

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Иркутский государственный технический университет»**

На правах рукописи

Макарук Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
И ПРАВКИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ
РАСКАТКОЙ РОЛИКАМИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук,
профессор А.Е.Пашков

Иркутск , 2012

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ существующих методик формообразования и правки маложестких подкрепленных деталей методами пластического деформирования	9
1.1 Описание и конструктивные особенности деталей каркаса, подвергаемых правке после механической обработки.....	9
1.2 Причины возникновения и виды отклонений, возникающих при обработке деталей.....	11
1.3 Существующие методы пластического деформирования формообразования и правки деталей.....	16
1.4 Методики расчета при определении технологических параметров процесса формообразования и правки маложестких подкрепленных деталей раскаткой роликами.....	23
1.5 Основные положения теории тонкостенных стержней.....	38
1.6 Постановка цели и задач исследования.....	46
2 Деформированное состояние детали типа балки комплексного поперечного сечения в процессе правки раскаткой роликами.....	49
2.1 Определение геометрических и крутильных характеристик комплексного сечения.....	49
2.2 Математическая модель деформированного состояния, возникающего в процессе правки деталей типа балок раскаткой роликами	57
2.3 Методика расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами деталей типа балок.....	65
Выводы по главе.....	67
3 Экспериментальные исследования по обработке раскаткой роликами...	69
3.1 Методика экспериментальных исследований.....	69
3.2 Результаты исследований и их обработка.....	76

3.2.1 Установление зависимостей деформации образцов-пластин в процессе раскатки роликами.....	76
3.2.2 Установление зависимости деформации конструктивно-подобных образцов от внутренних силовых факторов и стратегий процесса раскатки.....	87
3.3 Расчет деформаций конструктивно-подобных образцов, образованных при обработке раскаткой роликами.....	97
3.3.1 Определение значений прогибов конструктивно-подобных образцов.....	97
3.3.2 Определение значений закручивания конструктивно-подобных образцов.....	102
3.4 Сравнительный анализ деформаций конструктивно-подобных образцов при раскатке роликами, полученных экспериментальным и расчетным методами.....	107
Выводы по главе.....	114
4 Практическая реализация результатов исследования	116
4.1 Технологические рекомендации по правке деталей типа балок комплексного поперечного сечения раскаткой роликами.....	116
4.1.1 Общие требования к процессу правки раскаткой роликами.....	116
4.1.2 Требования к деталям, подвергаемым правке раскаткой роликами..	117
4.1.3 Требования к инструменту, применяемому в процессе правки раскаткой роликами.....	119
4.1.4 Правка деталей раскаткой полотна и ребер итерационным методом.....	121
4.2 Правка деталей раскаткой полотна и ребер с расчетом режимов обработки.....	127
4.3 Разработанный инструмент, применяемый при обработке раскаткой роликами.....	135
Выводы по главе.....	142
Общие выводы.....	143

Список литературы.....	145
Приложения.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и внедрение новых технологических процессов изготовления деталей, а также совершенствование уже существующих с целью повышения качества изделий, производительности труда и снижения энергозатрат являются важнейшей задачей машиностроения.

В области авиастроения решение поставленной задачи приобретает важное значение и при изготовлении деталей силового каркаса летательных аппаратов типа лонжеронов, рам, нервюр, шпангоутов и т.п. в большинстве случаев полученных фрезерованием из термически упрочненных плит и профилей алюминиевых сплавов. Серьёзной проблемой, снижающей эффективность данного технологического процесса, является коробление обработанных деталей, обусловленное влиянием технологических остаточных напряжений. Это коробление выражается в двухосном изгибе, закручивании и изменении размеров деталей.

Традиционные методы формообразования и правки подкреплённых деталей – гибка на прессах и обработка дробью не всегда позволяют добиться требуемого результата, прежде всего, в связи с большими габаритными размерами и сложной формой деталей.

Технологические возможности данного процесса могут быть существенно расширены за счет применения методов локального пластического деформирования, одним из которых является раскатка роликами.

Основным направлением настоящей диссертационной работы стали исследование и аналитическое описание процесса деформирования раскаткой роликами детали типа балки комплексного поперечного сечения (КПС), в результате которых с учетом спроектированного и изготовленного инструмента разработана технология правки данных деталей.

Автору при изучении процесса деформирования раскаткой роликами обрабатываемых деталей представилась возможность разработки

математической модели расчета двухосного изгиба и закручивания при действии растягивающих усилий, приложенных к участкам поперечного сечения балки КПС.

Диссертация подготовлена на кафедре оборудования и автоматизации машиностроения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Иркутского государственного технического университета. Объект исследований настоящей диссертации входит в список работ, выполняемых по договору № 334/10 от 27.08.2010 на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по созданию высокотехнологичного производства в рамках инновационного проекта «Разработка и внедрение комплекса высокоэффективных технологий проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолета МС-21», выполняемого совместно с ОАО «Научно-производственная корпорация «Иркут» и реализуемого на основании постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Она состоит из четырех глав.

В первой главе рассмотрены конструктивные особенности, причины возникновения и виды отклонений от заданной формы, существующие способы формообразования и правки маложестких подкрепленных деталей пластическим деформированием с описанием применяемого оборудования и методик расчета технологических параметров процесса, а также приведены основные положения теории тонкостенных стержней. По результатам анализа сделаны выводы о необходимости создания специализированного инструмента, методики расчета режимов обработки и сформулированы цели исследования, направленного на изучение процесса правки раскаткой роликами.

Вторая глава посвящена разработке учитывающей специфические свойства тонкостенных стержней математической модели расчета деформаций (двухосного изгиба и закручивания), возникающих при раскатке роликами деталей типа балок КПС. С целью дальнейшей проверки разработанной математической модели разработана методика расчета деформированного состояния (двухосного изгиба и закручивания) при раскатке роликами конструктивных элементов поперечного сечения (ребра и полотно). Также в состав этой главы входит методика расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами деталей типа балок КПС, разработанная на основе математической модели.

В третьей главе приведены методика и результаты экспериментального исследования по раскатке роликами КПО, включающие в себя эмпирические зависимости деформации образцов (деталей) от технологических параметров и последовательности обработки. После сравнительного анализа результатов расчета и экспериментального исследования сделан вывод об адекватности разработанной методики расчета технологических параметров.

Четвертая глава представлена методикой определения технологических параметров процесса правки раскаткой роликами детали типа лонжерон с применением разработанного программного модуля для автоматизированного расчета необходимых растягивающих сил и координат точек их приложения, технологическими рекомендациями и описанием разработанного инструмента, применяемого при правке деталей типа балок КПС раскаткой роликами.

По результатам проделанных работ автор выносит на защиту:

1. Математическую модель расчета деформаций деталей типа балок КПС, возникающих в процессе правки раскаткой роликами.
2. Методику и результаты расчета деформированного состояния деталей, основанную на разработанной математической модели.
3. Методику и результаты экспериментального исследования, направленного на подтверждение математической модели.

4. Разработанную методику расчета технологических параметров процесса правки мало жестких подкрепленных деталей раскаткой роликами.

5. Программный модуль для автоматизированного расчета внутренних силовых факторов, необходимых для получения требуемых деформаций в процессе правки деталей раскаткой роликами.

6. Реализацию разработанной конструкции специализированного инструмента.

1 Анализ существующих методик формообразования и правки мало жестких подкрепленных деталей методами пластического деформирования

1.1 Описание и конструктивные особенности деталей каркаса, подвергаемых правке после механической обработки

Мало жесткие детали силового каркаса летательных аппаратов типа стрингеров, лонжеронов, рам, нервюр и т.п. (см. рисунки 1.1-1.5) нашли свое широкое распространение за счет небольших размеров поперечных сечений, а, следовательно, незначительной массы и вместе с тем весьма высокой удельной сопротивляемостью к действию внешних нагрузок. Такие детали в большинстве случаев изготавливают фрезерованием из термически упрочненных плит и профилей алюминиевых сплавов.

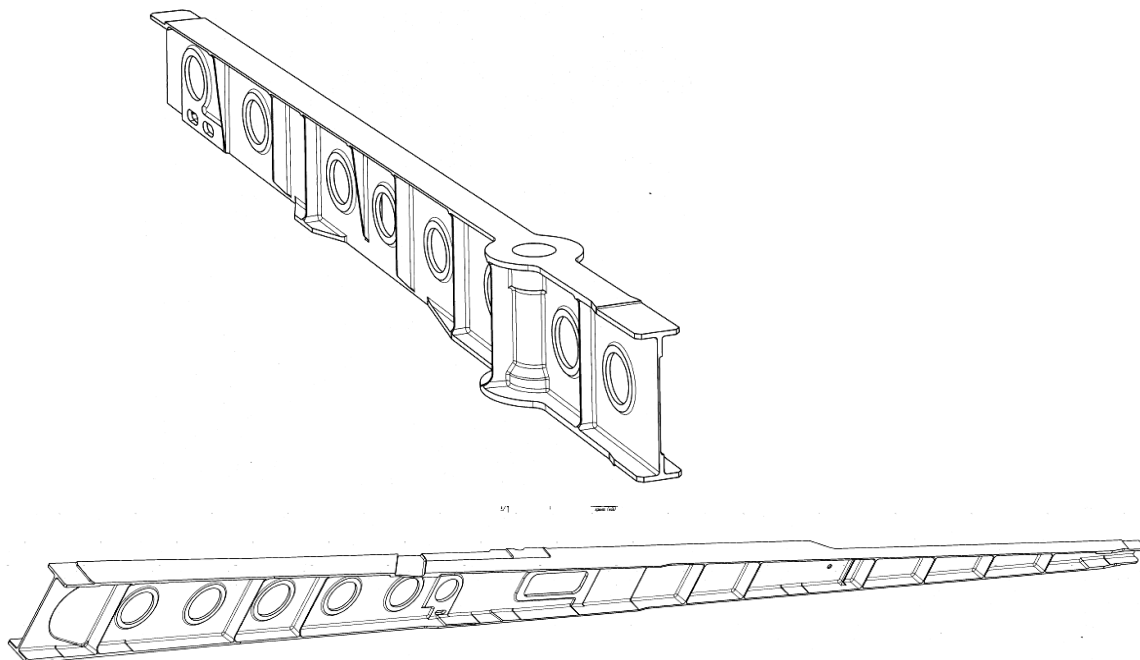


Рисунок 1.1 – Типовые конструкции детали ”Лонжерон”

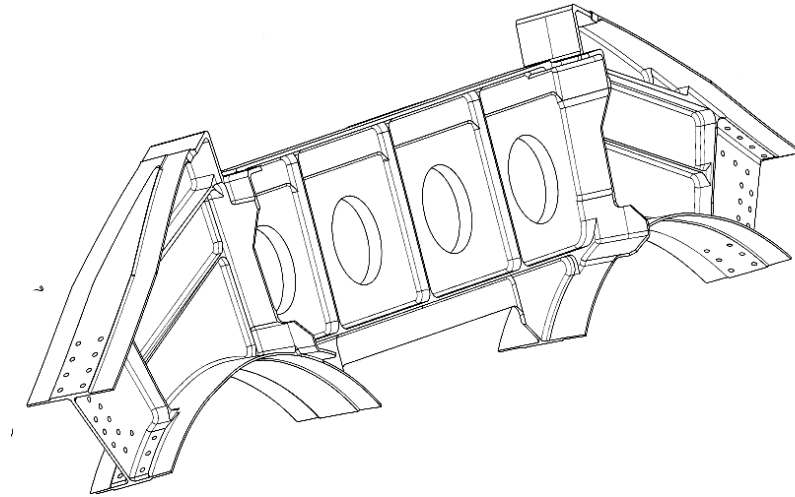


Рисунок 1.2 – Типовая конструкция детали ”Траверса”

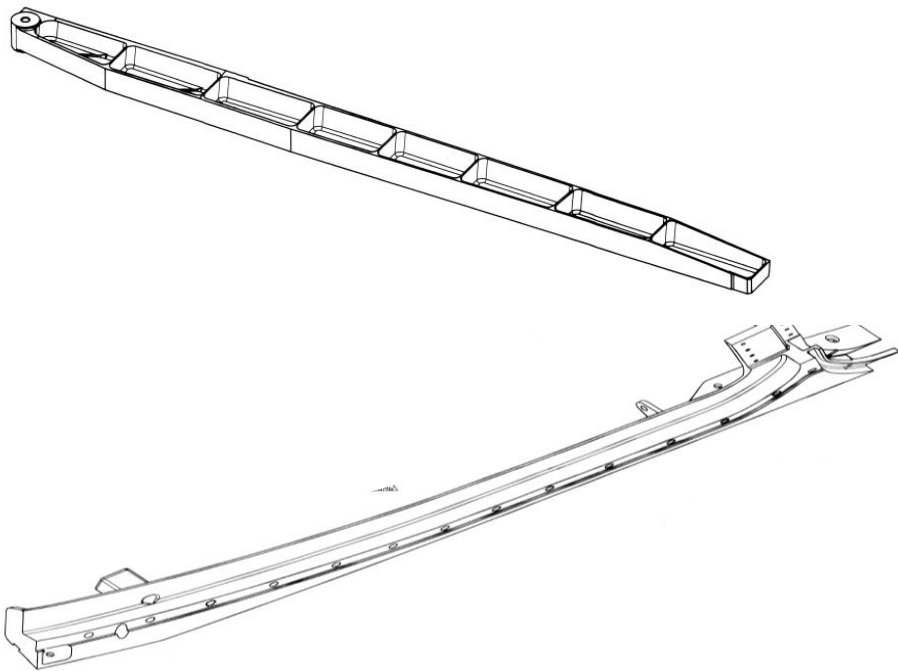


Рисунок 1.3 – Типовые конструкции детали ”Балка”

