

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТУЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи



ДАНИЛЕНКО ЕВГЕНИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ТОНКОСТЕННОГО КОРОБЧАТОГО КОРПУСА  
ИЗ ХОЛОДНОШТАМПОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
д. т. н, профессор Ямников А.С.

Тула 2022

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>1 АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КОРОБЧАТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСОВ... 13</b>	<b>13</b>
1.1 Типовые тонкостенные корпусные детали.....	13
1.2 Назначение детали «Коробка» и основные технические требования, предъявляемые к детали .....	19
1.3 Оценка технологии получения заготовки и ее параметров .....	23
Результаты исследования. Выводы .....	30
<b>2 РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ, ПОГРЕШНОСТИ БАЗИРОВАНИЯ .....</b>	<b>31</b>
2.1 Измерительные базы.....	31
2.2 Корреляционный анализ влияния погрешностей направляющей базы на точность выполнения размеров .....	33
2.3 Размерный анализ приспособления-спутника .....	37
Выводы.....	41
<b>3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ .....</b>	<b>42</b>
3.1 Решение технологических задач с применением компьютерного моделирования.....	42
3.2 Компьютерное моделирование погрешностей закрепления .....	43
3.3 Влияние упругих деформаций нежестких коробчатых заготовок на точность выполнения размеров в специальном приспособлении.....	44
3.4 Методика численного анализа деформаций боковых стенок заготовки в специальном приспособлении .....	53
3.5 Анализ упруго-наследственных погрешностей закрепления нежестких коробчатых заготовок в приспособлении-спутнике.....	58

Выводы.....	63
<b>4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИХ КОМПЕНСАЦИИ</b>	<b>64</b>
4.1 Влияние неплоскостности направляющей базы на точность механической обработки нежесткого корпуса при закреплении в специальном приспособлении .....	64
4.2 Влияние пружинения нежесткого корпуса на точность механической обработки в специальном приспособлении.....	68
4.2.1 Экспериментальные исследования и методика эксперимента влияния пружинения заготовки на точность механической обработки..	70
4.2.2 Разработка способа фиксации нежесткой призматической заготовки с незамкнутой верхней поверхностью при механической обработке на станке.....	77
4.3 Закономерности изменения координат отверстий детали в приспособлении-спутнике.....	80
4.3.1 Ручная компенсация изменения координат отверстий детали в приспособлении-спутнике.....	82
4.3.2 Автоматизация выверки нежестких коробчатых заготовок на станках с ЧПУ.....	83
Выводы.....	89
<b>5 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ НЕЖЕСТКИХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ КОРПУСОВ....</b>	<b>90</b>
5.1 Базовое приспособление для установки заготовки на станке .....	90
5.2 Вкладыш к базовому приспособлению для установки заготовки на станке.....	92
5.3 Приспособление-спутник.....	93
5.4 База для установки приспособления-спутника на станке.....	95

5.5 Выводы .....	99
<b>6 МОДЕРНИЗАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ .....</b>	<b>100</b>
6.1 Модернизированная технология механической обработки.....	100
6.2 Анализ брака при изготовлении узла «Коробка» по модернизированной технологии .....	105
6.3 Экономическое обоснование принятых решений .....	106
6.4 Внедрение результатов .....	107
Выводы.....	107
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....</b>	<b>108</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>111</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>129</b>
<b>СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>133</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>135</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>136</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>137</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....</b>	<b>138</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....</b>	<b>139</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В области специального машиностроения одной из основных тенденций производства является изготовление механизмов повышенной точности. Основной технологической сложностью при этом является обработка деталей пониженной жесткости, в том числе коробчатых, тонкостенных. Особенно это проявляется как при обработке самих нежестких конструкций, так и сборочных узлов. В процессе базирования призматических деталей в технологии машиностроения, как правило, используют установку в «координатный угол», представляющую собой пересечение трех взаимно перпендикулярных плоскостей [5]. При этом предполагается, что используемая заготовка является жесткой и, под действием сил зажима в приспособлении, не меняет свою начальную форму. Однако в практике машиностроительных предприятий большинство деталей выполняют из холодноштампованных заготовок, позволяющих значительно сэкономить на материале. Но использование подобных заготовок приводит к их деформациям при закреплении в приспособлениях [30].

Фундаментальные основы точности обработки деталей с учетом технологической наследственности отражены в работах Дальского А. М., Васильева А. С., Соколовского А. П. [61, 68, 69]. Отдельным вопросам точности обработки тонкостенных деталей посвящены работы Ямникова А. С., Родионовой Е. Н., Ямниковой О. А., Матвеева И. А. [73, 74, 76, 78, 79, 80, 81].

По данным Сосенушкина Е.Н., Яновской Е.А., Емельянова В.В. заготовки имеют значительные погрешности формы и остаточные напряжения [62]. В работах Kut S., Stachowicz F., Takahiro M., Samper S. и Giordano M. [88, 92, 101] показано, что в процессе пластического изгиба тонкостенных коробчатых профилей происходит значительная деформация поперечного сечения. Указанные погрешности формы заготовок по данным Васильева А. С. и Корсакова В. С. [25, 52] в некотором масштабе передаются изготовленным деталям и собираемым из них объектам.

Получение заготовок и механическая обработка тонкостенных корпусов описаны в работах Васильева А. С., Дальского А. М., Емельянова В. В., Корсакова В. С., Матвеева И. А., Родионовой Е. Н., Соколовского А. П., Сосенушкина Е. Н., Ямникова А. С., Ямниковой О. А., Яновской Е. А., а также Giordano M., Kut S., Samper S., Stachowicz F., Takahiro M и др. Подавляющее большинство из них посвящено технологии изготовления осесимметричных корпусов типа втулок и стаканов.

Проблемы механической обработки корпусных коробчатых заготовок описаны в работах Еремейкина П. А., Жилиева А. С., а также Kut S., Takahiro M и др. [44, 46, 88, 101], однако у них не решены задачи исследования влияния схем базирования и технологической оснастки, обеспечивающих заданное качество тонкостенных коробчатых корпусов при снижении трудоемкости обработки.

Большинство тонкостенных заготовок имеют значительные погрешности формы, которые выражены в виде выпуклостей или вогнутостей, а на данные поверхности не предусмотрена механическая обработка. Это обстоятельство затрудняет разработку эффективных технологий для стабильного получения требуемых размеров коробчатых тонкостенных корпусов. Поэтому выявление влияния погрешностей формы базовых поверхностей тонкостенного коробчатого корпуса из холодноштампованной заготовки на погрешности базирования и закрепления при установке заготовки в приспособления, а также обоснование способов и средств компенсации этих погрешностей, обеспечивающих заданную точность обработки, является **актуальной задачей**.

**Целью работы** является повышение точности изготовления коробчатых тонкостенных деталей путем обоснования рациональных схем базирования и способов приложения сил зажима к заготовкам в приспособлениях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ действующего технологического процесса производства коробчатых тонкостенных корпусов и выявить факторы, которые могут быть потенциальными причинами брака, возникающего при механической обработке коробчатых тонкостенных заготовок.

2. Выявить закономерности влияния погрешностей формы измерительной базы на точность выполнения размеров и обосновать способ их компенсации.

3. Выявить моделированием методом конечных элементов связь погрешностей размеров на незамкнутых полках заготовки с отклонениями формы дна, доводимого при зажиме до плоского состояния, проанализировать результаты компьютерного моделирования погрешностей закрепления тонкостенных коробчатых заготовок.

4. Провести экспериментальные исследования влияния погрешностей формы направляющей и установочных баз на точность механической обработки деталей пониженной жесткости в специальном приспособлении, вывести регрессионные зависимости получаемых размеров от выпуклости базовой поверхности дна нежесткого коробчатого корпуса и предложить способ автоматизированной выверки положения измерительной базы зажатой заготовки.

5. Разработать конструкции приспособлений для установки заготовок коробчатых тонкостенных корпусов, учитывающие предложенные схемы базирования и способы компенсации погрешностей закрепления.

6. Разработать рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления сборочного узла «Коробка» на производстве и внедрить результаты исследований в производство.

**Объектом исследования** является технология механической обработки тонкостенных коробчатых заготовок.

**Предметом исследования** является влияние отклонения базовых поверхностей нежестких коробчатых заготовок от правильной формы и положения на величину погрешностей базирования и закрепления в

приспособлениях, а также на точность выполнения размеров на операциях механической обработки поверхностей.

**Методы исследования.** Теоретические исследования базируются на основных положениях теории технологии машиностроения, технологической наследственности, методах математического и компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование проводилось в программных продуктах SolidWorks и Creo. Экспериментальные исследования проведены в производственных условиях филиала АО «Конструкторское бюро приборостроения» – «Центральное конструкторское исследовательское бюро спортивно-охотничьего оружия». Приведенные измерения проводились с применением аттестованных средств измерений.

**Достоверность результатов** обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, ограничений и допущений, корректностью постановки задачи, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными как лично автором, так и другими исследователями, а также практическим использованием результатов в промышленности.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований, в обработке и интерпретации результатов, формулировке выводов. Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат результаты, касающиеся математического моделирования деформаций заготовок при закреплении в приспособлении и процессов механической обработки коробчатых тонкостенных корпусов.

В первой главе приводится анализ действующей технологии изготовления тонкостенной, корпусной, коробчатой сборочной единицы и выявляются факторы, приводящие к браку при механической обработке заготовок. Отмечается, что неплоскостность заготовки зачастую превышает

допуск, назначенный на механическую обработку, что делает достижение заданных параметров точности механической обработки поверхности трудно выполнимой задачей.

Во второй главе описываются результаты проведенного размерного анализа и возникающих погрешностей базирования, рассматриваются влияния погрешностей направляющей базы на точность выполнения размеров, вызванные деформацией заготовки после применения сил зажима.

В третьей главе проанализированы результаты компьютерного моделирования погрешностей закрепления тонкостенных коробчатых заготовок. Исследовано влияние упругих деформаций тонкостенных корпусов в специальном приспособлении. В данной главе приведены результаты компьютерного моделирования в среде SolidWorks.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования влияния направляющей и установочных баз на точность механической обработки тонкостенных коробчатых корпусов. Проведен корреляционный анализ связи между неплоскостью установочной базы и выполняемыми размерами заготовки. Исследованы закономерности изменения координат отверстий тонкостенной коробчатой заготовки в специальном приспособлении.

Пятая глава посвящена результатам внедрения специальной оснастки для обработки тонкостенных заготовок на станках с ЧПУ.

В шестой главе представлена модернизация существующей технологии механической обработки, проведен анализ брака при изготовлении узла «Коробка» и приведено экономическое обоснование принятых решений. Результирующий экономический эффект составил 260187,5 руб. при условной партии выпуска 1000 шт. в год.

***Автор защищает:***

1. Доказательство того что при традиционном базировании холодноштампованных призматических коробчатых тонкостенных заготовок в «координатный угол» погрешности формы базовых поверхностей,

превышающие допуск на обрабатываемые поверхности, приводят к невозможности получения размеров в пределах установленных допусков, поэтому для компенсации их влияния возникает необходимость обоснования и разработки новых способов и приспособлений для базирования заготовок.

2. Результаты регрессионного и размерного анализа, связывающие влияние погрешностей формы измерительной базы на точность выполнения размеров и обоснование способа базирования по двум удаленным друг от друга участкам, подвергнутым дополнительной правке.

3. Теоретическое и экспериментальное обоснование последовательности выполнения приемов закрепления корпусов: вначале необходимо положить заготовку на основную базу, где она будет ориентироваться под действием собственного веса; затем поджать заготовку к направляющей базе, перемещая подвижный габарит с минимальной фиксирующей силой; после чего прилагать основную зажимающую силу, воздействуя одновременно на полки корпуса и, через специальный вкладыш с вырезом по центру, на дно корпуса, прижимая его к основной технологической базе.

4. Обоснование моделированием и регрессионным анализом конструкции приспособления-подставки, реализующего принцип базирования по выделенным участкам штампованной поверхности; подтверждение полученного моделированием эффекта снижения влияния упругого деформирования дна заготовки при закреплении через жесткий призматический вкладыш на точность выполняемых размеров; а также разработка способа выверки тонкостенных коробчатых заготовок, позволяющего обеспечить точность выполнения координат отверстий, производимых в приспособлении-спутнике.

5. Обоснование применения разработанных и изготовленных: базового приспособления для установки заготовки на станке с наличием в направляющей базе двух выступов, снижающих влияние погрешностей формы штампованной поверхности большой протяженности;

приспособления-спутника для базирования тонкостенных корпусных заготовок; базы для установки приспособления-спутника на станке.

6. Внедрение оптимизированного технологического процесса обеспечило увеличение доли годной продукции до 86 %, причем исправимый брак составляет 10 %, что в совокупности обеспечивает результирующий экономический эффект 260187,5 руб. при условном выпуске 1000 шт. в год.

**Научная новизна работы** заключается в установлении зависимостей, связывающих погрешности формы и положения базовых поверхностей холодноштампованной заготовки коробчатого корпуса и характерных схем базирования и закрепления заготовок с параметрами точности готового корпуса, обоснованы и предложены рациональные схемы базирования и способы компенсации погрешностей закрепления нежестких коробчатых заготовок.

**Практическая ценность работы.** Даны рекомендации по повышению точности процесса механической обработки тонкостенных корпусных коробчатых деталей и сборочных единиц на основе предложенных технологических решений.

Обоснован и предложен новый способ фиксации и установки нежесткой призматической заготовки с большими погрешностями формы. Экспериментальные исследования проведены в производственных условиях филиала АО «Конструкторское бюро приборостроения» – «Центральное конструкторское исследовательское бюро спортивно-охотничьего оружия». Технологические рекомендации, разработанные на основании исследований, приняты к внедрению на данном предприятии. Результирующий экономический эффект при условной партии в 1000 шт. составляет 260187,5 руб. в год.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы приняты к внедрению в филиале АО «Конструкторское бюро приборостроения» – Центральное конструкторское исследовательское бюро спортивно-охотничьего оружия.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции, г. Тамбов, 2018 г.; на XX Всероссийской научно-технической конференции, г. Пермь, 2019 г.; в национальной научно-технической конференции с международным участием «АПИР-24», г. Тула, 2019 г.; на Всероссийской НТК «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», г. Тула, 2019 г.; в национальной заочной научно-технической конференции с международным участием «АПИР-25», г. Тула, 2020 г.; на IV-ой международной НПК молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности», г. Пермь, 2020 г.; на международной НПК «Актуальные вопросы образования и науки», г. Тамбов, 2021 г.; на V Международной НТК «Проблемы машиноведения», г. Омск, 2021 г.; на III Всероссийской НТК с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», г. Тула, 2022 г.

**Публикации результатов работы.** По материалам диссертации опубликовано 21 научная работа, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и 4 статьи, входящие в международную систему цитирования Scopus, 10 публикаций – по материалам конференций различного уровня, 2 патента на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы, приложений. Основная часть работы изложена на 110 страницах, содержит 59 рисунков, 10 таблиц. Список использованных источников включает 116 наименований.

# 1 АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КОРОБЧАТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСОВ

## 1.1 Типовые тонкостенные корпусные детали

Применение корпусных тонкостенных деталей типа «Коробка» получило широкое распространение в области специального машиностроения [96]. При этом получение протяженных цельных тонкостенных деталей, обладающих высокими механическими характеристиками, возможно при использовании методов штамповки [55, 70]. Данные детали, обладающие специфическими характеристиками, позволяют повысить качество изготовления узлов оружия, а также снизить себестоимость изделий.

История штампованных деталей оружия началась с пистолета-пулемета Шпагина (рис. 1.1) [112].



Рисунок 1.1 – Пистолет-пулемет Шпагина ППШ-41

Простота данного оружия являлась самым важным условием военного времени. Так, ППШ-41 состоял всего из 87 деталей, и на производство одного изделия затрачивалось лишь 5,6 н\ч. Необходимость точной

обработки в данном изделии требовали ствол и частично затвор, остальные элементы изготавливались путем штамповки (рис. 1.2) [114].



Рисунок 1.2 – Основные части пистолета-пулемета Шпагина ППСШ-41

В дальнейшем российские оружейники широко применяли штампованные детали или штампосварные сборки для корпусных деталей оружия, например, крышка ствольной коробки Б-33, ЗЕНИТ (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Крышка Б-33 "Классика" на АКМ и аналоги с планкой Пикатинни на 17 шагов (Производитель: Зенит)

Примером штамповарных корпусов можно представить коробчатый магазин "Улитка" к АГС-17 "Пламя" (рис. 1.4) [111].



Рисунок 1.4 – Коробчатый магазин "Улитка" к АГС-17 "Пламя"

В современном специальном машиностроении можно выделить следующие типичные представители тонкостенных длинномерных деталей, представленных на рис. 1.5 – 1.7.

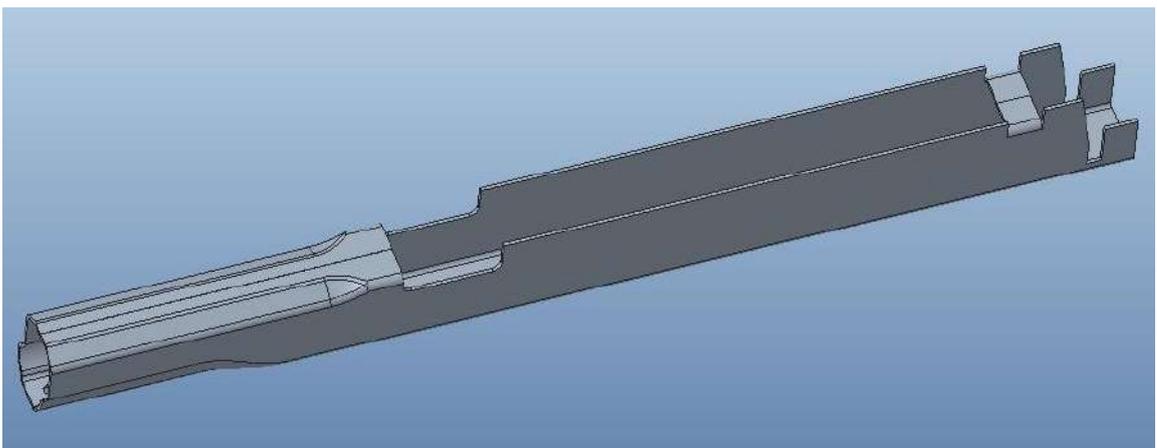


Рисунок 1.5 – Коробка 1

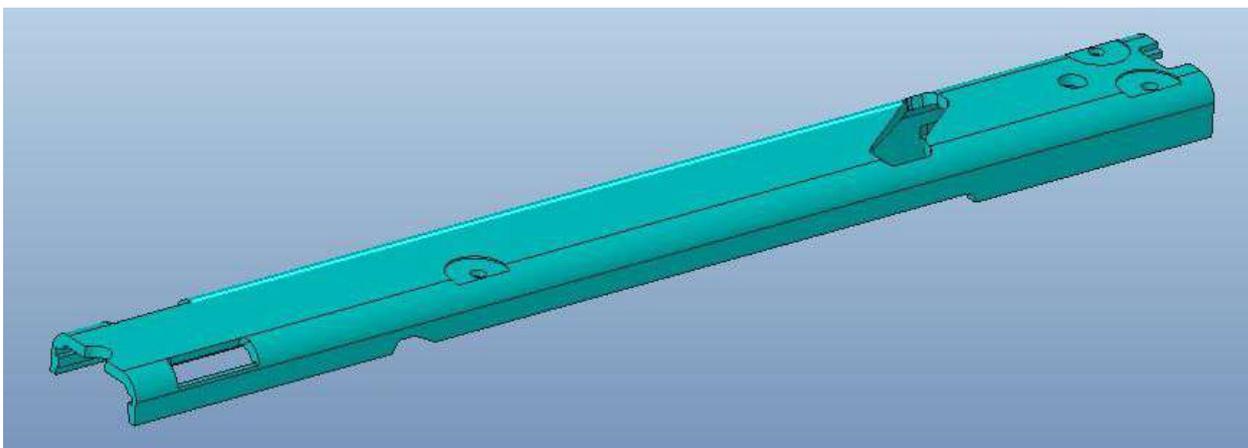


Рисунок 1.6 – Рама затворная

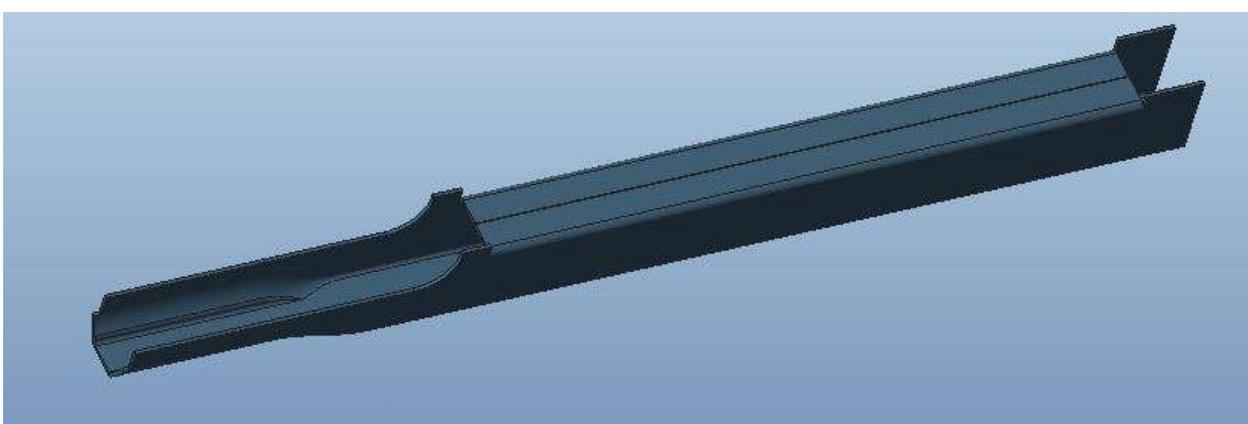


Рисунок 1.7 – Коробка 2

Типовая технология изготовления данных видов деталей осуществлялась следующим образом (табл. 1.1):

Таблица 1.1 - Типовые операции технологии обработки штамповарной заготовки

Номер операции	Наименование операции	Содержание	Оборудование
1	Контроль	1. Контролировать неплоскостность заготовки 0,3 мм 2. Контролировать угол $90^{\circ} \pm 30'$ 3. Контролировать шероховатость	
5	Фрезерная	1. Установить, закрепить заготовку 2. Произвести обработку торца заготовки	Универсальный фрезерный станок УФ-250
10	Слесарная	1. Произвести правку неплоскостности заготовки до 0,3 мм	
15	Координатно-расточная	1. Центровать, сверлить, развернуть отверстие	Координатно-расточной станок 2А430
20	Слесарная	1. Сбить заусенцы	

25	Разметка	1. Разметить контур	
30	Фрезерная	1. Произвести фрезерную обработку поверхности по разметке	Универсальный фрезерный станок УФ-250
35	Фрезерная	1. Произвести фрезерную обработку поверхности по разметке	Универсальный фрезерный станок УФ-250
40	Фрезерная	1. Произвести фрезерную обработку поверхности по разметке	Универсальный фрезерный станок УФ-250
45	Слесарная	1. Произвести правку неплоскостности заготовки до 0,3 мм	
50	Разметка	1. Разметить контур	
55	Фрезерная	1. Произвести фрезерную обработку поверхности по разметке	Универсальный фрезерный станок УФ-250
60	Фрезерная	1. Произвести фрезерную обработку поверхности по разметке	Универсальный фрезерный станок УФ-250
65	Фрезерная	1. Произвести фрезерную обработку поверхности по разметке	Универсальный фрезерный станок УФ-250
70	Слесарная	1. Опиливать заусенцы	
75	Контроль	1. Контролировать геометрические параметры заготовки	

Проанализировав данную типовую технологию можно сделать вывод, что штампованные поверхности заготовки, в том числе и базовые, имеют отклонения от плоскостности до 0,3 мм, что влечет за собой сложности достижения требуемой точности изготовления и контроля геометрических параметров деталей [59]. Следовательно, необходима разработка способов компенсации отклонений от неплоскостности тонкостенных корпусных заготовок.

При обработке заготовок на металлорежущих станках обычно возникают погрешности установки [52, 68, 69]: «Погрешность установки  $\epsilon$  при использовании приспособлений суммируется из погрешности базирования  $\epsilon_6$  и погрешности закрепления  $\epsilon_3$ . В  $\epsilon$  следует включать также

погрешность положения заготовки  $\varepsilon_{пр}$ , вызываемую неточностью приспособления». Автор выделяет особую группу погрешностей закрепления – деформации тела заготовки под действием сил зажима, обычно превосходящих силы резания на порядок. Большинство теоретических и экспериментальных исследований деформации тела заготовки под действием сил зажима посвящено тонкостенным осесимметричным заготовкам типа кольца или трубы [52, 89, 96, 103].

В работе [57] выделяют существенные погрешности, которые возникают в результате деформации.

В работах [44, 45, 47, 60] выделяют зависимость точности обработки от переменной жесткости заготовок в локальной зоне процесса резания, а также применение мягких режимов, но не учитывают кривизну деталей, например, в виде неплоскостности.

В работе [46] выделены только общие принципы, такие как увеличение скорости резания и уменьшения глубины резания, увеличение переднего угла фрезы и уменьшение радиуса скругления режущих кромок, позволяющие снизить деформации в заготовках при изготовлении крупногабаритных тонкостенных деталей, но не предложены никакие методики повышения точности обработки тонкостенных корпусных заготовок.

В работах [23, 67] представлены специальные устройства, позволяющие повысить точность изготовления тонкостенных круглых заготовок, но данные приспособления не применимы для тонкостенных корпусных деталей.

В работе [26] представлен вариант «бездеформационной» обработки тонкостенных деталей. Представленный вариант рассмотрен только для случая токарной обработки детали, закрепленной в трехкулачковом патроне.

В работе [101] исследованы деформации коробочных комплексов с помощью теории графов. В работе [88] показано, что в процессе пластического изгиба тонкостенных профилей происходит значительная деформация поперечного сечения. Получено удовлетворительное согласие

экспериментальных результатов и численных расчетов для значений горизонтального и вертикального прогиба стенки, а также для экспериментальных, расчетных и численных характеристик изгибающего момента, причем не только для закрытых, но и для незакрытых коробчатых профилей. В работе [98] исследован процесс экструзии тонкого коробчатого профиля и показано, что самый быстрый поток вертикальных ребер профиля вызывает специфическое ухудшение формы.

Указанные погрешности формы заготовок в некотором масштабе передаются на изготовленные детали и на объекты, собираемые из них [24, 25, 105]. В работе [78] показано, что под действием сил зажима базовая поверхность заготовки упруго деформируется, а полученная при обработке резанием поверхность получается правильной формы, но после раскрепления заготовка меняет форму, не приходя к исходному положению, так как с нее удален упруго-напряженный слой материала. При этом обработанная поверхность также теряет точность своей формы.

Чтобы повысить точность обработки необходимо учитывать упругие перемещения при механической обработке заготовок пониженной жесткости [92, 95, 99].

## **1.2 Назначение детали «Коробка» и основные технические требования, предъявляемые к детали**

Деталь «Коробка» (рис. 1.8) является связующим элементом для всех узлов боевого оружия. В ствольную коробку входят детали или комплекты деталей, предназначенные для размещения основных механизмов стрелкового оружия (спускового, запирающего канал ствола, ударного, предохранительного, а также приёмник магазина). В сборочном узле «Коробка» размещается затворная группа (затвор или затворная рама), характер движения которой задан взаимодействием со ствольной коробкой.

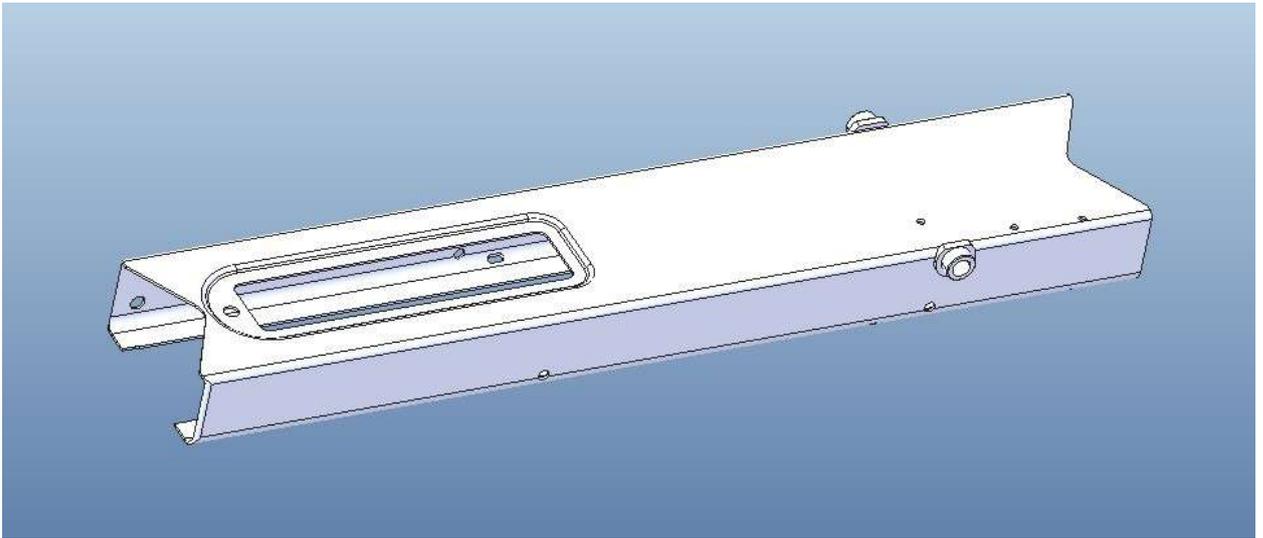


Рисунок 1.8 – 3D-модель узла «Коробка»

Узел имеет протяженную тонкостенную форму, на внешней поверхности которой приварены фланцы. Со всех сторон имеются отверстия высокого класса точности и шероховатости поверхности. Штампосварную заготовку получают невысокой точности по совпадению верхних полок.

К готовой детали «Коробка» предъявляются высокие требования по точности выполнения координат и диаметров отверстий. Требование к качеству плоскостности и шероховатости поверхностей типовые для тонкостенных деталей: отклонение от плоскостности поверхностей 0,3 мм, шероховатость поверхностей – Ra 3,2.

Разработанный технологический процесс изготовления детали «Коробка» применяется в условиях серийного производства при сравнительно большом объеме выпуска продукции. Применение прогрессивного метода получения заготовки; использование лазерного оборудования на заготовительных операциях; использование универсального металлорежущего оборудования в процессе предварительной механической обработки; использование специальных калибров на операциях контроля являются характерными чертами данного технологического процесса.

Четкая фиксация и расположение основных сборочных узлов изделия зависят от точности выполнения координат и диаметров отверстий в связующей детали «Коробка». Однако заготовки, получаемые методом

штамповки, имеют значительные погрешности формы и остаточные напряжения. Указанные погрешности формы заготовок в некотором масштабе передаются изготовленным деталям и собираемым из них изделиям.

«Неплоскостность заготовки зачастую превышает допуск, назначенный на механическую обработку, что делает достижение заданных параметров точности механической обработки поверхности трудно выполнимой задачей» [32].

Исходной заготовкой детали «Коробка» является лист 1,5 ГОСТ 19904-90, выполненный из стали 30ХГСА ГОСТ 11268-76 [33]. Данный материал характеризуется высокой прочностью и устойчивостью к ударной нагрузке и позволяет проводить формообразующие операции штамповки.

Конструкторские размеры для боковых стенок ( $15h_{13}$ ,  $7h_{14}$ ,  $15\pm 0,1$ ,  $22h_{14}$ ) проставлены от разных баз, поэтому необходимо применение дополнительных установов для достижения требуемой точности чертежа (рис. 1.9). По условиям конструкторской документации (рис. 1.9) на базовой поверхности *II* может быть неплоскостность 0,3 мм, которая выражена в виде выпуклостей или вогнутостей. Выпуклости базовой поверхности детали приводят к неоднозначности базирования, что, в свою очередь, приводит к возникновению погрешностей измерения.

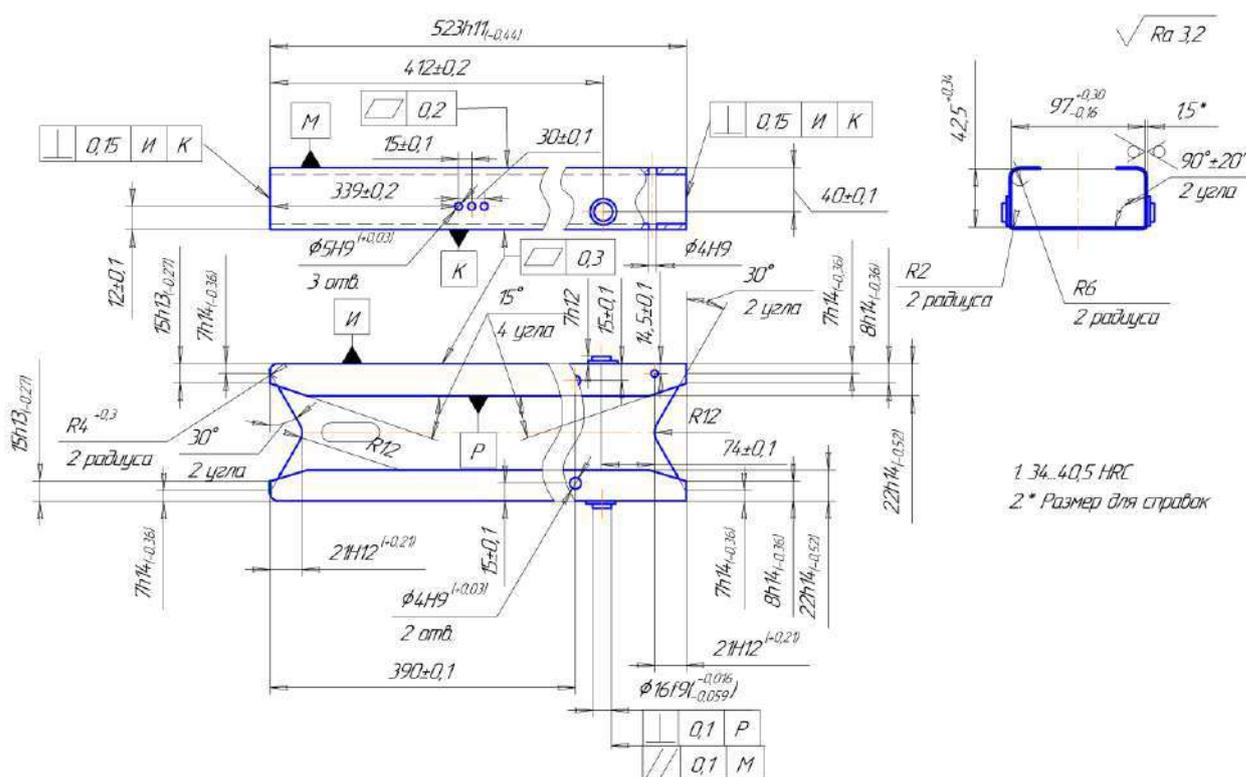


Рисунок 1.9 – Чертеж сборочного узла «Коробка»

По заводским данным 75 % деталей изготовлены в пределах требований допусков, предъявляемые к чертежу:

- отклонения по точности выполнения координат отверстий 0,1-0,3 мм;
- отклонения по точности выполнения диаметров отверстий 0,01-0,05 мм;
- разница в измерении размеров готовой детали, в виду наличия выпуклостей и вогнутостей на базовых поверхностях заготовки.

Необходимость усовершенствования технологического процесса изготовления узла «Коробка» в условиях серийного производства заключается в том, что неисправимый брак достигал до 20 %, а в настоящее время в специальном машиностроении предъявляют высокие требования по недопущению брака готовой продукции.

Анализ конструкторской документации детали «Коробка» на технологичность показал, следующее:

- деталь выполнена с применением высокопроизводительного метода получения заготовок – холодная штамповка, что дает значительную экономию материалоемкости;

– наличие множества конструкторских баз увеличивает количество установов и трудоемкость изготовления конструкции, а, следовательно, и себестоимость изготовления детали;

– нежесткость конструкции, за счет тонкостенности листа и разомкнутый контур заготовки, в сочетании с имеющимися погрешностями формы и положения базовых поверхностей приводят к дополнительным погрешностям механической обработки, и как следствие увеличению трудоемкости изделия.

В связи с этим, требуется подробное исследование технологического процесса получения заготовки и механической обработки детали.

### 1.3 Оценка технологии получения заготовки и ее параметров

С целью снижения себестоимости трудоемкости механической обработки применяют прогрессивную штамповарную заготовку, технология получения которой представлена в табл. 1.2. Характеристики материала, из которого изготовлена исходная заготовка, представлены в таблицах 1-6 в Приложении 1 [3, 8, 63].

В технологическом процессе узла «Коробка» предусмотрена операция «Сварка», поэтому при выборе марки стали необходимо учитывать данное свойство. Рассматриваемая марка среднелегированных сталей относится ко второй группе по степени свариваемости, что обеспечивает необходимые условия для изготовления детали [84].