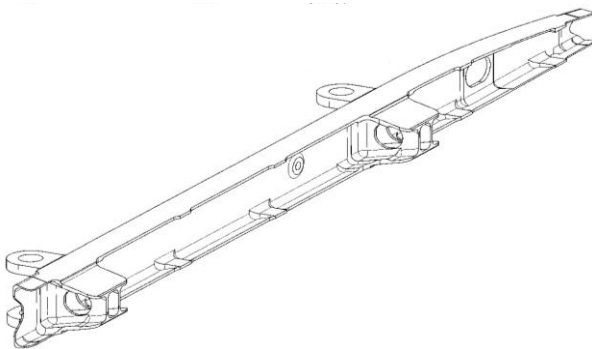


Рисунок 1.4 – Типовая конструкция
детали ”Стенка”

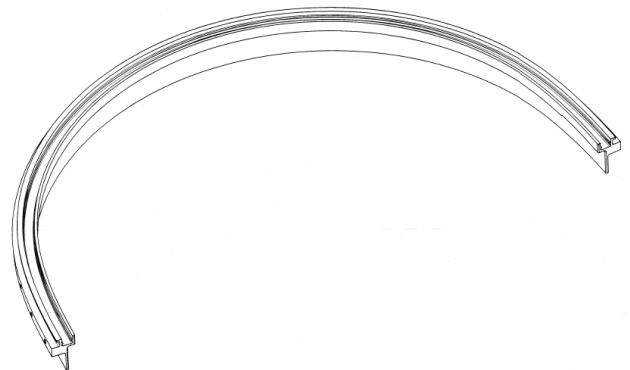


Рисунок 1.5 – Типовая конструкция
детали ”Рама”

В целях повышения жесткости данных деталей их конструкцией предусмотрено наличие дополнительных элементов: продольных и поперечных ребер (полок), что способствует образованию карманов у деталей. Типовые конструктивные элементы показаны на рисунке 1.6.

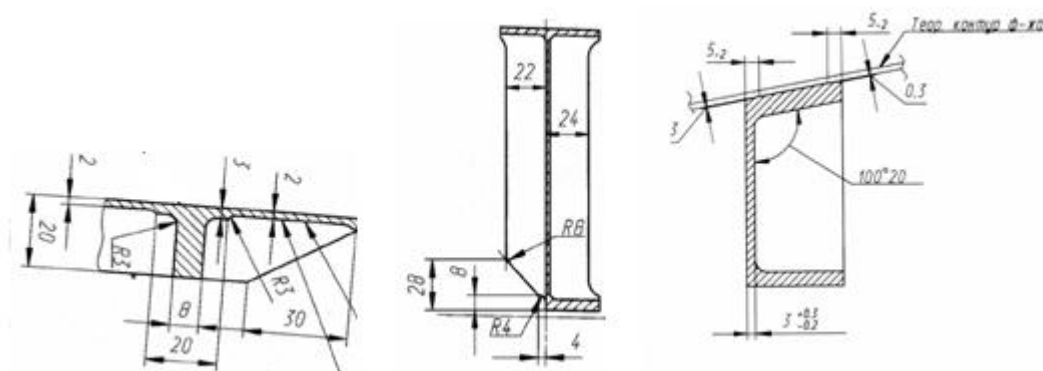


Рисунок 1.6 - Типовые конструктивные элементы деталей типа балки

Конструктивными особенностями данных деталей являются сложная форма, открытый профиль поперечного сечения и значительная протяженность, одновременно с этим при изготовлении к ним предъявляются высокие требования по точности.

1.2 Причины возникновения и виды отклонений, возникающих при обработке деталей

Появление остаточных деформаций деталей, изготовленных из термоупрочнённых алюминиевых сплавов, обусловлено двумя основными причинами: перераспределением наследственных термических остаточных напряжений после удаления припуска и пластической деформацией, возникающей в поверхностных слоях вследствие механообработки.

Заготовки подкреплённых деталей в виде прокатанных плит, профилей, поковок и штамповок из термоупрочняемых алюминиевых сплавов в состоянии поставки имеют термические остаточные напряжения,

возникновение которых обусловлено двумя факторами: неравномерными температурными деформациями и структурно-фазовыми превращениями.

При охлаждении заготовки в процессе закалки наружные слои получают пластическую деформацию растяжения, поскольку не могут принять размеры, соответствующие их температуре. В итоге, в центре формируются растягивающие напряжения, которые уравниваются сжимающими напряжениями во внешних слоях.

В связи с разной скоростью охлаждения внешних и внутренних слоев происходит неоднородное изменение удельного объема, обусловленное пересыщением α -твердого раствора алюминия легирующими элементами и образованием частиц упрочняющих фаз, плотность которых в поверхностных слоях будет выше, чем в срединных. Это приводит к возникновению остаточных напряжений – растягивающих на поверхности и сжимающих в центре.

Величина термических остаточных напряжений зависит от свойств сплава, скорости охлаждения при закалке, конфигурации и размеров заготовки. При этом распределение остаточных напряжений по сечению призматических заготовок подчиняется следующей закономерности: в центральной части образца напряжения растягивающие, затем, монотонно снижаясь, они переходят в сжимающие и на поверхности имеют максимальные отрицательные значения. Для сплава В95 максимальные термические остаточные напряжения находятся в диапазоне 10...100 МПа и зависят от толщины заготовки и условий охлаждения [9].

Основными видами механической обработки деталей типа балок являются торцовое фрезерование при обработке открытых плоскостей и концевое фрезерование при получении рёбер и карманов. Особенностью остаточного напряженного состояния поверхностного слоя детали после фрезерования является то, что направления главных осей поля остаточных напряжений, не совпадают ни с направлением формообразующих движений, ни с осями системы координат детали. Известно, что для алюминиевых сплавов,

подвергнутых фрезерованию, характерны растягивающие остаточные напряжения в тангенциальном направлении и сжимающие – в направлении, перпендикулярном ему. При этом тангенциальные и осевые остаточные напряжения сами представляют проекции главных остаточных напряжений на соответствующие оси. Угол отклонения главных осей для торцового фрезерования и фрезерования торцовой частью концевой фрезы в зависимости от элементов режима резания изменяется незначительно и может быть принят равным углу между средним направлением вектора скорости по углу контакта и перпендикуляром к вектору подачи.

Процессы изготовления профильных деталей (балки, пояса, рамы, шпангоуты, монолитные панели, лонжероны) штамповкой, прессованием, прокаткой, механообработкой сопровождаются такими дефектами, как отклонение от заданной формы и соответствующей неточностью получаемых размеров, возможным снижением качества поверхности, наличием следов разрушения в результате недопустимых деформаций и т.д.

Дефекты, связанные с нарушением формы и размеров, условно делятся на три основные группы, к которым относятся искажения поперечного сечения, искажения по длине, закручивание.

Искажения поперечного сечения характеризуются искривлением полок (см. рисунок 1.7, *а*) и стенок сечения (см. рисунок 1.7, *б*), непараллельностью полок (см. рисунок 1.7, *в*), отклонением поперечной кривизны детали от заданной (см. рисунок 1.7, *г*).

К искажениям по длине относят все отклонения от прямолинейности и отклонения от заданной кривизны в продольном направлении. Характерными представителями являются: волнистость – знакопеременное отклонение от прямолинейности в продольном направлении в плоскости, перпендикулярной поверхности листовой детали (см. рисунок 1.8, *а*); саблевидность – искривление детали в плоскости, совпадающей с плоскостью основания детали (см. рисунок 1.8, *б*); неплоскостность – отклонение от

прямолинейности детали в продольном направлении в виде прогиба постоянного знака.

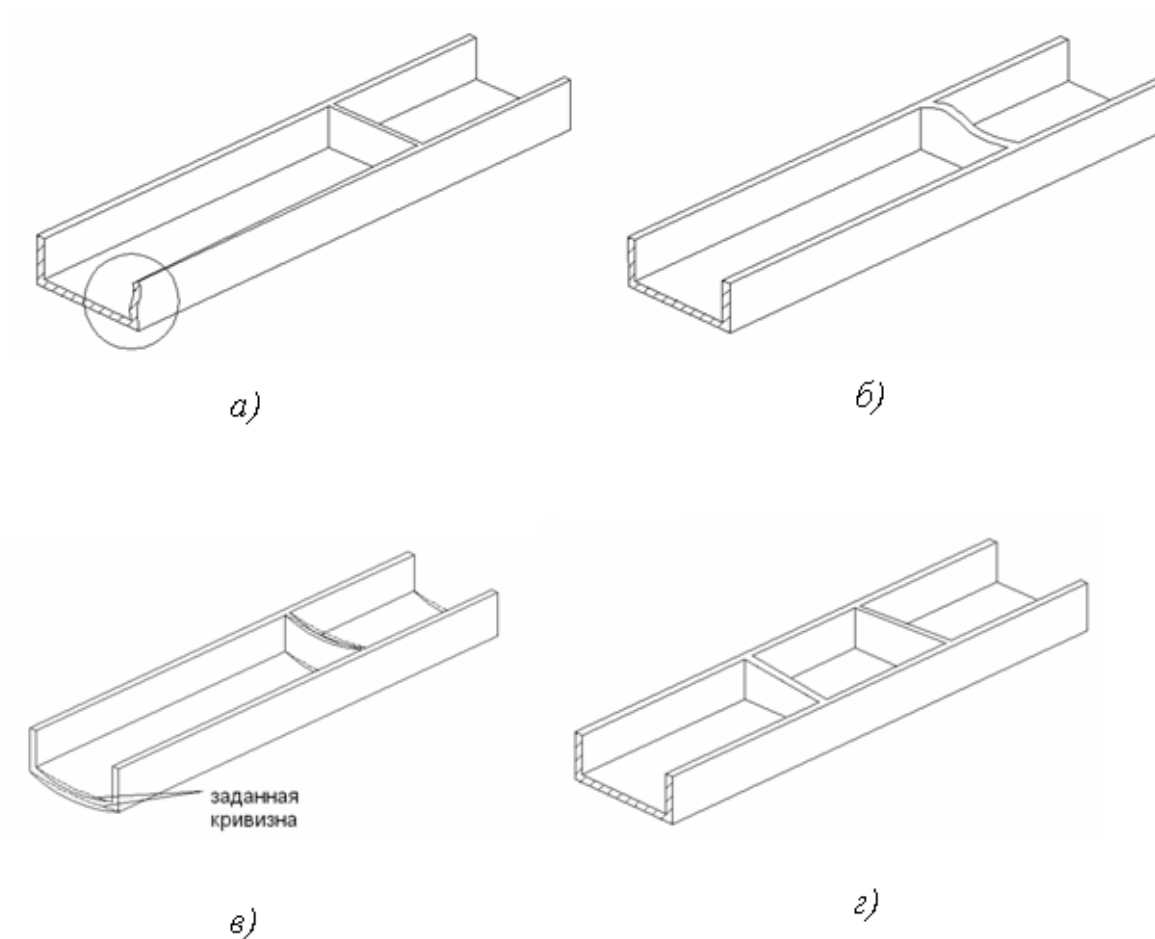


Рисунок 1.7 – Искажения поперечных сечений деталей типа балок

К закручиванию (см. рисунок 1.9) относят деформацию, связанную с угловым поворотом сечений последовательно расположенных в продольном направлении.

Основными причинами, вызывающими появление дефектов, связанных с нарушением формы и размеров изделий являются неравномерность нагрева и охлаждения их при термической обработке, неоднородность механических свойств обрабатываемого материала, ошибки при настройке оборудования, неточная установка инструмента, перераспределение остаточных напряжений в детали в процессе механообработки.

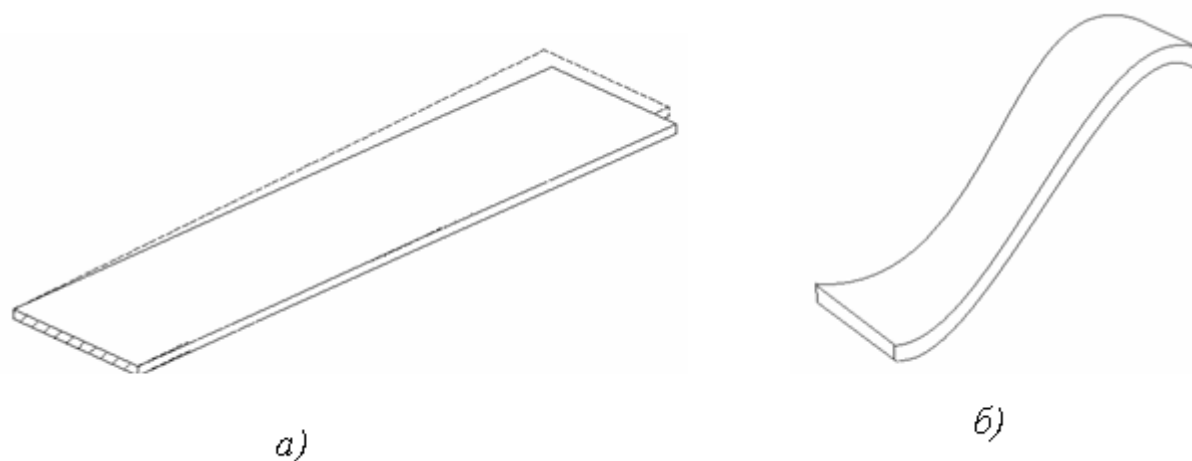


Рисунок 1.8 - Искажения по длине деталей типа балок

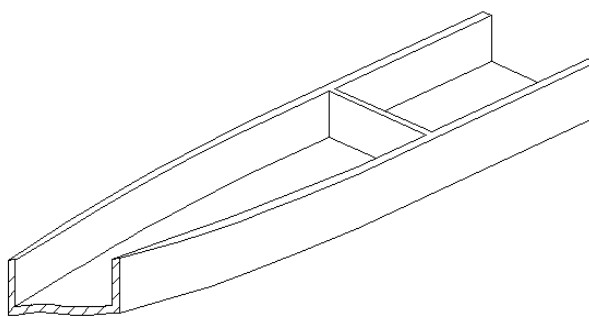


Рисунок 1.9 - Закрутка деталей типа балок

Как правило, появление дефекта связано не с одной какой-либо из перечисленных выше причин, а является следствием одновременно нескольких, что усложняет процессы правки и доводки. Так как на практике часто на одном изделии встречаются одновременно несколько дефектов, то при выборе необходимого доводочного оборудования следует остановиться на наиболее универсальных машинах и устройствах [1-17].

При анализе геометрических форм обрабатываемых деталей выявлены максимальные значения отклонений после механической обработки: по саблевидности – 0,001 м на базе 1 м, по неплоскостности – 0,004 м на базе 1 м, по единичному углу закручивания – 0,06 град/м.

1.3 Существующие методы пластического деформирования формообразования и правки деталей

Под правкой детали понимается «...технологическая операция обработки металлов давлением для придания детали (заготовки) требуемой точности формы» [18].

Согласно [19] для правки фрезерованных деталей из алюминиевых сплавов применяют следующие способы: гибку, разгибку, разводку, посадку, закрутку и дробеударную обработку.

Большое распространение имеют дефекты, связанные с простым или знакопеременным изгибом в продольном направлении, которые для деталей типа панелей устраняются локальной гибкой на гидропрессах.

Окончательная правка (доводка) общего или местного прогиба деталей из поковок, штамповок и профилей осуществляется методом свободной гибки на гидравлических прессах методом посадки или разводки полки (стенки) в специальных штампах, устанавливаемых на гидравлический пресс, и разводкой ручным молотком.

Окончательная правка (доводка) общего или местного прогиба деталей из монолитных панелей осуществляется методом свободного изгиба на прессах типа ПП-250 и СПП-160 и обдувкой дробью.

Правка и местная подгибка на прессах типа ПП- 250 и СПП- 160 производится на двух опорах путем последовательного нажатия пуансоном на деталь. Схема правки показана на рисунке 1.10. Приемы правки монолитных панелей показаны на рисунке 1.11.

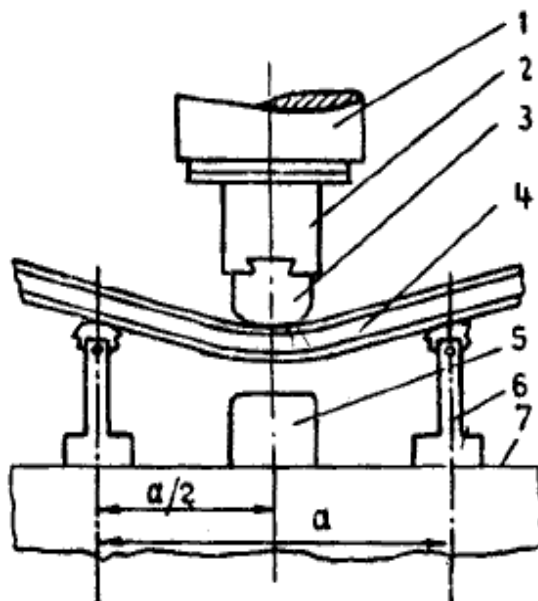


Рисунок 1.10 – Схема правки (гибки) на прессах типа ПП-250: 1 – плунжер пресса; 2 – поворотный адаптер; 3 – пуансон; 4 – деталь; 5 – ограничитель хода; 6 – опора; 7 – нижняя плита пресса).

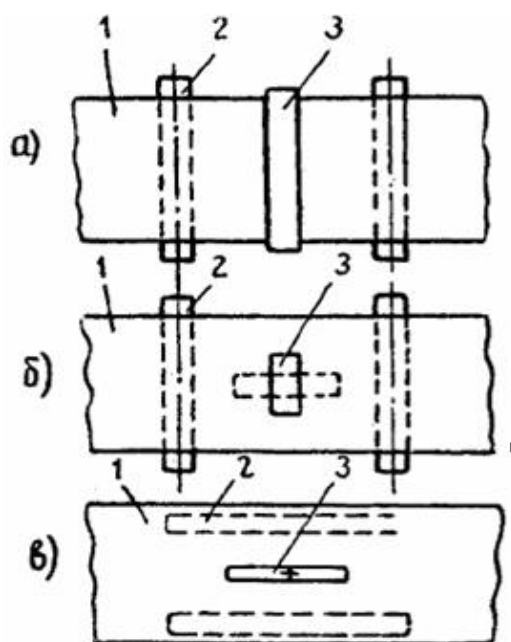


Рисунок 1.11 – Приемы правки монолитных панелей (вид со стороны плунжера): а – общего прогиба по размаху; б – местного прогиба (вспучины); в – прогиб по ширине; 1 – деталь; 2 – опора; 3 – пуансон

Сложными с точки зрения правки являются деформации, вызывающие продольную крутку. Для профилей, балок, лонжеронов, панелей тенденция к скручиванию вдоль продольной оси вызывается в первую очередь неравномерным, несимметричным размещением элементов жёсткости

относительно этой оси. Особенно сильно деформируются подобные детали, изготовленные из штамповок или поковок с последующей механообработкой. Устраняются такие дефекты в зависимости от конструктивно-технологических особенностей деталей ручной или машинной правкой скручиванием.

Правка общей или местной скрутки заготовок и деталей осуществляется закруткой на закруточных (крутильных) станках или стендах, а также методом свободного внецентренного изгиба на правильных гидравлических прессах.

Массовые коробления полотен – типа «хлопунов», неприлегание отдельных элементов к столу у тонкостенных сотовых панелей являются, как правило, следствием механообработки. Устраняются обычно рихтовкой или дробеструйной обработкой на установках типа БДУ (см. рисунок 1.12).

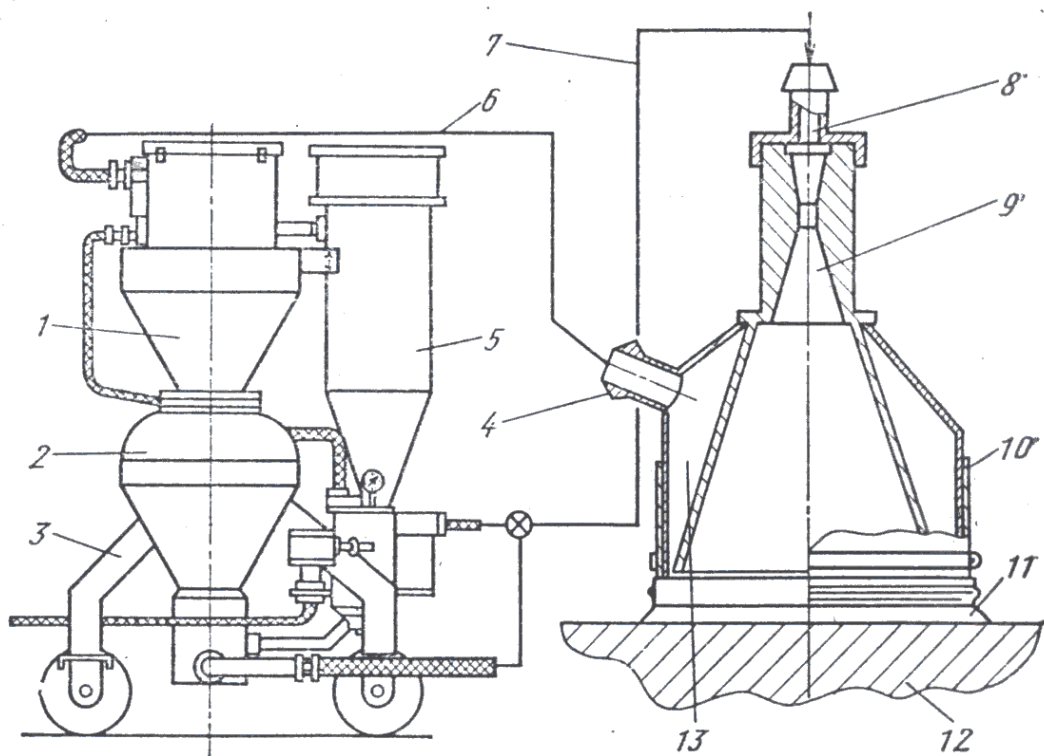


Рисунок 1.12 – Дробеструйная установка БДУ-Э2М [20]: 1 – система сбора дробы; 2 – система подачи дробы; 3 – транспортируемая тележка; 4, 8 – штуцер; 5 – система очистки дробы; 6 – рукав отсоса дробы; 7 – рукав подачи дробевоздушной смеси; 9 – сопло, подающее дробь на поверхность детали; 10 – рабочая камера, щеточное уплотнение; 12 – деталь; 13 – полость разрезания

В промышленности установки типа БДУ применяют для местного упрочнения и для формообразования деталей из листов и плит.

Деформации в плоскости детали или в перпендикулярном направлении (отклонение от плоскостности) наблюдаются у кольцевых деталей типа шпангоутов, поясов, профилей, у вытянутых поковок небольшой ширины, прессованных панелей. Устраняются такие дефекты правкой на гидропрессе.

Как правило, окна, лючки, отверстия деталей с односторонним обрешением типа рам за счёт релаксации остаточных напряжений сжимаются, теряя свои первоначальные размеры. Конструктивные элементы детали, находящиеся в зоне релаксации, как например рёбра, изгибаются, нарушаются межцентровые расстояния. Устраняются такие дефекты правкой на гидропрессах, в специальных приспособлениях.

В качестве инструмента для ручной правки деталей дробеударной обработкой может применяться устройство переносного типа (пневмопистолет) с одним профилированным центральным телом, показанное на рисунке 1.13 [20].

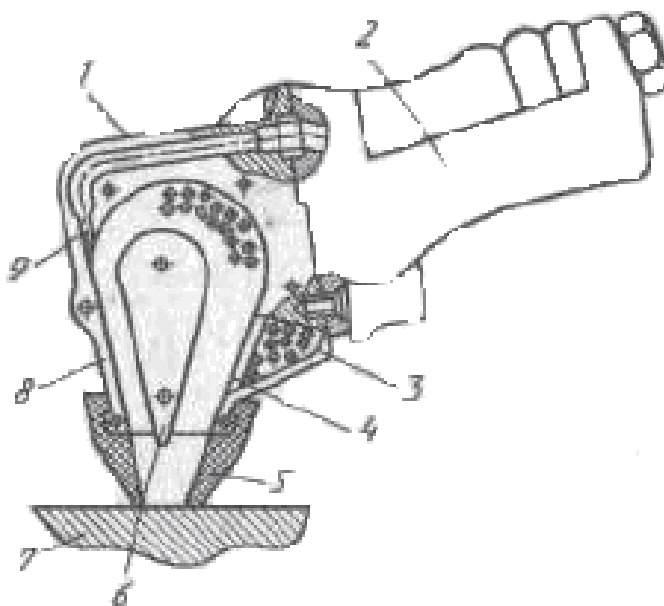


Рисунок 1.13 – Схема пневмопистолета с одним профилированным центральным телом (со снятой боковой крышкой): 1 – корпус; 2 – ручка; 3 – ловушка для хранения деформирующих тел до включения устройства в работу и сбора шариков после работы; 4 – заслонка; 5 – упругие резиновые насадки; 6 – рабочая камера; 7 – обрабатываемая поверхность детали; 8 – боковая крышка; 9 – сопло

Существующие прессовые методы правки отличаются низкой производительностью и низким уровнем механизации, а возможности дробеударной обработки при доводке профильных деталей имеет вполне определённые ограничения в связи с высокой изгибной жёсткостью деталей в продольном направлении.

В связи со значительными технологическими трудностями, возникающими при гибке крупногабаритных подкрепленных деталей на прессовом или валковом оборудовании, получили распространение методы, связанные с локальным пластическим деформированием.