Таблица 1.2 – Заготовительные операции технологического процесса изготовления штамповарной заготовки незамкнутого коробчатого сечения

№ оп.	Наименование операции	Содержание операции	Оборудование
1	Заготовительная	Получить лист в размеры: 1,5±0,12x600x1000	
2	Отрезная	Вырезать карту согласно эскизу (рис. 1.10) (учесть направление проката)	Trulaser 3030 L20 - Лазерный комплекс для резки и раскроя
3	Термообработка	Произвести отжиг заготовки по технологии ОГМет	СНО-6.12.5/12М - Печь электросопротивления
4	Виброабразивная	Произвести виброабразивную обработку	VBLE-500 - Лотковый вибратор

5	Слесарная	Править заготовку, с выполнением плоскостности 0,4 мм	Верстак
6	Гибка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть заготовку, поверхность должна быть чистой без ржавчины, царапин и окалины, а заусенцы по контуру должны быть удалены</li> <li>2. Нанести на поверхность заготовки смазку</li> <li>3. Уложить заготовку в рабочую зону штампа</li> <li>4. Произвести гибку в заготовке, расчётное усилие 500 кН (рис. 1.11)</li> <li>5. Удалить заготовку из рабочей зоны штампа</li> <li>6. Проверить внешний вид детали на отсутствие трещин, вмятин, надрывов</li> </ol>	П6332 - Пресс гидравлический
7	Гибка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть заготовку, поверхность должна быть чистой без ржавчины, царапин и окалины, а заусенцы по контуру должны быть удалены</li> <li>2. Нанести на поверхность заготовки смазку</li> <li>3. Уложить заготовку в рабочую зону штампа</li> <li>4. Гнуть заготовку в штампе по R6, выполняя размер 42,5+0,36, расчётное усилие 350 кН (рис. 1.12)</li> <li>5. Удалить заготовку из рабочей зоны штампа</li> <li>6. Проверить внешний вид заготовки на отсутствие трещин, вмятин, надрывов</li> </ol>	П6332 - Пресс гидравлический
8	Калибровка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть заготовку, поверхность должна быть чистой без ржавчины, царапин и окалины, а заусенцы по контуру должны быть удалены</li> <li>2. Вставить оправку в заготовку</li> <li>3. Уложить заготовку с оправкой в рабочую зону штампа</li> <li>4. Калибровать заготовку в штампе (рис. 1.13)</li> <li>5. Удалить заготовку с оправкой из рабочей зоны штампа</li> <li>6. Повернуть заготовку с оправкой на угол 180° и уложить в рабочую зону штампа</li> <li>7. Повторить переходы 3, 4, 5</li> <li>8. Снять заготовку с оправки</li> <li>9. Проверить внешний вид заготовки на отсутствие трещин, вмятин, надрывов</li> </ol>	П6332 - Пресс гидравлический

9	Контроль	Контролировать геометрические параметры	
10	Фрезерная	1. Фрезеровать левый торец 2. Фрезеровать поверхность, выдерживая размер 523h11(-0,44)	Приспособление цеховое, вкладыш
11	Координатно-расточная	1. Центровать, сверлить, развернуть отверстия Ø5H9(+0,03) 2. Центровать, сверлить, развернуть отверстия Ø4H9(+0,03) с двух сторон	Приспособление цеховое, вкладыш
12	Фрезерная	1. Фрезеровать полки, выдерживая размер 22h14(-0,52) в переkladку	Приспособление цеховое, вкладыш
13	Фрезерная	1. Фрезеровать скосы с двух сторон в переkladку, выдерживая размер 15h13(-0,27)	Приспособление цеховое, вкладыш
14	Фрезерная	1. Фрезеровать скосы с двух сторон в переkladку, выдерживая размер 8h14(-0,36)	Приспособление цеховое, вкладыш
15	Фрезерная	1. Фрезеровать скосы на нижней полке с двух сторон в переkladку, выдерживая размеры: 7h14(-0,36), R12	Приспособление цеховое, вкладыш
16	Слесарная	Править заготовку	Верстак
17	Контроль	Контролировать геометрические параметры	
18	Сварка	1. Провести внешний осмотр свариваемых поверхностей и присадочной проволоки, не допускается наличие влаги, масла, налетов соды и других загрязнений 2. Произвести прихватку сборочной единицы с патрубком длиной от 6 до 8 мм по всей длине свариваемых кромок, сварные швы по ОСТ3-4001-91, положение шва: н; полярность: прямая; сила тока: 30-60 А; напряжение: 10-15 В; V <sub>св.</sub> : 7-12 см/мин 3. Произвести сварку сборочной единицы с патрубком с полным перекрытием прихваток (стол сварщика ССН-1 ОСТ 2 П53-1, выпрямитель сварочный ВСС – 300, реостат балластный РБ - 301 ТУ 16. 739.334, горелка сварочная), сварные швы по ОСТ3-4001-91, положение шва: н; полярность: прямая; сила тока: 30-60 А; напряжение: 10-15 В; V <sub>св.</sub> : 7-12 см/мин 4. Контролировать качество сварного шва, визуально. Не допускается прожоги, непровары, трещины, поры. В местах возникновения пор	стол сварщика ССН-1 ОСТ 2 П53-1, выпрямитель сварочный ВСС – 300, реостат балластный РБ - 301 ТУ 16. 739.334, горелка сварочная

		необходима подварка швов. В данном технологическом процессе при аргонодуговой сварке отходов не образуется. Вредные производственные факторы: марганец и его оксиды - 2,0 г/кг, оксиды хрома - 1,0 г/кг 5. Направить на термообработку в течение четырех часов после окончания сварки и не позднее шести часов после наложения первого сварного шва	
19	Слесарная	1. Снять сб. ед. с приспособления 2. Править плоскостность 0,3 мм по мере необходимости	Верстак
20	Термообработка	Произвести отпуск после сварки в течение двух часов при температуре 650-680 °С	СНО-6.12.5/12М - Печь электросопротивления
21	Гидропескоструйная	Произвести очистку заготовок	Гидропескоструйная установка
22	Контроль	Контролировать качество сварного шва	
23	Слесарная	Править плоскостность 0,3 мм по мере необходимости	Верстак
24	Термообработка	1. Провести загрузку в печь, $t=800...900^{\circ}\text{C}$ , выдержка 40-50 мин. 2. Провести охлаждение в печи (в селитре), $t=180...200^{\circ}\text{C}$ 3. Провести загрузку заготовок в приспособление 4. Провести загрузку в печь, $t=480...520^{\circ}\text{C}$ , выдержка 60-90 мин. 5. Провести охлаждение на воздухе	СНО-6.12.5/12М - Печь электросопротивления
25	Гидропескоструйная	Провести очистку заготовок	Гидропескоструйная установка
26	Контроль	Контролировать плоскостность 0,3 мм	
27	Фрезерная	1. Фрезеровать бобышку с двух сторон в перекладку, выдерживая размер 29h11	Приспособление цеховое, вкладыш
28	Координатно-расточная	1. Расточить бобышку с двух сторон в перекладку, выдерживая размер $\text{Ø}16f9$	Приспособление цеховое, вкладыш
29	Координатно-расточная	1. Центровать, сверлить, развернуть отверстие с одной стороны, выдерживая размеры: $74\pm 0,1$ ; $14,5\pm 0,1$	Приспособление цеховое, вкладыш
30	Фрезерная	Фрезеровать паз	Приспособление цеховое, вкладыш
31	Слесарная	Править заготовку	Верстак
32	Контроль	Контролировать геометрические параметры	

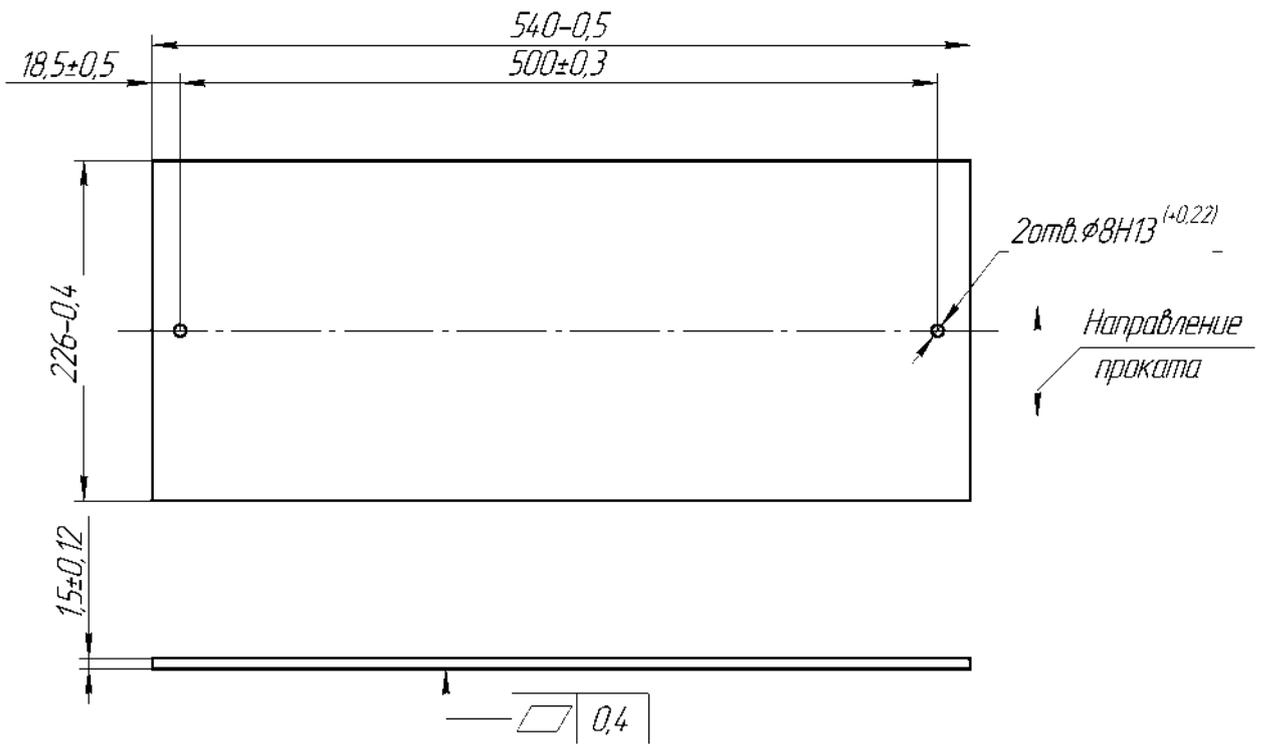


Рисунок 1.10 – Операционный эскиз резки проката

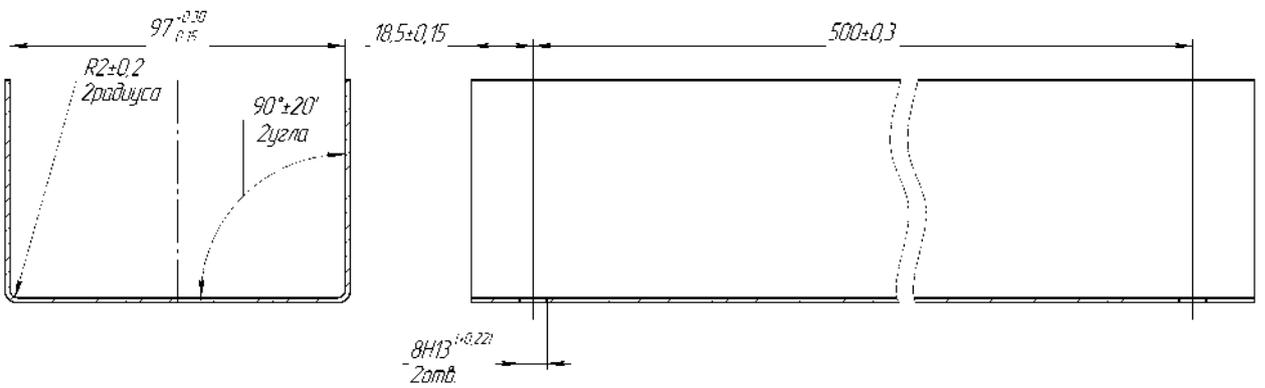


Рисунок 1.11 – Операционный эскиз гибки

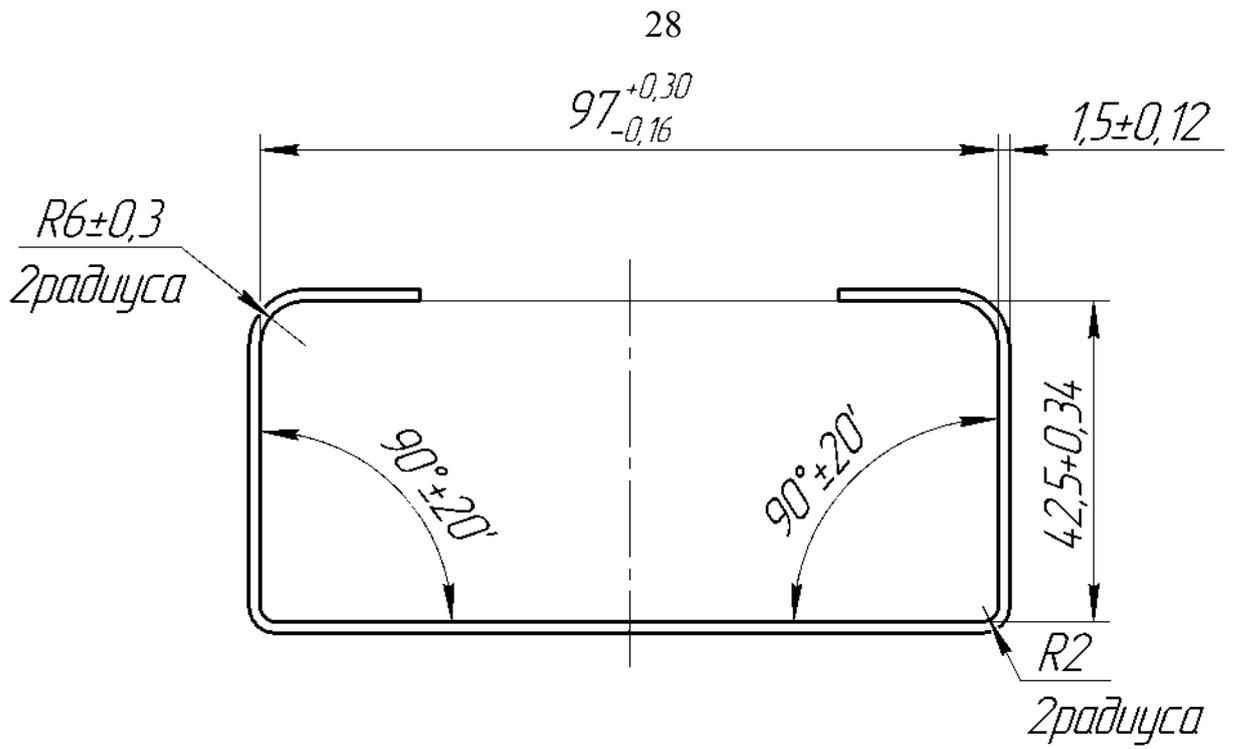


Рисунок 1.12 – Операционный эскиз гибки

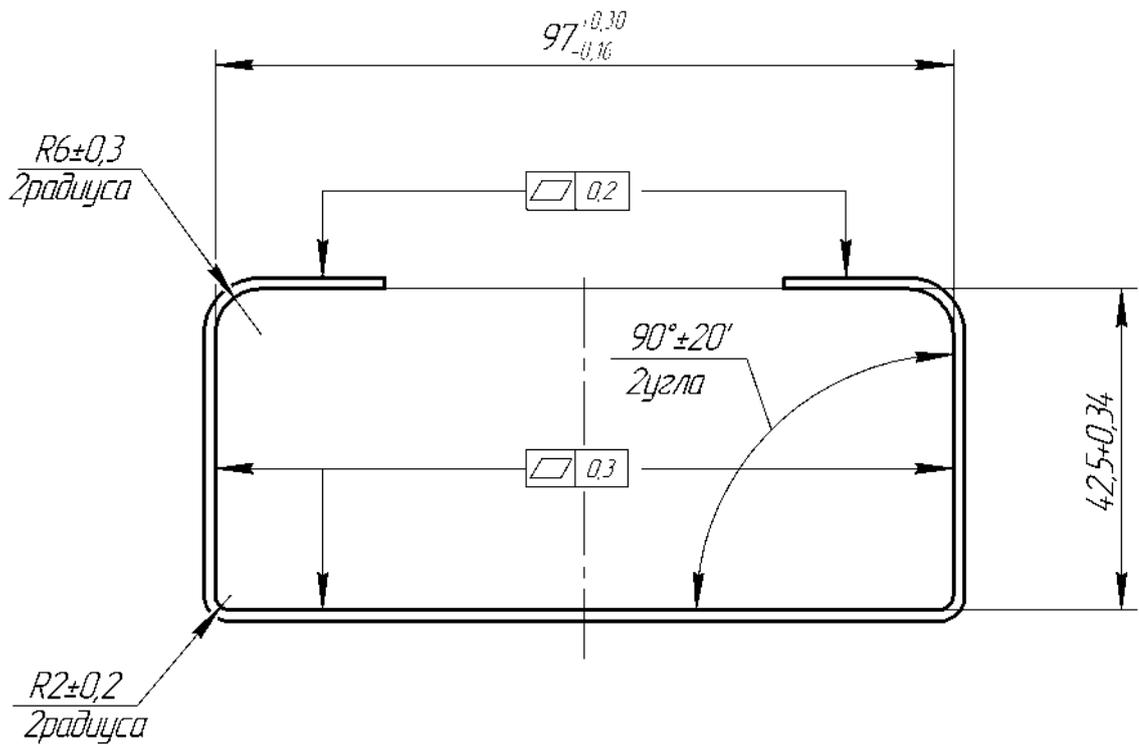


Рисунок 1.13 – Операционный эскиз калибровки

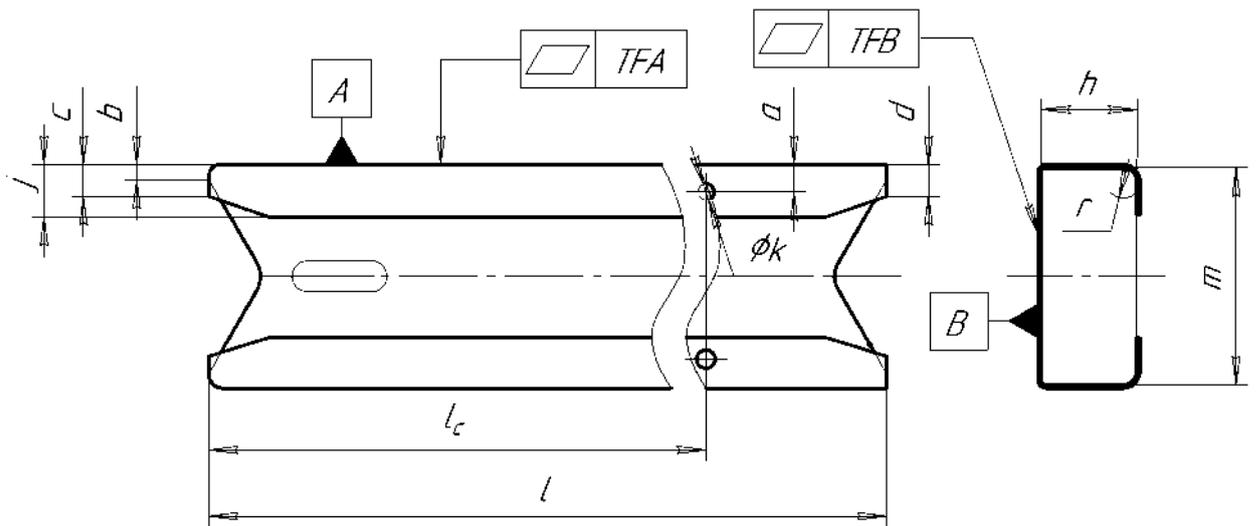


Рисунок 1.14 – Эскиз штампованного нежесткого коробчатого корпуса.

Проверяемые размеры:  $a$  ( $15 \pm 0,1$ ),  $b$  ( $15h13$ ),  $c$  ( $7h14$ ),  $d$  ( $8h14$ ),  $j$  ( $22h14$ ).

Остальные размеры – справочные.

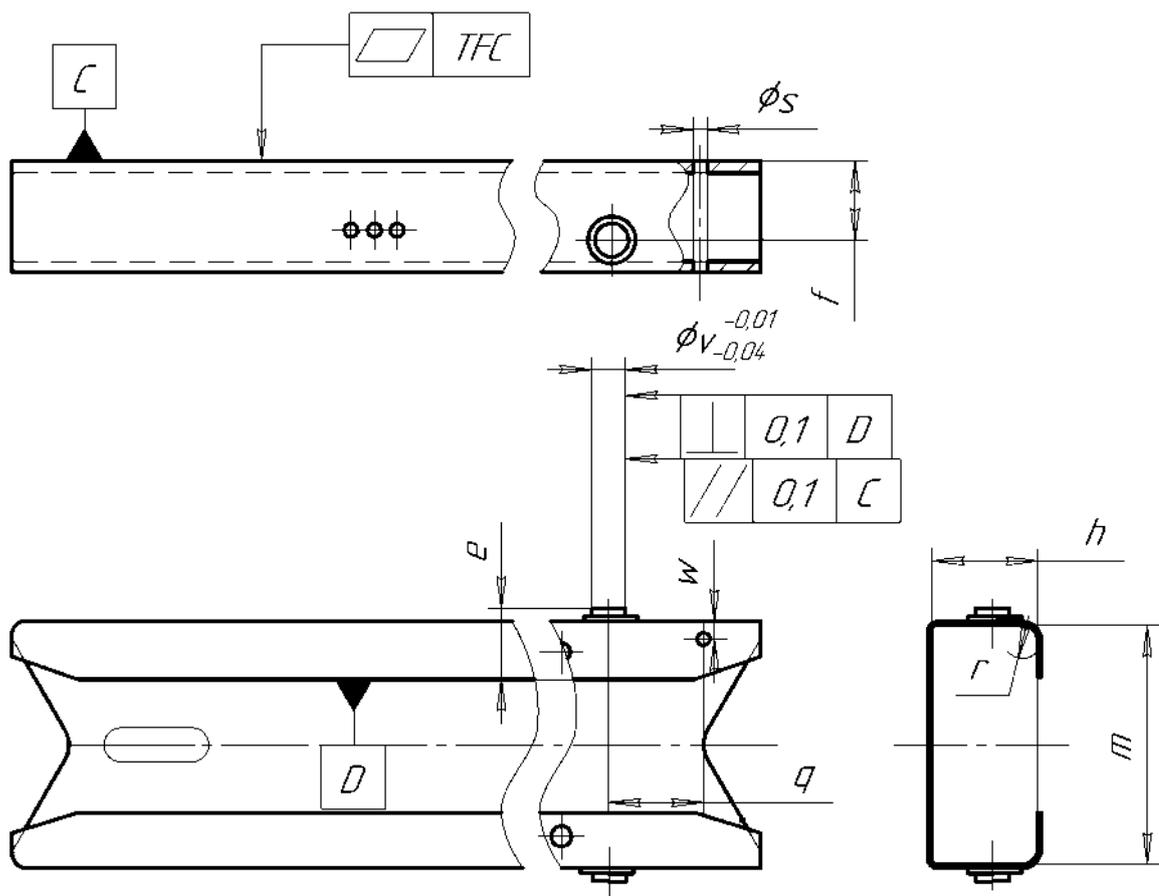


Рисунок 1.15 – Эскиз узла штампованного нежесткого коробчатого корпуса.

Проверяемые размеры:  $e$  ( $29h11$ ),  $q$  ( $74 \pm 0,1$ ),  $f$  ( $40 \pm 0,1$ ),  $w$  ( $14,5 \pm 0,1$ ),

$\phi_s$  ( $\text{Ø}4\text{H}9$ ). Остальные размеры – справочные.

Как видно из перечня операций в табл. 1.2, штамповарную заготовку допускается получать с неплоскостностью поверхностей *I* и *K* 0,3 мм (см. рис. 1.9). Базовые поверхности *I* и *K* (см. рис. 1.9) получают после формообразующих операций штамповки и не допускают механической обработки по условиям чертежа [29]. Поэтому вводят слесарную операцию «Правка» и ужесточают требования к отклонению поверхностей от плоскостности.

Ввиду большой протяженности заготовки данная операция имеет высокую трудоемкость. При внесении технологического ограничения неплоскостности боковой поверхности 0,1 мм, трудоемкость слесарной правки возрастает до  $1 \div 1,5$  н\ч.

При рассмотрении технологического процесса изготовления детали был проведен анализ структуры операций, используемого оборудования и применяемых приспособлений. В ходе анализа был сделан следующий вывод: структура операций и применяемое оборудование соответствуют серийному производству, т.е. маршрутная технология разработана в соответствии с предъявляемыми на предприятии требованиями.

#### **Результаты исследования. Выводы**

Результаты исследования действующего технологического процесса механической обработки детали «Коробка» позволяют сделать следующий вывод, что общий брак достигает 25 % (где неисправимый брак составляет 20 %), в том числе по размерам (см. рис. 1.14-1.15):

А) *b, d, c* – 18 %

Б) *a* – 20 %

В) *w, q, Øs* – 25 %

Г) *Øv, f, e* – 20 %

## 2 РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ, ПОГРЕШНОСТИ БАЗИРОВАНИЯ

В данной главе описываются результаты проведенного размерного анализа и возникающих погрешностей базирования. Рассматриваются влияния погрешностей направляющей базы на точность выполнения размеров, вызванные деформацией заготовки после применения сил зажима.

### 2.1 Измерительные базы

При проектировании изделий стараются выполнить противоречивые требования: обеспечение надежного функционирования при минимуме себестоимости. Это приводит к широкому распространению деталей, заготовки которых получают холодной штамповкой. В соответствии с ГОСТ 24643-81 [6, 7] в интервале номинальных размеров  $400 \div 630$  для 12 степени точности допуск на прямолинейность и плоскостность составляет 300 мкм. В порядке исключения, допускаемого п. 2 Приложения 2 к ГОСТ 24643-81 [6]: «... для поверхностей несопрягаемых или легкодеформируемых элементов.; ...допуск формы или расположения может и не быть составной частью допуска размера, а его числовое значение может превышать допуск размера».

Типичным примером таких деталей является «Коробка», заготовка которой получена холодной штамповкой (см. рис. 1.14). На рис. 1.14 размеры  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  заданы относительно поверхности  $A$ , следовательно, данная поверхность является измерительной базой. Допуск поверхности  $A$  на отклонение от плоскостности составляет 0,3 мм, что делает определение точности координат при контроле и обеспечение точности размеров при механической обработке  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  трудно достижимой задачей [73, 79, 81, 106, 107].

Схема базирования заготовки представлена на рис. 2.1.

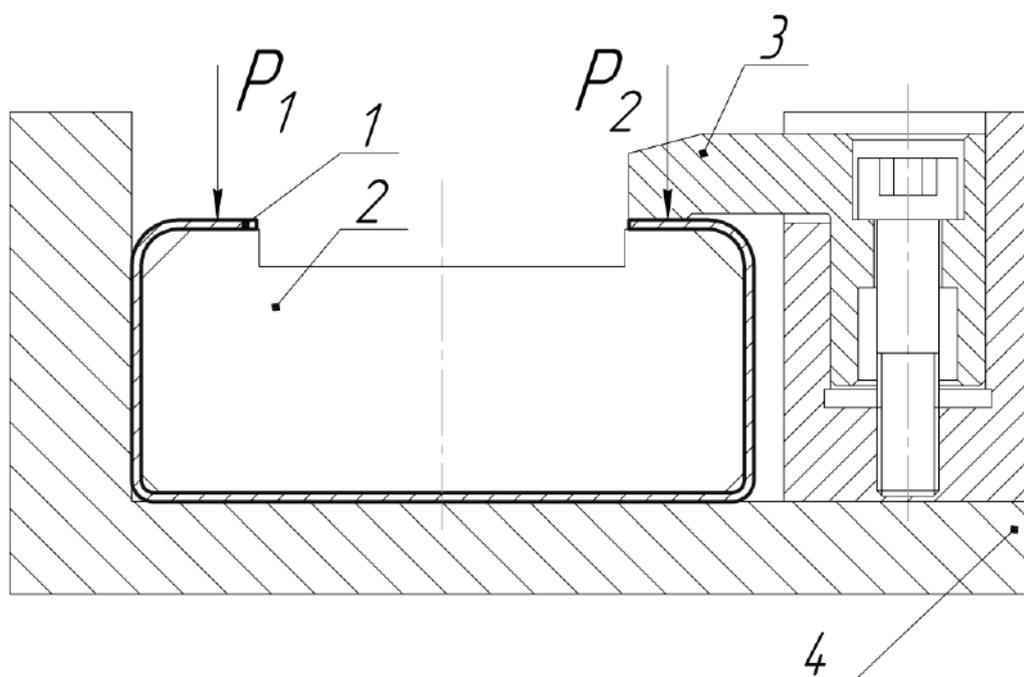


Рисунок 2.1 – Схема базирования заготовки

Базирование заготовок на операциях контроля и механической обработки в системе координатных плоскостей по ГОСТ 21495-76 [5, 22, 66, 77] выполняется следующим образом:

- заготовку *1*, с установленным в нее вкладышем *2*, поверхностью *B* укладывают на плоскость плиты *4* приспособления (см. рис. 2.1), тем самым лишая деталь 3-х степеней свободы;
- затем заготовку *1* поверхностью *A* досылают до боковой плоскости плиты *4* приспособления (см. рис. 2.1), лишая деталь еще 2-х степеней свободы;
- затем заготовку досылают до бокового торца приспособления, лишая еще одной степени свободы [5].

Согласно правилу 6-ти точек схема базирования выполнена правильно, также соблюдено единство измерительных и технологических баз. Однако в данной схеме базирования при контроле и механической обработке не учитываются погрешности формы и расположения базовых поверхностей. При допускаемой неплоскостности на базовой поверхности *A* она может выражаться как в виде выпуклости, так и вогнутости данных поверхностей. Наличие выпуклостей на базовых поверхностях заготовки приводит к

неоднозначности базирования, приводящей к потенциальной возможности погрешности выполнения размеров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  до 0,3 мм.

В рассматриваемом случае направляющую линию поверхности  $A$ , лишаящую заготовку еще 2-х степеней свободы при досылании до боковой плоскости приспособления, можно заменить прилегающей прямой. Однако, как показано в ГОСТ 24642-81 [6, 107] для выпуклой поверхности (линии) возможно существование нескольких касательных линий. И если можно найти, согласно определению ГОСТ: Прилегающая прямая – «прямая, соприкасающаяся с реальным профилем и расположенная вне материала детали так, чтобы отклонение от нее наиболее удаленной точки реального профиля в пределах нормируемого участка имело минимальное значение», – такую линию, то реализовать положение контролируемой (обрабатываемой) заготовки при установке в приспособление не представляется возможным [27, 43, 85, 86].

По сопроводительной документации отдела технического контроля предприятия, при указанном выше базировании, 75 % деталей выполнены в пределах допусков по координатам  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  детали, в частности:

- отклонения по точность выполнения координат отверстий  $c$  составили  $0,1 \div 0,3$  мм;
- разница в измерения размеров готовой детали, ввиду неплоскостности  $EFA$  поверхности  $A$ , в пределах допуска чертежа  $TFA = 0,3$  мм.

## **2.2 Корреляционный анализ влияния погрешностей направляющей базы на точность выполнения размеров**

Для приведенного выше способа базирования заготовки по ГОСТ 21495-76 была изготовлена тестовая партия деталей «Коробка» в количестве 20 штук. Измерение значений  $a$ ,  $c$ ,  $b$  и отклонение от неплоскостности базовой поверхности  $EFA$  деталей проводилось с использованием цифрового штангенрейсмаса (ГОСТ 164-90) и индикатора часового типа (ГОСТ 577-68). Результаты измерений представлены табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Измеренные значения размеров детали

<i>n</i>	<i>EFA</i> , мм	<i>a</i> , мм	<i>c</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>n</i>	<i>EFA</i> , мм	<i>a</i> , мм	<i>c</i> , мм	<i>b</i> , мм
1	0,28	15,32	15,29	7,35	11	0,23	14,85	14,71	6,75
2	0,21	15,09	14,89	6,91	12	0,32	15,29	15,35	7,31
3	0,25	15,21	15,21	7,18	13	0,25	14,89	14,76	6,79
4	0,16	14,91	14,95	6,92	14	0,15	14,90	14,89	6,89
5	0,15	14,87	14,88	6,91	15	0,28	15,19	15,16	7,21
6	0,26	15,21	15,23	7,18	16	0,27	14,79	14,79	6,75
7	0,15	14,90	14,92	6,91	17	0,32	14,76	14,68	6,67
8	0,18	14,83	14,86	6,85	18	0,19	14,92	14,87	6,95
9	0,20	15,12	15,06	7,08	19	0,15	14,89	14,89	6,87
10	0,12	14,92	14,92	6,89	20	0,21	14,81	14,76	6,77

Результаты корреляционного анализа связи между переменными *EFA* и *a*, *c*, *b* выполнены в системе STATISTICA. Критическое значение уровня доверительной вероятности *p* приняли равным 0,95. В данной выборке коэффициент корреляции между переменными составляет:

- 1) *a* и *EFA* = 0,4215 при значении *p*-уровня  $p < 0,05$ .
- 2) *c* и *EFA* = 0,3312 при значении *p*-уровня  $p < 0,05$ .
- 3) *b* и *EFA* = 0,3267 при значении *p*-уровня  $p < 0,05$ .

Полученные уравнения регрессии в базовом варианте технологии представлены ниже:

$$a = 14,715 + 1,2395EFA, \quad (2.1)$$

$$c = 6,7251 + 1,0713EFA, \quad (2.2)$$

$$b = 14,723 + 1,0663EFA. \quad (2.3)$$

Для зависимостей (2.1-2.3) размеров *a*, *c*, *b* от неплоскостности базовой поверхности *EFA* построены графики регрессионных уравнений (рис. 2.2-2.4):

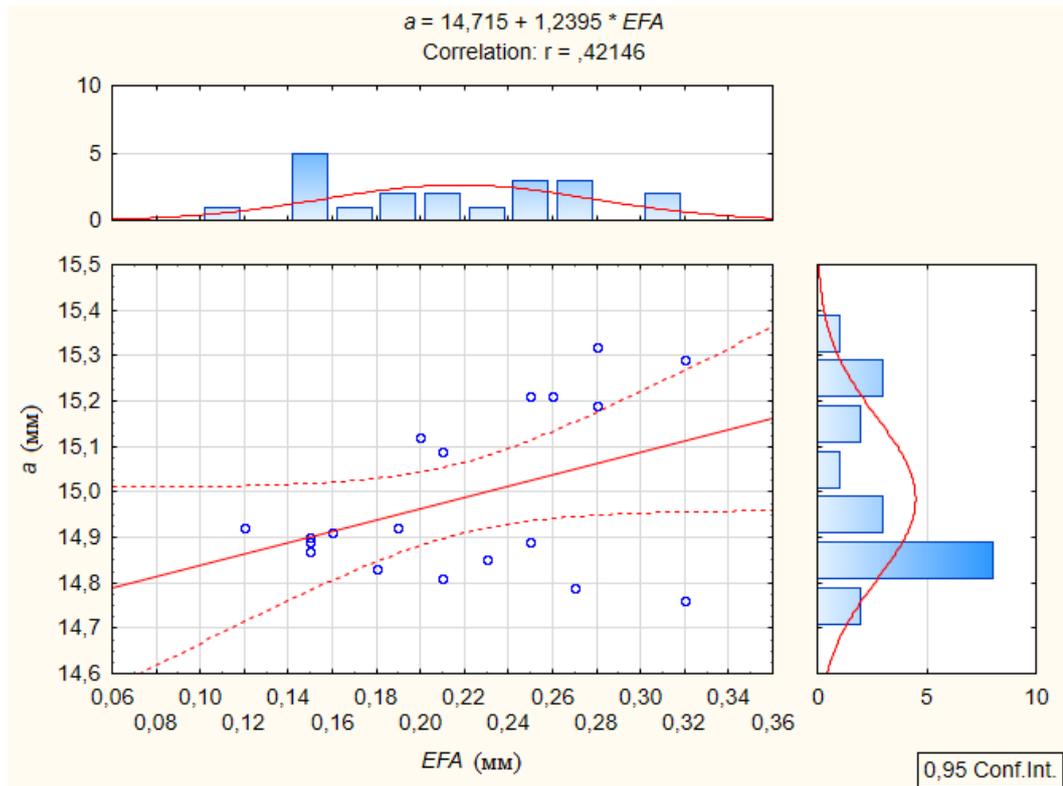


Рисунок 2.2 – График регрессионного уравнения зависимости координаты отверстия  $a$  от неплоскостности  $EFA$  базовой поверхности

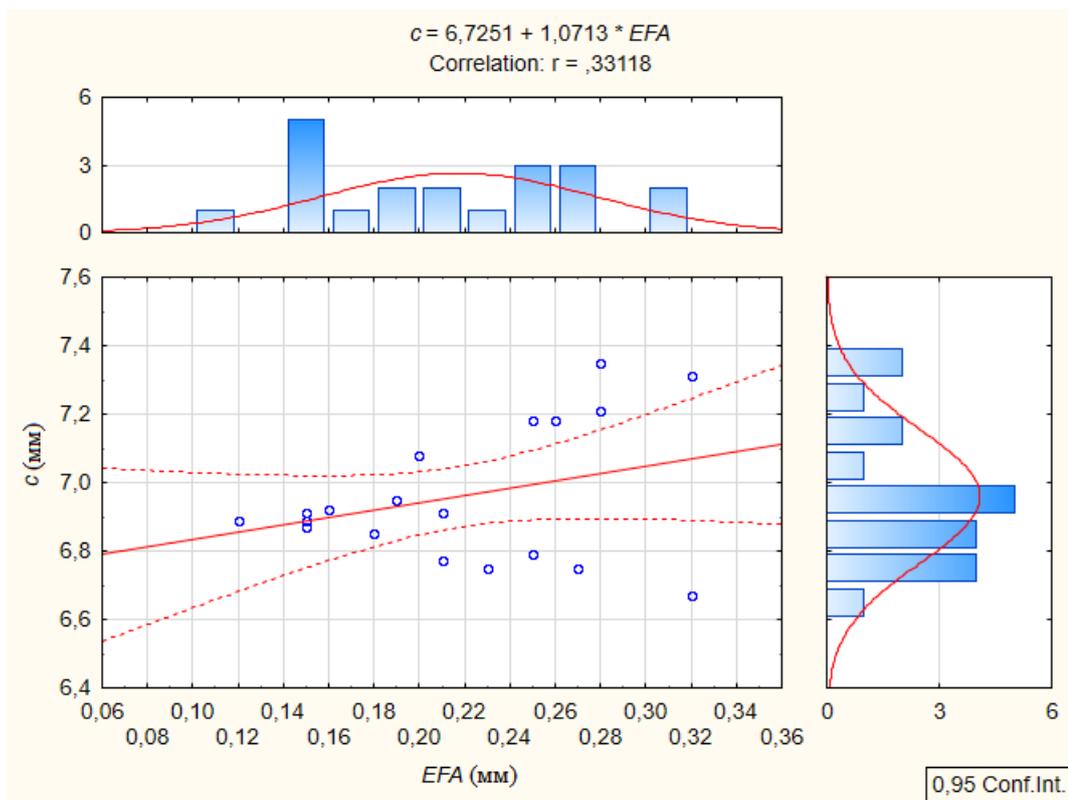


Рисунок 2.3 – График регрессионного уравнения зависимости размера  $c$  от неплоскостности  $EFA$  базовой поверхности

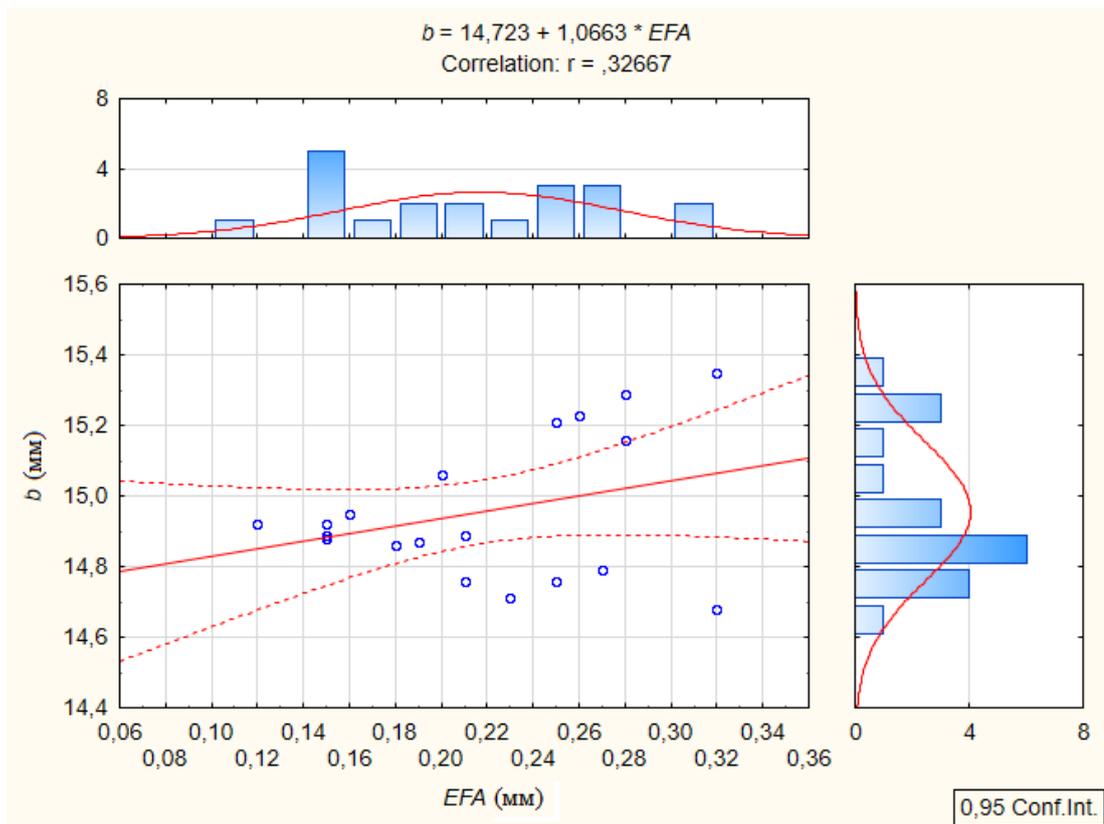


Рисунок 2.4 – График регрессионного уравнения зависимости размера  $b$  от неплоскости  $EFA$  базовой поверхности

При сборке коробчатая деталь контактирует с ответными деталями удаленными друг от друга участками  $P$ ,  $M$  шириной  $b_0$ , удаленных друг от друга на расстояние  $l_0$  и показанных на рис. 2.5

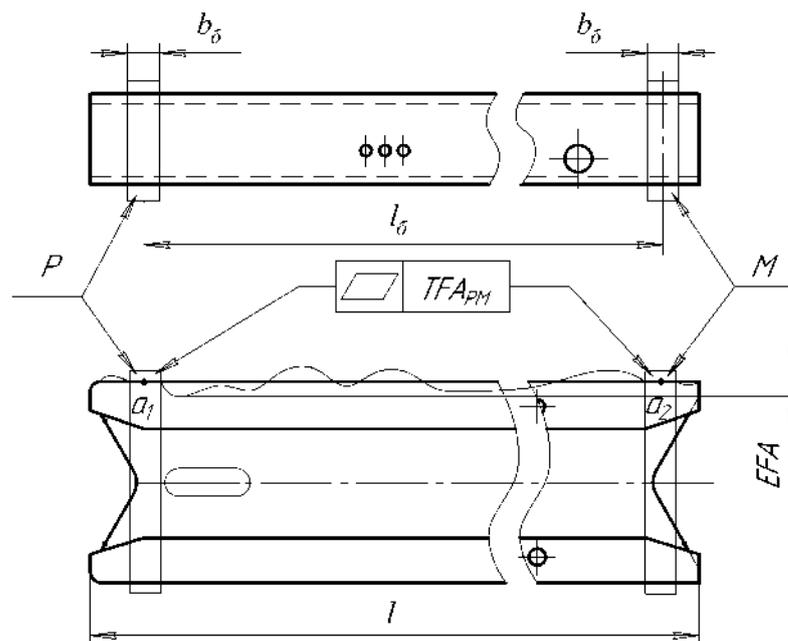


Рисунок 2.5 – Технологический эскиз детали «Коробка»

Базовую поверхность  $A$  (см. рис. 1.14) получают на операциях штамповки: гибки и калибровки. По условиям чертежа, на данную поверхность, не предусмотрен припуск под механическую обработку. Для снижения влияния погрешностей формы штампованной поверхности большой протяженности предложено выделить два участка с повышенной точностью формы шириной  $b_6$ , удаленных друг от друга на расстоянии  $l_6$ , и принять их в качестве измерительной и технологической базы. Ширина участка  $b_6$  принимается минимально возможной с учетом размеров правящего инструмента, а расстояние между центрами участков  $l_6$  принимают максимально возможным  $l_6 = l - 3b_6$ , с целью снижения угловой погрешности при базировании. Для более четкой ориентации детали к выделенным участкам повышены требования по точности: для них назначен допуск  $TFA_{PM} = 0,05$  мм. С этой целью выбранные участки  $P$  и  $M$  подвергают дополнительно правке, для чего внутрь детали вставляют призматическую оправку и ударами молотка выравнивают поверхность  $A$  на ширине  $l_6$  (см. рис. 2.5).