Одним из направлений, расширяющим возможности, как формообразования, так и правки, является практическое внедрение в производство методов местного пластического деформирования профильных деталей местной посадкой-разводкой материала детали специальными устройствами, раскаткой рёбер, а также применением комбинированных методов обработки, например, включающих раскатку и дробеударную обработку.

За рубежом для местной посадки и разводки фирмой Eckold AG выпускается гамма специального стационарного и переносного оборудования (см. рисунки 1.14-1.16). Данное оборудование, оснащённое разнообразным инструментом для различных операций холодной обработки металлов давлением, ориентировано для применения с целью правки и доводки формы деталей после какого-либо основного метода формообразования.

Этой фирмой разработана целая гамма станков различных типоразмеров с самым разнообразным быстросменным инструментом, как для ручной, так и машинной формовки, гибки, раздачи и посадки профилей и листа. Однако эти станки конструктивно ориентированы главным образом на профили со свободным подводом инструмента в зону обработки, что не позволяет применять их для правки деталей, имеющих карманы.

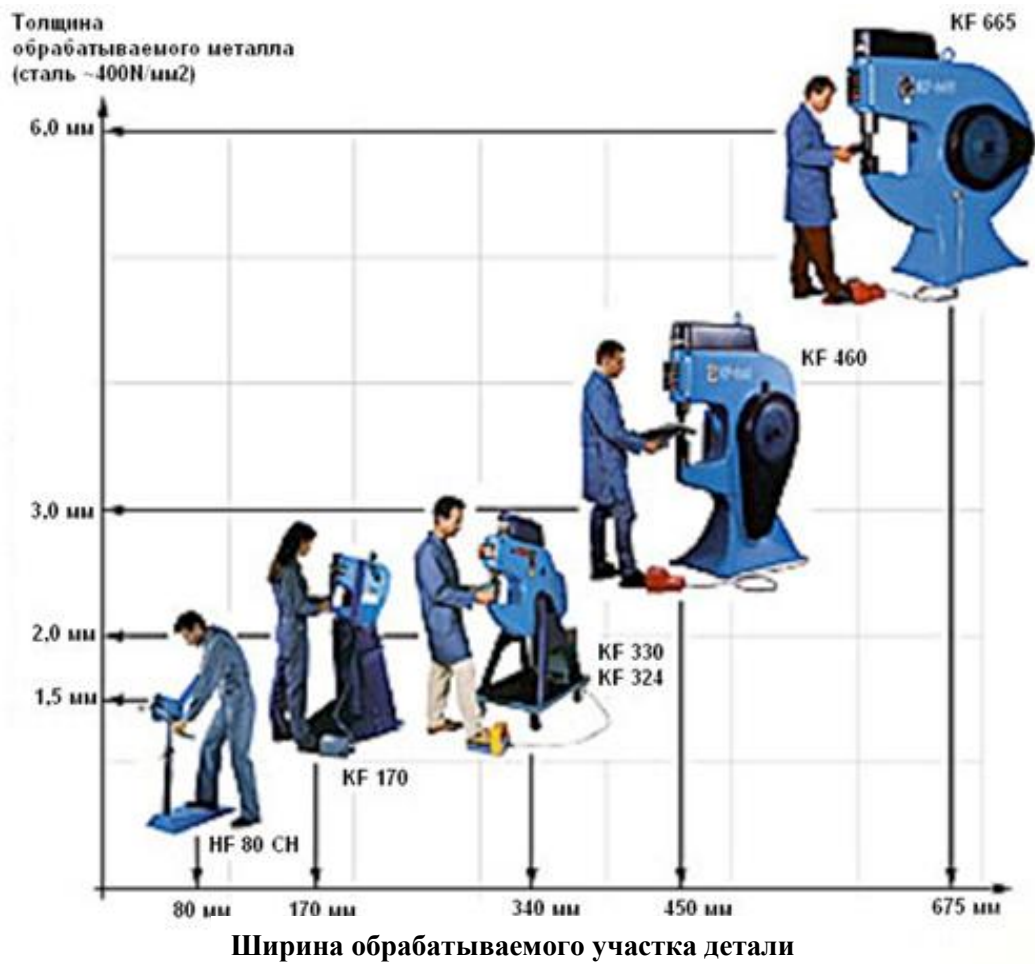


Рисунок 1.14 – «Линейка» оборудования фирмы Eskold



Рисунок 1.15 – Правка деталей местной посадкой (разводкой) полотна на прессе KF 460 фирмы Eskold AG [63]



Рисунок 1.16 – Правка деталей местной посадкой (разводкой) полотна переносным инструментом Dornier Do 228 фирмы Eckold AG [63]

Процесс формообразования деталей типа прессованных ребристых панелей раскаткой роликами упоминается в работах [21-24]. Отечественная нормативная документация на данный процесс отсутствует. Известно о применении процесса правки раскаткой роликами компанией Airbus.

В связи с отсутствием отраслевой нормативной документации на процесс раскатки роликами, для установления ограничений по деформированию деталей можно воспользоваться ограничениями, установленными в отраслевой нормативной документации на процессы местной разводки и посадки в штампах, схемы нагружения которых подобны схеме процесса раскатки. Согласно им глубина следов на детали от насечки на рабочих элементах штампа после посадки не должна быть больше допуска на номинальный размер толщины стенки (полки).

Схема нагружения детали при правке раскаткой роликами сходна с процессом прокатки на прокатном стане при замене цилиндрических валков на ролики цилиндрической (конической) формы или на ролики с круглым (параболическим) профилем [25]. Раскатываемый участок детали зажимается между двумя роликами и нагружается регулируемой силой (рисунок 1.17). При этом один из роликов может перемещаться свободно, а другой является ведущим и обеспечивает перемещение раскатного устройства (раскатника) по обрабатываемому участку детали. В результате раскатанный участок

детали пластически деформируется (удлиняется), что приводит к формоизменению детали и образованию остаточных напряжений.

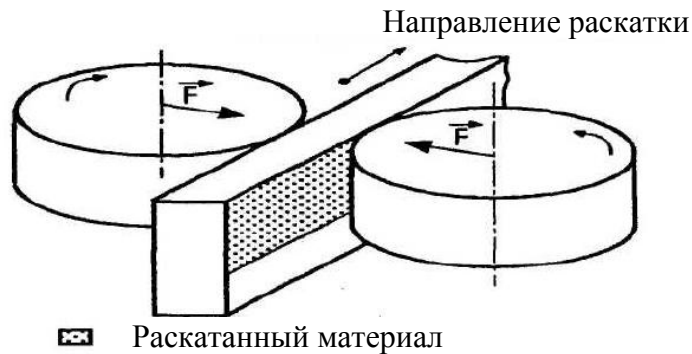


Рисунок 1.17 – Схема раскатки роликами

1.4 Методики расчета при определении технологических параметров процесса формообразования и правки мало жестких подкрепленных деталей раскаткой роликами

Решению прикладных задач, связанных с упругим и упругопластическим изгибом деталей-оболочек посвящено значительное количество исследований. В их основе лежат классические решения по упругому и пластическому изгибу [26, 27, 28], исследования по механике пластических деформаций [29, 30], работы в области теории обработки металлов давлением [31, 32].

В работах [21, 22, 23] приводится методика расчета основных технологических параметров формообразования ребристых панелей раскаткой ребер. Остаточная кривизна участка ребра панели с присоединенным с двух сторон полотном полной ширины, равной расстоянию между двумя соседними ребрами определяется в зависимости от обжатия Δh раскатанного участка ребра. Расчетная схема, использованная в [21], приведена на рисунке 1.18.

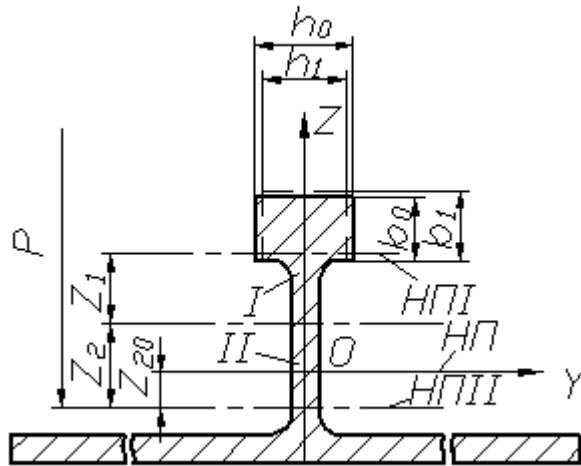


Рисунок 1.18 - Расчетная схема для определения остаточной кривизны

Схема процесса раскатки показана на рисунке 1.19.

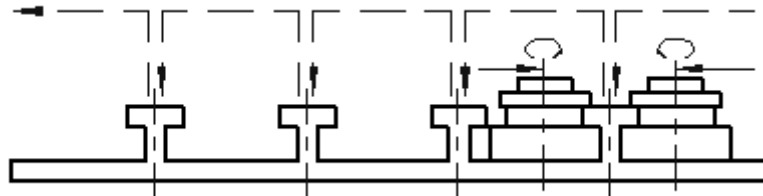


Рисунок 1.19 - Схема процесса раскатки

Для технологических расчетов предлагаются формулы:

$$\rho = R \cdot \left(1 - \frac{I_1 + I_2}{I} \right) \quad (1.1)$$

$$b_0 \left(\frac{\Delta h}{h_0} - \frac{z_1 + z_2}{\rho} \right) = C_b C_0 a \left(\sqrt{r \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (1.2)$$

где z_1 и z_2 – расстояние от границы раскатываемого и нераскатываемого участков до нейтральных поверхностей соответствующих участков (см. рисунок 1.18), ρ - радиус кривизны нейтральной поверхности участка II до разгрузки, $\Delta h = h_0 - h_1$ – обжатие, C_b - коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на уширение, C_0 - коэффициент, учитывающий влияние натяжения, $a = 2 \frac{1 - \varepsilon}{2 - 1.5\varepsilon}$ - коэффициент, зависящий от относительного обжатия, μ - коэффициент трения, R – остаточный радиус гибки, I_1, I_2 –

моменты инерции участков I и II относительно своих нейтральных поверхностей, r – радиус раскатного ролика.

При решении задачи вначале определяют значение ρ по известным параметрам с помощью выражения (1.1), а затем, решая уравнение (1.2), методом подбора находят искомый параметр Δh .

При последовательном деформировании ребер панели технологический процесс строится таким образом, чтобы форма панели не зависела от последовательности обжатий ребер [23]. Для этого необходимо выполнять два условия. При переходах от ребра к ребру полотно панели должно деформироваться в пределах упругости. Влияние смежных ребер и прилегающих участков полотна на процесс в очаге деформации не должно быть существенным.

Автором определены количественные оценки этих условий, которые можно представить в виде:

$$l_{p_{\max}} = 4/3\sigma_s b^2 / E\delta K \rho; l_{p_{\max}} / \rho < 0,1, \quad (1.3)$$

где $l_{p_{\max}}$ - длина зоны локального воздействия одного ребра вдоль его оси; σ_s , E – предел текучести и модуль упругости материала полотна; b - расстояние между ребрами панели; δ - толщина полотна панели; ρ - радиус гибки ребра. Коэффициент K учитывает соотношение жесткости полотна и ребра. Для большинства стандартных авиационных панелей $K = 1,5...2,5 \text{ м}^{-1}$ и определяется зависимостью:

$$K = \sqrt{\delta^3 / 16Ib^3}, \quad (1.4)$$

где I - момент инерции ребра с присоединенным участком полотна шириной, равной b .

Приведенные условия подтверждены экспериментально на образцах монолитных панелей из материала Д16Т с высотой оребрения 50 мм и толщиной 5 мм. В качестве критерия оценки точности выполнения указанных условий была принята относительная разность прогибов крайних ребер, находящихся в противоположных условиях деформирования.

Указанная относительная разность прогибов при соблюдении условий деформирования не превышает 0,03.

Взаимное расположение зон локальных воздействий на ребрах панели позволяет получить требуемую форму панели, а именно, прямой и косой изгиб под различными углами к оси ребер.

Необходимый угол гибки достигается с точностью 1' за счет проведения одной корректировки промежуточным замером. Дополнительный участок обжатия определяется по зависимости:

$$l_{pg} = (\alpha_K - \alpha_1)l_{p1} / \alpha_1, \quad (1.5)$$

где l_{p1} и α_1 - длина зоны локального воздействия вдоль оси ребра и его угол гибки при корректировке; α_K - требуемый угол гибки ребра.

В случае, если максимальная длина локального воздействия больше длины, необходимой для получения заданного угла, гибку следует вести повторением обжатий всех ребер. Следует учитывать, что число обжатий

$$n = \rho\alpha_K / l_{\rho_{max}}. \quad (1.6)$$

Полученная точность гибки панели в несколько раз превышает точность, достигаемую при свободной гибке впередвижку.

Работа [24] посвящена установлению закономерностей комбинированного метода формообразования панелей раскаткой ребер и обработкой дробью. В ней для расчета параметров процесс раскатки используется методика, разработанная в [21, 22, 23]. Установлены зависимости изменения кривизны в поперечном и продольном направлениях для ребристой детали, предварительно изогнутой раскаткой ребер и подвергнутой дробеударной обработке с вогнутой стороны.