Следовательно, большие погрешности формы свободных поверхностей коробчатых деталей, заготовки которые получены холодной листовой штамповкой, допустимые по условиям эксплуатации изделий, неприемлемы при использовании таких поверхностей в качестве измерительных или технологических баз.

### 2.3 Размерный анализ приспособления-спутника

На представленном выше рис. 1.15 размеры  $e$ ,  $f$  заданы относительно базовых поверхностей  $C$ ,  $D$ , следовательно, данные поверхности являются измерительными базами для размеров  $e$ ,  $f$  бобышки  $\varnothing v$  сборочного узла «Коробка». Для координаты  $w$  отверстия  $\varnothing s$  измерительной базой будет являться поверхность  $A$  (см. рис. 1.14), а технологическая база будет поверхность  $D$ . Согласно конструкторской документации координату  $q$  отверстия  $\varnothing s$  необходимо обработать совместно с бобышкой  $\varnothing v$  (см. рис.

1.15), следовательно, проведем размерный анализ влияния размера  $j$  (см. рис. 1.14) на координату  $w$  отверстия  $\varnothing s$  (см. рис. 1.15).

Для выполнения требуемых размеров (см. рис. 1.15) было разработано специальное приспособление-спутник со схемой базирования представленной на рис. 2.6-2.7. Базирование заготовок на операции механической обработки в системе координатных плоскостей по ГОСТ 21495-76 [5] выполняется следующим образом:

– заготовку  $б$  поверхностью  $D$  (см. рис. 1.15) совмещают с выступом на ступенчатом вкладыше  $1$  (рис.2.6), тем самым лишая деталь 2-х степеней свободы;

– затем заготовку  $б$  поверхностью  $C$  (см. рис. 1.15) досылают до базовой плоскости ступенчатого вкладыша  $1$  (рис. 2.6), лишая деталь еще 3-х степеней свободы;

– затем заготовку  $б$  фиксируют болтовым соединением 3-5, лишая еще одной степени свободы [5].

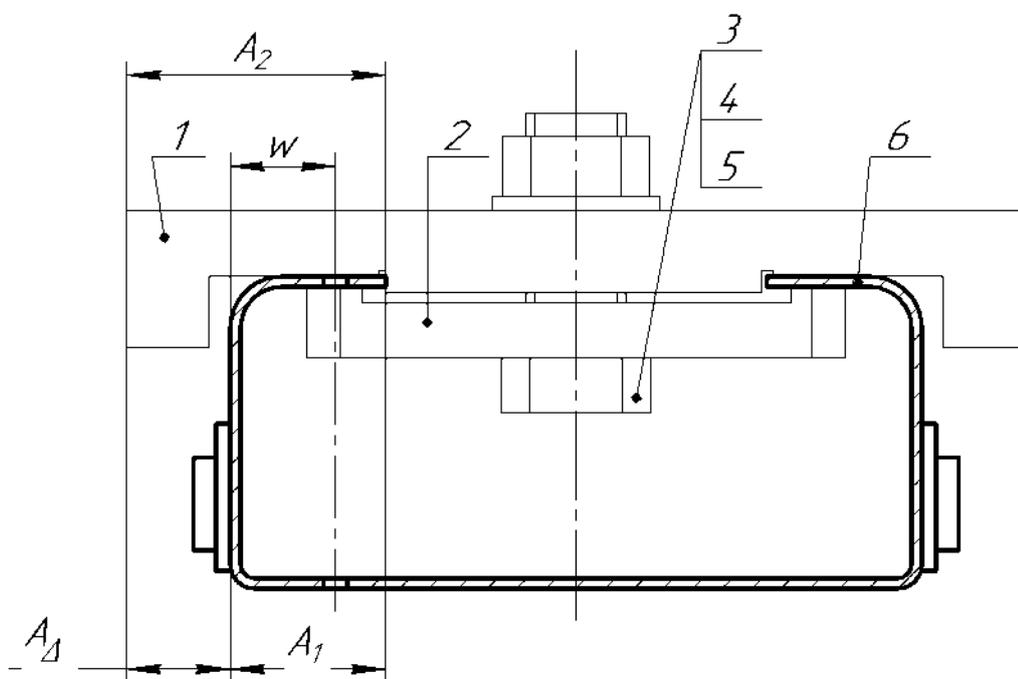


Рисунок 2.6 – Размерная цепь 1: заготовка в комплекте с приспособлением – спутником, где  $1$  – вкладыш,  $2$  – прижим,  $3-5$  – болтовое соединение,  $б$  – заготовка

Звенья размерной цепи 1 (см. рис. 2.6):  $A_1 = 22(-0,52)$  (мм);  $A_2 = 40(\pm 0,1)$  (мм); где  $A_1$  – уменьшающее звено,  $A_2$  – увеличивающее звено,  $A_{\Delta}$  – замыкающее звено.

Базирование приспособления-спутника осуществляется по двум взаимно перпендикулярным скобам 2 и основанию 1 станочного приспособления (рис. 2.7).

Для выяснения возможности колебания координаты  $w$  отверстия  $\varnothing s$  сборочного узла (см. рис. 1.15) проведем расчет размерной цепи при установке заготовки в приспособлении-спутнике, а затем комплекта в станочное приспособление по методу максимума-минимума.

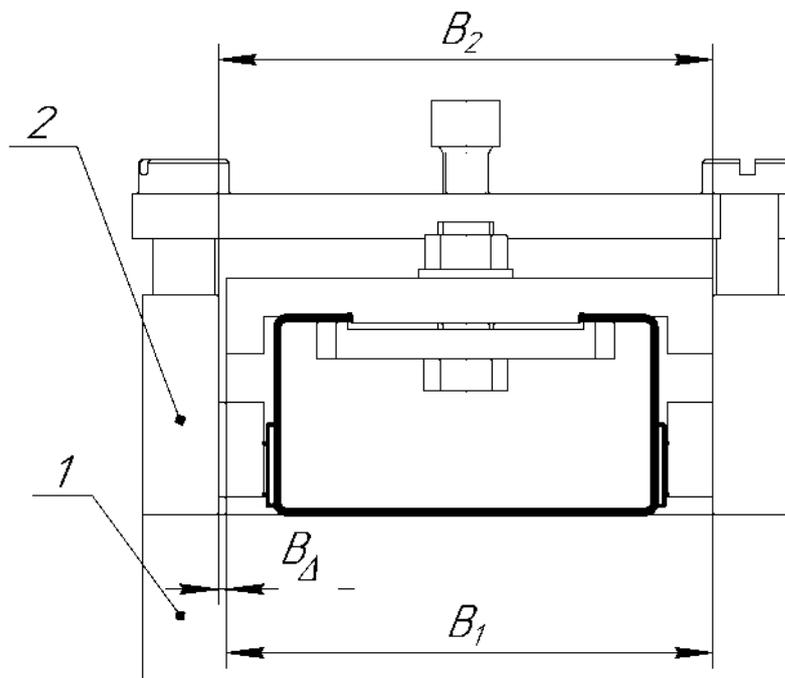


Рисунок 2.7 – Размерная цепь 2: комплект заготовка – приспособление-спутник в станочном приспособлении, где 1 – основание станочного приспособления, 2 – скоба

Звенья размерной цепи 2 (см. рис. 2.7):  $B_1 = 120f7(-0,036/-0,071)$ ;  $B_2 = 120H7(+0,04)$  (мм); где  $B_1$  – уменьшающее звено,  $B_2$  – увеличивающее звено,  $B_{\Delta}$  – замыкающее звено.

Максимальное значение замыкающего размера цепи в общем случае определяют разностью:

$$A_{\Delta \max} = \sum_{i=1}^n \vec{A}_{\max i} - \sum_{n+1}^{m-1} \vec{A}_{\min i} . \quad (2.4)$$

Для размерной цепи 1 формула (2.4) принимает вид:  $A_{\Delta \max} = A_{2 \max} - A_{1 \min} = 40,1 - 21,48 = 18,62$  (мм).

Для размерной цепи 2:  $B_{\Delta \max} = B_{2 \max} - B_{1 \min} = 120,04 - 119,929 = 0,111$  (мм).

Минимальное значение замыкающего размера цепи в общем случае определяют разностью:

$$A_{\Delta \min} = \sum_{i=1}^n \vec{A}_{\min i} - \sum_{n+1}^{m-1} \vec{A}_{\max i} . \quad (2.5)$$

Для размерной цепи 1 формула (2.5) принимает вид:  $A_{\Delta \min} = A_{2 \min}$ ;  
 $A_{1 \max} = 39,9 - 22 = 17,9$  (мм).

Для размерной цепи 2:  $B_{\Delta \min} = B_{2 \min} - B_{1 \max} = 120 - 119,964 = 0,036$  (мм).

Для сборочной размерной цепи 2: образуются предельные величины замыкающего размера:  $B_{\Delta \max} = 0,111$  и  $B_{\Delta \min} = 0,036$ .

Колебания замыкающих размеров составят

$$EA_{\Delta} = A_{\Delta \max} - A_{\Delta \min} = 18,62 - 17,9 = 0,72 \text{ мм};$$

$$EB_{\Delta} = B_{\Delta \max} - B_{\Delta \min} = 0,111 - 0,036 = 0,075 \text{ мм}.$$

Поскольку колебания значений замыкающих размеров непосредственно влияют на точность выполнения координатных размеров отверстия, то в сумме ожидаемая погрешность координат может составить

$$EA_{\text{баз}} = EA_{\Delta} + EB_{\Delta} = 0,72 + 0,075 = 0,795 \text{ мм}.$$

Таким образом, получаем, что замыкающие размеры звеньев могут иметь колебания, превышающие допуск на выполняемый размер  $w$  ( $T_{AB} = \pm 0,1$  мм). Следовательно, необходима разработка методики обеспечения точности выполняемых размеров.

## **Выводы**

1. Большие погрешности формы свободных поверхностей коробчатых деталей, заготовки которых получены холодной листовой штамповкой, допустимые по условиям эксплуатации, неприемлемы при использовании таких поверхностей в качестве измерительных или технологических баз.

2. Для снижения влияния погрешностей формы штампованной поверхности большой протяженности предложено выделить два удаленных друг от друга участка с повышенной точностью формы и принять их в качестве измерительной и технологической базы.

3. Требуется разработка специального приспособления, реализующая принцип базирования по выделенным участкам штампованной поверхности повышенной точности.

4. Для применения, описанного выше специального приспособления-спутника необходима разработка новой схемы фиксации тонкостенных заготовок.

### **3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ**

В данной главе проанализированы результаты компьютерного моделирования погрешностей закрепления тонкостенных коробчатых заготовок. Исследовано влияние упругих деформаций заготовок пониженной жесткости в специальном приспособлении. В главе приведены результаты расчетов напряженного деформированного состояния конструкции методом конечных элементов.

В процессе механической обработки корпусных тонкостенных деталей наиболее важной технологической задачей является обеспечение их геометрической точности. Примером такого рода деталей является тонкостенный коробчатый корпус, представленный на рисунке 1.9.

Высокие механические свойства стали 30ХГСА (предел прочности и предел упругости) в сочетании с заданным направлением проката листа и гибки заготовки, создают эффект пружинения при закреплении нежесткого коробчатого корпуса в станочном приспособлении. Для обеспечения точности коробчатых корпусов необходимо учитывать данные особенности обрабатываемых деталей.

#### **3.1 Решение технологических задач с применением компьютерного моделирования**

Программные приложения, такие как SolidWorks, Creo, Компас и др., применяемые в различных областях специального машиностроения, позволяют создавать компьютерные модели изготавливаемых деталей с целью получения новых сведений о моделируемом изделии, оценки его свойств и поведения на основе аналитических исследований. Создание компьютерных моделей особенно актуально при изготовлении тонкостенных корпусных заготовок.

Компьютерное моделирование упрощает процесс исследования изготавливаемых деталей, позволяя спрогнозировать будущий результат без существенных материальных и производственных затрат. Процесс формализации компьютерной модели позволяет определять ее основные

характеристики и исследовать поведение модели при изменении значений выделенных параметров.

Таким образом, компьютерное моделирование в процессе производства деталей позволяет проанализировать, интерпретировать и сопоставить результаты моделирования с реальным поведением изготавливаемого изделия и, при необходимости, уточнить модель детали.

В процессе создания модели возможно применение как имитационного моделирования, позволяющего исследовать поведение модели и воспроизводить ее функционирование на основе алгоритма, так и аналитического моделирования, позволяющего изучать модель реального объекта в виде математических зависимостей, формул и уравнений.

Возможности использования моделирования для решения обозначенных задач отражены в работах [74, 79], при этом подавляющее большинство работ не затрагивает вопросы использования программ трехмерного моделирования при исследовании процесса деформирования деталей. Современные программные продукты позволяют создавать трехмерные модели и использовать их в исследованиях деформирования заготовок. Таким образом, актуальным является проведение компьютерного моделирования для решения выделенных задач на основе современных программных продуктов, одним из которых является программный комплекс SolidWorks.

### **3.2 Компьютерное моделирование погрешностей закрепления**

В процессе обработки деталей нежесткой конструкции важнейшей технологической задачей становится обеспечение точности выполняемых размеров. Одной из таких деталей является тонкостенный нежесткий коробчатый корпус (см. рис.1.9). Нежесткость конструкции, в сочетании с имеющейся погрешностью формы заготовки и положения базовых поверхностей, приводящей к дополнительным погрешностям механической обработки, увеличивает себестоимость изделия.

Возникновение деформаций, искажение начальной формы тонкостенных коробчатых заготовок (корпусов, коробок, затворных рам и т.д.) особенно заметны при их закреплении в результате воздействия сил прижимов. После освобождения таких заготовок от сил прижимов, вследствие упругой деформации, они восстанавливаются до близкой к первоначальной форме, однако будучи обработаны в деформированном состоянии поверхности заготовки теряют форму и появляются погрешности формы деталей. Данные обстоятельства приводят к необходимости учета возможных искажений форм тонкостенных корпусных заготовок, возникающих в процессе обработки при их закреплении в станочных приспособлениях.

Эффективное решение обозначенных проблем возможно с использованием компьютерного моделирования, позволяющего изучать сложные системы, проводить необходимые эксперименты. Наиболее распространенным в настоящее время программным продуктом трехмерного проектирования, позволяющим создавать и исследовать модели, проводить прочностные расчеты конструкций является SolidWorks Simulation.

Модуль SolidWorks Simulation имеет возможность работы с импортированными моделями из других программных продуктов. Отличительной особенностью конфигурации SolidWorks Simulation является использование многопроцессорности при построении сетки и производстве расчетов, а также доступ ко всей оперативной памяти [19, 116].

### **3.3 Влияние упругих деформаций нежестких коробчатых заготовок на точность выполнения размеров в специальном приспособлении**

Использование установки в «координатный угол», при базировании призматических деталей, предполагает, что применяемая заготовка является жесткой и не меняет свою начальную форму под действием сил зажима в приспособлении. При этом в практике машиностроительных предприятий применяют заготовки нежестких коробчатых корпусов (см. рис. 1.14), штампованные из листовой исходной заготовки, что дает значительную

экономии, однако при закреплении в приспособлении они подвергаются деформациям.

Для выявления наиболее деформируемых зон формы поперечного сечения в специальном приспособлении (см. рис. 2.1) провели расчет напряженного деформированного состояния конструкции методом конечных элементов для заготовки с принятыми размерами на верхнем пределе допуска 42,84 и 97,3 мм (см. рис. 1.9).

Для определения величины деформирования боковых стенок были применены 2D упрощения. Основание приспособления закрепили неподвижно. К верхним полкам заготовки путем привинчивания лапок приложили силы величиной 500 Н. На рис. 3.1 представлен результат моделирования упругих перемещений по координате Z, возникающих при зажиме заготовки.

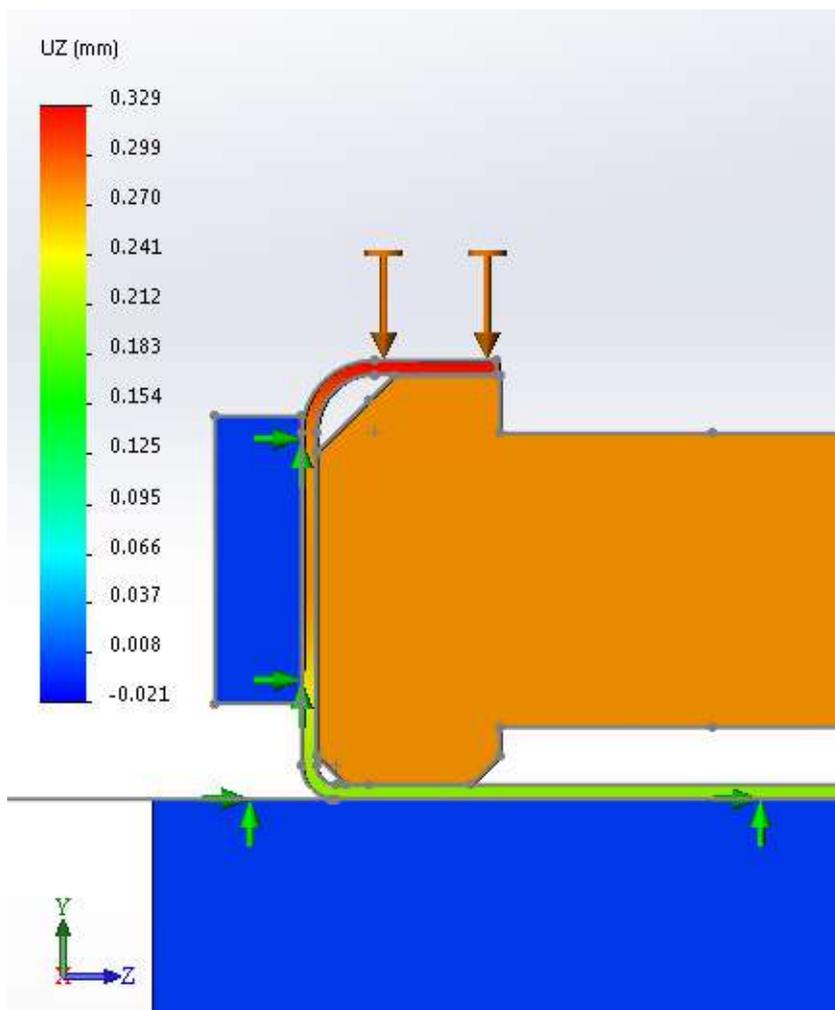


Рисунок 3.1 – Результат моделирования упругих перемещений

На основе анализа приведенного выше расчета, сделан вывод, что наибольшие упругие перемещения возникают в верхней части заготовки порядка 0,3 мм, где деталь разомкнута, следовательно, поверхность направляющей базы приспособления должна контактировать с заготовкой в зонах наибольшего деформирования.

Анализ геометрической формы тонкостенной заготовки показывает, что в качестве установочной базы следует принять широкое основание (поверхность  $B$ ), в качестве направляющей – длинную боковую сторону (поверхность  $A$ ), и, наконец, в качестве упорной базы – торец заготовки (см. рис. 1.14). Для установки корпуса в координатный угол использовано специальное приспособление, схема которого представлена на рис. 2.1 [74]. В этом приспособлении производится фрезерование поверхностей при выдерживании размеров  $b$ ,  $d$ ,  $c$  и сверление отверстий  $\varnothing k$  с координатой  $a$  от баз  $A$  и  $B$  (см. рис. 1.14).

В работе [79] был описан технологический процесс изготовления тонкостенного корпуса с помощью комплекса термических и штамповочных операций. Несмотря на проведение операции отжиг, деформации в заготовке, полученные в штамповых операциях, сохранились [88, 94, 101, 102].

При помощи методов математического моделирования упругих деформаций стенок нежесткой коробчатой заготовки, с приложением к ней распределенной нагрузки с помощью жестких элементов приспособления, имеющих правильную геометрическую форму, выявим числовую оценку возникающих погрешностей формы измерительных баз заготовки и соответствующих погрешностей координат обработанных поверхностей заготовки.

Поскольку тонкостенная заготовка нежесткая, для её прижатия к базовой плоскости основания приспособления применяют вкладыш 2 (рис. 3.2).

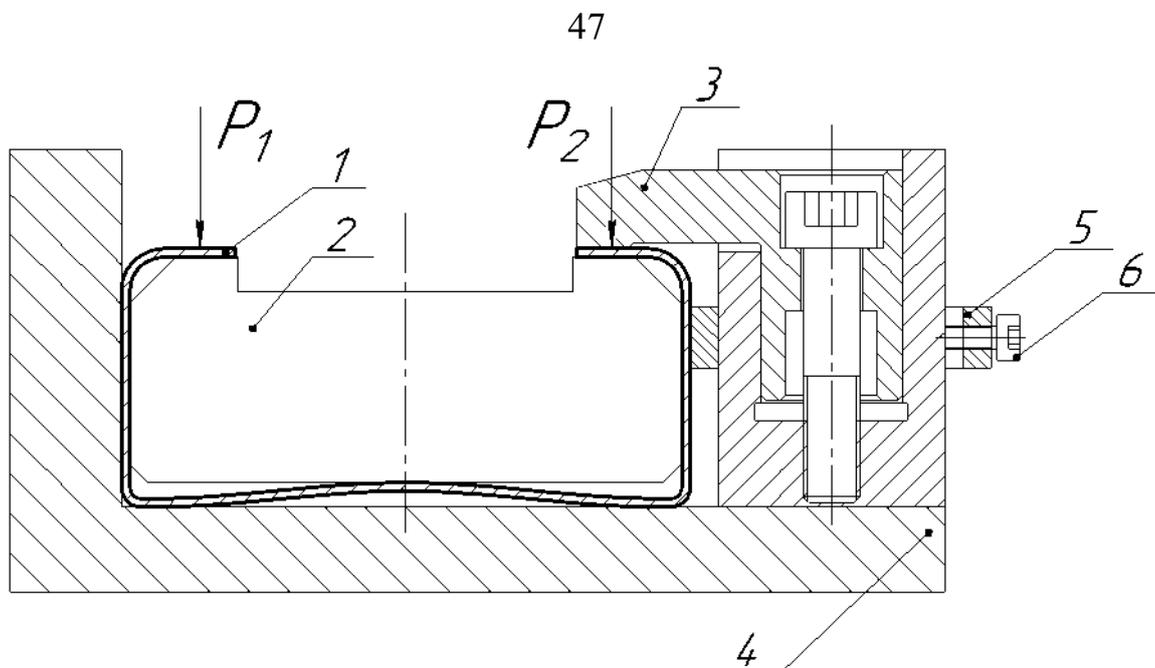


Рисунок 3.2 – Позиция на вертикальном обрабатывающем центре с ЧПУ TMV-1050AII Tongtai: 1 – заготовка; 2 – вкладыш; 3 – прижим; 4 – корпус приспособления; 5 – скоба; 6 – винт

На вкладыше 2 выполнили вырез  $F$  на зажимной поверхности, наличие которого позволяет компенсировать вогнутость заготовки. Силы зажима  $P_1$  и  $P_2$  действуют на дно заготовки через призматический вкладыш 2. Эскиз вкладыша с вырезом  $F$  представлен на рис. 3.3.

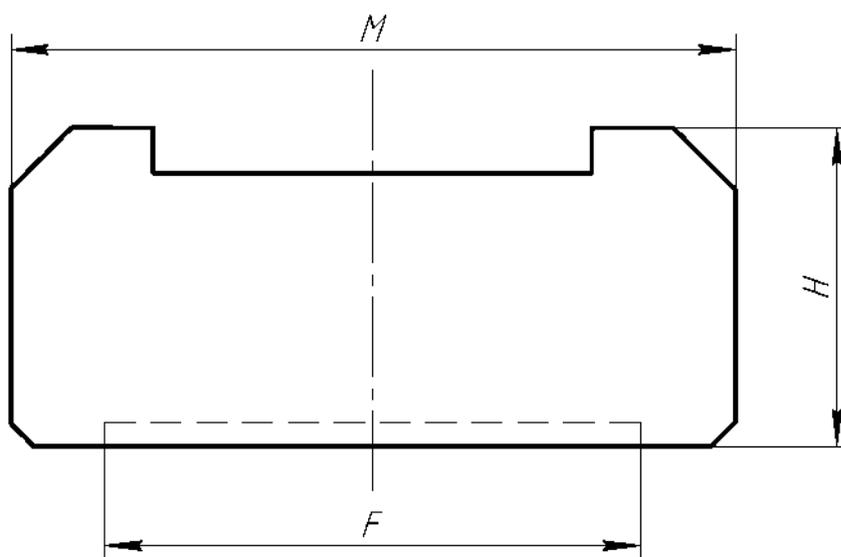
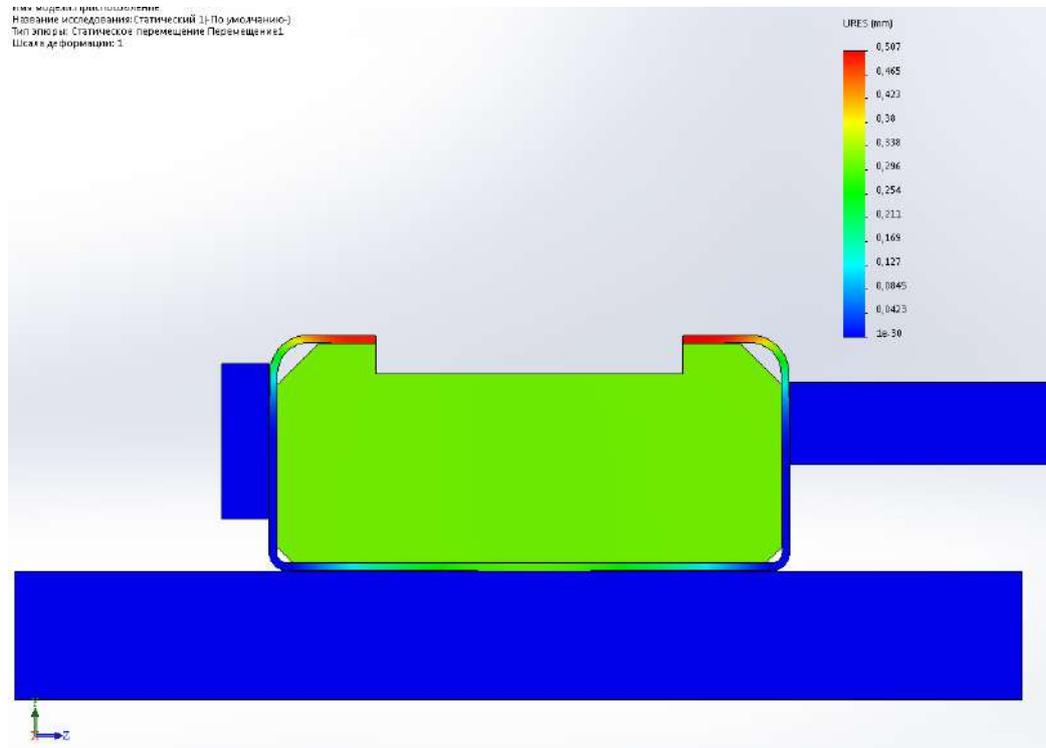


Рисунок 3.3 – Эскиз специального вкладыша

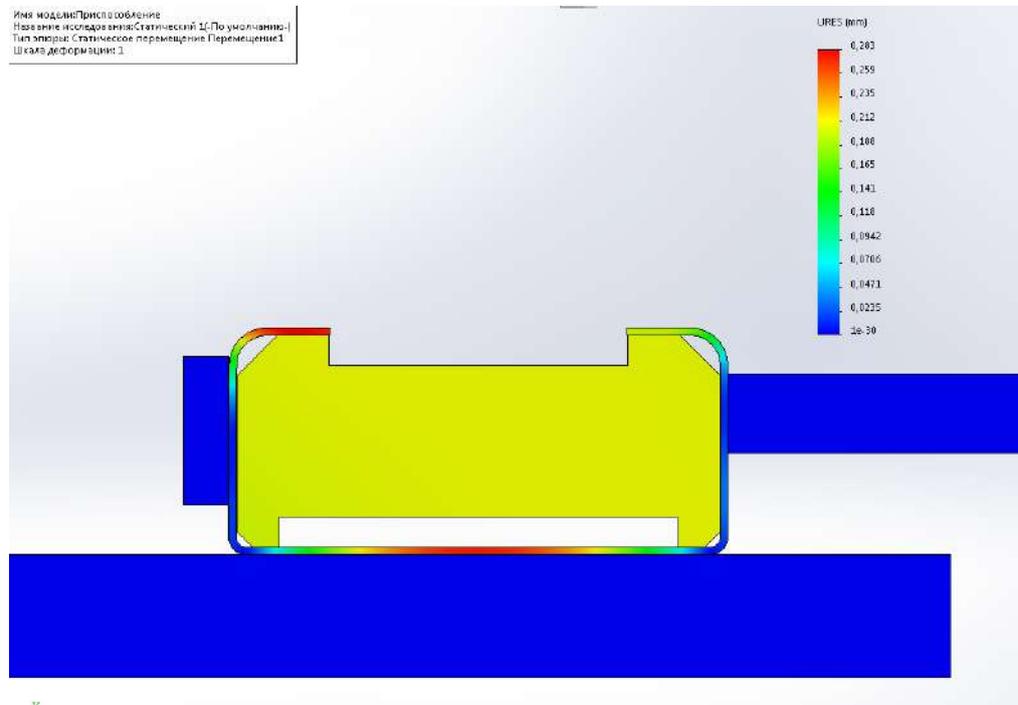
Рассмотрен случай, когда заготовка 1 (см. рис. 3.2) имеет размер  $h = 42,8$  мм, а размер  $m = 97,3$  мм (см. рис. 1.14). При неплоскостности дна

заготовки в 0,3 мм минимально допустим вкладыш с высотой  $A = 42,5$  мм. Проведены расчеты упругих перемещений дна заготовки при изменении ширины выреза  $F$  во вкладыше от 45 до 80 мм. Результаты расчетов заготовки с вогнутым дном представлены на рис. 3.4 и на графике (рис. 3.5).

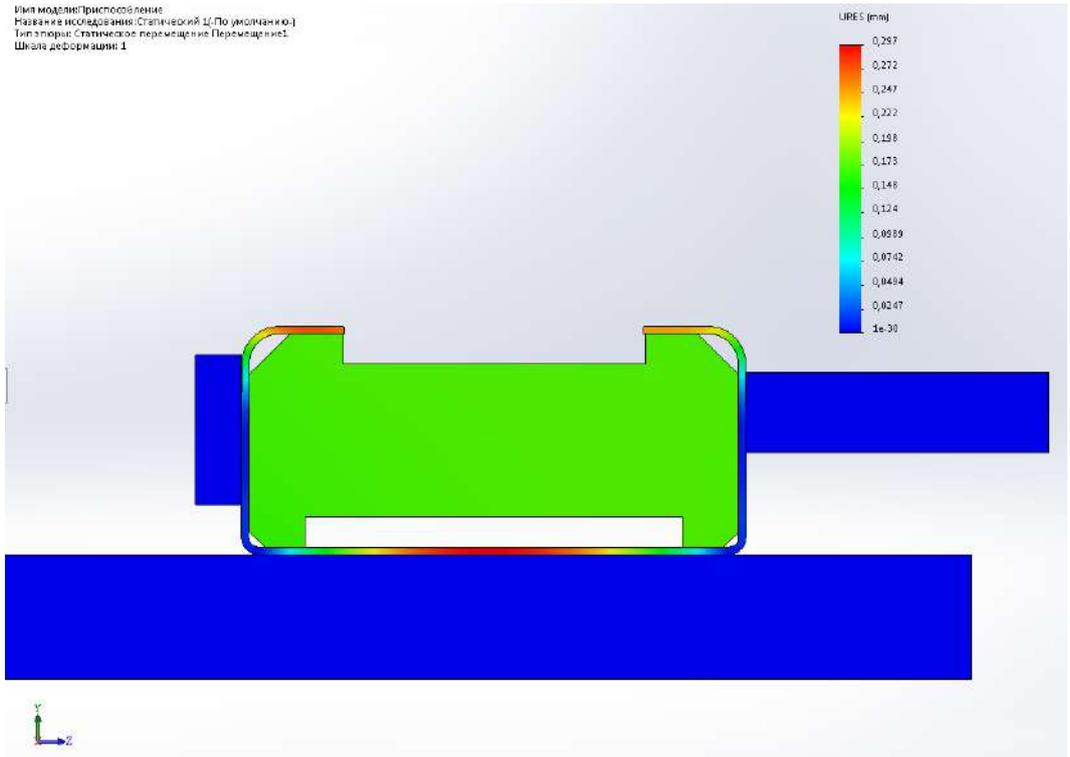
A,D,1



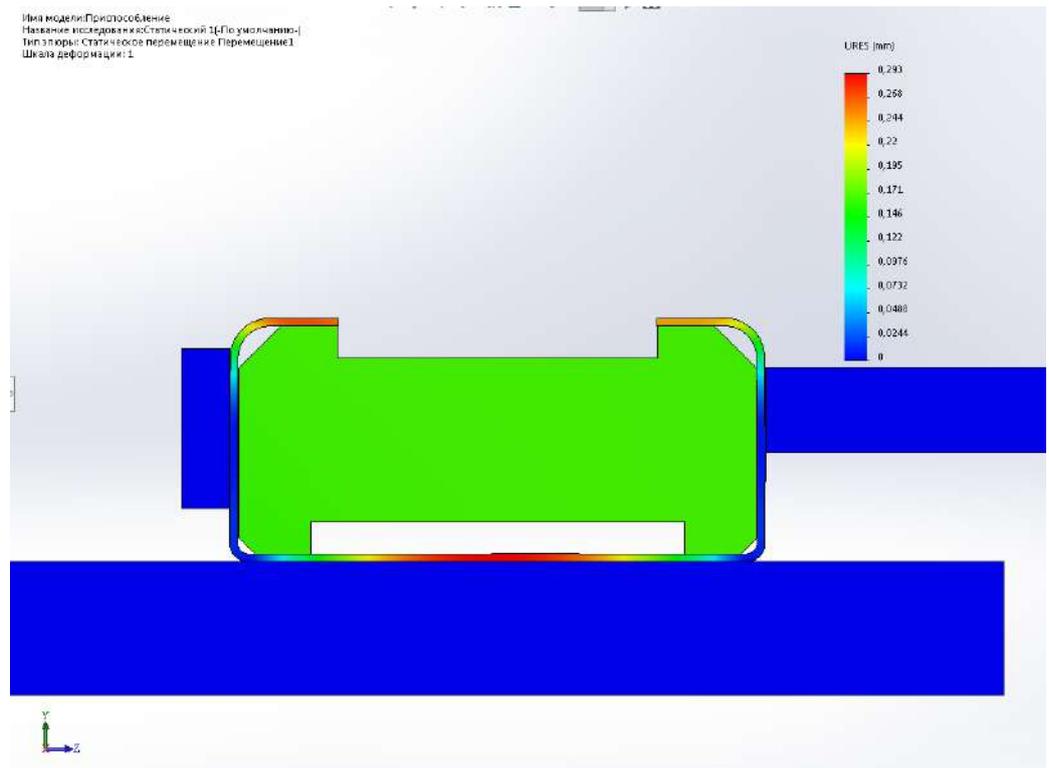
A,C,2



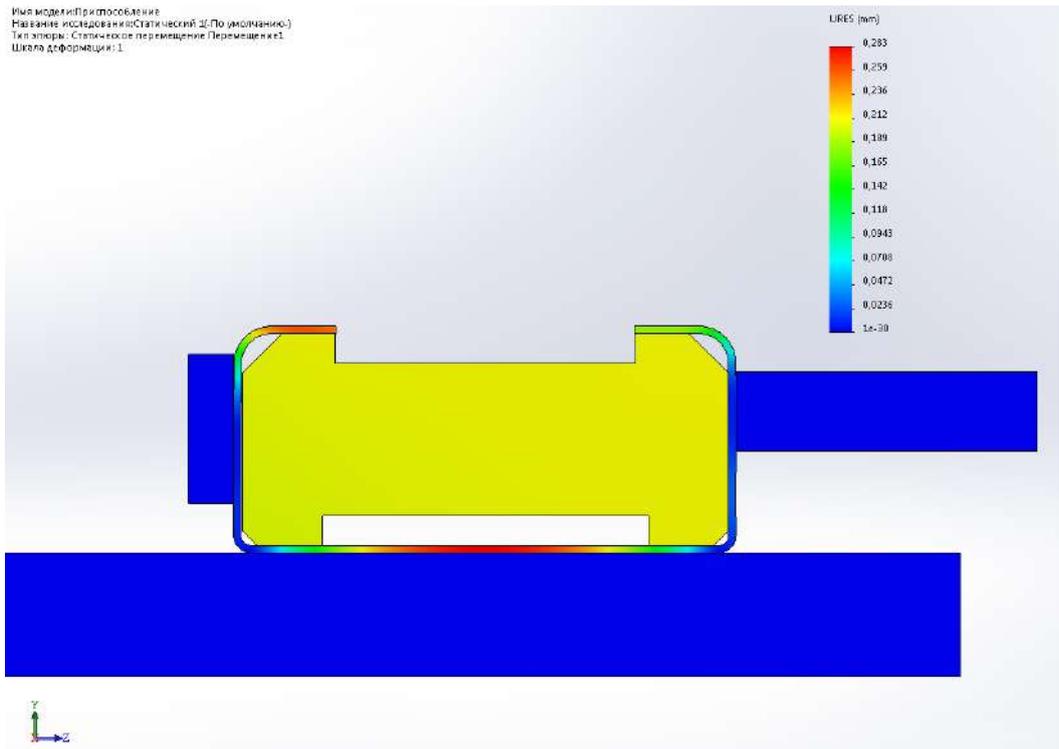
A,C,3



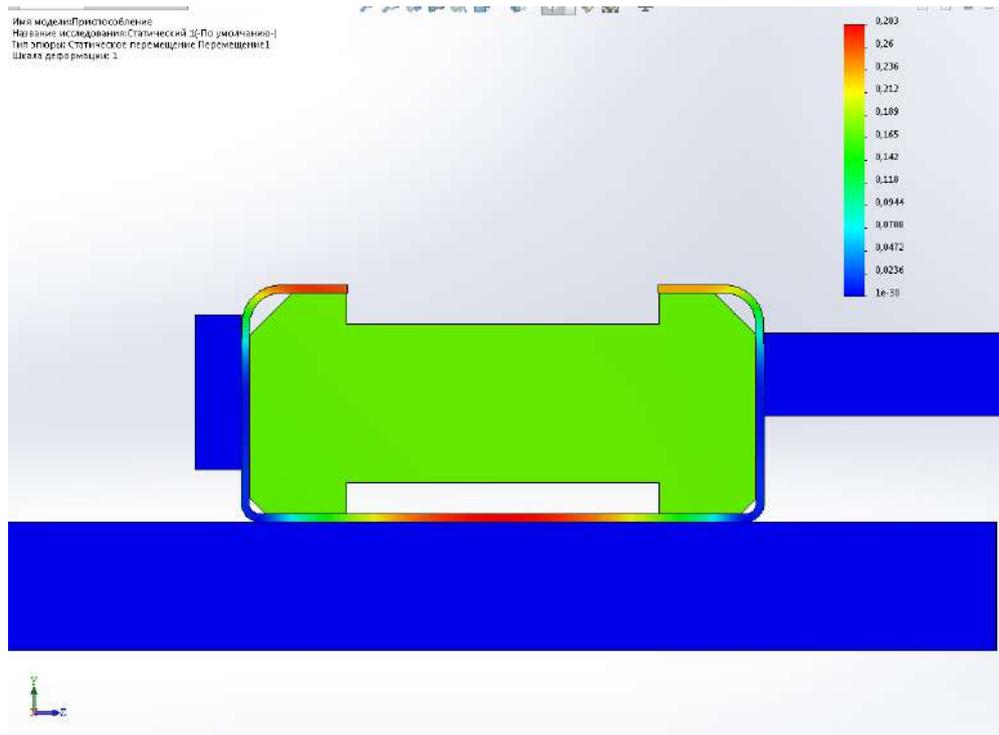
A,C,4



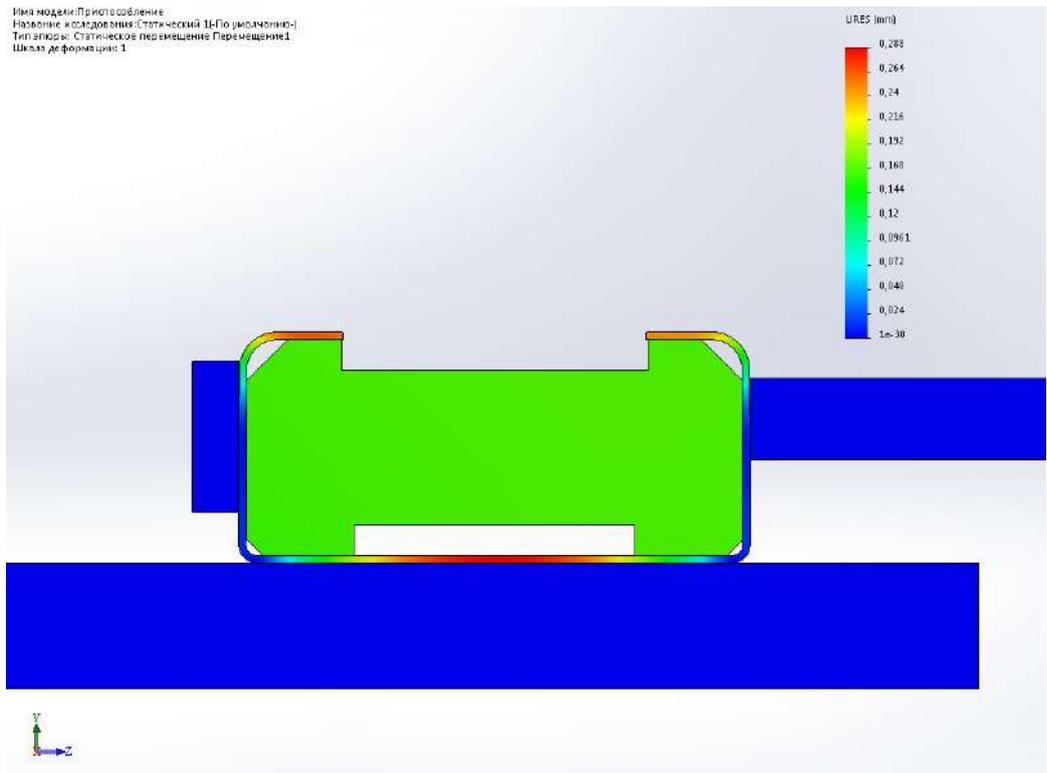
A,C,5



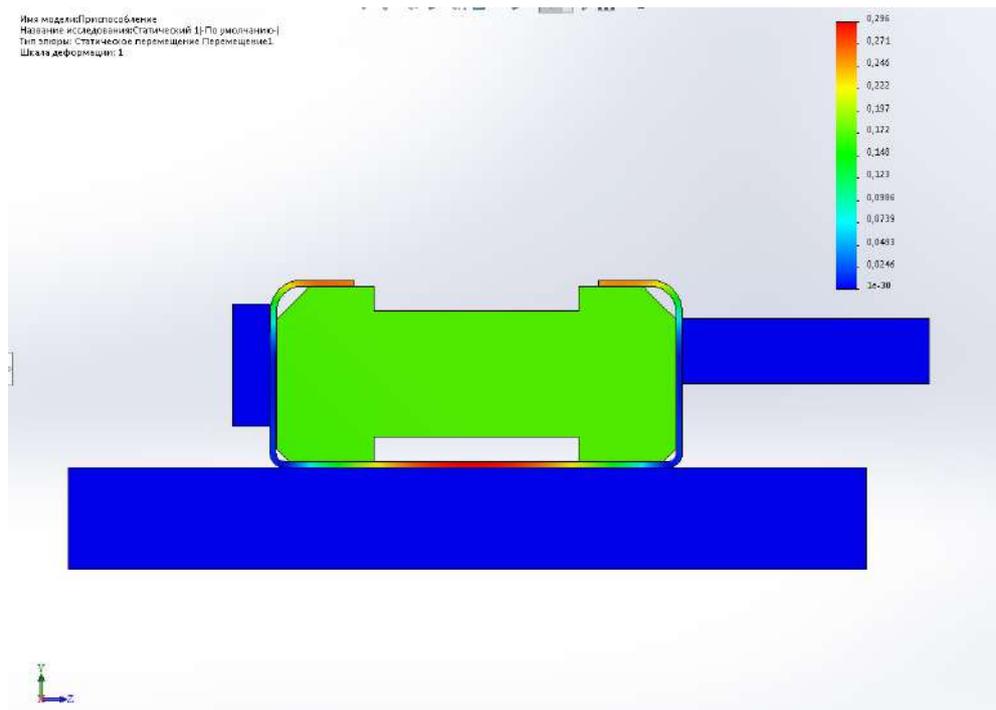
A,C,6



A,C,7



A,C,8



A,C,9

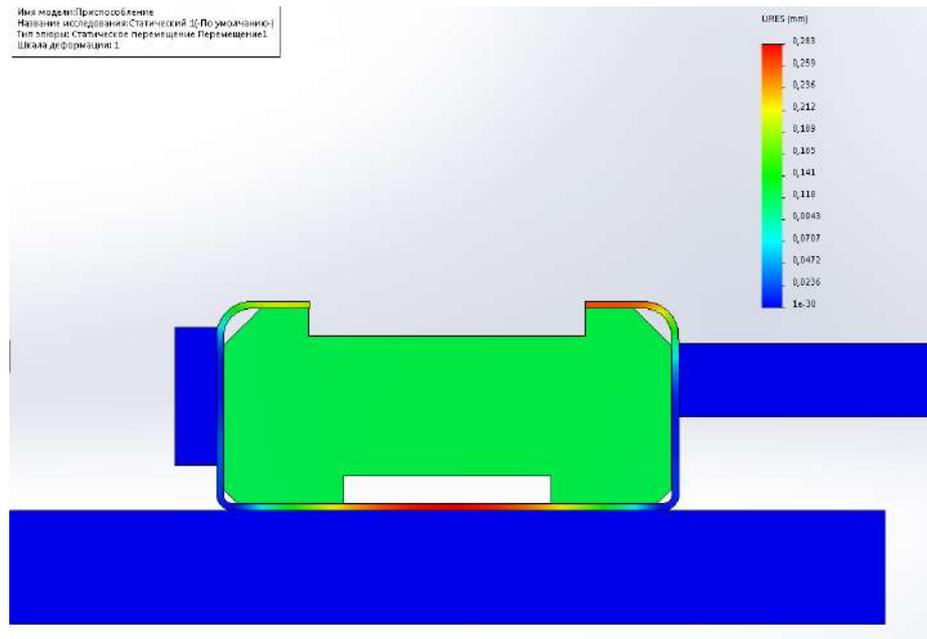


Рисунок 3.4 – Результаты моделирования перемещения дна заготовки:  
 А – Дно вогнутое (0,3 мм) ; С – высота вкладыша  $H=42,7$  мм; D – высота вкладыша  $H=42,5$  мм; 1 – ширина паза  $F = 0$  мм; 2 – ширина паза  $F = 80$  мм;  
 3 – ширина паза  $F = 75$  мм; 4 – ширина паза  $F = 70$  мм; 5 – ширина паза  $F = 65$  мм; 6 – ширина паза  $F = 60$  мм; 7 – ширина паза  $F = 55$  мм; 8 – ширина паза  $F = 50$  мм; 9 – ширина паза  $F = 45$  мм;

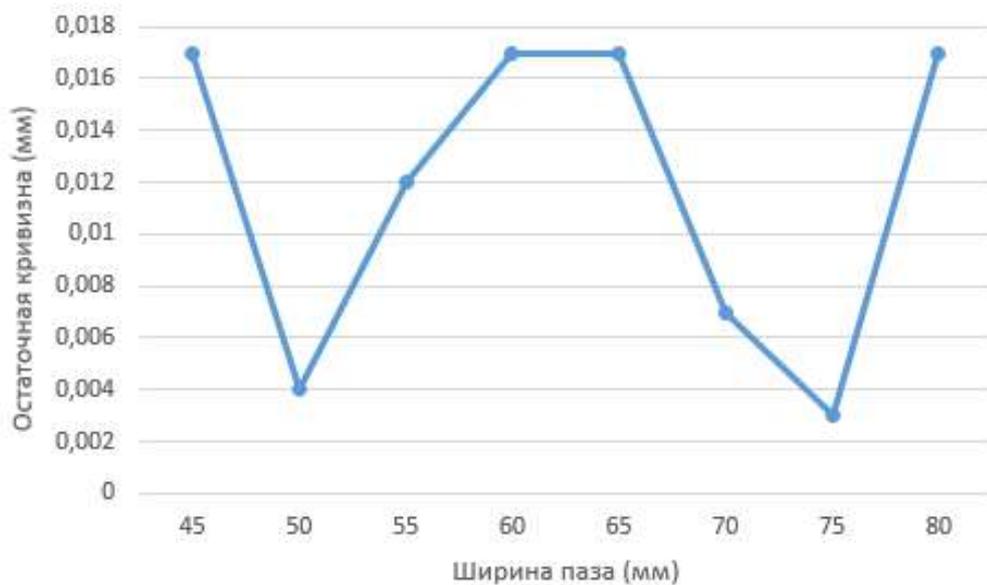


Рисунок 3.5 – Результат моделирования упругих перемещений заготовки с вогнутым дном

В результате проведенного расчета моделирования упругих перемещений заготовки с вогнутым дном (см. рис. 3.4-3.5), установлена оптимальная величина выреза  $F$  вкладыша для специального приспособления, эскиз которого представлен на рис. 3.3:  $F = (0,72 \div 0,75)M$ . В дальнейшей работе приняли ширину выреза  $F$  вкладыша 2 равным 70 мм. При данной ширине выреза  $F$  высоту  $H$  вкладыша 2 можно увеличить до 42,7 мм.

#### **3.4 Методика численного анализа деформаций боковых стенок заготовки в специальном приспособлении**

Для выявления влияния ширины выреза  $F$  вкладыша 2 на сущность неодинакового восстановления формы поперечного сечения провели расчет для нескольких случаев. В расчете приняли неплоскостность дна заготовки 0,3 мм. Рассмотрен случай, когда дно заготовки вогнутое (рис. 3.6, А) и выпуклое (рис. 3.6, В). На рис. 3.6 представлены расчеты поведения тонкостенной заготовки при двух разных способах зажима:

- тонкостенную заготовку досылали до неподвижной базы и фиксировали без применения усилий зажима при помощи регулируемой скобы 5 и винта 6 (см. рис. 3.2);
- тонкостенную заготовку досылали до неподвижной базы и фиксировали с усилием 50 Н при помощи регулируемой скобы 5 и винта 6 (см. рис. 3.2).

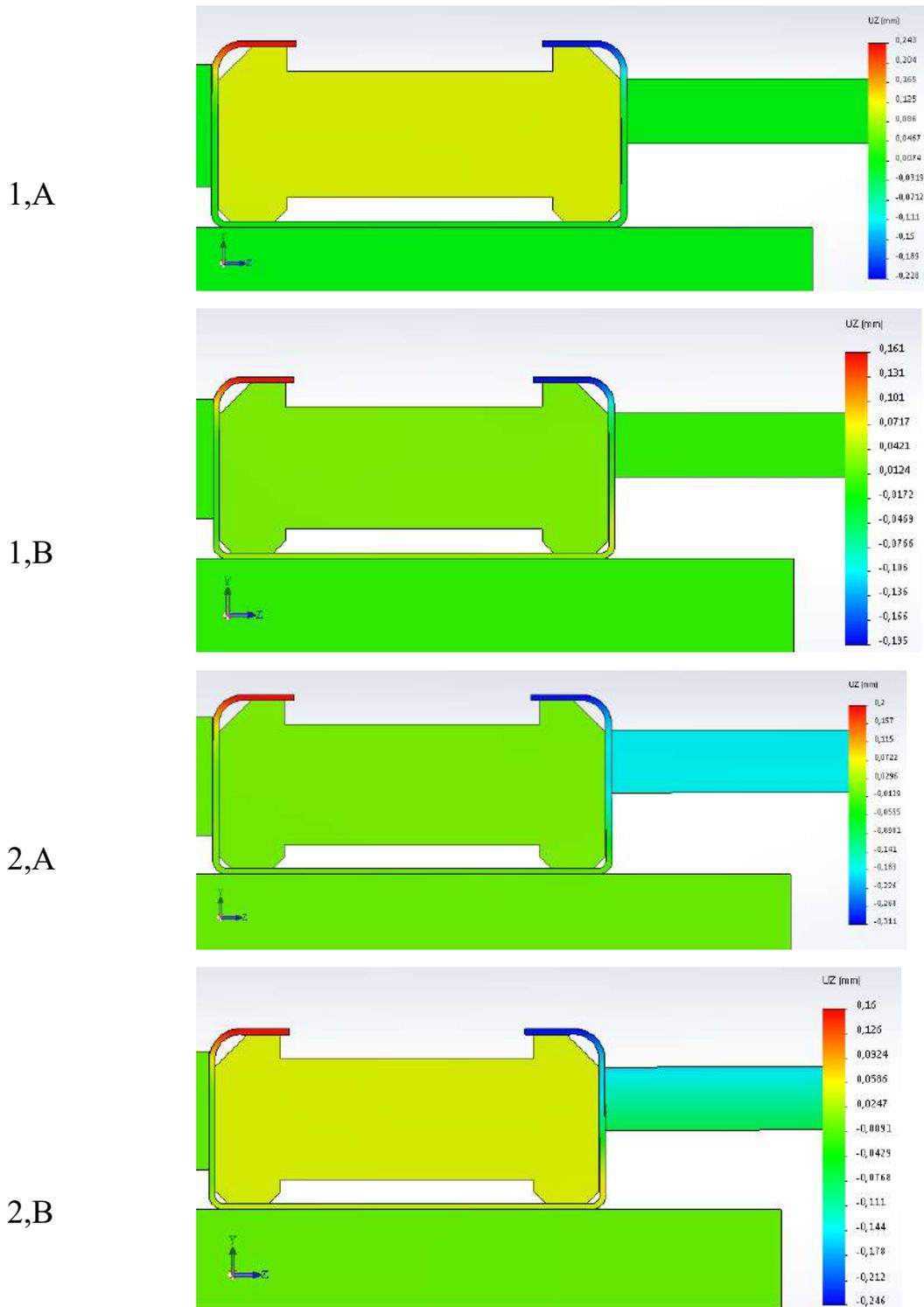


Рисунок 3.6 – Результаты моделирования перемещения боковых стенок заготовки при двух разных способах зажима с вкладышем высотой 42.7 мм:  
 А – Дно вогнутое ; В – Дно выпуклое; 1 – Заготовка, досланная без усилий зажима; 2 - Заготовка, зафиксированная силой 50 Н

Для наилучшей наглядности результаты моделирования перемещения боковых стенок заготовки при двух разных способах зажима сведены в графики и представлены на рис. 3.7.

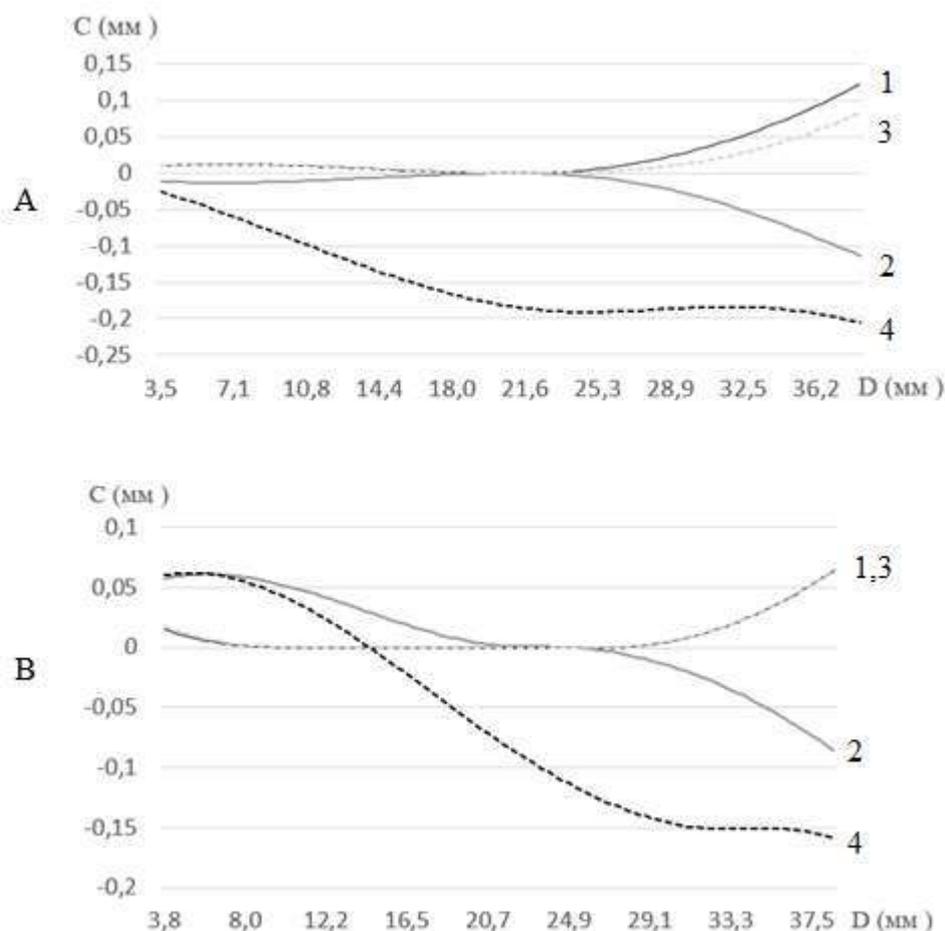


Рисунок 3.7 – Результаты моделирования перемещения боковых стенок заготовки при двух разных способах зажима с вкладышем высотой 42,7 мм: А – Дно вогнутое ; В – Дно выпуклое; С – Отклонение стенок; D – Высота стенки; 1 – Диаграмма перемещений левой стенки заготовки, досланной без усилий зажима; 2 – Диаграмма перемещений правой стенки заготовки, досланной без усилий зажима; 3 – Диаграмма перемещений левой стенки заготовки, зафиксированной с усилием 50 Н; 4 – Диаграмма перемещений правой стенки заготовки, зафиксированной с усилием 50 Н

С целью недопущения появления в теле тонкостенной заготовки, напряжений, превосходящих предел текучести, проведено моделирование

напряжений в теле заготовки, результаты которого представлены на рис. 3.8 и рис. 3.9.

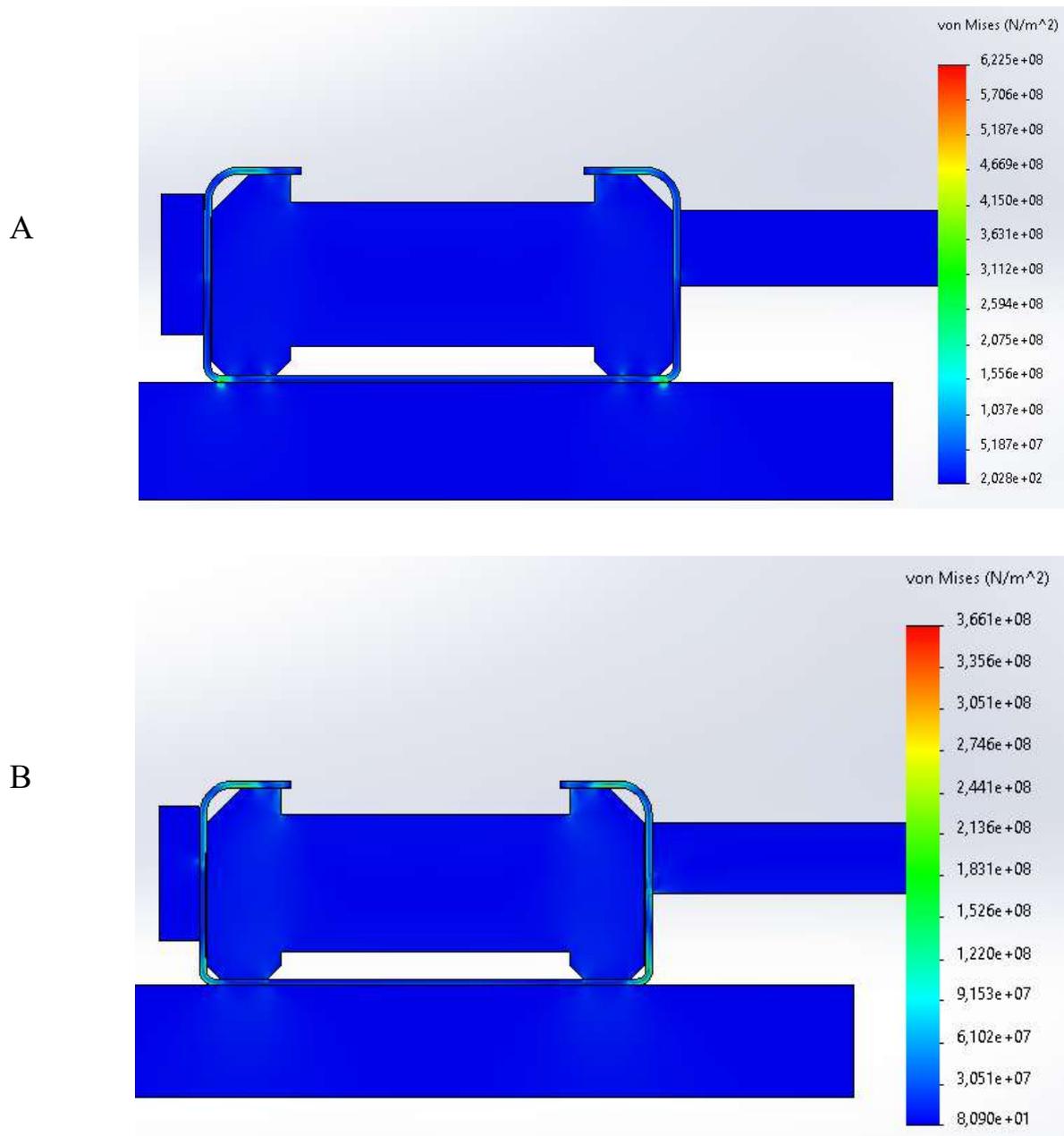


Рисунок 3.8 – Остаточные напряжения стенок заготовки: А – при вогнутом дне; В – при выпуклом дне

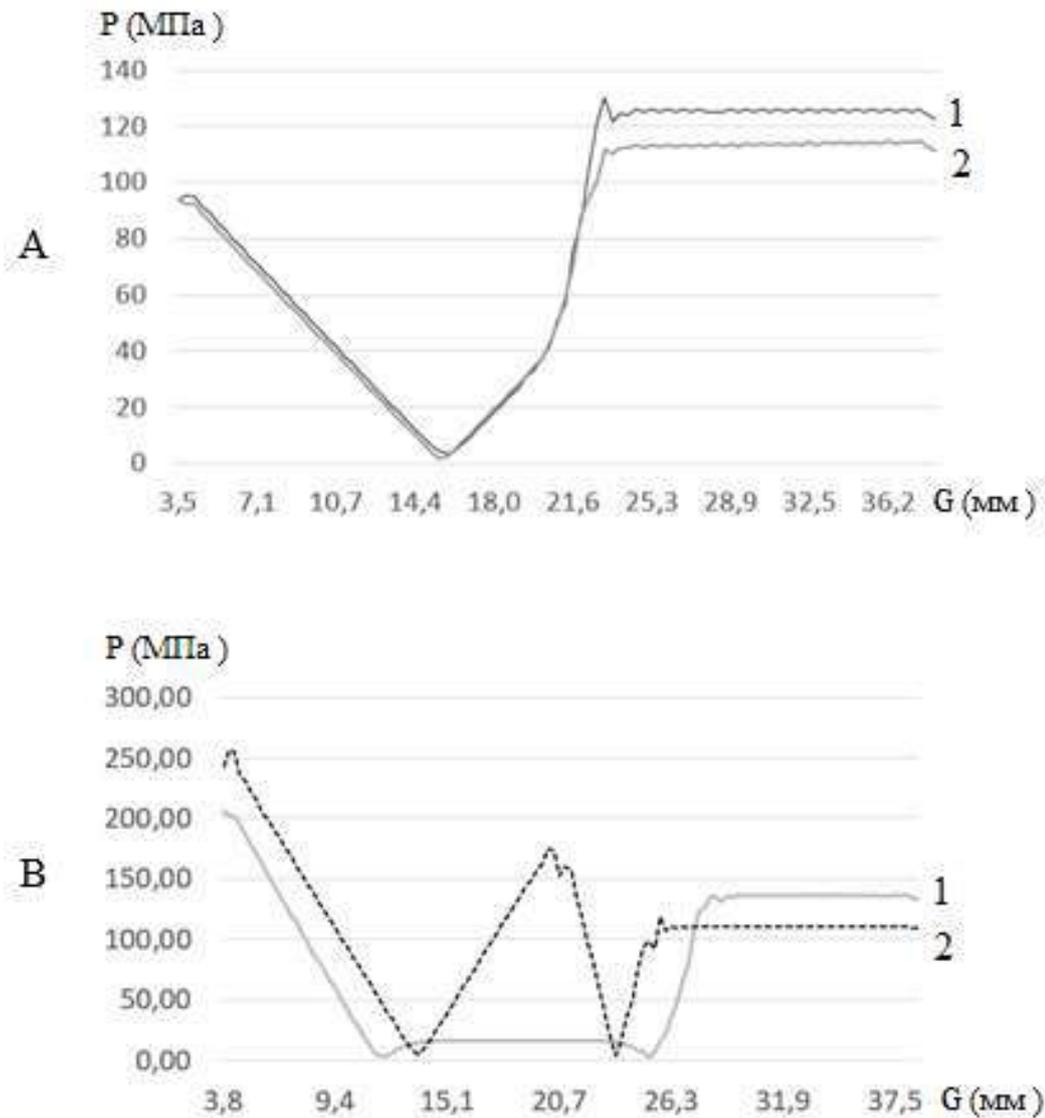


Рисунок 3.9 – Остаточные напряжения в стенках заготовки: А – при вогнутом дне; В – при выпуклом дне; Р – Остаточное напряжение; G – Высота стенки; 1 – Диаграмма напряжений левой стенки заготовки, досланной без усилий зажима; 2 – Диаграмма напряжений правой стенки заготовки, досланной без усилий зажима

Предел текучести для анализируемой стали составляет 490-740 МПа. Проведенный анализ напряжения компонентов (см. рис. 3.8 – 3.9) выявил наиболее нагруженные участки на боковых стенках заготовки, которые составляют:

- для заготовки с вогнутым дном 52-140 МПа,
- для заготовки с выпуклым дном 61-250 МПа.

Максимальные напряжения в теле тонкостенной заготовки не превосходят предела упругости, поэтому остаточных деформаций не наблюдается.

### **3.5 Анализ упруго-наследственных погрешностей закрепления нежестких коробчатых заготовок в приспособлении-спутнике**

На основании опыта филиала АО "КБП" – "ЦКИБ СОО" и анализа литературных данных было предложено модернизировать координатно-расточную операцию и перевести обработку на станок с ЧПУ Tongtai TMV-1050QII с введением специального приспособления-спутника [84]. При этом необходимо учитывать, что задача выбора эффективных технологических решений по обеспечению заданных технических характеристик ствольных коробок, должна решаться с учетом экономической эффективности и требований технологичности.

Для теоретического обоснования сущности неодинакового восстановления формы поперечного сечения провели расчет для двух случаев: 1 - угол между верхней полкой и боковой стенкой  $\varphi = 91^\circ$  (выпуклость); 2 - угол между верхней полкой и боковой стенкой  $\varphi = 89^\circ$  (вогнутость).

Вкладыш 3 (см. рис. 3.4) закрепили неподвижно. К верхним полкам тонкостенной заготовки приложили силы величиной 1000 Н, путем привинчивания прижима 2 (см. рис. 3.4). На рис. 3.10 и рис. 3.11 представлены результаты, смоделированные в программе SOLID WORKS.

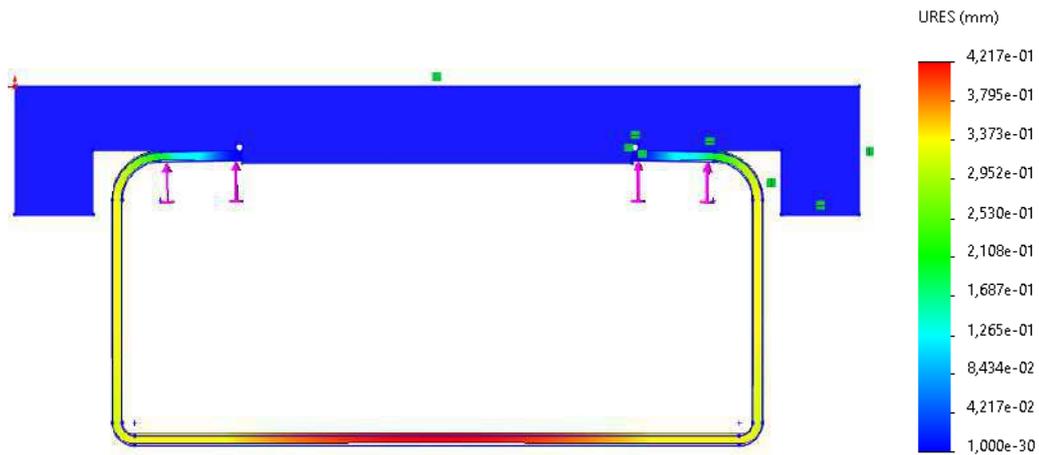


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования SOLID WORKS,  
возникающие при зажиме выпуклой заготовки

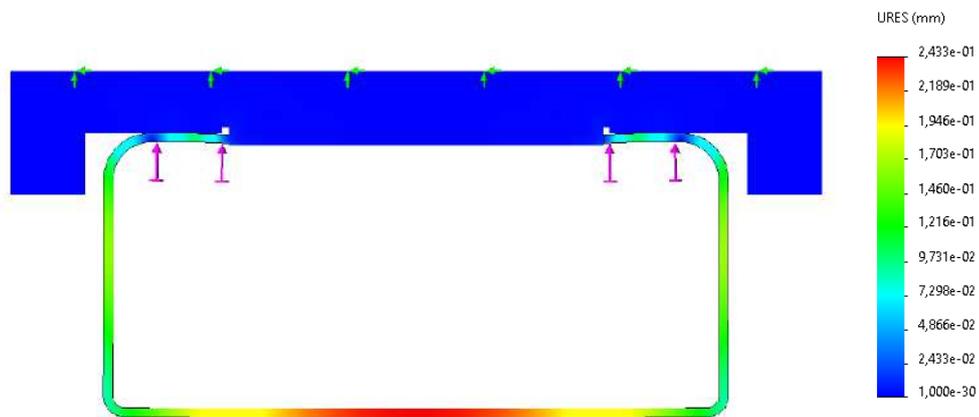


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования SOLID WORKS,  
возникающие при зажиме вогнутой заготовки

На рис. 3.12 и рис. 3.13 представлены графики результатов моделирования упругих перемещений, возникающие при зажиме выпуклой и вогнутой заготовок.

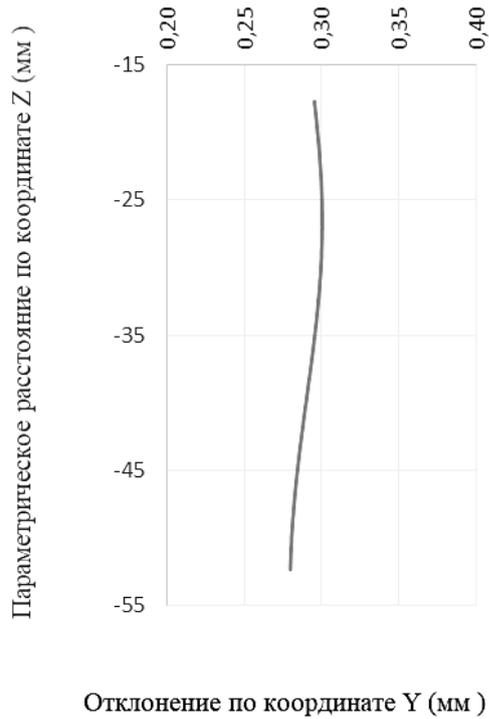


Рисунок 3.12 – Результаты моделирования упругих деформаций вертикальной стенки заготовки при зажиме для выпуклой верхней поверхности

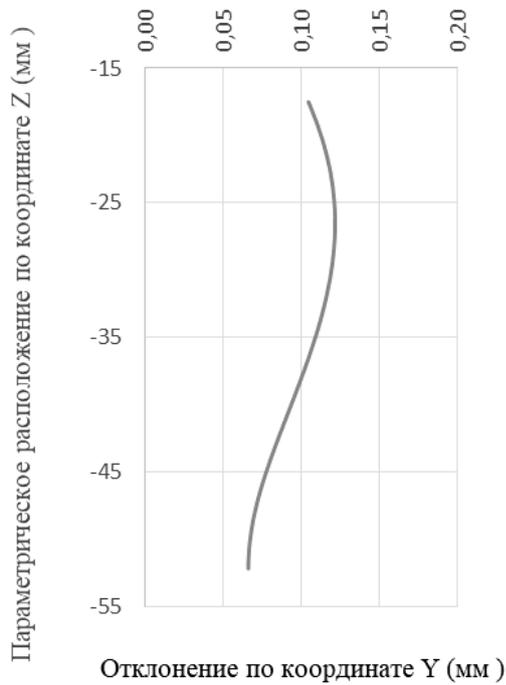


Рисунок 3.13 – Результаты моделирования упругих деформаций вертикальной стенки заготовки при зажиме для вогнутой верхней поверхности

Если заготовка имеет вогнутость, то боковые стенки изгибаются внутрь в пределах 0,1-0,2 мм. Если заготовка имеет выпуклость, то боковые стенки изгибаются наружу в пределах 0,2-0,3 мм. Проведенные расчеты подтвердили факт искривления боковых стенок при зажиме заготовок пониженной жесткости. Суммарная погрешность может достигать до 0,5 мм. Выпуклая заготовка сильнее влияет на отклонение боковой стенки, чем вогнутая. Данные погрешности необходимо учитывать при механической обработке тонкостенных деталей [54, 71].

Для подтверждения теоретических данных, на предприятии филиала АО "КБП" – "ЦКИБ СОО", была изготовлена тестовая партия деталей «Коробка» в количестве 10 шт. Перед проведением механической обработки, боковые стенки заготовки измерили на станке при помощи датчиков RMP40 фирмы RENISHAW [113]. Измерения проводили в не зажатом состоянии (нулевое положение) и после приложения сил зажима на разной высоте (рис. 3.14).