Как видно из схем, показанных на рисунках 1.18, 1.19, применение данных методик ограничивается симметричным профилем ребра панели. Используемая схема обработки также накладывает ограничение на конструкцию обрабатываемых деталей. Полка ребра, подлежащего раскатке

должна быть достаточно жесткой, во избежание потери устойчивости при его сжатии роликами.

Математическая модель формоизменения при переходе от единичного внедрения индентора к равномерной односторонней и двухсторонней обработке методами ППД (дробеударной обработкой, раскаткой шариками и роликами) поверхности детали рассмотрена в работе [33].

При разработке математических моделей формирования остаточных напряжений и деформаций для различных процессов ППД в работе использовались общие подходы, применяемые при численных методах решения контактных задач.

Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта индентора и тела определяется путем исследования векторного поля смещений точек тела. При отсутствии внешних воздействий и нулевом поле смещений точек тела напряжения во всех точках тела равны нулю. Возмущающими воздействиями являются смещения поверхностных точек тела при внедрении жесткого индентора, форма которого в зависимости от технологического назначения может быть самой разнообразной: сферической, цилиндрической, торообразной и т.д.

Практический интерес представляют задачи рассмотренных в работе инденторов цилиндрической формы и других, заданных в виде поверхности вращения. При внедрении таких инденторов в упруго-пластический материал решаются соответственно плоская и осесимметричная задачи.

Для решения плоской задачи приводятся следующие уравнения равновесия в перемещениях:

$$\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (\beta + G) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + G \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \alpha \frac{\partial u \partial^2 v}{\partial x \partial x^2} + G \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial x \partial y^2} + (\beta + G) \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial y \partial x \partial y} = 0; \quad (1.7)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (\beta + G) \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + G \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \alpha \frac{\partial v \partial^2 u}{\partial y \partial y^2} + G \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial y \partial x^2} + (\beta + G) \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial x \partial x \partial y} = 0;$$

где $u = f(x, y)$; $v = f(x, y)$ - смещения точек деформированного материала относительно выбранных осей; $\alpha = E/(1 - \mu^2)$; $\beta = \mu \cdot E/(1 - \mu^2)$; $G = E/2(1 + \mu)$; E – модуль упругости.

Для определения напряжений, исходя из обобщенного закона Гука, необходимо решить задачу нахождения двух функций u и v , которые должны удовлетворять в каждой точке пространства уравнениям равновесия (1.7) и одновременно граничным условиям, заданным в виде перемещений или напряжений. Определение граничных условий осуществляется для двух областей: а – зоны контакта, ограниченной поверхностью внедрения; б – внеконтактной зоны, ограниченной поверхностью нулевых смещений.

Граничные условия в зоне контакта определяются из различных законов задания рабочей поверхности индентора.

Смещения в зоне контакта цилиндрического индентора, заданного радиусом R :

$$v(x,0) = \sqrt{R^2 - x^2} - (R - h), \text{ при } 0 \leq x \leq x_k, \quad (1.8)$$

где h - глубина внедрения индентора, x_k - граничная точка контакта индентора и поверхности тела. В первом приближении $x_k = \sqrt{(2R - h)h}$. Для индентора, радиус кривизны которого изменяется по параболическому закону $y = ax^2$ (параболический цилиндр):

$$v(x,0) = h \left(1 - d \frac{x^2}{x_k^2} \right), \text{ при } 0 \leq x \leq x_k. \quad (1.9)$$

В первом приближении можно принять $x_k = \sqrt{\frac{h}{d}}$, где d - заданная постоянная.

Индентор с произвольным законом изменения кривизны рабочей поверхности, заданным в виде ряда:

$$v(x,0) = h \left(1 - \sum_{n=1}^k d_n \frac{x^n}{x_k^n} \right), \quad (1.10)$$

где d и n - заданные постоянные.

Аналогично получаются уравнения равновесия для осесимметричной задачи с соответствующими граничными условиями.

Для всех рассмотренных частных случаев общие граничные условия:

$$\begin{aligned} u(0, y) = 0; \quad v(0, 0) = h; \\ u(x, y_m) = v(x, y_m) = 0; \quad u(x_n, y) = v(x_n, y) = 0; \\ \sigma_y(x, 0) = 0, \quad \text{при } x_k < x \leq x_n. \end{aligned} \quad (1.11)$$

При упруго-пластическом деформировании для решения уравнений (1.7) используется метод переменных параметров упругости. Так решение системы уравнений (1.7) в аналитическом виде представляет сложную задачу, можно применить численный метод решения задачи с использованием метода сеток. В этом случае задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, неизвестными в которых являются значения функций u и v в узлах сетки.

Учитывая симметричный характер деформирования в зоне контакта решение системы (1.7) может осуществляться внутри замкнутой области, ограниченной положительным направлением координат, т.е. по одну сторону относительно оси симметрии индентора (см. рисунок 1.20). При численном решении задачи формообразования рассматриваются две расчетные схемы обработки: односторонняя и двусторонняя.

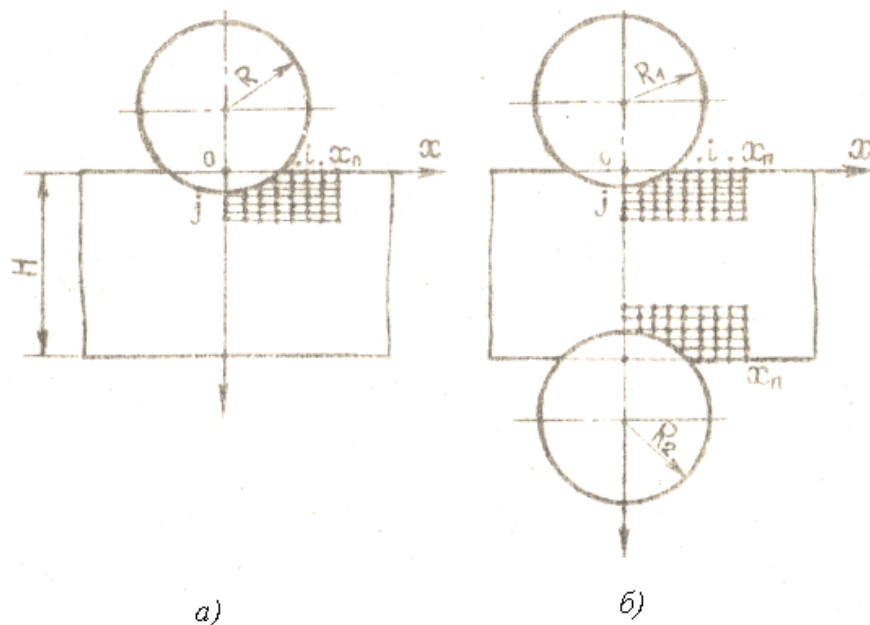


Рисунок 1.20 – Расчетные схемы обработки: а) односторонняя; б) двусторонняя

Решение задачи при односторонней обработке осуществляется в области, ограниченной координатами: $x=0$, $y=0$, $x=x_n$, $y=y_m$ (см. рисунок 1.20, а). При двусторонней обработке (см. рисунок 1.20, б) задача решается отдельно для верхнего и нижнего индентора с координатами области решения для верхнего индентора: $x=0$, $y=0$, $x=x_n$, $y=y_m$, для нижнего индентора: $x=0$, $y=H$, $x=x_n$, $y=H-y_m$.

Численная реализация задачи на ЭВМ позволяет определять остаточные напряжения в узлах сетки, зону упрочнения, усилие вдавливания для различного типа инденторов.

Также в работе приводится расчет параметров процесса формообразования типовых профильных деталей с учетом решения контактной задачи.

Задача изгиба профильной детали необходимо рассматривать как результат воздействия внешнего изгибающего момента от обработки поверхностного слоя детали. Пластически деформированный слой с толщиной h_s и осевыми остаточными напряжениями $\sigma^{ocm}(h_s)$ создает изгибающий момент относительно нейтрального слоя равный:

$$dM_{изг} = \sigma^{ocm}(h_s) B y dy, \quad (1.12)$$

где B - ширина детали, y - плечо момента.

Изменение изгибающего момента сопровождается изменением прогиба детали:

$$dM_{изг} = \frac{8EJ_x}{L^2} df_y, \quad (1.13)$$

где J_x - осевой момент инерции; L - длина детали.

Совместное решение (1.12) и (1.13) дает:

$$f_y = \frac{L^2 B}{8EJ_x} \int \sigma^{ocm}(h_s) y dy. \quad (1.14)$$

С учетом решения контактной задачи для цилиндрического индентора выражение (1.14) имеет вид:

$$f_y = \frac{L^2 B}{8EJ_x} \sum ((\alpha - \beta) \frac{\mu}{2p} [(u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) - \frac{1}{4p^2} (v_{i+1,j} - v_{i-1,j})^2] - \mu(\alpha - \beta) \frac{1}{2l} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) [1 - \frac{1}{4l} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1})]) (A - h_{sj}) p. \quad (1.15)$$

Уравнение прогибов при решении осесимметричной задачи:

$$f_y = \frac{L^2 B}{8EJ_x} \sum [\alpha \frac{1}{2p} (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) + \alpha \frac{1}{8p^2} (v_{i+1,j} - v_{i-1,j})^2 + \beta \frac{1}{ip} u_{ij} + \beta \frac{1}{2l} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) + \beta \frac{1}{8l^2} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1})^2] (A - h_{sj}) p, \quad (1.16)$$

где $p = y_m / M$ - шаг сетки; $A = H - h_{н.о.}$.

Локальный характер обработки отдельных участков профильной детали сопровождается приложением внешних сил и моментов, не совпадающих с главными осями инерции сечения. Это вызывает общий разворот поперечного сечения детали относительно конструктивной оси на некоторый угол как результат косоугольного изгиба (см. рисунок 1.21, а).

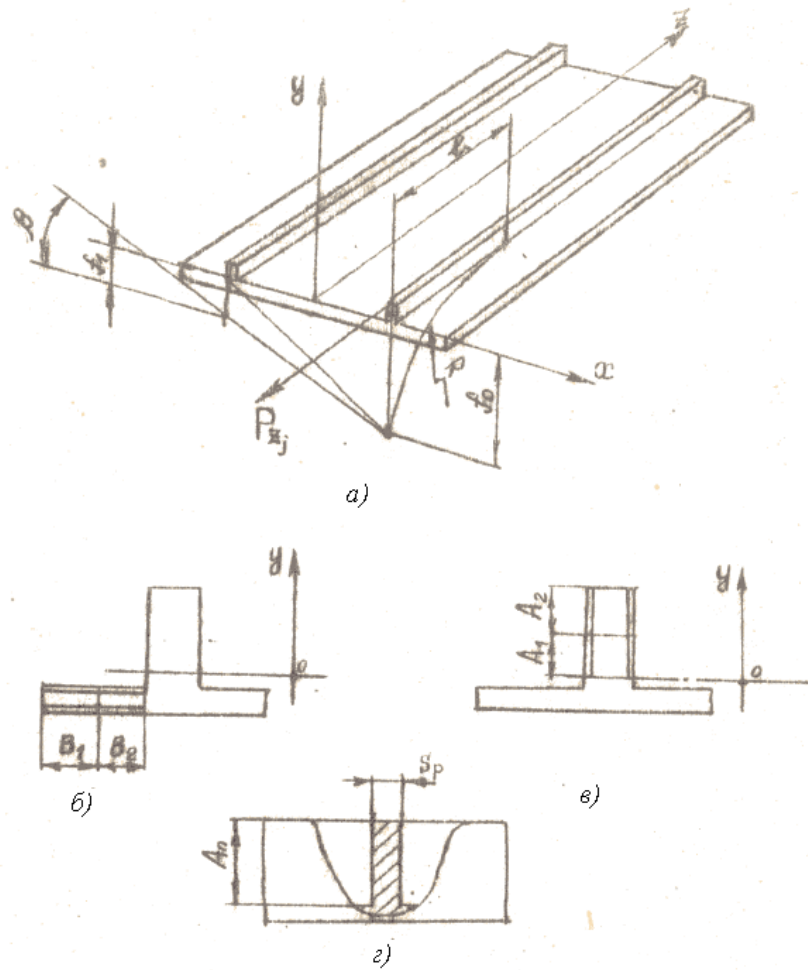


Рисунок 1.21 – Расчетные схемы обработки профильной детали: *a* – разворот при раскатке ребра; *b* – двухсторонняя обработка боковых участков полотна; *c* – обработка продольного ребра детали; *d* – обработка поперечного ребра

Для случая обработки горизонтальных боковых участков полотна детали (см. рисунок 1.21, *b*) угол между главной осью инерции и и действительной плоскостью изгиба β определится как:

$$\beta_i = \arctg \frac{J_x}{J_y} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{zj} B_i (x_0 - B_i / 2) p}{\sum_{j=1}^m \sigma_{zj} B_i (y_0 - j \cdot p / 2) p + \sum_{j=1}^m \sigma_{zj} B_i (y_0 - D_i + j \cdot p / 2) p}, \quad (1.17)$$

где B_i - ширина локального i -го участка обработки детали.