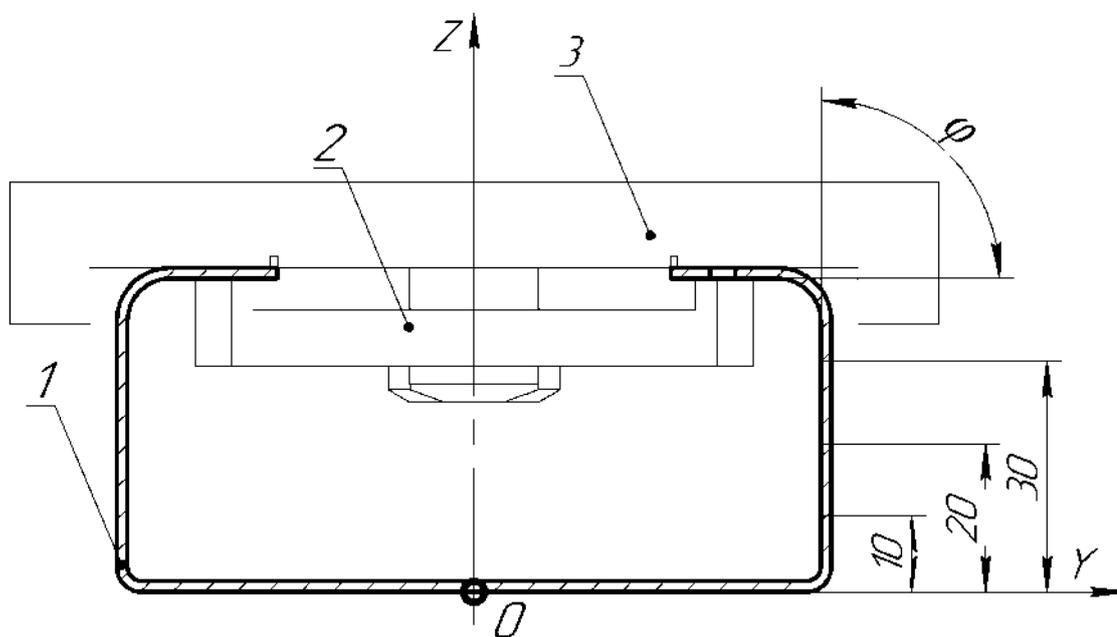


Рис. 3.14 – Схема измерения отклонений боковых стенок

Результаты измерений сведены в таблицу 3.1. В таблице представлены данные разницы между нулевым положением и под действием сил зажима.

Таблица 3.1 – Сравнительный анализ отклонений под действием сил зажима

№	Отклонение от нулевого положения заготовки на 10 мм по координате Y, (мм)	Отклонение от нулевого положения заготовки на 20 мм по координате Y, (мм)	Отклонение от нулевого положения заготовки на 30 мм по координате Y, (мм)	Угол между верхней полкой и боковой стенкой, (φ°)
1	-0,031	-0,04	-0,035	89,4
2	-0,063	-0,04	-0,022	89,3
3	0,002	0,001	0,005	90,05
4	0,152	0,137	0,108	90,85
5	-0,017	-0,025	-0,051	89,6
6	0,242	0,193	0,145	90,95
7	-0,032	-0,003	-0,013	89,8
8	0,131	0,14	0,133	90,9
9	-0,07	-0,089	0,041	89,15
10	-0,015	-0,02	-0,01	89,75

Затем производилась обработка тонкостенной заготовки, далее освобождались прижимы, и осуществлялся ещё один замер в не зажатом состоянии (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Сравнительный анализ отклонений после обработки

№	Отклонение от нулевого положения заготовки на 10 мм по координате Y, (мм)	Отклонение от нулевого положения заготовки на 20 мм по координате Y, (мм)	Отклонение от нулевого положения заготовки на 30 мм по координате Y, (мм)	Угол между верхней полкой и боковой стенкой, (φ°)
1	-0,015	-0,02	-0,02	89,40
2	-0,016	-0,014	-0,006	89,30
3	0,001	0,001	0,003	90,05
4	0,012	0,017	0,01	90,85
5	-0,007	-0,01	-0,015	89,60
6	0,03	0,012	0,009	90,95
7	-0,011	-0,002	-0,005	89,80
8	0,02	0,011	0,014	90,90
9	-0,008	-0,01	0,011	89,15
10	-0,009	-0,01	-0,005	89,75

На основе анализа табличных данных и проведенных расчетов, сделан вывод о значительных перемещениях боковых стенок заготовки при угле  $\varphi > 90^\circ$  (см. табл. 3.1), после приложения сил зажима, что оказывает влияние на выполнения координат отверстий. Ввиду своей упругости заготовка, после освобождения от сил зажима, возвращается в свое первоначальное состояние (см. табл. 3.2). В работе проведен сравнительный анализ теоретических и практических расчетов, подтверждающий перемещение боковых стенок заготовки после применения сил зажима и возвращение в свое первоначальное состояние после освобождения от прижимов.

### **Выводы**

1. При фиксации тонкостенных заготовок в конструкции специального вкладыша рекомендуется выполнять вырезы для увеличения его высоты и уменьшения количества номенклатуры приспособлений.

2. При зажиме в специальном приспособлении выпуклое дно заготовки меньше влияет на перемещение боковых стенок (0,01-0,07 мм), чем вогнутое (до 0,01-0,086 мм). Данное явление объясняется тем, что когда дно заготовки выпуклое, то боковые стенки отгибаются наружу, на неподвижную базу и на зафиксированную скобу. В том случае, когда дно заготовки вогнутое, боковые стенки отгибаются внутрь, на вкладыш, который выполнен с зазором в 0,25 мм от номинального размера заготовки.

3. При зажиме тонкостенных заготовок рекомендуется проводить базирование и фиксацию без применения усилий, в данном случае происходит меньшее по величине (порядка 0,01-0,08 мм) упругое деформирование боковых стенок заготовки, чем при фиксации с усилием (порядка 0,02-0,20 мм).

4. При обработке корпусных тонкостенных деталей в приспособлении-спутнике на точность выполнения координат отверстий значительно влияют выпуклости и вогнутости тонкостенных заготовок.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

В данной главе проведены экспериментальные исследования влияния направляющей и установочных баз на точность механической обработки деталей пониженной жесткости. Проведен корреляционный анализ связи между неплоскостностью установочной базы и выполняемыми размерами заготовки. Исследованы закономерности изменения координат отверстий тонкостенной коробчатой заготовки в специальном приспособлении.

##### 4.1 Влияние неплоскостности направляющей базы на точность механической обработки нежесткого корпуса при закреплении в специальном приспособлении

Для базирования детали по выделенным участкам  $P$  и  $M$  было изготовлено специальное приспособление-подставка (рис. 4.1) [75, 104].

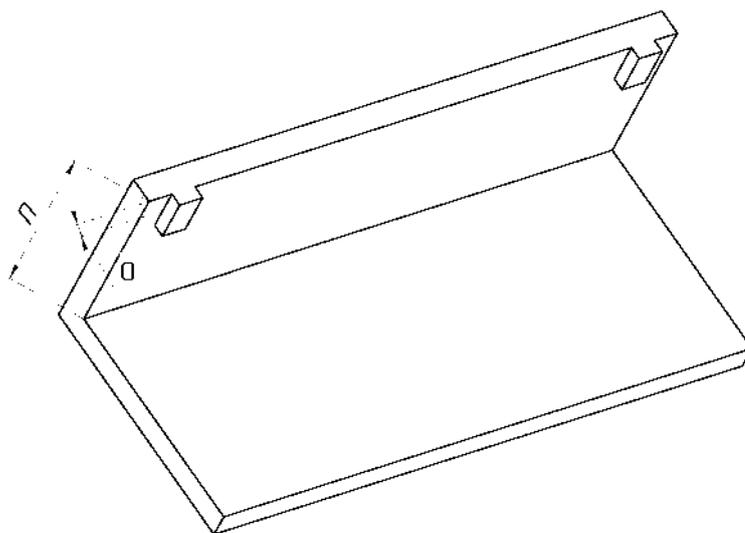


Рисунок 4.1 - Приспособление – подставка

Приспособление выполнено в виде двух пластин, на краях одной из них, направляющей базы, имеются два выступа шириной  $o$ . Высота подставки  $n$  была выбрана такой, чтобы базирующая линия  $a_1a_2$  (см. рис. 2.5), проходящая через центры выделенных участков  $a_1$ ,  $a_2$ , гарантировано находилась на плоской поверхности  $A$  (см. рис. 1.14), а не на переходных участках.

$$n = h - (1,5 \div 2)r,$$

где  $n$  – высота приспособления,

$h$  – высота детали (см. рис. 1.14),

$r$  – переходный радиус.

Толщина выступа базирующего участка  $o$  должна быть больше допуска на неплоскостность  $TFA = 0,3$  мм:  $o > TFA$ .

В специальном приспособлении-подставке изготовлена партия заготовок и проведены измерения фактических отклонений, при помощи штангенрейсмаса ШРЦ-250-0,01.

В табл. 4.1 занесены измерения приведенных выше размеров.

Таблица 4.1 – Измеренные значения размеров детали в приспособлении-подставке

$n$	$EFA$ , мм	$a$ , мм	$c$ , мм	$b$ , мм	$n$	$EFA$ , мм	$a$ , мм	$c$ , мм	$b$ , мм
1	0,05	15,05	14,86	6,85	11	0,05	14,99	14,86	6,85
2	0,05	15,03	14,84	6,86	12	0,04	15,06	14,93	6,91
3	0,04	15,01	14,85	6,85	13	0,03	14,98	14,84	6,86
4	0,05	14,99	14,82	6,83	14	0,05	14,91	14,79	6,76
5	0,03	15,01	14,86	6,85	15	0,04	15,02	14,86	6,89
6	0,04	15,05	14,91	6,89	16	0,05	14,96	14,87	6,82
7	0,05	14,98	14,81	6,82	17	0,32	15,03	14,85	6,89
8	0,04	14,95	14,79	6,81	18	0,04	14,91	14,79	6,75
9	0,05	15,02	14,81	6,87	19	0,03	14,98	14,87	6,85
10	0,04	14,97	14,83	6,81	20	0,05	15,06	14,91	6,89

Результаты корреляционного анализа связи между переменными  $EFA$  и  $a$ ,  $c$ ,  $b$  выполнены в системе STATISTICA. В данной выборке коэффициент корреляции между переменными составляет:

- 1)  $a$  и  $EFA = 0,1763$  при значении  $p$ -уровня  $p < 0,05$ ;
- 2)  $c$  и  $EFA = 0,2332$  при значении  $p$ -уровня  $p < 0,05$ ;
- 3)  $b$  и  $EFA = 0,0083$  при значении  $p$ -уровня  $p < 0,05$ .

Полученные уравнения регрессии при новом варианте технологии представлены ниже:

$$a = 14,991 + 0,12571EFA, \quad (4.1)$$

$$c = 6,8365 + 0,15755EFA, \quad (4.2)$$

$$b = 14,848 + 0,002EFA. \quad (4.3)$$

На рис. 4.2-4.4 представлены графики регрессионных уравнений зависимости размеров  $a$  ( $15\pm 0,1$ ),  $c$  ( $7h14$ ),  $b$  ( $15h13$ ) от неплоскостности базовой поверхности  $EFA$ .

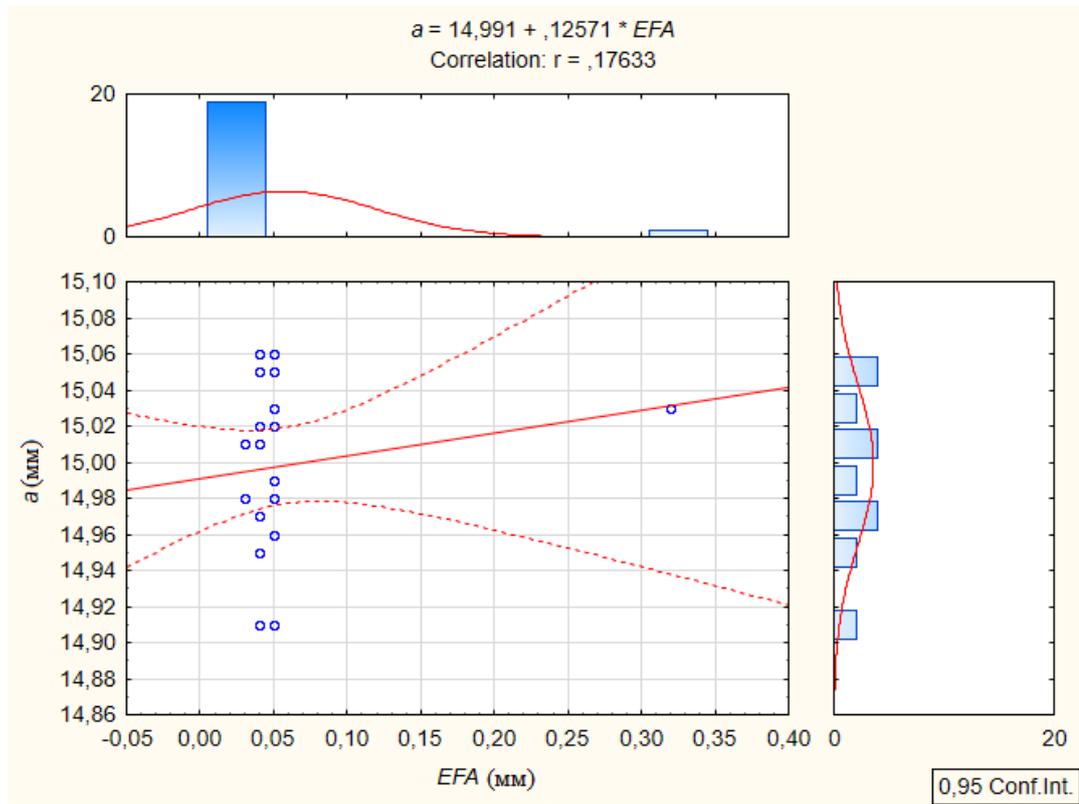


Рисунок 4.2 – График регрессионного уравнения зависимости координаты отверстия  $a$  от неплоскостности  $EFA$  базовой поверхности

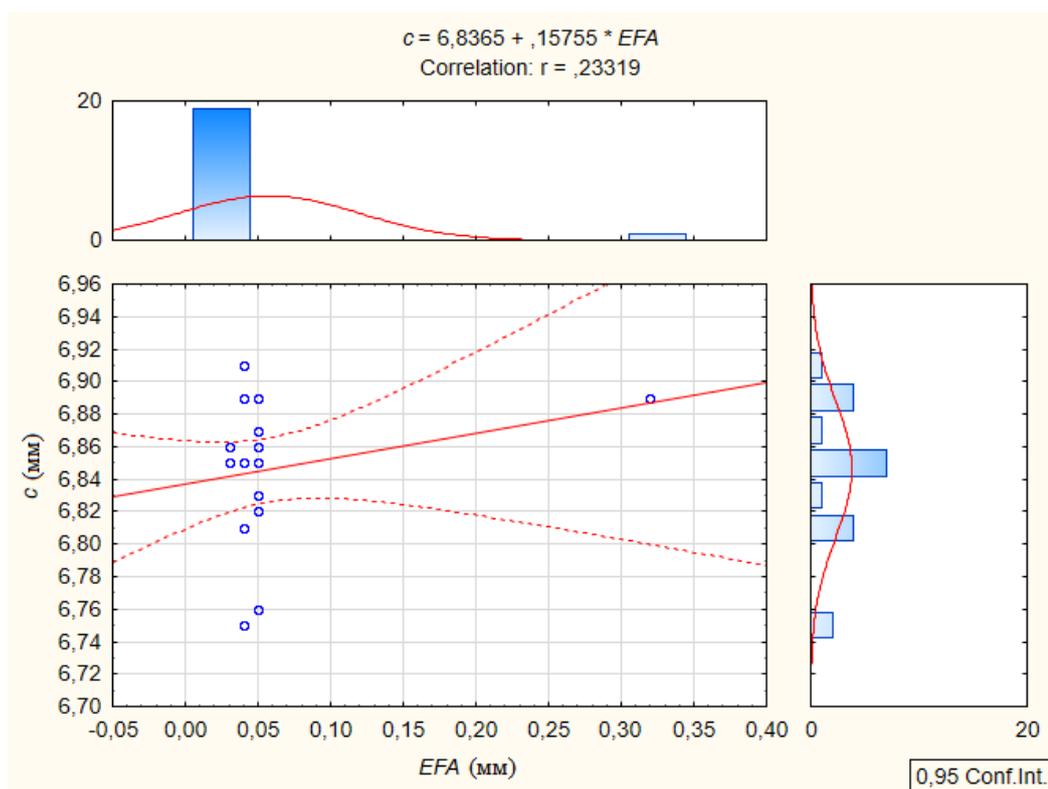


Рисунок 4.3 – График регрессионного уравнения зависимости размера  $c$  от неплоскостности  $EFA$  базовой поверхности

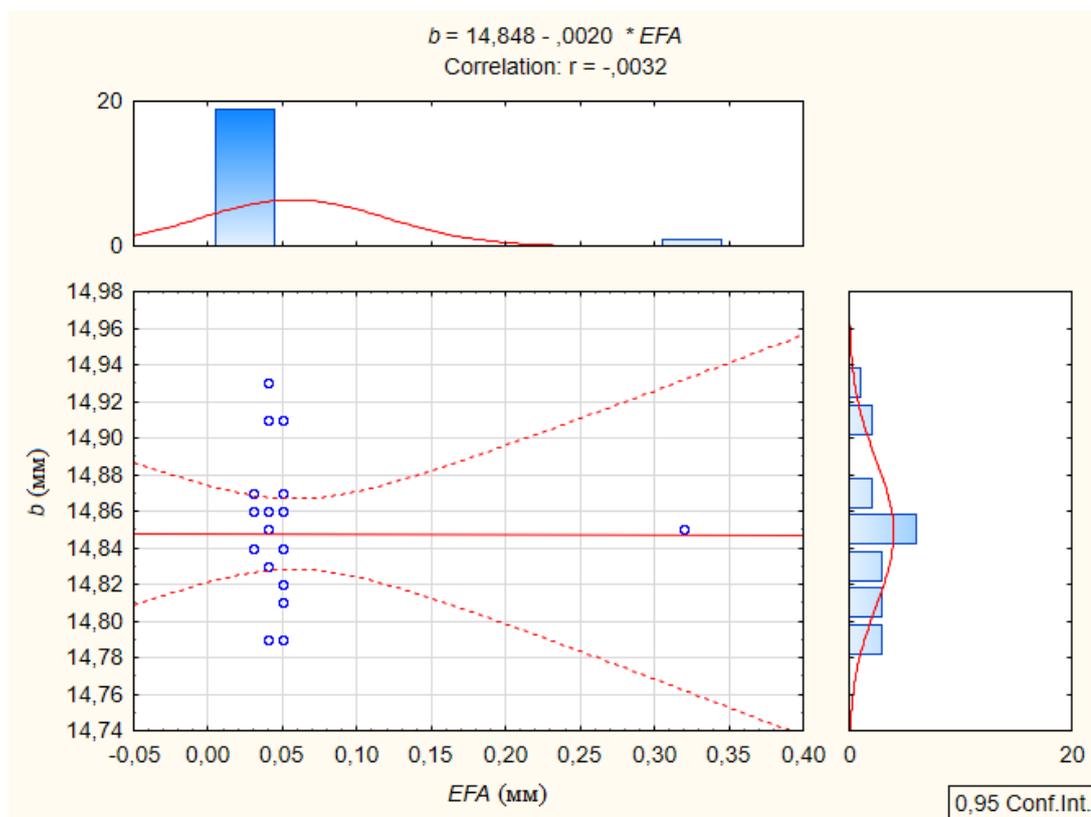


Рисунок 4.4 – График регрессионного уравнения зависимости размера  $b$  от неплоскостности  $EFA$  базовой поверхности

Сопоставление коэффициентов при *EFA* для переменных *a*, *c*, *b* представленных на графиках (см. рис. 2.3-2.5) и рис. 4.2-4.4 показывает, что предложенный способ выделения измерительных и технологических зон в протяженных тонкостенных деталях обеспечивает единство баз, тем самым обеспечивая точность изготовления корпусных тонкостенных деталей.

#### **4.2 Влияние пружинения нежесткого корпуса на точность механической обработки в специальном приспособлении**

В работе [108] исследован процесс экструзии тонкого коробчатого профиля и показано, что самый быстрый поток вертикальных ребер профиля вызывает специфическое ухудшение формы. То есть известные способы формообразования коробчатых профилей не позволяют получать их без искажения. При дополнительной деформации тонкостенных профилей происходит значительная деформация поперечного сечения [83, 97, 101]. В работе [88] исследованы деформации коробчатых комплексов с помощью теории графов. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных результатов и численных расчетов для значений горизонтального и вертикального прогиба стенки, а также для экспериментальных, расчетных и численных характеристик изгибающего момента, причем, не только для закрытых, но и для незакрытых коробчатых профилей. Локальные дефекты дополнительно увеличивают чувствительность профилей прямоугольного полого сечения к образованию погрешности формы [93, 94].

В работе [25] показано, что в результате гибки заготовок из стального листа с высоким пределом прочности и упругости наблюдается эффект пружинения, когда угол сгиба оказывается больше угла штампа. При выборе режимов обработки давлением большое значение придают механическим свойствам листовых материалов [53, 56, 102], которые существенно зависят от принятых режимов термической обработки [70, 87].

В работе [30] были приведены методика и результаты математического моделирования упругих перемещений стенок нежесткого корпуса из листа 1,5 ГОСТ 19904-90 стали 30ХГСА при закреплении в приспособлении для

механической обработки. Анализируемые упругие перемещения стенок обусловлены упругой деформацией выпуклого или вогнутого дна коробки при доведении её до плотного контакта с базовой поверхностью приспособления путем приложения сил зажима через верхние незамкнутые полки корпуса и дополнительный призматический вкладыш. Установлено, что вид отклонения от плоскостности дна заготовки влияет на величину пружинения стенок корпуса.

На рис. 4.5 представлены схема приложения сил закрепления к нежесткому коробчатому корпусу в приспособлении, в котором заготовку досылали до неподвижной установочной базы и при помощи регулируемой скобы 5 и винта 6 фиксировали без применения усилий зажима.

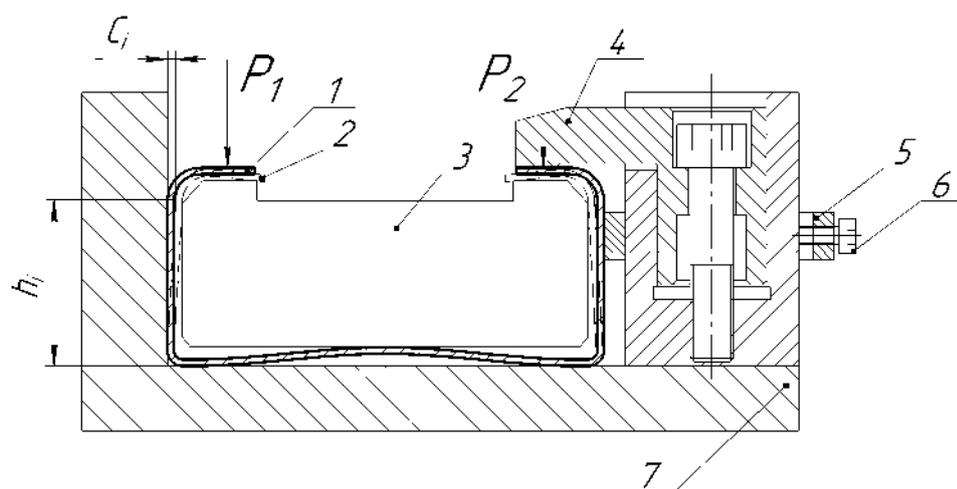


Рисунок 4.5 – Схема приложения сил закрепления к нежесткому коробчатому корпусу в приспособлении: 1 – корпус до зажима; 2 – корпус после зажима; 3 – вкладыш; 4 – прижим; 5 – скоба; 6 – винт; 7 – корпус приспособления

В расчете приняли предельно допустимую неплоскостность дна корпуса, равную 0,3 мм. Показаны результаты расчетов для случая, когда дно корпуса вогнутое (рис. 4.6, А) и выпуклое (рис. 4.6, В). Как видно из рис. 4.5 вкладыш 3 для коробчатого корпуса с вогнутым дном должен иметь высоту меньшую, чем вкладыш 3 для коробчатого корпуса с выпуклым дном на величину фактической неплоскостности дна корпуса  $EFB$  (см. рис. 1.14), что потенциально увеличивает прогиб базовой стенки  $B$ .

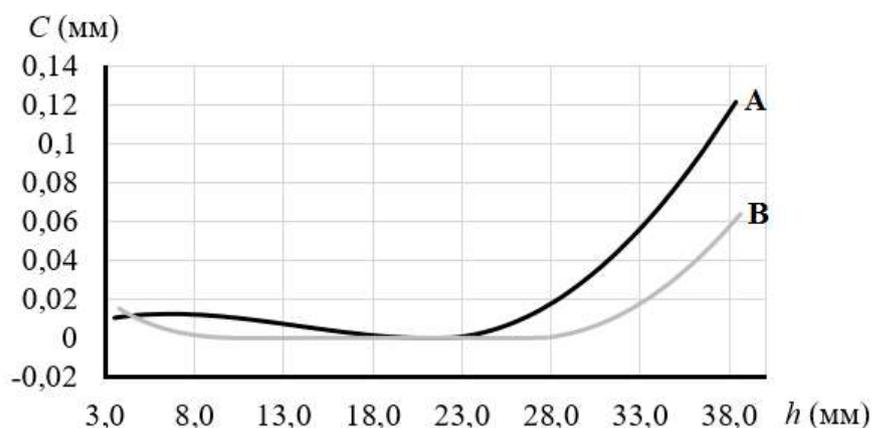


Рисунок 4.6 – Результаты моделирования перемещения базовой стенки нежесткого коробчатого корпуса *A* при зажиме с вкладышем: *A* – кривая перемещений базовой стенки корпуса при вогнутом дне *B*; *B* – кривая перемещений базовой стенки корпуса при выпуклом дне; *C* – отклонение стенки; *h* – высота стенки

Сопоставление кривых *A* и *B* показывает, что при заданных условиях и принятых допущениях кривая *A* перемещений базовой стенки корпуса при вогнутом дне на высоте замера более 23 мм предполагает примерно в 2 раза большие перемещения, чем для кривой *B* перемещений базовой стенки корпуса при выпуклом дне.

#### 4.2.1 Экспериментальные исследования и методика эксперимента влияния пружинения заготовки на точность механической обработки

Для оценки точности выполнения размеров *a*, *b*, *c*, заданными в пределах соответственно:  $15 \pm 0,1$ ,  $15h13(-0,27)$ ,  $7h14(-0,36)$ , были изготовлены две тестовых партии нежестких коробчатых корпусов в количестве 50 штук.

Для попадания в поле допуска размеров *a*, *b*, *c*, в управляющей программе фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ номиналы координат были настроены на середину полей допусков, равных соответственно 15; 14,865; 6,82 мм, поэтому в измеренных размерах подавляющее большинство близки к данным величинам. Несоответствие некоторых выполненных размеров объясняется наличием у нежесткого коробчатого корпуса дополнительных отклонений (например, неплоскости боковых

поверхностей, неперпендикулярности боковых стенок относительно верхних плоских полок). В первую партию (№№1÷25) были отобраны корпуса с неплоскостью базовой поверхности в виде вогнутостей, во вторую (№№26÷50) - в виде выпуклостей.

При измерениях использовали координатно-измерительную машину модели Аxiom too с ЧПУ и индикатор часового типа (ГОСТ 577-68) с ценой деления 0,01 мм. Измерения размеров проводилось на высоте  $h = 35$  мм от дна коробчатого корпуса, как наиболее близкую к предельным значениям высоты в математическом эксперименте (см. рис. 1.14). Результаты экспериментов сведены в табл. 4.2

Таблица 4.2 Измеренные размеры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  в зависимости от неплоскости дна нежесткого коробчатого корпуса  $EFB$

$n$	Дно вогнутое				$n$	Дно выпуклое			
	$EFB$ , мм	$c$ , мм	$b$ , мм	$a$ , мм		$EFB$ , мм	$c$ , мм	$b$ , мм	$a$ , мм
1	0,16	14,83	6,78	14,95	26	0,1	14,86	6,8	14,98
2	0,12	14,85	6,79	14,97	27	0,26	14,8	6,78	14,95
3	0,21	14,81	6,76	14,93	28	0,15	14,85	6,79	14,97
4	0,20	14,82	6,77	14,94	29	0,12	14,85	6,8	14,99
5	0,15	14,83	6,78	14,96	30	0,15	14,83	6,78	14,98
6	0,2	14,8	6,75	14,94	31	0,18	14,84	6,79	14,96
7	0,1	14,84	6,78	14,97	32	0,23	14,82	6,78	14,95
8	0,16	14,83	6,77	14,96	33	0,21	14,83	6,78	14,95
<b>9</b>	<b>0,3</b>	<b>14,76</b>	<b>6,7</b>	<b>14,89</b>	34	0,2	14,83	6,79	14,96
10	0,15	14,85	6,8	14,97	35	0,2	14,84	6,78	14,97
11	0,29	14,77	6,71	14,87	36	0,11	14,85	6,8	14,98
12	0,11	14,87	6,81	14,98	37	0,18	14,83	6,79	14,97
13	0,12	14,85	6,79	14,97	<b>38</b>	<b>0,28</b>	<b>14,81</b>	<b>6,78</b>	<b>14,95</b>
14	0,12	14,86	6,81	14,98	39	0,12	14,86	6,79	14,98
15	0,28	14,79	6,73	14,91	40	0,24	14,81	6,78	14,95
16	0,15	14,82	6,77	14,95	41	0,11	14,85	6,79	14,98
17	0,23	14,79	6,74	14,92	42	0,14	14,84	6,79	14,97
18	0,19	14,81	6,75	14,94	43	0,26	14,81	6,78	14,94
19	0,26	14,78	6,72	14,91	44	0,25	14,81	6,78	14,95
20	0,27	14,77	6,71	14,9	45	0,14	14,85	6,79	14,98
21	0,21	14,8	6,75	14,93	46	0,12	14,85	6,8	14,98
22	0,26	14,79	6,74	14,91	47	0,23	14,82	6,78	14,96
23	0,25	14,8	6,75	14,92	48	0,24	14,81	6,78	14,95
24	0,23	14,81	6,75	14,94	49	0,1	14,85	6,79	14,99
25	0,21	14,81	6,76	14,93	50	0,15	14,84	6,79	14,98

В таблице для наглядности выделены жирным шрифтом максимальные значения неплоскостности дна, а курсивом – минимальные, а также соответствующие им значения переменных размеров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

Сопоставление максимальных значений фактических погрешностей детали по размеру  $y$  (см. табл. 4.2) и перемещений боковых стенок нежесткого коробчатого корпуса, полученных моделированием (см. рис. 4.6), показывает их близкое совпадение. Причем опытные данные подтверждают выводы математического моделирования о том, что вогнутость дна оказывает более сильное влияние на размеры, чем выпуклость.

Результаты корреляционного анализа связи между переменными  $EFB$  и  $c$ ,  $b$ ,  $a$  выполненные в системе STATISTICA. В данной выборке коэффициенты корреляции между переменными  $c$  и  $EFB$ ,  $b$  и  $EFB$ ,  $a$  и  $EFB$  соответственно составляют:

- для вогнутого дна нежесткого коробчатого корпуса соответственно -0,9448; -0,9314; -0,9596;
- для выпуклого дна нежесткого коробчатого корпуса составляют -0,9408; -0,8262; -0,9330.

Для вогнутого дна корпуса уравнения регрессии имеют вид:

$$c = 14,904 - 0,4584EFB ; \quad (4.4)$$

$$b = 6,8506 - 0,4656EFB ; \quad (4.5)$$

$$a = 15,028 - 0,4598EFB . \quad (4.6)$$

Для выпуклого дна корпуса уравнения регрессии имеют вид:

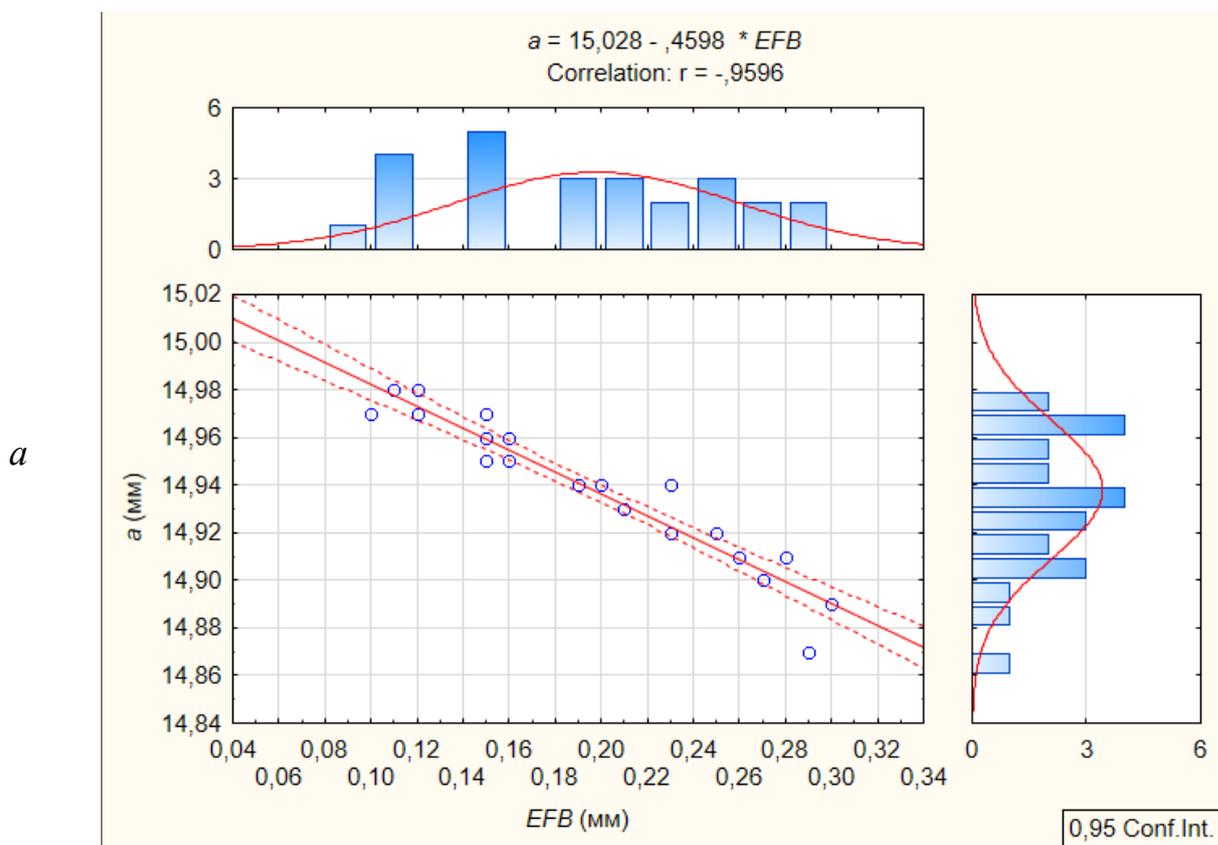
$$c = 14,886 - 0,2917EFB ; \quad (4.7)$$

$$b = 6,806 - 0,1049EFB ; \quad (4.8)$$

$$a = 15,01 - 0,2399EFB . \quad (4.9)$$

Как пример визуального представления регрессионных уравнений на рис. 4.7 и рис. 4.8 приведены графики изменения размеров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  от вогнутости и выпуклости базовой поверхности корпуса  $EFB$ . На графике

кроме точек, соответствующих параметрам эмпирических значений переменных  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $EFB$ , нанесена линия (сплошная) линейной регрессии и две линии (пунктирных) 95 % доверительных интервалов для регрессионной зависимости.



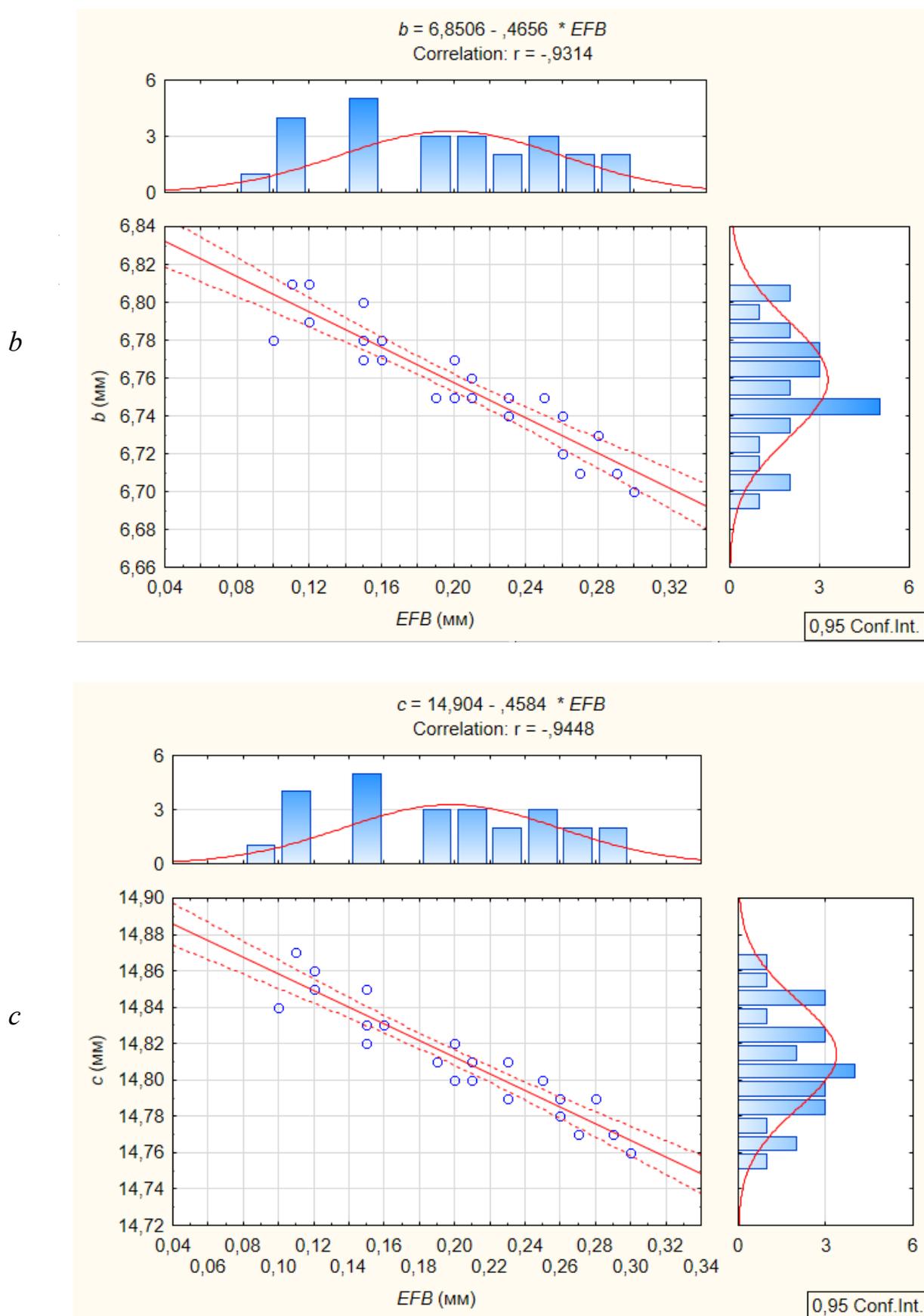
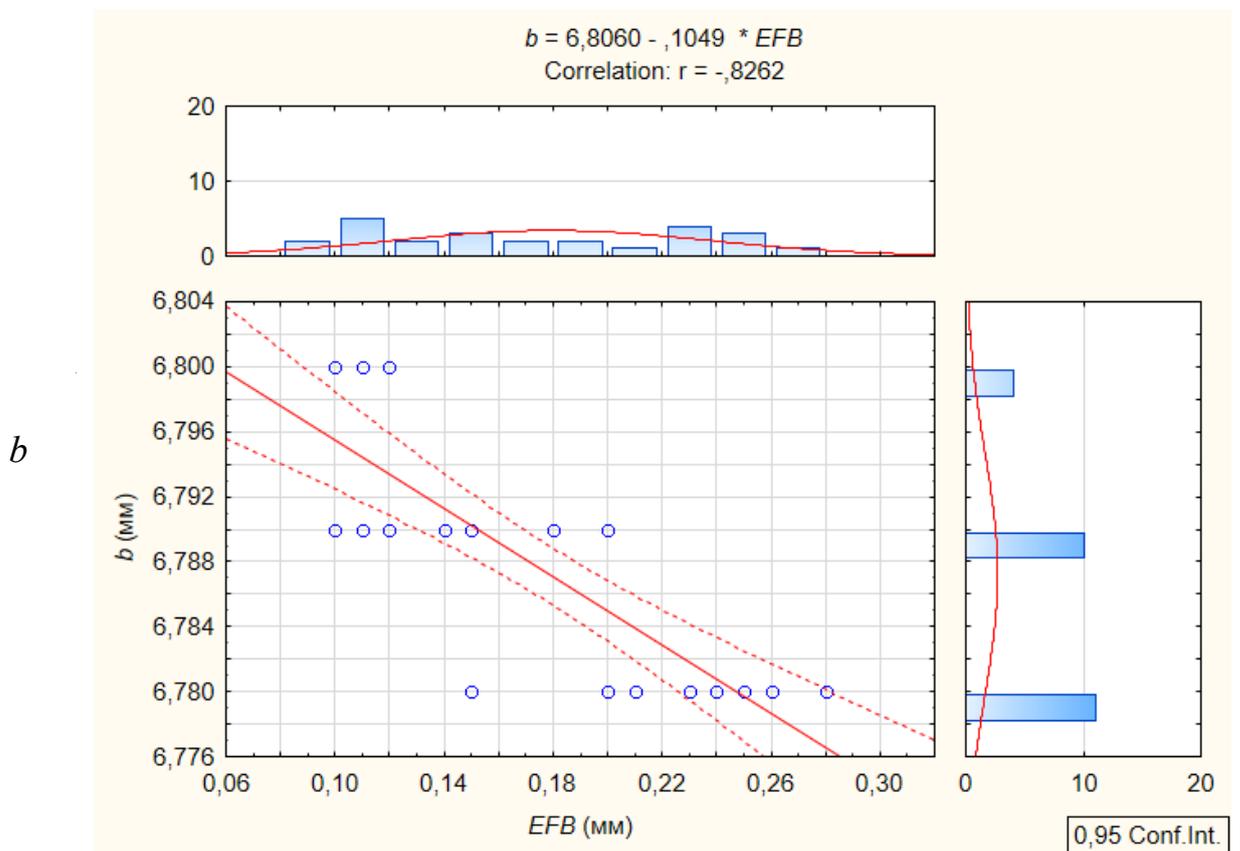
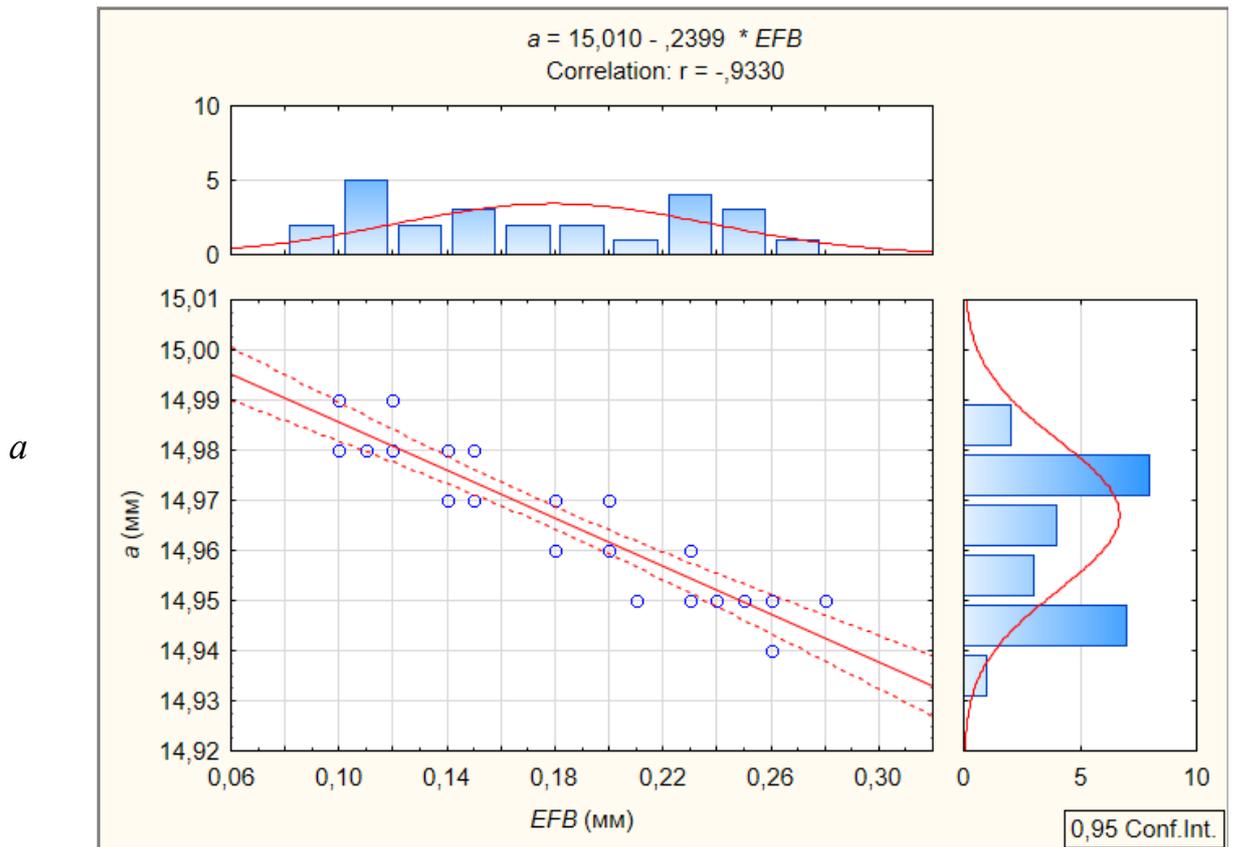


Рисунок 4.7 – Графики регрессионных зависимостей размеров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  от вогнутости базовой поверхности  $EFB$  дна нежесткого коробчатого корпуса



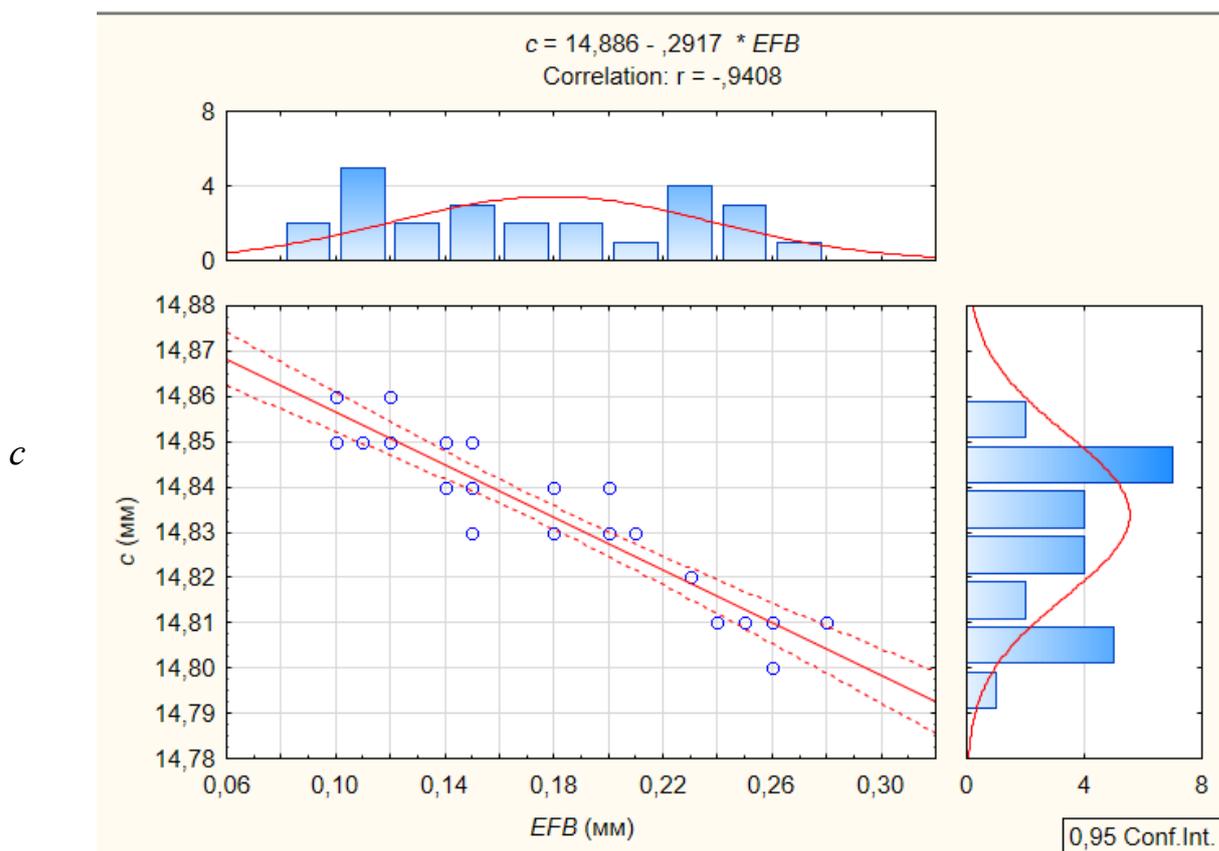


Рисунок 4.8 – Графики регрессионных зависимостей размеров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  от выпуклости базовой поверхности  $EFB$  дна нежесткого коробчатого корпуса

Если принять максимально допустимое значение  $EFB = TFB = 0,3$  мм, то, в соответствии с уравнениями (4.4-4.9), максимальное влияние будет оказано на размер  $b$  для вогнутого дна корпуса (4.5):  $E_b = 0,3 \times 0,4656 = 0,13968 \approx 0,14$  мм, что составляет 38,9 % от допуска  $T_b = 0,36$  мм.

Данные показывают, что неплоскостность дна корпуса существенно влияет на точность выполнения размеров чертежа нежесткого коробчатого корпуса, поэтому необходимо учитывать возможные перемещения боковых стенок нежесткого коробчатого корпуса при неплоскостности его дна и вводить при необходимости дополнительную правку данной поверхности.

Моделирование показывает, что при заданных условиях и принятых допущениях перемещения стенки заготовки при вогнутом дне на высоте

замера более 23 мм предполагает примерно в 2 раза большие перемещения, чем для стенки заготовки при выпуклом дне.

Сопоставление регрессионных зависимостей размеров детали и перемещения моделирования перемещений боковых стенок нежесткого коробчатого корпуса подтверждает, что неплоскостность дна оказывает более сильное влияние на размеры, когда дно нежесткого коробчатого корпуса вогнутое.

Когда дно нежесткого коробчатого корпуса вогнутое, то боковые стенки отгибаются внутрь, на вкладыш, выполненный по ширине с гарантированным зазором относительно габаритного размера  $m$  (см. рис. 1.14) нежесткого коробчатого корпуса  $l$  (см. рис. 4.5). Чем больше вкладыш  $2$  будет соответствовать габаритному размеру  $m$  нежесткого коробчатого корпуса  $l$ , тем меньше будет возможное перемещение боковых стенок при вогнутом дне нежесткого коробчатого корпуса (см. рис. 4.5). Аналогичное влияние оказывает уменьшение высоты вкладыша  $3$  (см. рис. 4.5) для коробчатого корпуса с вогнутым дном на величину фактической неплоскостности дна корпуса  $EFB$ .

Когда дно нежесткого коробчатого корпуса выпуклое, то боковые стенки отгибаются наружу, на неподвижную базу и на зафиксированную скобу, что лимитирует допускаемые перемещения. Вкладыш  $3$  (см. рис. 4.5) при этом может иметь максимальную высоту, что уменьшает возможные прогибы базовой стенки  $A$  (см. рис. 1.14).

#### **4.2.2 Разработка способа фиксации нежесткой призматической заготовки с незамкнутой верхней поверхностью при механической обработке на станке**

Рассмотрим способы фиксации заготовок, преимущественно малой жесткости при их механической обработке на станках.

Известен способ фиксации тонкостенной заготовки путем установки опор в точках наименьшей жесткости детали при помощи подпорок, винтового домкрата и других стандартных приспособлений, выставляемых

вручную при фиксации заготовки на столе станка [28, 65]. Наличие значительных затрат времени при установке дополнительных опор вручную является недостатком данного способа.

Известен способ фиксации нежесткой заготовки, включающий её базирование при помощи самоустанавливающихся подпружиненных опор. Данные опоры снабжены вакуумными присосками [14]. Недостатком данного способа является трудоемкость изготовления и неопределенность базирования, ввиду наличия на установочной базе более трех степеней свободы.

Технической задачей разработанного способа, является повышение точности обработки заготовок преимущественно малой жесткости и с большими погрешностями формы.

Решение поставленной технической задачи достигается тем, что заготовку базируют на плоскую плиту, воздействуя на незамкнутую верхнюю поверхность заготовки при помощи прижимов 3 (рис. 4.9), в результате дно заготовки 1 (рис. 4.9) упруго деформируют при закреплении через жесткий призматический вкладыш 2 до номинального положения установочной базы путем приложения распределенной силы.

На рисунке 4.9 изображен начальный контакт вкладыша 2 с выпуклым дном и дна с плоской базовой поверхностью заготовки 1.

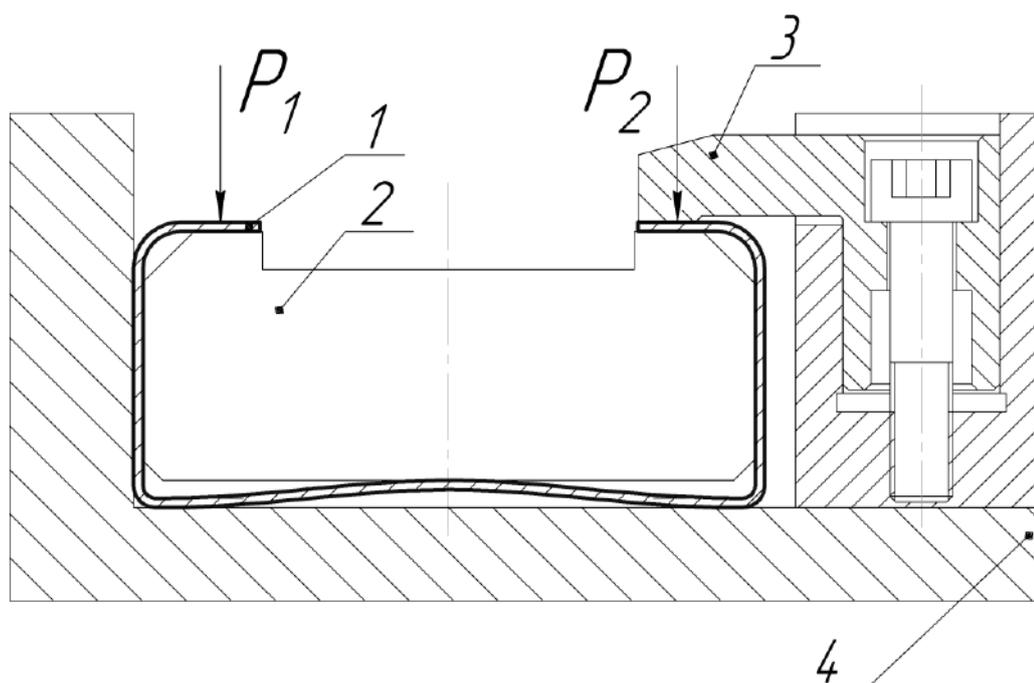


Рисунок 4.9 – Схема начального контакта вкладыша 2 с плоской базовой поверхностью заготовки 1

На рис. 4.10 изображено выпрямленное через жесткий призматический вкладыш 2 дно заготовки 1 в конце рабочего хода зажима.

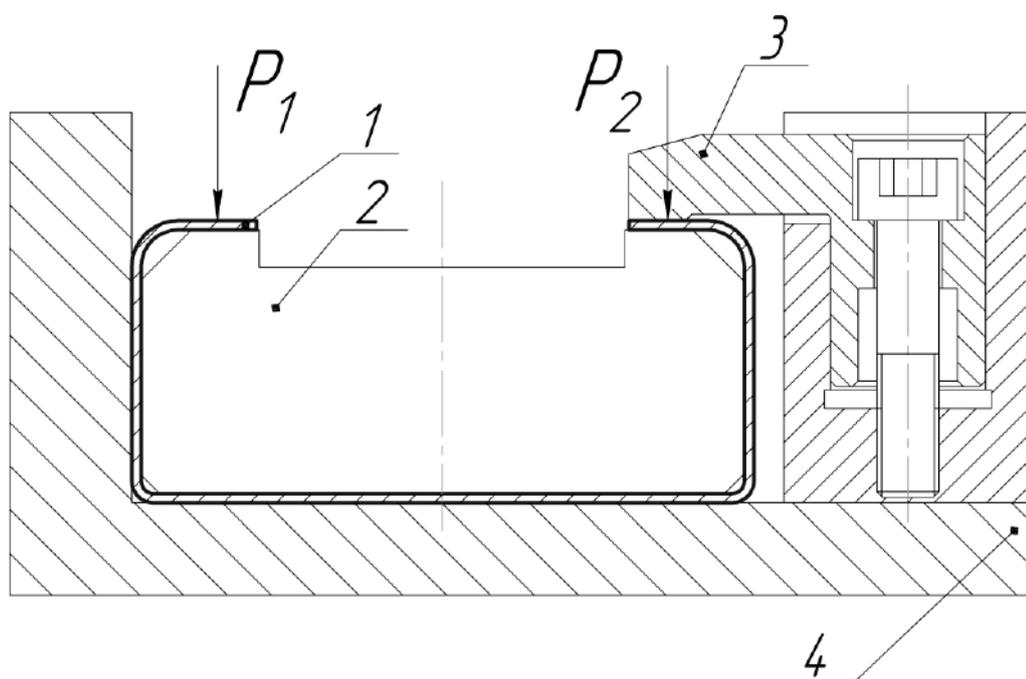


Рисунок 4.10 – Схема выпрямленного положения заготовки 1

Способ фиксации нежесткой призматической заготовки с незамкнутой верхней поверхностью при механической обработке на станке [15] осуществляется следующим образом: в заготовку 1 (см. рис. 4.9)

устанавливают вкладыш 2. Собранный конструкцией базируют на плоскую плиту 4 приспособления (см. рис. 4.9). Затем на незамкнутую верхнюю поверхность заготовки воздействуют с помощью прижимов 3 равными силами  $P_1$  и  $P_2$ , которые прижимают незамкнутую верхнюю поверхность заготовки к жесткому призматическому вкладышу 2, который, в свою очередь, передает силовое воздействие в виде распределенной силы на дно нежесткой призматической заготовки, плотно прижимая его к базовой плоскости приспособления (см. рис. 4.10).

Данный способ позволяет повысить точность обработки заготовок, преимущественно малой жесткости, при их механической обработке на станке, за счет упругого деформирования дна заготовки при закреплении, путем воздействия прижимов на незамкнутую верхнюю поверхность заготовки с передачей силового воздействия в виде распределенной силы через вкладыш на дно заготовки.

#### **4.3 Закономерности изменения координат отверстий детали в приспособлении-спутнике**

При фиксации заготовки в специальных приспособлениях для обработки отверстий правую и левую полки фиксируют в одной плоскости, изменяя их начальное положение путем упругого изгиба. Поскольку полки связаны с вертикальными стенками заготовки, то они также будут подвержены упругому изгибу [25, 105], что приводит к изменению положения измерительной базы. Для компенсации колебания положения измерительной базы использовали известный прием [113], заключающийся в том, что после фиксации заготовки и установки её на станке с помощью датчика RMP40 измеряют фактическое положение базы и вносят коррекцию в управляющую программу станка [31, 41 90]. Схема замеров координаты  $w$  отверстия  $\varnothing s$  (см. рис. 1.15) показана на рис. 4.11

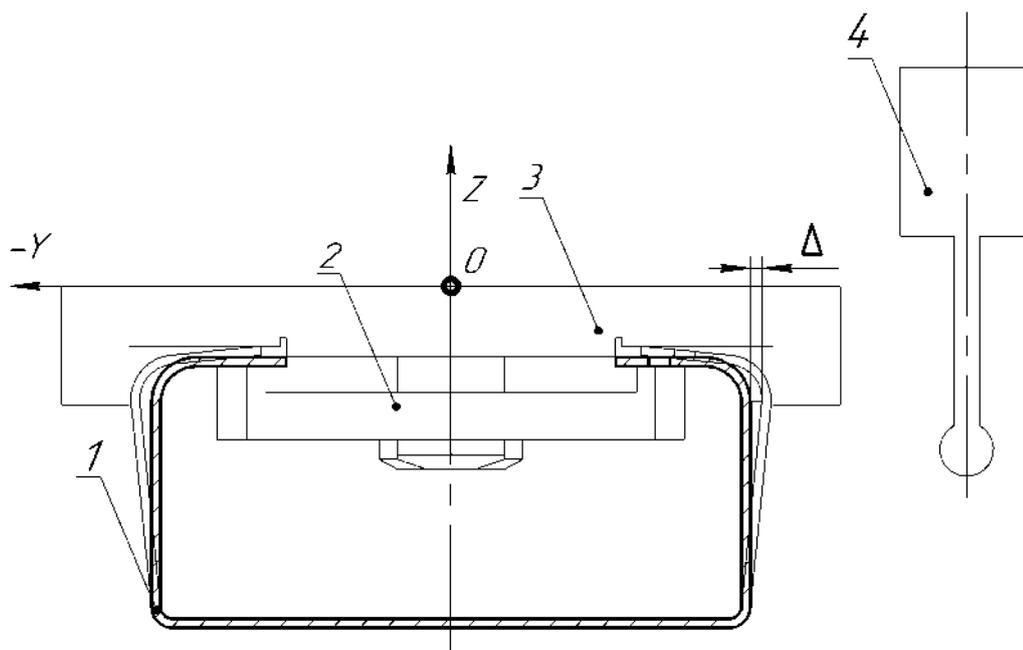


Рисунок 4.11 – Схема замеров координаты Y: 1 – заготовка; 2 – прижим; 3 – вкладыш; 4 – датчик RMP 40; ZY – система координат станка

После обработки и раскрепления заготовки измерили получившиеся координаты просверленных отверстий (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Координаты просверленных отверстий, мм

№ детали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фактическое значение координаты $15 \pm 0,1$	14,62	14,45	14,36	14,29	15,23	14,6	14,76	14,39	14,63	14,8

Данные табл. 4.4 показывают, что, несмотря на компенсацию фактического положения измерительной базы по оси Y, координаты  $w$  просверленных отверстий  $\varnothing s$  (см. рис. 1.15) выходят за допускаемые пределы и составляют от 14,29 до 14,8 мм. Очевидно, что упругое восстановление положения элементов сечения происходит неодинаково для разных заготовок. Необходимо проведение мероприятий по компенсации упругого деформирования заготовок.

### **4.3.1 Ручная компенсация изменения координат отверстий детали в приспособлении-спутнике**

В процессе обработки отверстий в тонкостенных заготовках особенно заметны возникающие в результате их закрепления в специальных приспособлениях упругие деформации [92, 99]. Несмотря на то, что наружная поверхность заготовки после освобождения от сил зажима принимает близкую к первоначальной форму, координаты отверстий смещаются и искажаются.

Этот факт требует учета возникновения возможных искажений при закреплении корпусных тонкостенных заготовок в специальных приспособлениях станка в процессе обработки. В практике технологии машиностроения известны следующие способы установки заготовок на станках:

- установка заготовки с выверкой её положения относительно рабочих элементов станка;
- установка заготовки без выверки её положения относительно рабочих элементов станка.

Установка с выверкой предполагает, что заготовка размещается непосредственно на столе станка, и не обеспечивает высокую точность положения заготовки на станке без дополнительной выверки. Установка без выверки предполагает размещение заготовки в специальном станочном приспособлении, и обеспечивает высокую точность её положения на станке без дополнительной выверки [80, 109]. Недостатками данных способов является продолжительное время выверки, так как необходимо контролировать положение обрабатываемых поверхностей заготовки с помощью рейсмасов, линеек, уровней и других средств измерения. Применительно к нежестким призматическим заготовкам, вышеуказанная выверка не учитывает упругую деформацию тонкостенных деталей. Так как при зажиме тонкостенные заготовки искажаются, затем происходит выверка

и последующая обработка, а после освобождения от сил зажима деталь возвращается в свое первоначальное положение.

Получение требуемой точности взаимного расположения поверхностей обрабатываемой нежесткой призматической заготовки требует выверки правильности ее положения. С этой целью рассмотрим вариант выверки тонкостенной, коробчатой заготовки на размер, закрепленной в станочных тисках. Для настройки необходимо выполнить следующие действия [109]:

1. Установить заготовку в тисках, слегка закрепив ее.
2. Произвести досыл заготовки до баз с использованием ударных инструментов с мягким бойком до плотного ее прилегания. В случае прогиба заготовки в тисках необходимо применить вкладыши или клинья.
3. Окончательно закрепить заготовку.
4. С помощью индикатора, закрепленного на оправке, вставленной в шпиндель, подвести к базовой поверхности и нагрузить индикатор на определённую величину (например, на 1 мм) и установить на индикаторе значение «0».
5. Переместить стол станка на требуемый размер.
6. Произвести обработку заготовки.
7. Разжать тиски, снять деталь.

Предложенные ранее универсальные методы закрепления корпусных тонкостенных заготовок не обеспечивали выполнения заданных требований чертежа или приводили к удорожанию конструкции приспособлений. Поэтому в настоящее время для установки заготовок на станки с ЧПУ разрабатывают соответствующие методики [4, 37, 50, 58, 82, 91, 95, 115].

#### **4.3.2 Автоматизация выверки нежестких коробчатых заготовок на станках с ЧПУ**

Рассмотрим способы, относящиеся к выверке заготовок на станках, преимущественно малой жесткости и имеющих призматическую (коробчатую), сложную пространственную форму при их механической обработки.

Известен способ фиксации заготовки за счет применения дополнительной поддержки в процессе обработки. Данный способ реализован за счет применения подвижных опор, перемещаемых вдоль заготовки, согласованно с перемещениями движения резца. Недостатком способа является сложность его осуществления и дороговизна устройства [14, 17].

Известен способ фиксации тонкостенных заготовок при помощи станка со специальным подвижным порталом, предназначенным для поддержания заранее сформированной заготовки. Недостатком данного способа является его высокая стоимость и ограниченность применения [14, 18].

Известен способ базирования нежестких заготовок при помощи опор, выполненных в виде эластичных мешков, заполняемых рабочей средой и принимающих форму заготовки. Недостатком данного способа является сложность его применения [2, 14].

Известен способ базирования нежестких заготовок за счет применения вакуумной фиксации к опорной поверхности. Данный способ осуществляется при помощи силы атмосферного давления. Недостатком способа является сложность его применения [14, 20].

Известен способ фиксации нежесткой заготовки магнитными силами, при помощи переходных магнитных блоков. Недостатком данного способа является дороговизна оборудования [14, 20].

Известен способ фиксации нежестких заготовок при помощи самоустанавливающихся опор. Данные опоры устанавливаются в нужное положение, после чего фиксируются затягиванием болта. Недостатком данного способа является возможный отрыв заготовки от опор в процессе обработки из-за вибраций [14, 28].

Известно приспособление для фиксации нежестких заготовок при помощи блока самоустанавливающихся опор. Данные опоры подводятся автоматически при помощи подачи электрического напряжения. В отверстиях подводимых опор находится жидкость с ферромагнитными

частицами. Под действием электрического напряжения происходит затверждение жидкости в опорах и фиксация в достигнутом положении. Недостатками данного способа является сложность и высокая стоимость приспособления [12, 14].

Известен способ фиксации нежестких заготовок при помощи блока самоустанавливающихся опор. Данные опоры выполнены из термопластичной резины и под действием давления заготовки занимают нужное положение. Перед фиксацией заготовки приспособление нагревают, а после установки производят охлаждение. Недостатком данного способа является невысокая жесткость данного приспособления [9, 14].

Известно приспособление для фиксации нежестких заготовок при помощи выдвижных опор с вакуумными присосками. Данные опоры снабжены числовой системой управления перемещениями. Недостатком приспособления является сложность его реализации [13, 14].

Все вышеуказанные способы относятся к установке заготовки без выверки её положения относительно рабочих элементов станка.

Известен способ выверки заготовки по разметочным линиям. Недостатками данного способа является продолжительное время выверки, которое зависит от квалификации рабочего. Нестабильная точность выверки заготовки данным способом зависит от вида применяемого измерительного инструмента [110].

Наиболее близким к заявляемому техническому решению по технической сущности и достигаемому техническому результату является способ выверки заготовки непосредственно по обрабатываемой поверхности. Выверку осуществляют несколькими способами: с помощью рейсмуса от плоскости стола, с помощью индикатора, или с помощью индикатора, закрепленного на оправке, вставленной в шпиндель [72].

Известен способ выверки тонкостенных цилиндров, в котором точность формы в осевом направлении цилиндрической части детали измеряется с помощью устройства измерения формы, чтобы получить первые

данные формы. Затем снова измеряют точность формы в осевом направлении, при условии, что та же заготовка установлена на рабочие устройства с торцевым захватом, чтобы получить данные второй формы. Величина деформации из-за подгонки к устройствам вычисляется из разницы между данными первой формы и данными второй формы с помощью компьютера и передается на устройство ЧПУ, и включается в программу для определения места резания [11].

Известен способ выверки тонкостенных деталей, в котором тонкостенная заготовка захватывается с очень небольшим давлением на зажимном патроне, в результате которого заготовка не деформируется под действием измерительного давления. Затем заготовка захватывается с сильным давлением и проводится еще одно измерение. Разница в округлости вычисляется в арифметической части сравнения в устройстве ЧПУ, скорректированная рабочая программа сохраняется с ее подготовкой с разницей в данных обеих программ округления. Обработка некруглости выполняется по скорректированной рабочей программе [10, 100].

Представленные способы рассмотрены только для случая токарной обработки осевых деталей, закрепленных в трехкулачковом патроне.

Технической задачей способа является повышение точности и снижение трудоемкости выверки нежестких, призматических заготовок. Выверку забазированной заготовки осуществляют до и после закрепления, с последующим внесением компенсаций в настроечный размер на величину упругой деформации. Выверка, проводимая на обрабатывающем центре с ЧПУ, осуществляется при помощи средств измерения (например, датчиков RMP40 фирмы RENISHAW), с автоматическим внесением вычисленных компенсаций в управляющую программу обработки тонкостенной заготовки.

Способ осуществляется следующим образом. Заготовку 6 соединяют с вкладышем 1 при помощи прижима 2 и болтового соединения 3-5 без применения сил зажима (рис. 4.12).

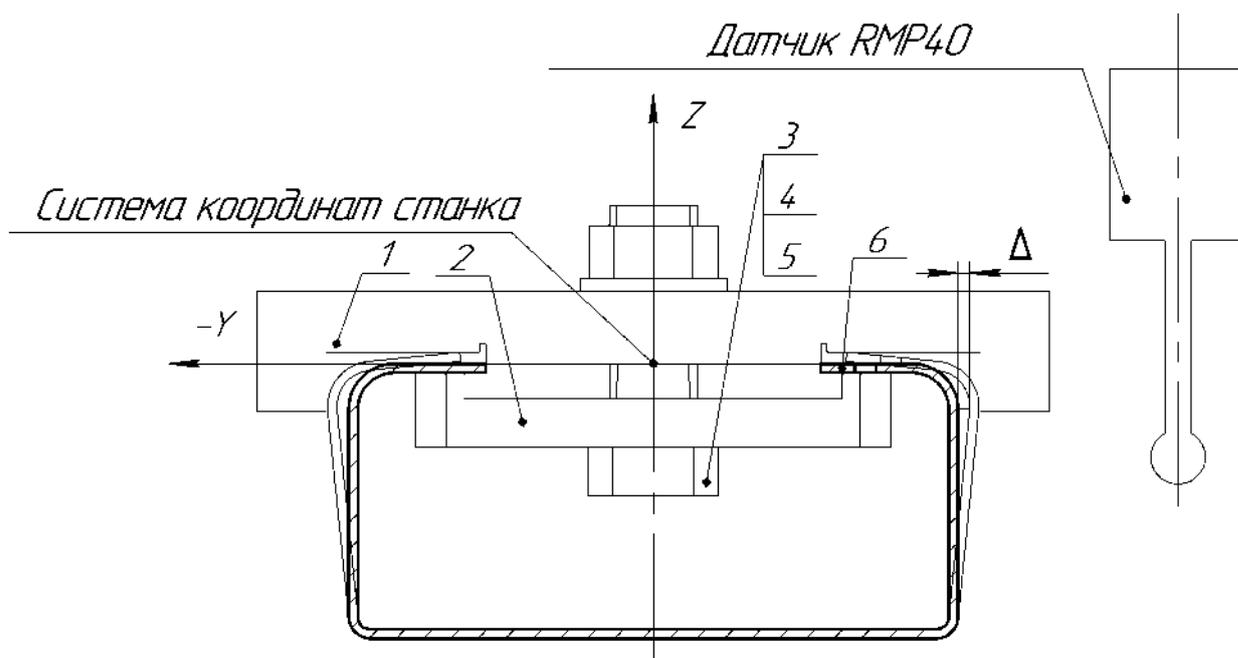


Рисунок 4.12 – Схема измерения упругой деформации стенки заготовки

Затем собранную конструкцию, базируют по двум взаимно перпендикулярным опорам станочного приспособления. Далее происходит измерение координаты базовой стороны тонкостенной заготовки *б* на заданной в управляющей программе высоте при помощи датчика RMP40 в автоматическом режиме (см. рис. 4.12). Данная координата по оси *Y* запоминается и записывается в ячейке станка. Затем заготовку *б* закрепляют с вкладышем *1* при помощи прижима *2* и болтового соединения *3-5* (см. рис. 4.12). Далее соединенную конструкцию базируют по двум взаимно перпендикулярным опорам станочного приспособления и закрепляют прижимами, тем самым деформируя заготовку *б* (см. рис. 4.12). После этого проводится еще один замер базовой стороны заготовки *б*. Данное значение сравнивается с предыдущим, и вносится компенсация на величину упругой деформации  $\Delta$  в систему координат станка.

Для автоматической выверки заготовки по обрабатываемой поверхности и внесения компенсаций упругой деформации была разработана специальная управляющая программа, фрагмент которой представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Фрагмент управляющей программы внесения компенсаций  
упругой деформации

Команда	Действие
T119M6 (ZAMER KOORDINATI Y DETAL NE ZAGATA)	Смена инструмента (комментарий)
G0G90G40G53X0Y0	Строка безопасности
G0G17G54.1P43	Задание системы координат 43 нуля
M26	Разжим поворотной оси
B0	Поворот стола по оси В
M41	Включение RENISHAW
M19	Ориентация шпинделя
G1X30.Y10.F3000	Выход инструмента по координатам X и Y
G43H119Z100.	Включение коррекции на длину инструмента
Z6.F1000	Выход инструмента по координате Z
G65P9013Y0.S1	Измерительный цикл по координате Y
M42	Выключение RENISHAW
G0G90Z300.	Выход инструмента по координате Z
G49G53X0Y0Z0	Выход в ноль станка по координатам X, Y, Z
<b>#7842=#5222( P43=G54 Y )</b>	<b>Запись измеренной координаты Y в 43 ячейке станка</b>
T119M6 (ZAMER KOORDINATI Y DETAL ZAGATA)	Смена инструмента (комментарий)
G0G90G40G53X0Y0	Строка безопасности
G0G17G54.1P44	Задание системы координат 44 нуля
M26	Разжим поворотной оси
B0	Поворот стола по оси В
M41	Включение RENISHAW
M19	Ориентация шпинделя
G1X30.Y10.F3000	Выход инструмента по координатам X и Y
G43H119Z100.	Включение коррекции на длину инструмента
Z6.F1000	Выход инструмента по координате Z
G65P9013Y0.S1	Измерительный цикл по координате Y
M42	Выключение RENISHAW
G0G90Z300.	Выход инструмента по координате Z
G49G53X0Y0Z0	Выход в ноль станка по координатам X, Y, Z
<b>#7862=#5222( P44=G54 Y )</b>	<b>Запись измеренной координаты Y в 44 ячейке станка</b>
<b>#1=#7862 - #7842(DELTA)</b>	<b>Вычисление значения компенсации</b>
<b>#7862=#7862 - ABS[#1](UCET UPRUG DEFORM)</b>	<b>Корректировка координаты Y (44 нуля) на значение компенсации</b>
M1	Безусловный останов

Предлагаемое техническое решение позволило обеспечить точность и снизить трудоемкость выверки нежестких, призматических деталей.

## **Выводы**

1. Обоснована конструкция установочного приспособления-подставки, реализующая принцип базирования по выделенным участкам штампованной поверхности повышенной точности.

2. Найденные регрессионные уравнения подтверждают, что предложенный способ выделения технологических зон позволяет уменьшить на порядок влияние погрешности формы измерительной базы и увеличить точность изготовления тонкостенных коробчатых деталей.

3. По результатам проделанной работы было предложено ввести дополнительную слесарную операцию правки дна коробчатой заготовки, с недопущением вогнутостей.

4. Разработан способ фиксации нежесткой призматической заготовки с незамкнутой верхней поверхностью при механической обработке на станке, позволяющий обеспечить точность обработки, за счет упругого деформирования дна заготовки при закреплении до номинального положения установочной базы путем приложения распределенной силы, например, через жесткий призматический вкладыш, реализованный в специальном приспособлении.

5. Разработан способ выверки тонкостенных коробчатых заготовок, позволяющий обеспечить точность выполнения координат отверстий, производимых в приспособлении-спутнике.

## **5 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ НЕЖЕСТКИХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ КОРПУСОВ**

Для обеспечения точности обработки, разработано несколько технических решений. Первое техническое решение достигается тем, что для уменьшения погрешности формы штампованной поверхности большой протяжённости можно выбрать два удалённых друг от друга участка с повышенной точностью формы и принять их в качестве направляющей измерительной и технологической базы. Для уменьшения погрешности формы заготовки, выбранные участки дополнительно правят. Данное предложение реализовано в специальном приспособлении. Второе техническое решение относится к разработке специального приспособления-спутника, позволяющего зажимать заготовку с вкладышем вне станка, тем самым сокращая подготовительное время и вести механическую обработку с нескольких сторон, переворачивая собранную заготовку с вкладышем без потери точности переустановки.

### **5.1 Базовое приспособление для установки заготовки на станке**

Выполнение операций механической обработки на физически и морально устаревших станках УФ-250 и 2Е440А не могло обеспечить точность выполняемых размеров. Было решено перевести выполнение данных операций на фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ Tongtai TMV-1050QII [37, 84]. Данное решение позволило снизить трудоемкость в несколько раз и обеспечить точность выполнения размеров чертежа, вследствие отсутствия переустановок заготовки.

Для выполнения вышеуказанных операций было спроектировано базовое приспособление для установки заготовки на станке [21, 49, 51, 64], конструкция 3D-модели которого показана на рис. 5.1.