Для случая двухсторонней обработки ребра детали (см. рисунок 1.21, *d*):

$$\beta_i = \arctg \frac{J_x}{J_y} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{zj} A_i (x_0 - C - j \cdot p/2) p + \sum_{j=1}^m \sigma_{zj} A_i (c + j \cdot p/2) p}{2 \sum_{j=1}^m \sigma_{zj} A_i (C_i - A_i / p) p}, \quad (1.18)$$

где A_i - высота локального i – го участка обработки ребра.

Разворот поперечного сечения может быть и следствием неравномерного изгиба продольных ребер панели в вертикальной плоскости при их раскатке или двухсторонней дробеударной обработке. Прогиб концевой участка панели при раскатке ребра на величину f_0 (см. рисунок 1.21, а) вызывает угол поворота поперечного сечения равный:

$$\beta = \arctg \frac{l^2(1-k)}{2BR}, \quad (1.19)$$

где l - участок раскатки ребра; B - расстояние между ребрами; R - радиус изгиба ребра; k - коэффициент влияния обрабатываемого участка на необработанный, $k = f_1 / f_0$.

Данная методика может использоваться для определения технологических параметров процесса формообразования деталей типа панелей, при котором необходимо получить деформацию одноосного изгиба. Разворот поперечного сечения в данной методике рассмотрен как результат косоугольного изгиба, при его определении не учитываются нормальные напряжения, вызывающие кручение в тонкостенных стержнях.

Целью методики расчета внутренних сил, действующих на ребро в процессе обработки панелей с несимметричным профилем ребра, является определение параметров раскатки ребер, обеспечивающих формирование продольной кривизны детали [34]. Для чего необходимо установить зависимости между силовыми факторами процесса и деформацией изгиба обрабатываемой детали.

Решение выполняется в технологической системе координат, ось Y которой параллельна ребрам панели оси X и Z совпадают с наружной поверхностью и с левым обрезом рассматриваемого сечения соответственно (см. рисунок 1.22).

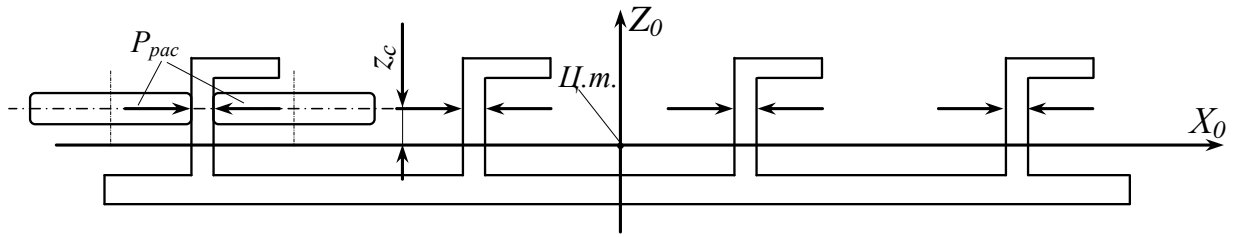


Рисунок 1.22 - Схема силовых факторов, действующих при раскатке

Силовыми факторами раскатки являются силы P_{pac} , которые действуют на ребро детали со стороны роликов раскатника, расстояние z_c от линии приложения этих сил, совпадающей с осью симметрии роликов, до центра тяжести сечения и количество раскатываемых рёбер.

Результатом действия силовых факторов раскатки является возникновение внутренних сил $P_y^{вн}$, действующих на деталь со стороны рёбер на расстоянии z_c до центра тяжести сечения, что приводит к возникновению изгибающего момента M_{pac} (см. рисунок 1.23), который связан зависимостью (1.4.7) с кривизной $\kappa_{y\Phi_y}$ детали в направлении оси Y (см. рисунок 1.23).

$$\kappa_i = \frac{12M_i}{EK_{ynp}H_{np}^3}; \quad i, j = x, y, \quad (1.20)$$

где E – модуль упругости 1-го рода; H_{np} – приведенная постоянная толщина детали, эквивалентная по моменту инерции детали, комплексного сечения криволинейной формы; K_{ynp} – коэффициент вида НДС, характеризующий отличие зависимости между компонентами напряжений и деформаций в рассматриваемом направлении при сложном НДС от зависимости, отвечающей одноосному НДС в области упругих деформаций. При одноосном изгибе пластин $K_{ynp} = 1,125$, при двухосном изгибе он определяется следующим выражением

$$K_{ynp} = \frac{3}{8}(3 + a_R),$$

a_R – коэффициент, характеризующий соотношение радиусов кривизны при двухосном изгибе,

$$a_R = \frac{R_y}{R_x}.$$

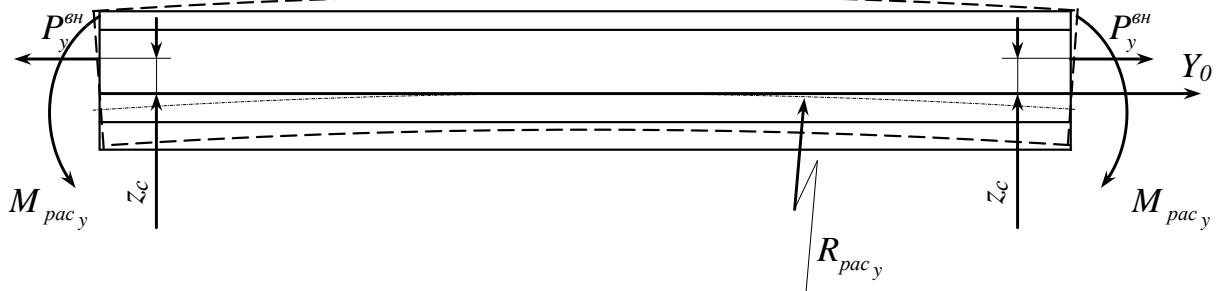


Рисунок 1.23 - Деформация панели под действием внутренних силовых факторов раскатки

[34]

Сила $P_{рас}$, действующая на ребро детали со стороны роликов раскатника может создаваться различными силовыми механизмами.

В случае использования винтового механизма, создаваемая им сила $P_{рас}$ связана с моментом затяжки болта приближенной зависимостью:

$$P_{рас} = \frac{M_3}{0,1d + fd_1/3}, \quad (1.21)$$

где M_3 – момент затяжки болта; d – диаметр силового болта; f – коэффициент трения; d_1 – диаметр торца болта, через который давление передаётся на нажимной ролик [25].

Для определения внутренней распределенной силы $P_y^{вн}$, действующей на деталь со стороны раскатанного ребра, можно использовать экспериментальный метод.

При использовании экспериментального метода изготавливается натурный образец детали, выполняется раскатка его рёбер с заданной силой раскатки $P_{рас}$, после чего определяется кривизна образца, по формуле (1.20) вычисляется действующий на него изгибающий момент $M_{рас}$, а сила $P_y^{вн}$ находится как

$$P_y^{вн} = M_{рас} / n_p z_c. \quad (1.22)$$

где n_p – количество рёбер в расчётном сечении; z_c – расстояние от оси роликов до центра тяжести сечения.

Результаты экспериментального определения параметров раскатки в виде зависимости внутренней силы $P_y^{вн}$ от момента затяжки болта-нагрузителя применительно к верхней панели крыла самолёта БЕ-200 приведены на рисунке 1.24.

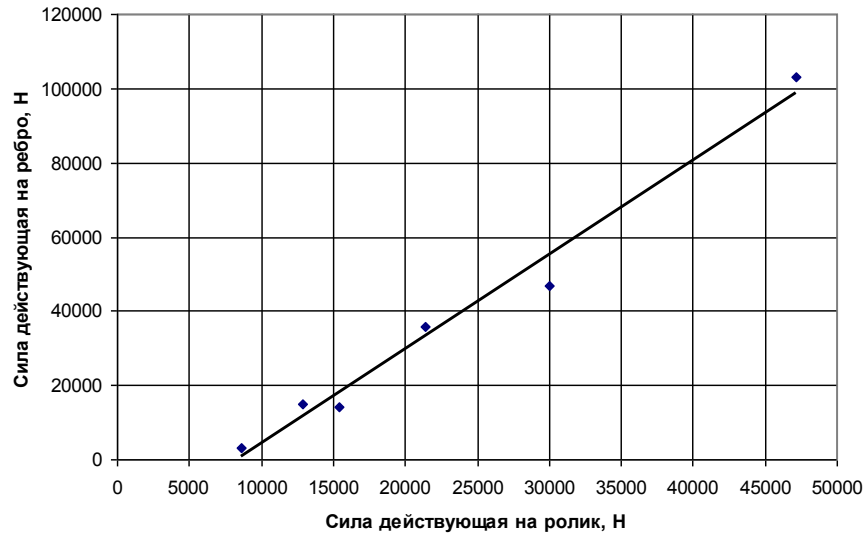


Рисунок 1.24 - Зависимость внутренней силы, действующей на деталь со стороны раскатанных рёбер КПО, от момента затяжки силового болта

Данная методика расчета технологических параметров процесса формообразования используется при обработке деталей типа панелей, когда необходимо получить только деформацию одноосного изгиба.

В работе [35] приведена методика оценки угла закручивания профиля не симметричного относительно плоскости изгиба в процессе деформирования и его компенсации путем упруго-пластического кручения заготовки в обратном направлении.

В отличие от процесса правки раскаткой роликами, где образуются продольные растягивающие силы, для расчета автором используется схема, при которой внецентровая перерезывающая сила, образующаяся в процессе гибки на гибочно-малковочном станке ГМС-1, вызывает закручивание поперечных сечений профиля.

Проанализированные методики расчета технологических параметров при обработке раскаткой роликами маложестких подкрепленных деталей с

целью формоизменения строятся на расчете деформации одноосного изгиба и не позволяют рассчитывать деформации деталей силового каркаса летательных аппаратов, которые включают в себя изгибы в двух плоскостях и закручивание. Поэтому для таких деталей необходимо применять другие расчетные схемы, учитывающие одновременное образование комплекса деформаций, включающего двухосный изгиб и закручивание.

Для решения задач, связанных с местным пластическим деформированием малоэластичных деталей, применяется метод, основанный на теории начальных напряжений, предложенный в работах [38, 39, 40]. Согласно этой теории начальные напряжения σ^h в отличие от остаточных являются неуравновешенной нагрузкой. Их действие эквивалентно приложению к детали осевой силы P и изгибающего момента M , которые при закрепленной детали компенсируются внешними силами зажима. После раскрепления происходит деформация детали в виде изгиба и удлинения (укорочения). В результате деформации начальные напряжения перераспределяются по всему сечению детали, принимают равновесное состояние и превращаются в остаточные напряжения (см. рисунок 1.25).

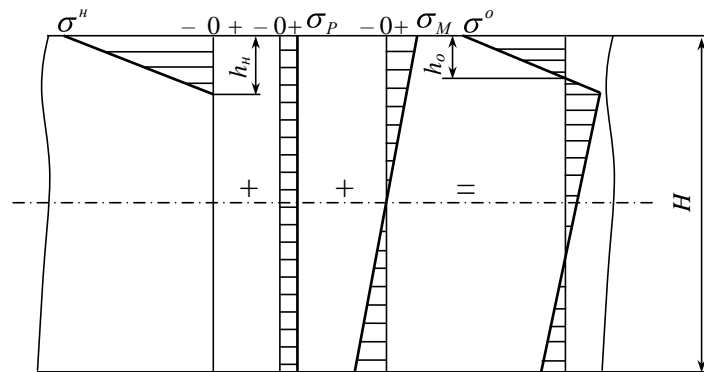


Рисунок 1.25 - Принципиальная схема образования остаточных напряжений [20]

Эпюра остаточных напряжений может быть найдена алгебраическим суммированием эпюры начальных напряжений σ^h , эпюры от осевой силы σ_P и эпюры от изгибающего момента σ_M [38]:

$$\sigma^o = \sigma^h + \sigma_P + \sigma_M. \quad (1.23)$$

1.5 Основные положения теории тонкостенных стержней

К четвертому классу расчетных схем элементов конструкций и сооружений относятся тела [46], представляющие собой длинные призматические или цилиндрические оболочки, характеризующиеся тем, что протяженность их в пространстве по всем трем основным измерениям выражается величинами разных порядков: толщина оболочки представляет собой малую величину по сравнению с каким-либо характерным размером поперечного сечения, а этот размер должен быть малым по сравнению с длиной оболочки. Такие тела называют *тонкостенными стержнями*. Примером тонкостенных стержней являются широко применяемые в строительных конструкциях металлические прокатные, сварные или клепаные балки, колонны, отдельные элементы ферм и рам и т. д. Многие строительные сооружения, работающие как пространственные системы, по своим относительным размерам могут быть отнесены к конструкциям типа тонкостенных стержней. К таким сооружениям, в частности, относятся некоторые типы балочных и арочных мостов с достаточно жесткими поперечными связями, висячие мосты с проезжей частью корытного или двутаврового профиля, конструкции длинных железобетонных ребристых, цилиндрических и призматических сводов-оболочек, бункеров, трубопроводов и т. д.

К числу наиболее распространенных тонкостенных стержней относятся прокатные профили, сварные балки и т.п. (см. рисунок 1.26) Толщина профиля (стенки поперечного сечения) δ мала по сравнению с размерами поперечного сечения. В тонкостенных стержнях (открытого профиля) возникают явления, которые не могут быть учтены обычными моделями кручения и изгиба стержней.

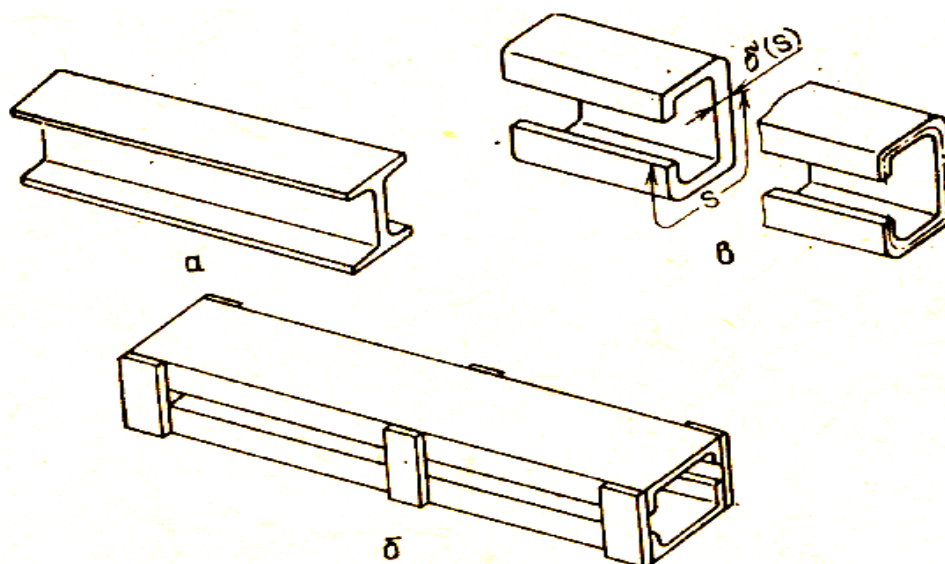


Рисунок 1.26 – Тонкостенные стержни

В авиации и в судостроении к тонкостенным стержням следует отнести металлические стрингеры, шпангоуты, отдельные элементы конструкции самолета, корабля.

Рассматриваемые мало жесткие подкрепленные детали силового каркаса (см. рисунки 1.1-1.5) также попадают под определение тонкостенных стержней.

Классические модели стержней, основанные на гипотезе плоских сечений и одноосном напряженном состоянии, в некоторых случаях оказываются недостаточными, и приходится рассматривать более сложные модели [48]. Так, в теории тонкостенных стержней происходит отказ от гипотезы плоских сечений, а в полупространственной теории стержней не используется гипотеза о ненадавливании.

Главная особенность деформации тонкостенных стержней – появление значительной депланации сечения при действии крутящих моментов и связанных с ней нормальных напряжений.

На рисунке 1.27 показано кручение стержня коробчатого сечения с открытым (незамкнутым) профилем. Если концевые сечения имеют возможность осевых перемещений (свободное или чистое кручение), то края разреза (точки А и В) заметно расходятся; когда развитие осевых

деформаций стеснено (стесненное кручение), депланация (выход точек сечения из первоначальной плоскости поперечного сечения) уменьшается.

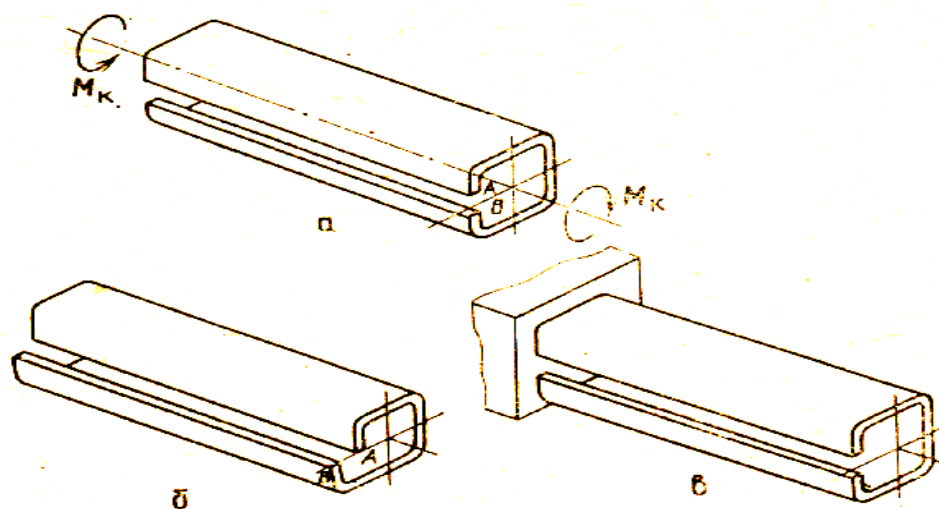


Рисунок 1.27 – Депланация при кручении тонкостенного стержня открытого профиля: *a* – схема нагружения; *б* – чистое кручение; *в* – стесненное кручение

Следует отметить, что стеснение осевых деформаций повышает жесткость и прочность тонкостенного стержня. Для тонкостенных стержней замкнутого профиля депланация будет существенно меньше, и для них, как правило, можно использовать обычную теорию кручения и изгиба стержней.

Определяющим для учета «тонкостенности» профиля является параметр:

$$\nu = J_{min} / J_k, \quad (1.24)$$

где J_{min} - минимальный момент инерции сечения на изгиб, J_k - геометрическая жесткость сечения стержня на кручение.

При малых ν ($\nu \leq 3$) следует использовать обычную теорию изгиба и кручения, при больших ν - учитывать дополнительные эффекты, связанные с «тонкостенностью» стержня.

На рисунке 1.28 показан общий случай нагружения стержня, когда внешние силы дают в поперечном сечении не только крутящий момент, но также изгибающие моменты и усилия.

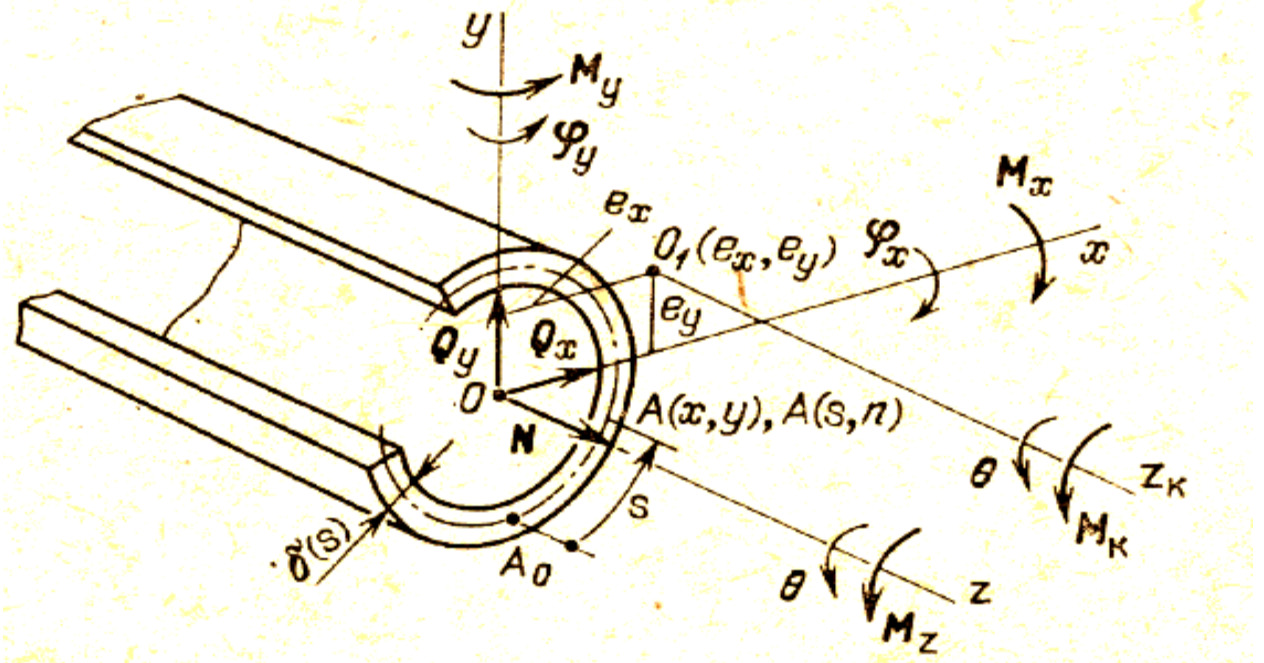


Рисунок 1.28 – Изгиб и кручение тонкостенного стержня: O – центр тяжести сечения; O_1 – центр кручения, или центр жесткости; e_x, e_y – координаты центра кручения; x, y – главные оси

Внешние силы приводятся к главным осям сечения x, y в виде перерезывающих усилий Q_x и Q_y , осевого усилия N , изгибающих моментов M_x, M_y и момента M_z относительно оси z , проходящей через центр тяжести сечения. К обычным деформациям стержня на основе гипотезы плоских сечений добавляются деформации, связанные с депланацией сечения при кручении.

Тогда перемещение точки A сечения стержня могут быть представлены так:

$$w = w_0 + \varphi_x y - \varphi_y x - \frac{d\theta}{dz} \omega, \quad (1.25)$$

где φ_x, φ_y – углы поворота сечения относительно осей x, y . Последний член правой части равенства (1.25) выражает осевое смещение (депланацию) при кручении. Угол поворота сечения θ определяется относительно оси, перпендикулярной плоскости поперечного сечения (он одинаков для осей z и z_k , проходящей через центр O или через центр кручения O_1).

Величина ω в равенстве (1.25) представляет секториальную площадь и зависит от дуги s , характеризующей положение точки A относительно начала отсчета секториальной площади A_0 (см. рисунок 1.28), и полюса, который принимается в центре кручения O_1 .

Для упругого, равномерно нагретого материала, используя гипотезу одноосного напряженного состояния, находим, что деформациям отвечают напряжения:

$$\sigma = E \left\{ \frac{N}{A} + y \frac{M_x}{B_x} - x \frac{M_y}{B_y} - \frac{d^2 \theta}{dz^2} \omega \right\}. \quad (1.26)$$

Формуле для нормальных напряжений в тонкостенном стержне можно придать более удобный вид, если ввести понятие *бимомент*:

$$M_B = - \frac{d^2 \theta}{dz^2} B_\omega, \quad (1.27)$$

Для стержня с постоянными параметрами упругости имеем:

$$\sigma = \frac{N}{A} + y \frac{M_x}{J_x} - x \frac{M_y}{J_y} + \omega \frac{M_B}{J_\omega}. \quad (1.28)$$

Как видно из соотношения (1.28), в теории тонкостенных стержней распределение деформаций и напряжений при изгибе не подчиняется гипотезе плоских сечений. Гипотеза дополняется законом секториальной площади.

Величина бимомент M_B имеет размерность [сила \times длина²], т. е. отличается от размерности обычных моментов.

Другое отличие состоит в том, что значение M_B в поперечном сечении стержня в противоположность изгибающим моментам M_x и M_y не может быть найдено из условий равновесия. Это объясняется тем, что величина M_B определяется самоуравновешенной системой сил. Значения M_B определяются в самом процессе решения. Если в концевых сечениях стержня внешние усилия заданы, то становится известной и величина бимомент.

Условие (1.28) показывает, что осевые силы, приложенные к торцу стержня, могут вызывать закручивание тонкостенного стержня при

$$M_B \neq 0.$$

Главная секториальная площадь должна удовлетворять следующим условиям:

$$\int_F E \omega dF = 0, \quad (1.29)$$

$$\int_F E x \omega dF = 0, \quad (1.30)$$

$$\int_F E y \omega dF = 0, \quad (1.31)$$

где x, y – координаты элемента площади dF относительно приведенных главных осей сечения; E – модуль упругости материала стержня.

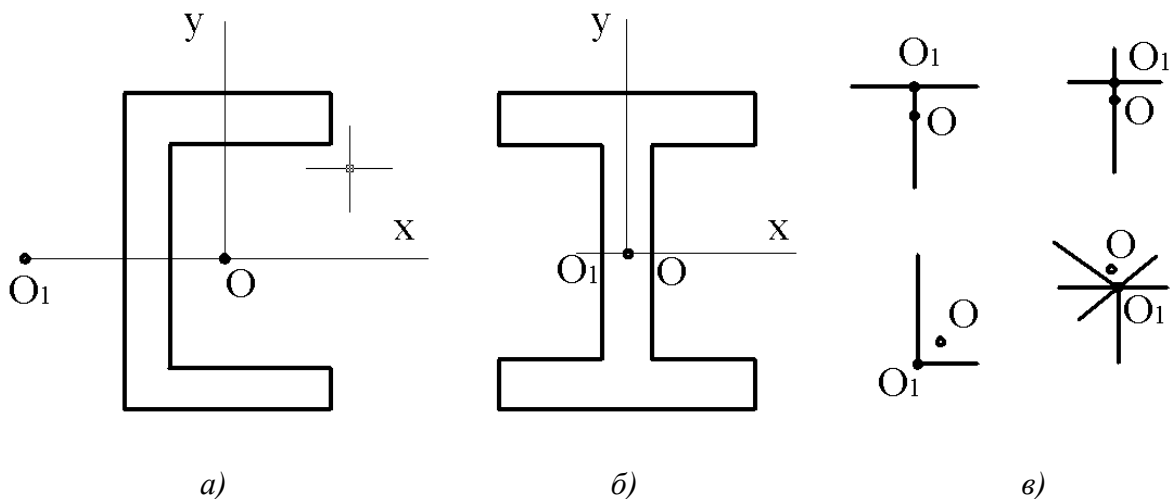


Рисунок 1.29 – Расположение центра кручения O_1 и центра тяжести O некоторых профилей

Если сечение стержня имеет ось симметрии, то центр кручения так же, как и центр тяжести, лежит на этой оси (см. рисунок 1.29, *а*). Известно, что для таких сечений ось симметрии является одной из главных осей.