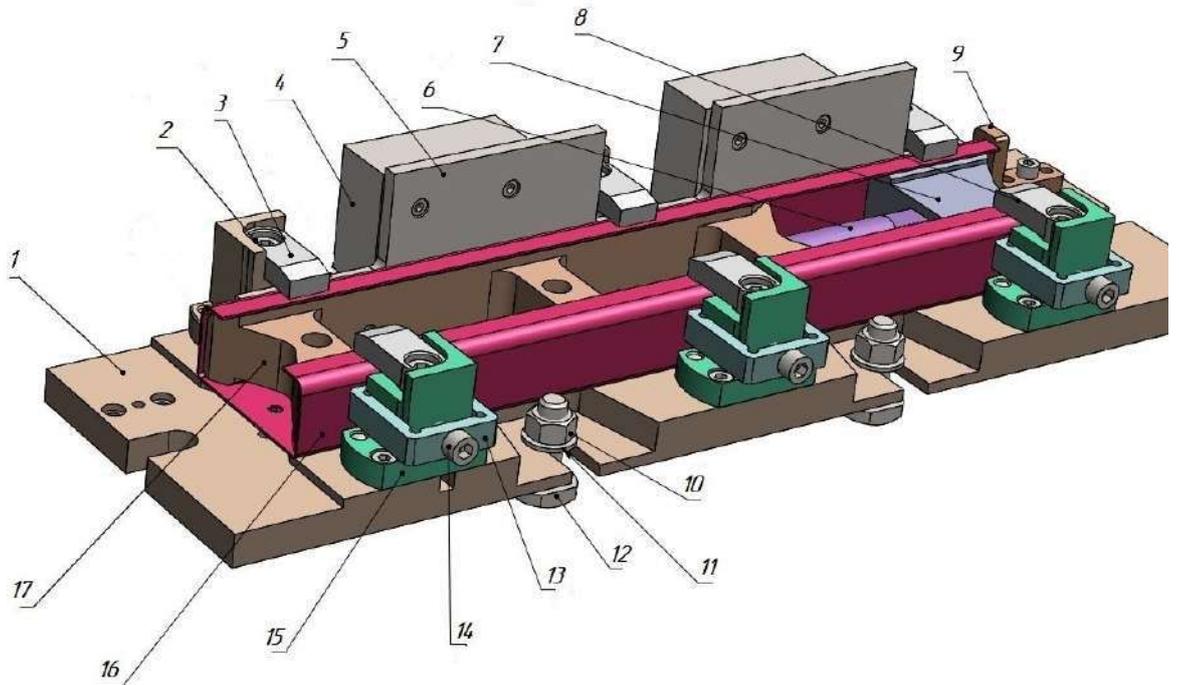


Рисунок 5.1 – 3D-модель базового приспособления для установки заготовки на станке: 1 – плита; 2 – винт, 3 – прижим; 4 – стойка; 5 – планка; 6 – упор; 7 – вставка; 8 – прижим; 9 – упор; 10 – гайка; 11 – шайба; 12 – болт; 13 – скоба; 14 – винт; 15 – основание; 16 – заготовка; 17 – вкладыш.

На рис. 5.2 представлена фотография изготовленного базового приспособления для установки заготовки на станке.



Рисунок 5.2 – Фотография базового приспособления для установки заготовки на станке

Приспособление для базирования тонкостенных корпусных заготовок работает следующим образом: в заготовку 16 устанавливают вкладыш 17, затем в отверстие вкладыша 17 устанавливают упор 6, соединенный с вставкой 7. Собранный конструкцию базируют на плиту 1 и досылают до упора 9. При помощи скобы 13 и винта 14, заготовку 16 прижимают к планке 5 (без существенных усилий). Затем при помощи лапок 3 и винтов 2 зажимают заготовку 16 (см. рис. 5.1).

Наличие выпуклостей на базовых поверхностях заготовки приводит к неоднозначности базирования, приводящей к потенциальной возможности погрешности выполнения размеров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ . Решение поставленной задачи удалось достичь за счет реализации в направляющей базе планке – 5 (см. рис. 5.1) двух выступов толщиной  $o$  (см. рис. 4.1) на высоте  $n$ .

### **5.2 Вкладыш к базовому приспособлению для установки заготовки на станке**

Для обработки тонкостенной заготовки был спроектирован специальный вкладыш для базового приспособления на станке. Эскиз данного вкладыша представлен на рис. 5.3. Ширину выреза приняли  $F=70$  мм. Высоту вкладыша  $H$  приняли равным 42,7 мм. Для удобства сборки и уменьшения веса вкладыша изготовили его разъемным. Фотография данного вкладыша представлена на рис. 5.3.



Рисунок 5.3 – Фотография вкладыша для установки заготовки в приспособление на станке

### 5.3 Приспособление-спутник

Известны устройства для базирования корпусных заготовок, при котором их фиксация осуществляется при помощи приспособлений-спутников. В данных приспособлениях заготовки перемещаются вместе с деталью, а базирование спутника осуществляется по двум взаимно перпендикулярным опорам или по направляющим «ласточкин хвост» [48]. Недостатком известных устройств является сложность и трудоемкость их изготовления.

Известно приспособление-спутник для фиксации корпусных заготовок, при котором их закрепление осуществляется при помощи прижимов. Данное приспособление содержит поворотный стол, на котором крепятся L-образные стойки [1]. Недостатками известного приспособления-спутника являются погрешности возможного смещения и поворота спутника, вследствие наличия угловой фиксации, а также большая трудоемкость перехода закрепления заготовки.

Технической задачей данного решения является повышение точности обработки тонкостенных корпусных заготовок и снижение их трудоемкости закрепления/раскрепления. Приспособление-спутник для базирования тонкостенных корпусных заготовок включает Ш-образный базирующий элемент, основание и крепящие элементы. Базирующий элемент выполнен в виде ступенчатого вкладыша, внутренний выступ которого выполнен по ширине паза заготовки и высотой, равной толщине стенки заготовки. Наружный габаритный размер ступенчатого вкладыша выполнен равной ширине паза посадочной поверхности основания станочного приспособления.

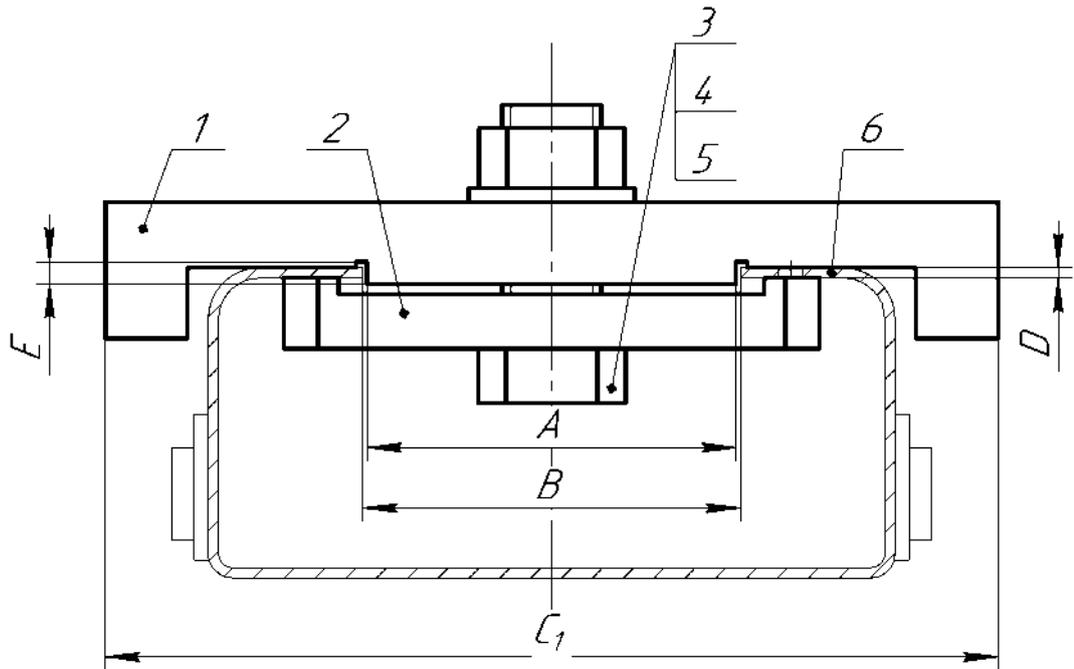


Рисунок 5.4 – Схема закрепления заготовки с вкладышем

На рисунке 5.4 Ш-образный ступенчатый вкладыш  $1$ , на котором при помощи прижима  $2$  и болтового соединения  $3-5$  (болт  $3$ , шайба  $4$ , гайка  $5$ ) крепится заготовка  $6$  с пазом  $B$ , где:

$A$  – ширина внутреннего выступа Ш-образного ступенчатого вкладыша  $1$ ,

$B$  – ширина паза заготовки  $6$ ,

$C_1$  – ширина Ш-образного ступенчатого вкладыша  $1$ ,

$D$  – ширина стенки заготовки  $6$ ,

$E$  – высота внутреннего выступа Ш-образного ступенчатого вкладыша  $1$ .

Приспособление-спутник состоит из Ш-образного ступенчатого вкладыша  $1$ , в котором при помощи прижима  $2$  и болтового соединения  $3-5$  закреплена заготовка  $6$  (см. рис. 5.4).

На рис. 5.5 представлена фотография изготовленного приспособления-спутника.



Рисунок 5.5 – Фотография специального приспособления-спутника

Приспособление-спутник для базирования тонкостенных корпусных заготовок работает следующим образом:

- заготовку *б* с пазом *В* (см. рис. 5.4) совмещают с Ш-образным ступенчатым вкладышем *1* с выступом *А* (см. рис. 5.4),
- затем при помощи прижима *2* и болтового соединения *3-5* заготовку *б* жестко закрепляют с Ш-образным ступенчатым вкладышем *1*.

#### **5.4 База для установки приспособления-спутника на станке**

На рисунках 5.6 и 5.7 представлены соответственно схема установки приспособления-спутника на базу для установки приспособления-спутника на станке и его 3-D модель.

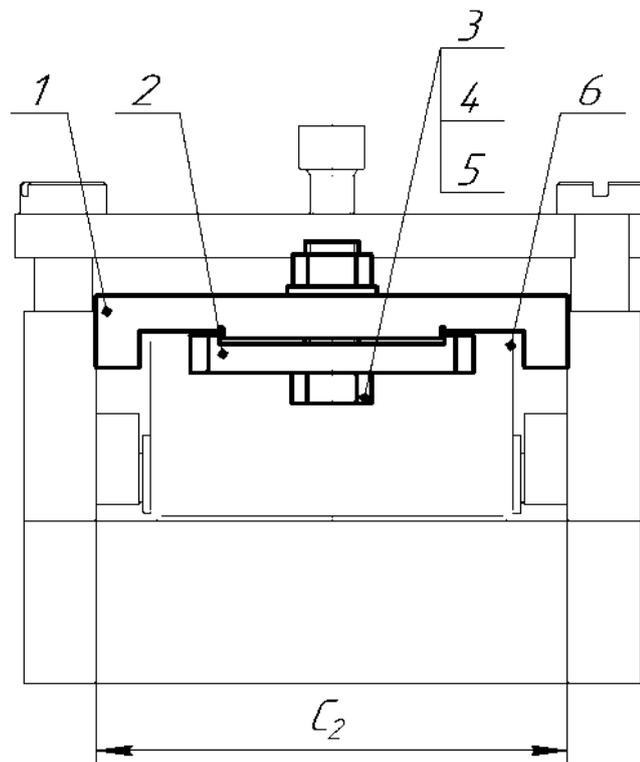


Рисунок 5.6 – Схема установки приспособления – спутника на базу для установки приспособления-спутника на станке

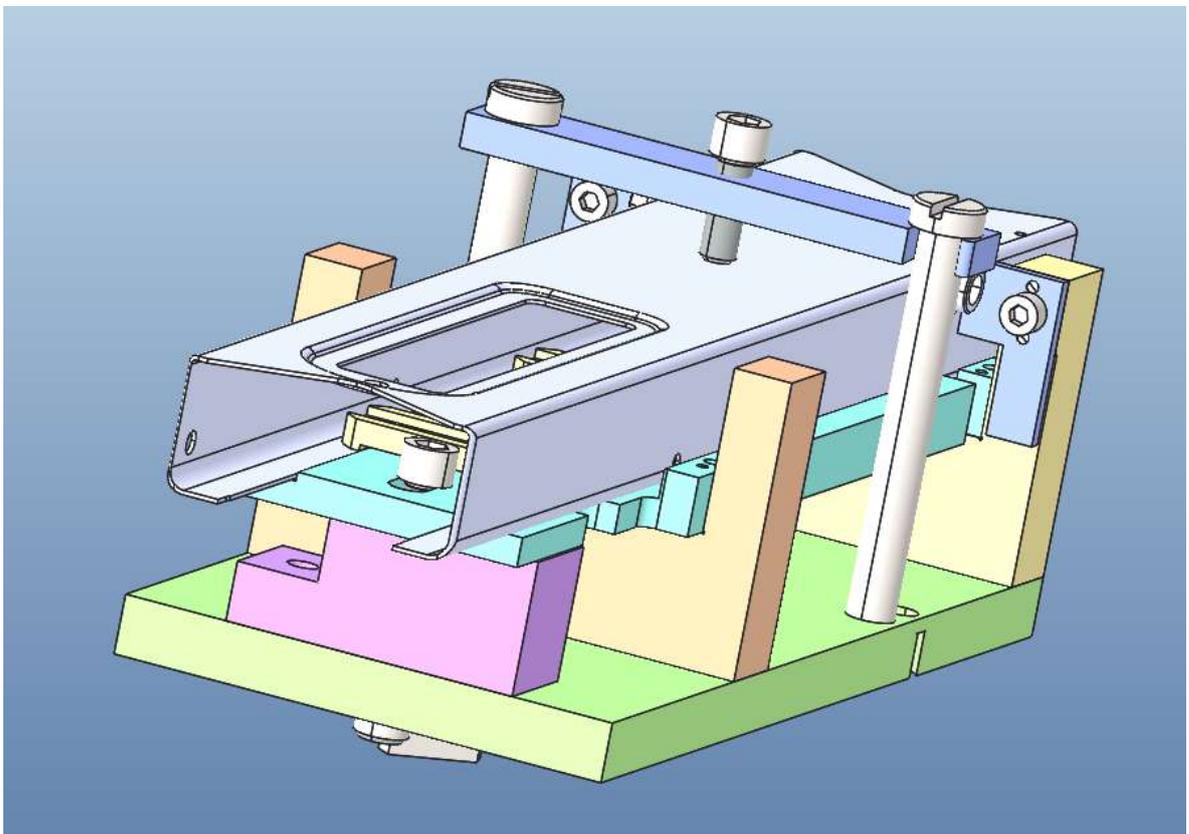


Рисунок 5.7 – 3-D модель приспособления-спутника и базы для установки приспособления-спутника на станке

Базирование приспособления-спутника осуществляется по двум взаимно перпендикулярным скобам базы для установки приспособления-спутника на станке (см. рис. 5.6), где ширина паза основания  $C_2$  равна  $C_1$  ширине Ш-образного ступенчатого вкладыша 1 (см. рис. 5.4).

База для установки приспособления-спутника на станке состоит из основания 1, скрепленного со скобами 3, 6 и опорой 2. Пластины 5 притянуты при помощи винта 4 и двух штифтов 7 к скобе 6. При помощи двух винтов 10, на которые надевается прижим 9 и двух винтов 8, приспособление-спутник фиксируется в данном устройстве (рис. 5.8).

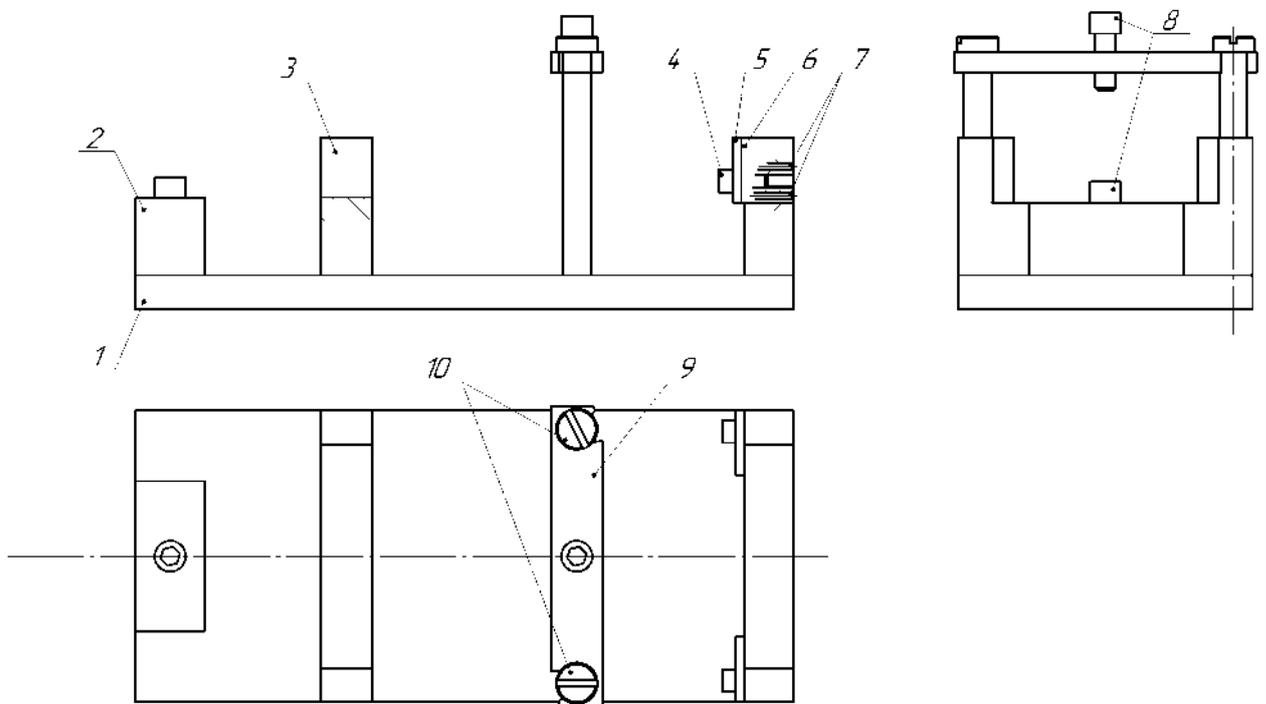


Рисунок 5.8 – Схема базы для установки приспособления-спутника на станке

На рис. 5.9 представлена фотография изготовленной базы для установки приспособления-спутника на станке.



Рисунок 5.9 – Фотография изготовленной базы для установки приспособления-спутника на станке

База для установки приспособления-спутника работает следующим образом:

- собранное приспособление-спутник с заготовкой устанавливают на опору 2 и скобы 3, 6 установленные на основании 1,
- затем, собранную конструкцию досылают до пластины 5 и притягивают к опоре 2 и скобам 3, 6 при помощи болтов 8 и прижима 9 (см. рис. 5.8).

Заготовку, закрепленную в приспособлении-спутнике можно устанавливать в базе для установки приспособления-спутника на станке либо вверх, либо вниз.

Приспособление-спутник для базирования тонкостенных корпусных деталей с пазом [16] позволяет повысить точность обработки заготовок, за счет выполнения ступенчатого Ш-образного вкладыша 1 шириной  $C_1$  (см. рис. 5.4) равной ширине  $C_2$  паза посадочной поверхности базы для установки приспособления-спутника на станке (см. рис. 5.6), а также уменьшить время

установки тонкостенных заготовок за счет уменьшения действий, необходимых для их закрепления в приспособлении.

### 5.5 Выводы

По результатам работы были разработаны и изготовлены:

- базовое приспособление для установки заготовки на станке с наличием в направляющей базе планке 5 (см. рис. 5.1) двух выступов толщиной  $o$  (см. рис. 4.1) на высоте  $n$ , снижающее влияние погрешностей формы штампованной поверхности большой протяженности и обеспечивающее точность выполнения требуемых размеров;
- вкладыш к базовому приспособлению для установки заготовки на станке;
- приспособление-спутник для базирования тонкостенных корпусных заготовок, которое позволяет обеспечить точность обработки заготовок, а также уменьшить время установки тонкостенных заготовок за счет уменьшения действий, необходимых для их закрепления в приспособлении;
- база для установки приспособления-спутника на станке, позволяющая точно координировать пространственное положение комплекта «заготовка-приспособление спутник».

## **6 МОДЕРНИЗАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

В данной главе рассмотрен процесс модернизации существующей технологии механической обработки, проведен анализ брака изготовления узла «Коробка» и приведено экономическое обоснование принятых решений.

Техническое решение относится к сокращению числа переустановов за счет внедрения специальных приспособлений для механической обработки заготовок пониженной жесткости на станках с ЧПУ. До этого предложения (см. табл. 1.8) в технологическом процессе узла «Коробка» присутствовало большое количество установов, что в свою очередь накапливало погрешности установки и как следствие вело к появлению брака на производстве.

### **6.1 Модернизированная технология механической обработки**

Проанализировав существующую технологию (см. табл. 1.8) сделан вывод о наличии большой номенклатуры универсального морально устаревшего оборудования. Данные вертикально-фрезерные станки (ВМ127М, УФ-250) не обеспечивали требуемую точность, а процент брака доходил до 25%. Так как особенность разработки технологического процесса механической обработки на станках с ЧПУ, сводится к объединению большинства переходов в одну операцию, то было принято решение перевести операции механической обработки на фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ TMV-1050AII Tongtai (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 – Общий вид станка TMV-1050AII Tongtai

Для данного станка были разработаны три специальных приспособления. Применение специальных приспособлений в технологическом процессе механической обработки узла «Коробка» позволило перевести ряд операций на фрезерный станок с ЧПУ TMV-1050AII Tongtai, тем самым существенно сократив штучное время обработки детали [34, 35, 36, 38, 39, 40, 42]. Усовершенствованная технология представлена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Пересмотренные заготовительные операции технологического процесса изготовления штамповарной заготовки незамкнутого коробчатого сечения

№ оп.	Наименование операции	Содержание операции	Оборудование
1	Заготовительная	Получить лист в размеры: $1,5 \pm 0,12 \times 600 \times 1000$	
2	Отрезная	Вырезать карту согласно эскизу (рис. 1.10) (учесть направление проката)	Trulaser 3030 L20 - Лазерный комплекс для резки и раскроя
3	Термообработка	Произвести отжиг заготовки по технологии ОГМет	СНО-6.12.5/12М - Печь электросопротивления
4	Виброабразивная	Произвести виброабразивную обработку	VBLE-500 - Лотковый вибратор

5	Слесарная	Править заготовку, с выполнением плоскостности 0,4 мм	Верстак
6	Гибка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть заготовку, поверхность должна быть чистой без ржавчины, царапин и окалины, а заусенцы по контуру должны быть удалены</li> <li>2. Нанести на поверхность заготовки смазку</li> <li>3. Уложить заготовку в рабочую зону штампа</li> <li>4. Произвести гибку в заготовке, расчётное усилие 500 кН (рис. 1.11)</li> <li>5. Удалить заготовку из рабочей зоны штампа</li> <li>6. Проверить внешний вид заготовки на отсутствие трещин, вмятин, надрывов</li> </ol>	П6332 - Пресс гидравлический
7	Гибка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть заготовку, поверхность должна быть чистой без ржавчины, царапин и окалины, а заусенцы по контуру должны быть удалены</li> <li>2. Нанести на поверхность заготовки смазку</li> <li>3. Уложить заготовку в рабочую зону штампа</li> <li>4. Гнуть заготовку в штампе по R6, выполняя размер 42,5+0,32, расчётное усилие 350 кН (рис. 1.12)</li> <li>5. Удалить заготовку из рабочей зоны штампа</li> <li>6. Проверить внешний вид заготовки на отсутствие трещин, вмятин, надрывов</li> </ol>	П6332 - Пресс гидравлический
8	Калибровка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть заготовку, поверхность должна быть чистой без ржавчины, царапин и окалины, а заусенцы по контуру должны быть удалены</li> <li>2. Вставить оправку в заготовку</li> <li>3. Уложить заготовку с оправкой в рабочую зону штампа</li> <li>4. Калибровать заготовку в штампе (рис. 1.13)</li> <li>5. Удалить заготовку с оправкой из рабочей зоны штампа</li> <li>6. Повернуть заготовку с оправкой на угол 180° и уложить в рабочую зону штампа</li> <li>7. Повторить переходы 3, 4, 5</li> <li>8. Снять заготовку с оправки</li> <li>9. Проверить внешний вид заготовки на отсутствие трещин, вмятин, надрывов</li> </ol>	П6332 - Пресс гидравлический

9	Контроль	Контролировать геометрические параметры.	
10	Фрезерная	1. Фрезеровать торец	Приспособление цеховое, вкладыш
11	Слесарная	1. Править плоскостность 0,3 мм на поверхностях А и В (рис. 1.14). 2. На поверхности В (рис. 1.14) не допускаются вогнутости. 3. Править плоскостность 0,05 мм на участках Р и М (рис. 2.6)	Верстак
12	Фрезерная с ЧПУ	1. Центровать, сверлить, развернуть отверстия Ø5Н9(+0,03) 2. Центровать, сверлить, развернуть отверстия Ø4Н9(+0,03) с двух сторон 3. Фрезеровать поверхность, выдерживая размер 523h11(-0,44) 4. Фрезеровать верхнюю полку, выдерживая размеры: 22h14(-0,52); 15h13(-0,27); 7h14(-0,36); 8h14(-0,36); R12 5. Фрезеровать нижнюю полку, выдерживая размеры: 22h14(-0,52); 15h13(-0,27); 7h14(-0,36); 8h14(-0,36); R12	Базовое приспособление
13	Слесарная	Править заготовку	Верстак
14	Контроль	Контролировать геометрические параметры	
15	Сварка	1. Провести внешний осмотр свариваемых поверхностей и присадочной проволоки, не допускается наличие влаги, масла, налетов соды и других загрязнений 2. Провести прихватку сборочной единицы с патрубком длиной от 6 до 8 мм по всей длине свариваемых кромок, сварные швы по ОСТ3-4001-91, положение шва: н; полярность: прямая; сила тока: 30-60 А; напряжение: 10-15 В; V <sub>св.</sub> : 7-12 см/мин 3. Провести сварку сборочной единицы с патрубком с полным перекрытием прихваток (стол сварщика ССН-1 ОСТ 2 П53-1, выпрямитель сварочный ВСС – 300, реостат балластный РБ - 301 ТУ 16. 739.334, горелка сварочная), сварные швы по ОСТ3-4001-91, положение шва: н; полярность: прямая; сила тока: 30-60 А; напряжение: 10-15 В; V <sub>св.</sub> : 7-12 см/мин	стол сварщика ССН-1 ОСТ 2 П53-1, выпрямитель сварочный ВСС – 300, реостат балластный РБ - 301 ТУ 16. 739.334, горелка сварочная

		<p>4. Контролировать качество сварного шва, визуально. Не допускается прожоги, непровары, трещины, поры. В местах возникновения пор необходима подварка швов. В данном технологическом процессе при аргонодуговой сварке отходов не образуется. Вредные производственные факторы: марганец и его оксиды - 2,0 г/кг, оксиды хрома - 1,0 г/кг</p> <p>5. Направить на термообработку в течение четырех часов после окончания сварки и не позднее шести часов после наложения первого сварного шва</p>	
16	Слесарная	<p>1. Снять сб. ед. с приспособления</p> <p>2. Править плоскостность 0,3 мм по мере необходимости</p>	Верстак
17	Термообработка	Провести отпуск после сварки в течение двух часов при температуре 650-680 °С	СНО-6.12.5/12М - Печь электросопротивления
18	Гидропескоструйная	Провести очистку заготовок	Гидропескоструйная установка
19	Контроль	Контроль качества сварного шва	
20	Слесарная	Править плоскостность 0,3 мм по мере необходимости	Верстак
21	Термообработка	<p>1. Провести загрузку в печь, t=800...900°C, выдержка 40-50 мин.</p> <p>2. Провести охлаждение в печи (в селитре), t=180...200°C</p> <p>3. Провести загрузку заготовок в приспособление</p> <p>4. Провести загрузку в печь, t=480...520°C, выдержка 60-90 мин.</p> <p>5. Провести охлаждение на воздухе</p>	СНО-6.12.5/12М - Печь электросопротивления
22	Гидропескоструйная	Провести очистку заготовок	Гидропескоструйная установка
23	Контроль	Контролировать плоскостность 0,3 мм	
24	Фрезерная с ЧПУ	<p>1. Фрезеровать бобышку с одной стороны, выдерживая размеры 29h11; Ø16f9</p> <p>2. Фрезеровать бобышку с другой стороны, выдерживая размеры 29h11; Ø16f9</p> <p>3. Перезажать заготовку, дослать до базы</p> <p>4. Центровать, сверлить, развернуть отверстие с одной стороны, выдерживая размеры: 74±0,1; 14,5±0,1</p>	Приспособление-спутник

		5. Перевернуть заготовку вместе с вкладышем 6. Центровать, сверлить, развернуть отверстие с одной стороны, выдерживая размеры: $74\pm 0,1$ ; $14,5\pm 0,1$ 7. Фрезеровать паз.	
25	Слесарная	Править заготовку	Верстак
26	Контроль	Контролировать геометрические параметры.	

## 6.2 Анализ брака при изготовлении узла «Коробка» по модернизированной технологии

Оптимизация технологии заключается в том, что сокращение числа переустановов за счет внедрения специальных приспособлений для механической обработки заготовок пониженной жесткости на станках с ЧПУ привело к обеспечению точности выполняемых размеров и снижению трудоемкости за счет увеличения скорости резания на высокопроизводительном обрабатывающем центре с ЧПУ TMV-1050АП Tongtai.

Усредненная оценка анализа качества проделанной партии показала, что выход годной продукции (без отклонений по всем параметрам конструкторской документации), составляет 86%.

Исправимый брак в виде сборочных узлов, которые возможно доработать по каким-либо отклонениям, составляет 10%, из которых исправление по диаметрам отверстий  $\varnothing_s$  и  $\varnothing_k$  (см. рис. 1.14) составляет 8%, а остальные 2% исправимого брака составляют отклонения по размерам  $d$ ,  $c$ ,  $b$  (см. рис. 1.14).

Около 4% сборочных узлов получают с неисправимым браком по координатам отверстий  $\varnothing_s$  и  $\varnothing_k$ , вызванных большими отклонениями от неплоскостности базовых поверхностей  $A$  и  $B$  (см. рис. 1.14).

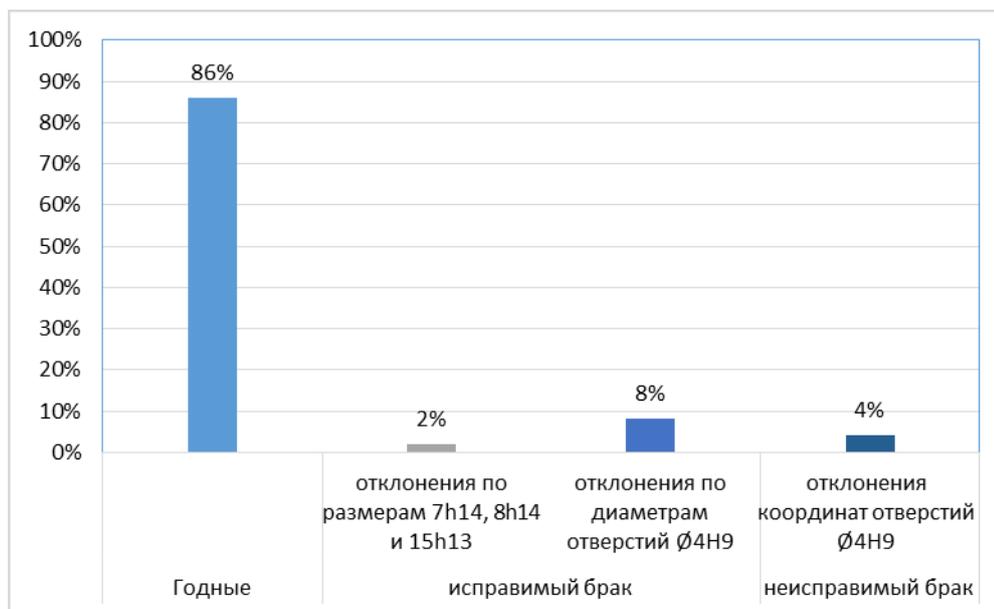


Рисунок 6.2 – Диаграмма соотношения брака в партии изготовленных сборочных узлов.

На рис. 6.2 представлена диаграмма соотношения брака в партии изготовленных сборочных узлов.

### 6.3 Экономическое обоснование принятых решений

По результатам внедрения нового технологического процесса в производственных условиях провели экономические расчеты.

По результатам проведенного анализа таблиц 1.8 и 6.1 вычислим годовой экономический эффект для предприятия по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_2 = (C_2 - C_1) \times P; \quad (6.1)$$

$P$  – годовой выпуск сборочных узлов,

$C_2$  – себестоимость сборочных узлов, изготовленных по универсальной технологии,

$C_1$  – себестоимость сборочных узлов, изготовленных по технологии с использованием станка с ЧПУ.

Для расчета себестоимости условно примем  $1 \text{ шт.} = 250 \text{ руб.}$ ,  $P = 1000 \text{ шт.}$

$$\mathcal{E}_{21} = (2,358 \times 250 - 1,467 \times 250) \times 1000 = 222750 \text{ руб.} \quad (6.2)$$

По результатам проделанной работы было предложено ввести дополнительную слесарную операцию правки дна коробчатой заготовки, с недопущением вогнутостей. Время выполнение данной операции составило

0,083 н\ч. За счет внедрения данной операции брак изготовления детали «Коробка» снизился с 25 % до 14 %. Трудоемкость изготовления данной детали, без дополнительной слесарной операции, составляет 1,467 н\ч. Трудоемкость изготовления детали «Коробка» с операцией правка составляет 1,55 н\ч. Вычислим суммарный годовой экономический эффект для предприятия по следующей формуле:

$$Э_{2,2} = (1,467 \times 250 \times 25\% - 1,55 \times 250 \times 14\%) \times 1000 = 37437,5 \text{ руб.} \quad (6.3)$$

Результирующий экономический эффект составил 260187,5 руб. при выпуске 1000 шт. в год.

#### **6.4 Внедрение результатов**

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению в филиале АО «КБП» – «ЦКИБ СОО» для обработки коробчатых корпусных тонкостенных деталей.

Отдельные материалы научных исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Соответствующие документы о внедрении результатов расчета размещены в приложениях 2-4.

#### **Выводы**

1. В результате внедрения оптимизированного технологического процесса оценка качества изготовленных сборочных узлов показывает, что выход годной продукции составляет 86 %.

2. Исправимый брак в виде сборочных узлов, которые возможно доработать по каким-либо отклонениям, составляет 10 %.

3. Около 4 % сборочных узлов получают с неисправимым браком по координатам отверстий  $\varnothing_s$  и  $\varnothing_k$ , вызванным большими отклонениями от неплоскостности базовых поверхностей  $A$  и  $B$  (см. рис.1.14).

4. Установлено, что по усовершенствованному технологическому процессу результирующий экономический эффект составил 260187,5 руб. при условном выпуске 1000 шт. в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертации решена важная для современного машиностроения актуальная задача: технологическое обеспечение точности механической обработки коробчатого тонкостенного корпуса из холодноштампованной заготовки, для чего в работе обоснованы рациональные схемы базирования и способы приложения сил зажима к заготовкам в приспособлениях; конструктивные параметры технологической оснастки; схема автоматизированной выверки деталей на станках с ЧПУ.

По результатам выполнения работы сделаны следующие выводы:

1. Непостоянство измерительных баз, от которых заданы координаты обрабатываемых поверхностей, а также низкая жесткость конструкции, в сочетании с имеющимися погрешностями формы и положения базовых поверхностей приводят к погрешностям механической обработки.

2. Большие погрешности формы свободных поверхностей коробчатой детали, заготовка которой получена холодной листовой штамповкой, допустимые по условиям эксплуатации, неприемлемы при использовании таких поверхностей в качестве измерительных или технологических баз; для снижения влияния погрешностей формы поверхности большой протяженности следует принять в качестве измерительной и технологической базы два удаленных друг от друга участка с повышенной точностью формы.

3. Моделирование погрешностей закрепления показало, что выпуклость дна заготовки нежесткого коробчатого корпуса меньше влияет на перемещение боковых стенок, чем вогнутость. Когда дно заготовки выпуклое, то боковые стенки отгибаются наружу, на неподвижную базу и на зафиксированную скобу. Если дно заготовки вогнутое, боковые стенки отгибаются внутрь, на вкладыш, который выполнен с зазором в 0,25 мм от номинального размера заготовки. В данном случае происходит более равномерное и меньшее по величине (0,01-0,08 мм) упругое деформирование боковых стенок заготовки, чем при фиксации с усилием (0,02-0,20 мм).

4. Составленные регрессионные уравнения подтверждают что предложенный способ выделения технологических зон позволяет уменьшить на порядок влияние погрешности формы измерительной базы и увеличить точность изготовления тонкостенных коробчатых деталей.

5. Разработанные способы компенсации погрешностей закрепления позволяют:

а) способ фиксации тонкостенного коробчатого корпуса – обеспечить точность обработки за счет упругого деформирования дна заготовки при закреплении до номинального положения установочной базы путем приложения распределенной силы, реализованный в базовом приспособлении;

б) способ выверки тонкостенного коробчатого корпуса – обеспечить точность выполнения координат отверстий, производимых в приспособлении-спутнике, за счет учета упругого деформирования измерительной базы.

6. Разработанные установочные приспособления обеспечивают:

а) базовое приспособление для установки заготовки на станке с наличием в направляющей базе двух выступов – заданную точность выполнения требуемых размеров;

б) приспособление-спутник для базирования тонкостенных корпусных заготовок – точность обработки заготовок пониженной жесткости, а также сокращает время установки заготовки за счет уменьшения действий, необходимых для закрепления заготовки в приспособлении;

в) база для установки приспособления-спутника на станке – точность координат пространственного положения комплекта «заготовка – приспособление спутник».

7. Результирующий экономический эффект по усовершенствованному технологическому процессу составил 260187,5 руб. при условном выпуске 1000 шт. в год.

Перспективой дальнейшей разработки темы является методика проектирования групповых технологий для механической обработки аналогичных тонкостенных корпусных деталей.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Авторское свидетельство № 1794625 А1 СССР, МПК В23Q 3/00. Приспособление-спутник: № 4922336: заявл. 28.03.1991: опубл. 15.02.1993 / А.М. Царев; заявитель ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ. – 5 с.: ил. – Текст: непосредственный.
2. Авторское свидетельство № 273623 А1 СССР, МПК В23Q 3/00. Устройство для крепления нежестких деталей криволинейного профиля: № 1343723/25-8: заявл. 16.06.1969: опубл. 15.06.1970 / Ф.Н. Петухов, А.А. Шипилов. – 2 с.: ил. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ 11268-76. Прокат тонколистовой специального назначения из конструкционной легированной высококачественной стали. Технические условия = Alloyed structural high-grade rolled steel sheets for special purposes. Specifications : межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24.12.76 N 2844 : введен впервые : дата введения 1978-01-01 / разработан Министерством черной металлургии СССР. - Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 10 с. - Текст непосредственный.
4. ГОСТ 1559-67. Подпорки винтовые для станочных приспособлений. Конструкция = Screw sprags for machine retaining devices. Design : межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 19.05.67 N 855 введен впервые: дата введения 1968-01-01 / разработан Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. - Москва : ИПК Издательство стандартов, 2000. - 7 с. - Текст непосредственный.

5. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения = Zocating and bases in machine building industry. Terms and definitions: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 26 января 1976 г. N 199 введен впервые: дата введения 1977-01-01 / разработан Государственным Комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 1990. - 37 с. - Текст непосредственный.
6. ГОСТ 24642-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные определения и термины = Basic norms of interchangeability. Tolerances of form and position. Basic terms and definitions: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 18.03.81 N 1423 введен впервые: дата введения 1981-07-01 / разработан Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. - 50 с. - Текст непосредственный.
7. ГОСТ 30893.2-2002 (ИСО 2768-2-89). Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Допуски формы и расположения поверхностей, не указанные индивидуально = Basic norms of interchangeability. General tolerances. Tolerances of form and position for features without individual tolerance indications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации протокол N 22 от 6 ноября 2002 г. введен впервые: дата введения 2004-01-01 / разработан Научно-исследовательским и конструкторским институтом средств измерения в машиностроении

(ОАО "НИИИзмерения"). - Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. - 8 с. - Текст непосредственный.

8. ГОСТ 4543-2016. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия = Structural alloy steel bars. Specifications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 25.10.2016 N 95-П) введен впервые: дата введения 2017-10-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием (ЦНИИчермет им.И.П.Бардина). - Москва: Стандартинформ, 2019. - 53 с. - Текст непосредственный.
9. Патент JP 2010188469 Япония, МПК B23Q 3/02, B23Q 3/06. Flexible Fixture : № 2009003084: заявл. 18.02.2009: опубл. 02.09.2010 / DEN KO, NAKANISHI TSUTOMU, SUGITA TAKECHIKA [and etc.]; заявитель UNIV OF MIYAZAKI, HONDA LOCK MFG CO LTD. – 39 с.: ил. – Текст: непосредственный.
10. Патент JPH0482646 (A) Япония, МПК B23Q15/00, B23Q15/013, B23Q17/00. Processing method for thin wall work: № JP19900198398: заявл. 26.07.1990: опубл. 16.03.1992 / MIYAKE KAZUHISA ; заявитель OKUMA MACHINERY WORKS LTD. – 3 с. : ил. – Текст: непосредственный.
11. Патент JPH05228793 (A) Япония, МПК B23B5/08, B23P25/00, B23Q15/18, B23Q17/20. Working method for accurate thin wall cylinder: № JP19920059359: заявл. 13.02.1992: опубл. 07.09.1993 / SENDA HARUMITSU, Otake YOSHINOBU; заявитель OKUMA MACHINERY WORKS LTD. – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.
12. Патент № 2277466 С2 Российская Федерация, МПК B23Q 3/155. Блок самоустанавливающихся домкратов: № 2004126383/02: заявл. 30.08.2004: опубл. 10.06.2006 / А.В. Балашов, В.А. Федоров, А.А. Черепанов [и др.]; заявитель Государственное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ). – 5 с.: ил. – Текст: непосредственный.

13. Патент № 2495738 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 3/00. Гибкая автоматизированная система базирования: № 2012103484/02: заявл. 02.02.2012: опубл. 20.10.2013 / И.В. Вайнштейн, Б.Н. Малахов, М.М. Стебулянин [и др.]; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России). – 13 с.: ил. – Текст: непосредственный.
14. Патент № 2701815 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 1/26, В25В 11/00. Способ фиксации нежесткой заготовки сложного профиля и приспособление для осуществления способа: № 2018116506: заявл. 03.05.2018: опубл. 01.10.2019 / Н.С. Сивцев, С.А. Погудин, А.Г. Бажин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова". – 13 с.: ил. – Текст: непосредственный.
15. Патент № 2781937 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 3/06, В23Q 3/18. Способ фиксации нежесткой призматической заготовки с незамкнутой верхней поверхностью при механической обработке на станке: № 2022100285: заявл. 11.01.2022: опубл. 21.10.2022 / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет". – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.
16. Патент № 2783244 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 3/00, В23Q 3/18. Приспособление-спутник для базирования и закрепления тонкостенной корпусной детали с пазом: № 2021130657: заявл. 20.10.2021: опубл. 10.11.2022 / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников, А.М.

Миляев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет". – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.

17. Патент US 20080178719A1 США, МПК В23В 23/00, В23В 25/00. Workpiece Machining Apparatus: № US95663907A: заявл. 14.12.2007: опубл. 31.07.2008 / TANAKA NAOYA, RYUTA TORAHARU, KAWAI NOBUHIRO ; заявитель YAMAZAKI MAZAK CORP. – 14 с.: ил. – Текст: непосредственный.
18. Патент WO/2012/059891 Италия, МПК В23Q 1/03, В23Q 1/76, В64F 5/00. Apparatus for the lightening of panels or thin plates by removal of the material: № PCT/IB2011/054922: заявл. 04.11.2011: опубл. 10.05.2012 / PESENTI. Gino, ACETI. PietroC; заявитель C.M.S. S.P.A. [IT]/[IT] (AllExceptUS), PESENTI, Gino [IT]/[IT] (UsOnly), ACETI, Pietro [IT]/[IT] (UsOnly). – 35 с.: ил. – Текст: непосредственный.
19. Алямовский, А.А. Инженерные расчёты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – Изд. ДМК-Пресс, 2010. – 230с. — Текст: непосредственный.
20. Ансеров, М.А. Приспособления для металлорежущих станков / М.А. Ансеров. – 4-е изд. - Л.: Машиностроение, 1975. - 656 с, стр. 352-354. — Текст: непосредственный.
21. Антонюк, В.Е. Конструктору станочных приспособлений.: Справ. пособие / В.Е. Антонюк. – Мн.: Беларусь, 1991. – 400 с.: ил. — Текст: непосредственный.
22. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / Б.М. Базров – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.: ил. — Текст: непосредственный.
23. Бобровский, А.В. Установка для механической обработки тонкостенных осесимметричных деталей / А.В. Бобровский, О.И. Драчев, И.Ю. Амирджанова – Текст: непосредственный // Известия Волгоградского

государственного технического университета. – 2020. – № 3(238). – С. 11-14. – DOI 10.35211/1990-5297-2020-3-238-11-14.

24. Васильев, А.С. Направленное формирование эксплуатационных свойств деталей в технологических средах / А.С. Васильев – Текст: непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. Изд-во: Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). 2017. Том 17. № 1. С. 33-40.
25. Васильев, А.С. Технологическая наследственность в машиностроении / А.С. Васильев – Текст: непосредственный // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017, № 1 (40). С. 198-202.
26. Гаврюшин, С.С. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей / С.С. Гаврюшин, А.Д. Жаргалова, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 11(668). – С. 53-61.
27. Глубоков, А.В. Влияние числа контрольных точек профиля поверхности на погрешность измерений отклонений от прямолинейности / А. В. Глубоков, С. Е. Педь, С. В. Глубокова – Текст: непосредственный // Измерительная техника. - 2017. - № 2. - С. 24-27.
28. Горошкин, А.К. Приспособления для металлорежущих станков: справочник / А.К. Горошкин. – 7-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1979. - 303 с, стр. 83-84. – Текст: непосредственный.
29. Даниленко, Е.А. Анализ конструктивных и технологических особенностей изготовления детали «Направляющая» / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей / под ред. В.А. Лебедева; Донской государственный технический университет. – Текст:

электронный. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2021112> С. 122-126.

30. Даниленко, Е.А. Влияние упругих деформаций нежесткой коробчатой заготовки, лимитированных конструкцией приспособления, на точность обработанных поверхностей / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников, А.А. Маликов – Текст: непосредственный // «Черные металлы», 2022. №4. С. 66-70.
31. Даниленко, Е.А. Особенности измерения тонкостенных деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников, Р.А. Тушин – Текст: непосредственный // Актуальные вопросы в науке и практике. Сборник статей по материалам XIV международной научно-практической конференции (04 февраля 2019 г., г. Самара). В 3 ч. Ч.1 / – Уфа: Изд. Дендра, 2019. – 236 с. С. 131-134.
32. Даниленко, Е.А. Особенности технологии механической обработки тонкостенных деталей на станках с ЧПУ / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Вестник научных конференций. 2018. № 11-4(39). Вопросы образования и науки: по материалам международной научно-практической конференции 30 ноября 2018 г. Тамбов. Часть 4. 188 с. С. 49-51.
33. Даниленко, Е.А. Повышение точности коробчатых корпусов из листоштампованных заготовок / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов национальной научно-технической конференции с международным участием «АПИР-24», 12-13 ноября 2019 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 255 с. С. 165-167. ISBN 978-5-7679-4252-7
34. Даниленко, Е.А. Повышение точности обработки отверстий в корпусных тонкостенных заготовках на станках с ЧПУ / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов национальной заочной научно-технической конференции с

международным участием «АПИР-25», 10-12 ноября 2020 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. 323 с. С. 205-208.

35. Даниленко, Е.А. Повышение точности обработки тонкостенных корпусных деталей / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Проблемы машиноведения. Материалы V Международной научно-технической конференции. Омск, 2021. С. 323-331. (РИНЦ).
36. Даниленко, Е.А. Применение вертикального обрабатывающего центра для обработки корпусных тонкостенных деталей / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 3. С. 271-276.
37. Даниленко, Е.А. Применение вертикального обрабатывающего центра для обработки корпусных тонкостенных деталей / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 3. С. 271-276.
38. Даниленко, Е.А. Применение высоких технологий при механической обработке тонкостенных деталей на станках с ЧПУ / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2019. Материалы XX Всероссийской научно-технической конференции (г. Пермь, 14–16 ноября 2019 г.) В двух частях. Часть 1. Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2019. 176 с. С. 43-46.
39. Даниленко, Е.А. Применение фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ для обработки тонкостенных деталей / Е.А. Даниленко – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 350-354.

40. Даниленко, Е.А. Разработка методики повышения точности обработки тонкостенных корпусных заготовок / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Инновационные наукоемкие информационные технологии, 2021 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. 50 с. С. 31-33.
41. Даниленко, Е.А. Специфика контроля тонкостенных коробчатых деталей / Е.А. Даниленко, А.С. Ямников – Текст: непосредственный // Всероссийская научно-техническая конференция "Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении". Сборник докладов. Тула, 2019. С. 151-153.
42. Даниленко, Е.А. Модернизация технологического процесса механической обработки коробчатых корпусов из листоштампованных заготовок/ – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 635-639.
43. Данилов, М.Ф. Оптимизация числа точек контроля при координатных измерениях характеристик формы, ориентации и месторасположения геометрических элементов изделий / М.Ф. Данилов, А.А. Савельева – Текст: непосредственный // Измерительная техника. 2019 № 2. С. 29-34.
44. Еремейкин, П.А. Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок / П.А. Еремейкин, А.Д. Жаргалова, С.С. Гаврюшин – Текст: непосредственный // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 17-27. – DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27.
45. Еремейкин, П.А. Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при "мягких" режимах токарной обработки тонкостенных деталей / П.А. Еремейкин, А.Д. Жаргалова, С.С. Гаврюшин – Текст: непосредственный // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 22-32. – DOI 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32.

46. Жилиев, А.С. Управление точностью механической обработки крупногабаритных тонкостенных деталей на этапе подготовки производства / А.С. Жилиев, С.Д. Кугультинов – Текст: непосредственный // Вестник МГТУ Станкин. – 2019. – № 2(49). – С. 101-105.
47. Исаев, А.В. Особенности встречного и попутного фрезерования при обработке тонкостенных деталей / А.В. Исаев, М.П. Козочкин, В.Р. Купцов – Текст: непосредственный // Вестник МГТУ Станкин. – 2013. – № 1(24). – С. 11-17.
48. Клепиков, В.В. Технологическая оснастка. Станочные приспособления. Учебное пособие / В.В. Клепиков – Изд. Инфра-М, 2017. – 348 с. — Текст: непосредственный.
49. Коваленко, А.В. Станочные приспособления / А.В. Коваленко, Р.Н. Подшивалов. – М.: Машиностроение, 1986, 152 с., ил. — Текст: непосредственный.
50. Кондаков, А.И. К вопросу о выборе схем установки заготовок при автоматизированном проектировании технологических процессов изготовления деталей. Справочник. Инженерный журнал с приложением / А.И. Кондаков, И.И. Кравченко. – 2018. № 12 (261). С. 55-60. — Текст: непосредственный.
51. Корсаков, В.С. Основы конструирования приспособлений: Учебник для вузов / В.С.Корсаков. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 277 с., ил. — Текст: непосредственный.
52. Корсаков, В.С. Точность механической обработки / В.С. Корсаков. – МАШГИЗ. Москва 1961. 397 с. — Текст: непосредственный.
53. Кухарь, В.Д. Вытяжка низких прямоугольных коробок из профильных заготовок / В.Д. Кухарь, А.Н. Малышев, Ю.В. Бессмертная – Текст: непосредственный // Черные металлы. 2019. №1. С. 26-33.
54. Куц, В.В. Исследование осевой силы при сверлении заготовок из латуни Л59 в предварительном упругодеформированном состоянии / В.В. Куц,

- М.С. Разумов, А.С. Бышкин, П.А. Глазков – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 401-405.
55. Малышев, А.Н. Вытяжка коробчатых деталей с небольшими угловыми радиусами / А.Н. Малышев, С.С. Яковлев, Ю.В. Бессмертная – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2015. Вып. 4. С. 111-117.
56. Металлы и сплавы : справочник / Ю.П. Солнцева; НПО Профессионал, НПО Мир и семья; Санкт Петербург, 2003 г. 1066 с. — Текст: непосредственный.
57. Моргунов, А. П. Технологическое обеспечение точности механической обработки тонкостенных деталей авиационных двигателей / А.П. Моргунов, Е.Ю. Чхетиани – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2012. – № 1(107). – С. 130-132.
58. Пегашкин, В.Ф. Повышение точности обработки нежестких деталей в центрах на станках с числовым программным управлением / В.Ф. Пегашкин, А.П. Старостин – Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2018. Т. 18. № 1. С. 51-57.
59. Самохвалов, В.Н. Технологические процессы изготовления деталей летательных аппаратов листовой штамповкой: учеб. пособие / В.Н. Самохвалов, Е.Г. Громова, А.А. Шаров, О.В. Ломовской. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2017. – 80 с. — Текст: непосредственный.
60. Санкин, Ю.Н. Устойчивость обработки тонкостенных заготовок концевыми фрезами / Ю.Н. Санкин, С.А. Явкин, К.Ю. Ахметов – Текст: непосредственный // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2006. – № 4(36). – С. 33-36.
61. Соколовский, А.П. Научные основы технологии машиностроения / А.П. Соколовский – М.: Машгиз, 1955. – 515 с. — Текст: непосредственный.
62. Сосенушкин, Е.Н. Напряженное состояние и деформируемость металла при осесимметричном растяжении / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская,

- В.В. Емельянов – Текст: непосредственный // СТИН. 2014. № 12. С. 21–25.
63. Справочник металлиста. Т.4/ Под общ. ред. М.П. Новикова, П.Н. Орлова. – М.: Машиностроение, 1977. – 720 с. — Текст: непосредственный.
64. Справочник технолога машиностроителя. В 2 – х т. Т.2/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4 – е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с. — Текст: непосредственный.
65. Станочные приспособления: справочник: в 2 т. / ред. совет Б.Н. Вардашкин (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1984. - Т. 2 / под ред. Б.Н. Вардашкина, В.В. Данилевского. - 656 с, стр. 500-501, рис. 115 — Текст: непосредственный.
66. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения/ А.Г. Суслов, А.М. Дальский – М.: Машиностроение, 2002. 684 с. — Текст: непосредственный.
67. Тараховский, А.Ю. Технологическая наследственность при механической обработке тонкостенных прецизионных втулок / А.Ю. Тараховский, В.Б. Богущий – Текст: непосредственный // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 36-43.
68. Технология машиностроения: В 2 т. Т1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский [и др.]; Под ред. А.М. Дальского. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 564 с. — Текст: непосредственный.
69. Технология машиностроения: В 2 т. Т2. Производство машин: Учебник для вузов / Бурцев, В.М., Васильев А.С., Деев О.М. [и др.]; Под ред. Г.Н. Мельникова. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 640 с. — Текст: непосредственный.
70. Чудин, В.Н. Вытяжка листовых изделий коробчатых форм / В.Н. Чудин – Текст: непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. 2002. № 6. С. 3-8.

71. Шинкин, В.Н. Простая аналитическая зависимость модуля упругости от высоких температур для некоторых сталей и сплавов / В. Н. Шинкин – Текст: непосредственный // Обзор чугуна и стали СНГ. 2018. Т. 15. С. 32-38.
72. Яковцев, А.Д. Работа на строгальных и долбежных станках. Учебник для проф.-техн. училищ / А.Д. Яковцев. – Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: «Высшая школа», 1971. – 264 с. — Текст: непосредственный.
73. Ямников, А.С. Влияние погрешностей формы и положения базовых поверхностей сборного осесимметричного корпуса на размер прилегающего контура / А.С. Ямников, Е.Н. Родионова, О.А. Ямникова, И.А. Матвеев – Текст: непосредственный // Измерительная техника, №8, 2019. С. 29-32.
74. Ямников, А.С. Влияние погрешности формы и положения черновых базовых поверхностей на точность изготовления детали «Коробка» / А.С. Ямников, Е.А. Даниленко – Текст: непосредственный // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2021. №12. С. 37-43.
75. Ямников, А.С. Влияние погрешности формы измерительной базы на точность выполнения и контроля заданных координат поверхностей / А.С. Ямников, Е.А. Даниленко – Текст: непосредственный // Измерительная техника. 2022. №3. С. 24-28.
76. Ямников, А.С. Влияние технологии изготовления секций полых осесимметричных корпусов на биение базовых торцов / А.С. Ямников, И.А. Матвеев, О.А. Ямникова – Текст: непосредственный // Технология машиностроения. 2017. № 12. С. 37-41.
77. Ямников, А.С. Основы технологии машиностроения/ Учебник. / А.С. Ямников [и др.]; Под ред. Ямникова А.С./ Допущен Минобрнауки. Тула, Изд-во ТулГУ. 2006 г. 269 с. — Текст: непосредственный.
78. Ямников, А.С. Проявление технологического наследования при токарной обработке нежестких трубных заготовок / А.С. Ямников, И.А.

- Матвеев, Е.Н. Родионова – Текст: непосредственный // Черные металлы. 2019. №5. С. 36-40.
79. Ямников, А.С. Упруго-наследственные погрешности закрепления нежестких коробчатых заготовок / А.С. Ямников, Е.А. Даниленко, О.А. Корнев, А.А. Маликов – Текст: непосредственный // Черные металлы. 2021. №10. С. 68-77.
80. Ямников, А.С. Фрезерная базирующе - зажимная оправка / А.С. Ямников, М.Н. Богомоллов, А.О. Чуприков – Текст: непосредственный // Технология машиностроения. 2019. № 12. С. 13-17.
81. Ямникова, О.А. Влияние овальности базовых поверхностей тонкостенных протяжённых осесимметричных полых деталей на погрешности измерения радиального биения в призмах / О.А. Ямникова, А.С. Ямников, И.А. Матвеев – Текст: непосредственный // Измерительная техника. 3-2018. С. 32-36.
82. Vazrov, V.M. Quality of surface modules in machine parts / V.M. Vazrov, A.G. Suslov, O.V. Taratynov, A.N. Shoev – Text: electronic // Russian Engineering Research. 2013. T. 33. № 11. Pp. 651-654.
83. Cowin, S.C. Continuum mechanics of anisotropic materials / Cowin S.C. – Text : electronic // Springer, 2013. 438 p.
84. Danilenko, E.A. Increasing the accuracy of processing thin-walled box-shaped parts / E.A. Danilenko and A.S.Yamnikov – Text: electronic // 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1901 012003. V International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update"16-17 March. 2021. Omsk, Russia. С. 323-331. DOI: 10.25206/978-5-8149-3246-4-2021-331-342.
85. Danilov, M.F. Optimization of the number of control points in coordinate measurements of the form, orientation, and relative position of the geometric elements of articles / M.F. Danilov, A.A. Savel'eva – Text: electronic // Measurement Techniques. 2019. T. 62. № 2. С. 126-133.
86. Glubokov, A.V. Effect of the number of check points of a surface profile on the error of measuring deviations from straightness / A.V. Glubokov, S.E.

- Ped', S.V. Glubokova – Text: electronic // Measurement Techniques. 2017. T. 60. № 2. C. 134-139.
87. Hongwei, W. Coupling and Decoupling Measurement Method of Complete Geometric Errors for Multi-Axis Machine Tools / Hongwei W., Yan R., Shengyong Zh. and Yulong Li. – Text: electronic // Appl. Sci. 2020, 10, 2164; doi:10.3390/app10062164.
88. Kut, S. Bending Moment and Cross-Section Deformation of a Box Profile / S. Kut, F. Stachowicz – Text: electronic // Advances in Science and Technology. Research Journal. June 2020, Vol. 14, Iss. 2, pp. 85–93. <https://doi.org/10.12913/22998624/118552>.
89. Madureira, L.R. Deformation of thin straight pipes under concentrated forces or prescribed edge displacements/ L.R. Madureira, F.Q. Melo – Text: electronic // Mechanics Research Communications. 2015. Vol. 70, pp. 79–84.
90. Martinova, L.I. Development of automatic measuring cycles for assessing the position of the workpiece on the machine / L.I. Martinova, A.V. Stas – Text: electronic // Komp'yuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tekhnologii, materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet. 2017, pp. 629-633.
91. Pisarciuc, C. The use of statistical process control to improve the accuracy of turning / C. Pisarciuc – Text: electronic // 20th innovative manufacturing engineering and energy conference (IMANEE 2016). Ser. Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161. 8 p.
92. Samper, S. Taking into Account Elastic Displacements in 3d Tolerancing: Models and Application / S. Samper, M. Giordano – Text: electronic // Journal of Materials Processing Technology, 1998. № 78(1). Pp. 156-162.
93. Shen, J. Sensitivity to local imperfections in inelastic thin-walled rectangular hollow section struts / J. Shen and M.A. Wadee – Text: electronic // Structures, 17, 2019, 43–57.

94. Shinkin, V.N. Simple analytical dependence of elastic modulus on high temperatures for some steels and alloys / V.N. Shinkin – Text: electronic // CIS Iron and Steel Review. 2018. Vol. 15. P. 32–38.
95. Söderberg, R. Improving Decision Making by Simulating and Visualizing Geometrical Variation in Non-Rigid Assemblies / R. Söderberg, C. Wickman, L. Lindkvist – Text: electronic // CIRP Annals. 2008. Vol. 57. Pp. 175-178.
96. Sosenushkin, E.N. Stress state and deformability of metal in axisymmetric extension / E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, V.V. Emelyanov – Text: electronic // Engineering Research. 2015. Vol. 35, No. 6. Pp. 462-465.
97. Ssab. Bending of high strength steel. – 2022. – URL: [www.ssab.com](http://www.ssab.com) (дата обращения 25.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
98. Stebunov, S. Influence of Contact Friction Conditions on Thin Profile Simulation Accuracy in Extrusion / S. Stebunov, N. Biba and A. Lishni – Text: electronic // Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, Switzerland. 2012, Vol. 491 pp. 35-42. doi:10.4028.
99. Swic, A. Accuracy Control in the Machining of Low Rigidity Shafts / A. Swic, D. Wołos, J. Zubrzycki – Text: electronic // Industrial and service robotics, Applied Mechanics and Materials, 2014. Vol. 613. 357 p.
100. Świć, A. The Use of Neural Networks and Genetic Algorithms to Control Low Rigidity Shafts Machining / A. Świć, D. Wołos, A. Gola, G. Kłosowski – Text: electronic // Sensors 2020, 20, 4683. <https://doi.org/10.3390/s20174683>.
101. Takahiro, M. Deformations of box complexes / M. Takahiro – Text: electronic // Cornell University: Mathematics > Combinatorics. [Submitted on 11 Dec 2013 (v1), revised 11 Jan 2015 (this version, v5), latest version 28 Jun 2015 (v6)]. <https://arxiv.org/abs/1312.3051v5>.
102. Wojes. Working Metal – The Process of Annealing / Wojes, Ryan. – Text: electronic // ThoughtCo, Aug. 28, 2020, [thoughtco.com/annealing-explained-2340013](https://www.thoughtco.com/annealing-explained-2340013).

103. Yamnikov, A.S. Errors in Clamping Thin-Walled Pipe / A.S. Yamnikov, O.A. Yamnikova, I.A. Matveev, E.N. Rodionova – Text: electronic // Russian Engineering Research. 2019, Vol. 39, Iss. 11, pp. 966–969.
104. Yamnikov, A.S. Influence of the Shape Error of Measuring Base on the Accuracy of Manufacturing Parts from Stamped Blanks / A.S. Yamnikov, E. A. Danilenko – Text: electronic // Measurement Techniques. Vol. 65, No. 3, June, 2022. Pp. 174-179. Q4. DOI: 10.1007/s11018-022-02065-w
105. Yamnikov, A.S. Relationship of the method of obtaining the original billet with the accuracy of manufacturing of the extended axisymmetric bodies / A.S. Yamnikov, E.N. Rodionova, I.A. Matveev – Text: electronic // CIS Iron and Steel Review, 2020. Vol. 20, pp. 25–28.
106. Yamnikov, A.S. The Effect of Errors of the Form and Position of the Base Surfaces of a Composite Axisymmetric Body on the Size of an Adjacent Contour / A.S. Yamnikov, E.N. Rodionova, O.A. Yamnikova, I.A. Matveev – Text: electronic // Measurement Techniques. November 2019, Vol. 62, Iss. 8, pp. 692–696.
107. Yamnikova, O.A. Influence of the ovality of the base surfaces of thin-walled extended axially symmetric hollow parts on the error of radial runout measurements in prisms / O.A. Yamnikova, A.S. Yamnikov, I.A. Matveev – Text: electronic // Measurement Techniques. 2018. V. 61. no 3. pp. 251-257.
108. Younas, N. Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming Processes using Non-Quadratic Anisotropic Plasticity Models and Solid-Shell Finite Elements / N Younas, H Chalal, F Abed-Meraim. – Text: electronic // 23rd International Conference on Material Forming, ESAFORM 2020, May 2020, Cottbus, Germany. 8 pp. fahal-03246909f.
109. Базирование и закрепление тонкостенных деталей / SCHUHK. URL: <https://konstruktions.ru/podrobnee-det/bazirovanie-i-zakreplenie-tonkostennykh-detalej.html> (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

110. Конспект лекций для подготовки специалистов направлений: 151000 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». [Электронный ресурс] URL: [https://studopedia.ru/3\\_18398\\_konspekt-lektsiy.html](https://studopedia.ru/3_18398_konspekt-lektsiy.html) (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
111. Коробчатый магазин "Улитка" к АГС-17 "ПЛАМЯ" <https://www.derr.su/korobchatyy-magazin-ulitka-k-ags-17-plamya-mt-38-10981.html>. (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
112. Пистолет-пулемет Шпагина ППШ-41. <https://www.drive2.ru/b/486369244498363052/> (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
113. Повышая эффективность в промышленности и здравоохранении – URL:<http://www.renishaw.ru> (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
114. Секретная история ППШ, часть четвертая. [https://pikabu.ru/story/sekretnaya\\_istoriya\\_ppsh\\_chast\\_chetvertaya\\_6239533](https://pikabu.ru/story/sekretnaya_istoriya_ppsh_chast_chetvertaya_6239533) (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
115. Технология обработки металла на станках с программным управлением. Установка заготовок и приспособлений на станке URL: [https://ozlib.com/854622/tehnika/ustanovka\\_zagotovok\\_prisposobleniy\\_stanke](https://ozlib.com/854622/tehnika/ustanovka_zagotovok_prisposobleniy_stanke) (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
116. Dassault Systemes SolidWorks Corporation. – URL:<http://https://www.solidworks.com/ru> (дата обращения: 18.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- $\varepsilon$  – погрешность установки;
- $\varepsilon_6$  – погрешность базирования;
- $\varepsilon_3$  – погрешность закрепления;
- $\varepsilon_{пр}$  – погрешность положения заготовки;
- $EFA$  – неплоскостности базовой поверхности;
- $TFA$  – допуск неплоскостности базовой поверхности;
- $A_j$  – номинальный размер любого увеличивающего звена;
- $A_q$  – номинальный размер любого уменьшающего звена;
- $j$  – индекс увеличивающего звена;
- $q$  – индекс уменьшающего звена;
- $n$  – число увеличивающих звеньев;
- $m$  – число уменьшающих звеньев;
- $i$  – индекс звена;
- $k$  – число звеньев размерной цепи;
- $C(A_j)$  – координата середины поля допуска любого увеличивающего звена;
- $C(A_q)$  – координата середины поля допуска любого уменьшающего звена;
- $E_s(A_\Delta)$  – верхнее отклонение замыкающего звена;
- $E_i(A_\Delta)$  – нижнее отклонение замыкающего звена;
- $A_{\Delta \max}$  – максимальное значение замыкающего размера цепи;
- $A_{\Delta \min}$  – минимальное значение замыкающего размера цепи;
- $P_1, P_2$  – силы зажима;
- $F$  – ширина выреза вкладыша;
- $H$  – высота вкладыша;
- $M$  – ширина вкладыша;
- $\varphi$  – угол между верхней полкой и боковой стенкой детали;
- RMP40 – измерительный датчик фирмы RENISHAW;
- $n$  – высота приспособления;
- $h$  – высота детали;
- $r$  – переходный радиус;

$EFB$  – неплоскостность дна;

$TFB$  – допуск неплоскостности дна;

$\rho$  – коэффициенты корреляции между переменными;

$\Delta$  – величину упругой деформации;

$A$  – ширина внутреннего выступа Ш-образного ступенчатого вкладыша;

$B$  – ширина паза детали  $b$ ;

$D$  – ширина стенки детали;

$E$  – высота внутреннего выступа Ш-образного ступенчатого вкладыша;

$\Pi$  – годовой выпуск изделий;

$C_1$  – себестоимость детали по технологии с ЧПУ;

$C_2$  – себестоимость детали по универсальной технологии;

$\mathcal{E}_r$  – годовой экономический эффект.

**СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ**

**погрешность установки** – отклонение положения заготовки на станке от требуемого. Погрешность установки состоит из погрешности базирования, погрешности закрепления и погрешности положения заготовки, вызываемой неточностью приспособления;

**погрешность базирования** – отклонение фактически достигнутого положения заготовки при базировании от требуемого;

**погрешность закрепления** – деформация тела заготовки под действием сил зажима, обычно превосходящих силы резания на порядок;

**погрешность положения** – определяется погрешностями при изготовлении и сборке его установочных элементов, износом установочных элементов и ошибками установки приспособления на станке;

**погрешность формы** – макрогеометрические отклонения, изменяющие форму поверхности детали в целом;

**деформация** – изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением друг относительно друга за счет приложения усилия, при котором тело искажает свои формы;

**неплоскостность** – отклонение от плоскостности, при котором поверхность металлопродукции или ее отдельные части имеют вид чередующихся выпуклостей или вогнутостей, образующих не менее двух вершин отдельных волн, не предусмотренных формой проката;

**тонкостенная деталь** – это деталь у которой соотношение длины и толщины стенки превосходит;

**шероховатость поверхности** – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине;

**технологический процесс** – это система взаимосвязанных действий, выполняющихся с момента возникновения исходных данных до получения нужного результата;

**допуск** – это разница между наибольшим и наименьшим (плюс-минус) предельными значениями параметров отклонения от заданных параметров;

**измерительная база** – база, используемая для определения относительного положения заготовки или изделия и средств измерения;

**неисправимый брак** – брак, в котором хотя бы один из дефектов, обусловивших забракование продукции, является неустранимым;

**исправимый брак** – продукция, имеющая дефекты, которые исправлять технически возможно и экономически целесообразно;

**трудоемкость** – количество рабочего времени человека, затрачиваемого на производство единицы продукции;

**операция** – часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте, над одним или несколькими одновременно обрабатываемыми или собираемыми изделиями, одним или несколькими рабочими;

**установ** – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки или собираемой сборочной единицы;

**остаточные напряжения** – упругая деформация и соответствующее ей напряжение в твердом теле при отсутствии действия на него механического воздействия извне;

**базирование** – поверхность, совокупность поверхностей, ось, точку детали или сборочной единицы, по отношению к которым ориентируются другие детали, изделия или поверхности детали, обрабатываемые или собираемые на данной операции;

**прилегающая прямая** – прямая, соприкасающаяся с реальным профилем и расположенная вне материала детали так, чтобы отклонение от нее наиболее удаленной точки реального профиля в пределах нормируемого участка имело минимальное значение.

**корреляционный анализ** – статистический метод изучения взаимосвязи между двумя и более случайными величинами.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Характеристика материала сталь 30ХГСА

Таблица 1 – Характеристика материала сталь 30ХГСА ГОСТ 11268-76

Марка стали	30ХГСА
Заменитель стали 30ХГСА	40ХФА, 35ХМ, 40ХН, 25ХГСА, 35 ХГСА
Классификация стали 30ХГСА	Сталь конструкционная легированная ГОСТ 11268-76
Применение стали 30ХГСА	корпус обшивки, вал, крепежная деталь, работающая при низкой температуре. оси, зубчатое колесо, фланец, лопатка компрессорная, работающая при температуре до 200°С, рычаг, толкатель, ответственная сварная конструкция, работающая при знакопеременной нагрузке

Таблица 2 – Химический состав материала сталь 30ХГСА, %

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28 - 0.34	0.9 - 1.2	0.8 - 1.1	до 0.3	до 0.025	до 0.025	до 0.8- 1.1	до 0.3

Таблица 3 – Температура критических точек материала сталь 30ХГСА

$A_{c1} = 760$ , $A_{c3}(A_{cm}) = 830$ , $A_{r3}(A_{rcm}) = 705$ , $A_{r1} = 670$ , $M_n = 352$
--

Таблица 4 – Механические свойства при T=20°С материала сталь 30ХГСА

Сортамент	Размер	Напр.	σ <sub>B</sub>	σ <sub>T</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ	К <sub>CU</sub>	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>	-
Лист			1080	830	10	45	490	Состояние поставки

Таблица 5 – Технологические свойства материала

Свариваемость:	ограничено свариваемая
Флокеночувствительность:	чувствительна
Склонность к отпускной хрупкости:	склонна

Таблица 6 – Физические свойства материала сталь 30ХГСА

T	E 10- 5	α 10 6	l	γ	C	R 10 9
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)	Ом·м

20	2,15		38	7850		210
100	2.11	11.7	38	7830	496	
200	2.03	12.3	37	7800	504	
300	1.96	12.9	37	7760	512	
400			36	7730	533	
500	1.73	13.7	34	7700	554	
600	1.64	14.0	33	7670	584	
700	1.43	14.3	31		622	
800	1.25	12.9	30		693	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Акт внедрения

СТП СМК.624-2002

Филиал АО "КБП" - "ЦКИБ СОО"



Утверждаю  
 Бриг. Главного инженера  
 М. В. Солодов

2022 г.

Акт № 25/17-22

внедрения технологического процесса  
 сборочный узел «Коробка»

(обозначения и наименование комплекта технологических документов)

В соответствии с комплектом ТД изготовлена (подвергнута входному контролю) установочная партия сборочных единиц в количестве 20 штук с обеспечением требований КД (перечня контролируемых параметров).

По результатам работ с установочной партией выявлены следующие замечания: без замечаний

Технологический процесс внедрен в цехе № 11

Акт составлен комиссией в следующем составе:

Председатель комиссии:

В.В. Борисов -начальник цеха №11  
 (подпись, инициалы, фамилия)

Члены комиссии:

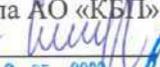
И.А. Андреева -технолог  
 (подпись, инициалы, фамилия)

Т.А. Луккина -ОТК цеха №11  
 (подпись, инициалы, фамилия)

Е.А. Даниленко ведущий инженер-технолог  
 (подпись, инициалы, фамилия, должность, должность работника комплекта ТД)

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Акт о принятии к внедрению результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ Проректор по научной работе ТулГУ  М.С. Воротилин 05 2022 г.	УТВЕРЖДАЮ Врио Главного инженера филиала АО «КБП» – «ЦКИБ СОО»  М.В. Солодов « 16. 05. 2022 »
	

**АКТ**  
о принятии к внедрению результатов  
диссертационной работы Даниленко Е.А.

Настоящий акт составлен "16" мая 2022 г. представителями Тульского государственного университета д.т.н., проф. Ямниковым А.С., д.т.н., зав. кафедрой «Технология машиностроения» Маликовым А.А., аспирантом Даниленко Е.А. и представителями филиала АО «КБП» – «ЦКИБ СОО» главным технологом, начальником отделения 6 Буниным А.Н., начальником отдела 65 Бликовым А.Н. в том, что научная работа аспиранта Даниленко Е.А., выполненная на тему: «Повышение точности коробчатых корпусов из листоштампованных заготовок с учётом технологического наследования при обработке и сборке» внедрена в филиале АО «КБП» – «ЦКИБ СОО».

Внедрение данной работы включает в себя:

- обоснование конструкции специального зажимного приспособления, предназначенного для фиксации нежесткой призматической заготовки с большими погрешностями формы, позволяющего снизить влияние погрешностей формы штампованной поверхности большой протяженности и обеспечить выполнение требуемых размеров,
- обоснование конструкции зажимного приспособления-спутника, предназначенного для базирования тонкостенных корпусных деталей, позволяющего обеспечить точность обработки заготовок пониженной жесткости.
- разработку способа фиксации нежесткой призматической заготовки с большими погрешностями формы, позволяющего обеспечить точность обработки, реализованного в специальном приспособлении,
- разработку способа выверки тонкостенных коробчатых заготовок позволяющего обеспечить точности выполнения координат отверстий производимых в приспособлении-спутнике.

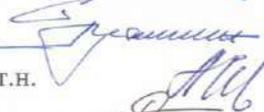
Кроме того, внедрение научной работы позволило:

- сократить неисправимый брак в 5 раз.
- получить условный годовой экономический эффект по усовершенствованному технологическому процессу в сумме 260187.5 руб.

От филиала АО «КБП» – «ЦКИБ СОО»:

Главный технолог, нач. отделения 6  Бунин А.Н.  
Начальник отдела 65 Бликов А.Н.

От ТулГУ:

Зав. каф. ТМС ТулГУ, д.т.н.  Маликов А.А.  
Профессор каф. ТМС ТулГУ, д.т.н. Ямников А.С.  
Аспирант каф. ТМС ТулГУ Даниленко Е.А.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

## Акт о внедрении результатов научно-квалификационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Григорьев

Котов В.В.

« 02 »

03

2022 г.



о внедрении результатов научно-квалификационной работы  
Е.А. Даниленко «ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОРОБЧАТЫХ КОРПУСОВ  
ИЗ ХОЛОДНОШТАМПОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ» в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», доктор технических наук, профессор А.А. Маликов и директор политехнического института, доктор технических наук, профессор О.И. Борискин составили настоящий акт о том, что результаты научно-квалификационной работы аспиранта Е.А. Даниленко внедрены в разделы лекционного курса «Технология машиностроения» по направлению подготовки 15.06.01 «Машиностроение».

Заведующий кафедрой ТМС

А.А. Маликов

Директор ПТИ

О.И. Борискин

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

## Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2781937

**Способ фиксации нежесткой призматической заготовки с незамкнутой верхней поверхностью при механической обработке на станке**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Даниленко Евгений Анатольевич (RU), Ямников Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022100285

Приоритет изобретения 11 января 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 января 2042 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 6806007214-1910294e0b02414505c7  
Евгений Ю.С. Зубов  
Действителен с 2022.06.26.03.2023

*Ю.С. Зубов*



## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

## Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2783244

**Приспособление - спутник для базирования и закрепления тонкостенной корпусной детали с пазом**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Даниленко Евгений Анатольевич (RU), Ямников Александр Сергеевич (RU), Миляев Александр Михайлович (RU)*

Заявка № 2021130657

Приоритет изобретения **20 октября 2021 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **10 ноября 2022 г.**

Срок действия исключительного права на изобретение истекает **20 октября 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 6806007214-1910294e3b024145d5c7  
Иванов Ю.С. Зубов Ю.С. Сергеевич  
Действителен с 2022.06.26.03.2023

*Ю.С. Зубов*