Если сечение имеет две оси симметрии, то центр кручения так же, как и центр тяжести, лежит на пересечении указанных осей (см. рисунок 1.29, *б*).

Если сечение имеет радиальную точку, то центр кручения совпадает с ней (см. рисунок 1.29, *в*). Радиальной точкой сечения называется точка, по

отношению к которой средние линии частей сечения имеют радиальное направление. Очевидно, что средние линии должны быть прямыми.

В связи с этим для любой точки средней линии главная секториальная площадь равна $\omega = 0$, так как ее полюс находится в точке O_1 . Сечения, обладающее радиальной точкой, не имеют депланации при кручении; в тонкостенных стержнях с такими сечениями (типа тавра, уголка и т.п.) стесненное кручение не возникает. Нужно отметить, что при $\omega = 0$ условия (1.29) – (1.31) выполняются тождественно.

В [48] приведено дифференциальное уравнение для углов закручивания и его общее решение. На рисунке 1.30, *а* изображен тонкостенный стержень, нагруженный некоторой нагрузкой q , который испытывает растяжение, изгиб и кручение. Рассмотрению подлежит деформация кручения, совершаемую вокруг оси $A—A$, так как каждое поперечное сечение при кручении поворачивается как диск вокруг центра кручения A . Очевидно, что чем больше плечо e поперечной нагрузки относительно оси $A—A$, тем больше будет деформация кручения. При $e = 0$ поперечная нагрузка вызовет только изгиб. Поэтому ось $A—A$ называется также осью центров изгиба.

При определении углов закручивания φ необходим переход к осевой расчетной схеме, для чего, совместив с осью $A—A$ продольную ось z , необходимо перенести все поперечные нагрузки на эту ось. На рис. 1.30, *б* изображены скручивающие силовые воздействия, которые надо приложить при указанном переносе нагрузок. Интенсивность внешнего момента будет

$m = qe$. Продольная сила P_i , приложенная в i -ой точке контура,

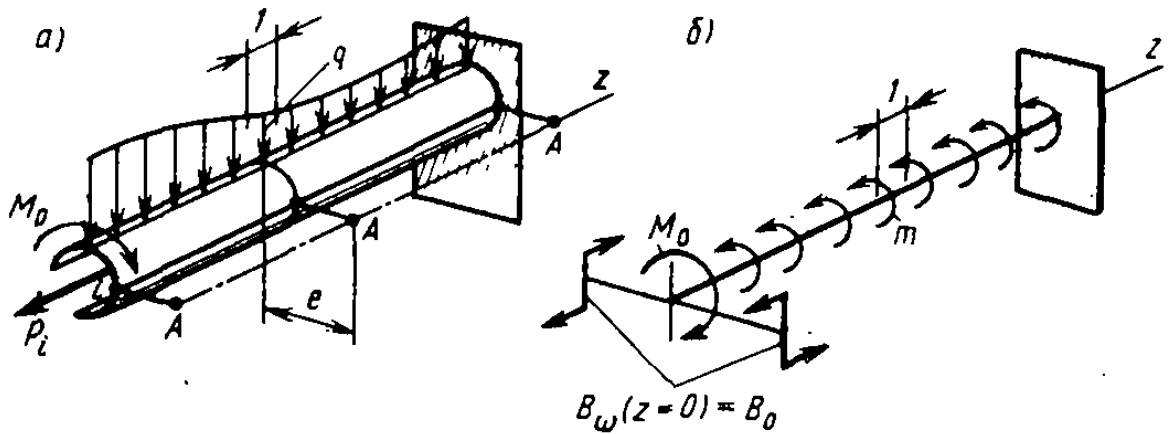


Рисунок 1.30 – Нагружение тонкостенного стержня и его расчетная схема

в этом сечении бимомент $B_\omega(z=0) = B_0$. Бимомент B_0 условно изображен на схеме в виде *бипары*.

Дифференциальное уравнение для угла закручивания $\varphi(z)$ имеет вид:

$$\varphi^{IV} - \beta^2 \varphi'' = \frac{m}{EJ_\omega}, \quad (1.32)$$

где m - интенсивность внешнего момента, где J_ω - секториальный момент инерции, E - модуль упругости, $\beta = \sqrt{\frac{GJ_d}{EJ_\omega}}$ [M^{-1}], где G - модуль сдвига, J_d - момент инерции на кручение поперечного сечения.

В случае однородного уравнения, когда $m=0$:

$$\varphi^{IV} - \beta^2 \varphi'' = 0; \quad (1.33)$$

его общее решение имеет вид:

$$\varphi = C_1 + C_2 z + C_3 \operatorname{ch} \beta z + C_4 \operatorname{sh} \beta z. \quad (1.34)$$

Для преобразования этого решения к форме метода начальных параметров необходимо сформулировать следующие граничные условия при $z=0$: $\varphi(0) = \varphi_0$; $\varphi'(0) = \varphi'_0$; $M_{кр}(0) = (GJ_d \varphi' - EJ_\omega \varphi''')_{z=0} = M_0$ и $B_\omega(0) = -EJ_\omega \varphi''(0) = B_0$.

Используя их, находят произвольные постоянные:

$$C_1 = \varphi_0 + \frac{B_0}{GJ_d}; C_2 = \frac{M_0}{GJ_d}; C_3 = \frac{B_0}{GJ_d}; C_4 = \frac{1}{\beta} \left(\varphi'_0 - \frac{M_0}{GJ_d} \right). \quad (1.35)$$

После этого необходимо внести их значения в (1.34) и группируя слагаемые при соответствующих начальных параметрах φ_0 , φ'_0 , M_0 и B_0 , получается решение в виде:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi'_0 sh \beta z + \frac{B_0}{GJ_d} (1 - ch \beta z) + \frac{M_0}{\beta GJ_d} (\beta z - sh \beta z). \quad (1.36)$$

Приведенные формулы теории тонкостенных стержней можно использовать при определении деформированного состояния тонкостенной детали типа балки КПС в процессе обработки ее раскаткой роликами.

1.6 Постановка цели и задач исследования

Из анализа отклонений, возникающих в процессе обработки деталей силового каркаса, с учетом их конструктивных особенностей следует установить, что для правки данных деталей можно эффективно применить метод раскатки роликами. Данный метод позволяет производить комплексную обработку протяженных деталей сложных форм, а также конструктивных элементов типа карманов путем локального воздействия на ребра и полотно, при этом возможно устранение двухосного изгиба с получением требуемого угла закручивания.

Однако отсутствие в настоящее время методики определения технологических параметров процесса правки раскаткой роликами деталей

типа балок имеющих несимметричные поперечные сечения и используемых в конструкции силового каркаса летательных аппаратов, не позволяет в полной мере использовать все возможности данного процесса. Поэтому, целью настоящей диссертационной работы необходимо считать *повышение эффективности формообразования и правки раскаткой роликами мало жестких деталей типа балок с переменными несимметричными поперечными сечениями путем реализации деформаций двухосного изгиба с закручиванием с использованием расчета параметров процесса и специализированного инструмента*. Достижение этой цели возможно после решения следующих задач:

1. Разработка математической модели деформированного состояния деталей типа балок, компонентами которого являются двухосный изгиб и закручивание, возникающие под действием растягивающих сил при раскатке роликами;

2. Создание методики расчета деформированного состояния деталей типа балок, основанной на разработанной математической модели.

3. Создание методики расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами мало жестких балок.

4. Создание специализированного инструмента (раскатников) для местного пластического деформирования, позволяющего производить обработку различных конструктивных элементов деталей типа балок с целью их правки раскаткой роликами;

5. Проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение процесса раскатки роликами с целью формоизменения конструктивно-подобных образцов деталей типа балок КПС с получением эмпирических зависимостей деформации образцов (деталей) от технологических параметров и стратегий обработки;

6. Проведение сравнительного анализа с целью подтверждения сходимости данных, полученных в результате опытных работ по раскатке

конструктивно-подобных образцов, с результатами расчета, проведенного с использованием разработанной методики определения деформаций;

7. Разработка технологических рекомендаций по обработке деталей типа балок КПС раскаткой роликами в целях формообразования и правки, включающих в себя технологические методы достижения (устранения) заданных геометрических параметров деталей и методику определения режимов обработки.

2 Деформированное состояние детали типа балки комплексного поперечного сечения в процессе правки раскаткой роликами

2.1 Определение геометрических и крутильных характеристик комплексного сечения

Деформированное состояние детали типа балки при раскатке роликами характеризуется двухосным изгибом и закручиванием. Определим геометрические характеристики комплексного поперечного сечения детали каркаса летательных аппаратов: центры тяжести и моменты инерции, а также центры кручения и секториальные моменты инерции.

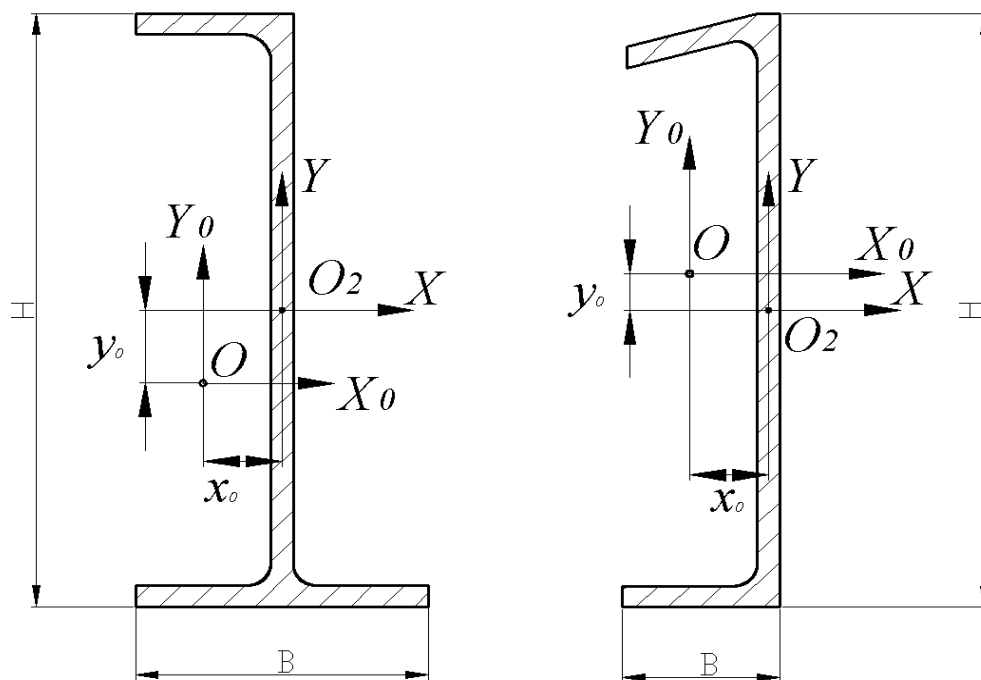


Рисунок 2.1 – Комплексные поперечные сечения деталей

Для определения координат x_0 , y_0 центров тяжести O комплексных сечений (см. рисунок 2.1) по отношению к выбранным осям X и Y используются следующие зависимости:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_{умi}}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_{умi}}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (2.1)$$

где F_i – площади отдельных элементов 1, 2, ..., n , на которые разбивается поперечное сечение; $x_{умi}$ и $y_{умi}$ – координаты (с их знаками) центров тяжести элементов по отношению к осям X и Y .

Осевые моменты J_x , J_y инерции комплексного сечения определяются как

$$J_x = \sum_{i=1}^n (J_{xi} + e_{xi}^2 F_i), \quad J_y = \sum_{i=1}^n (J_{yi} + e_{yi}^2 F_i), \quad (2.2)$$

где J_{xi} , J_{yi} – моменты инерции элементов 1, 2, ..., n , на которые разбивается поперечные сечения КПО по отношению к осям, проходящим через центры тяжести элементов; $e_{x(y)1}$, $e_{x(y)2}$, ..., $e_{x(y)n}$ – расстояния между осью X_0 (Y_0) и центрами тяжести элементов.

Различные размеры и ориентация расчетных участков, выражающиеся в разнотолщинности и разнообразии форм, обрабатываемых деталей при определении геометрических характеристик определяют необходимость упорядочить их конструктивные элементы.

Нетрудно заметить, что комплексное поперечное сечение детали можно представить совокупностью простых элементов: прямоугольных, треугольных (прямоугольных) и радиусных переходов (круговых треугольников) между ними (рис. 2.2).

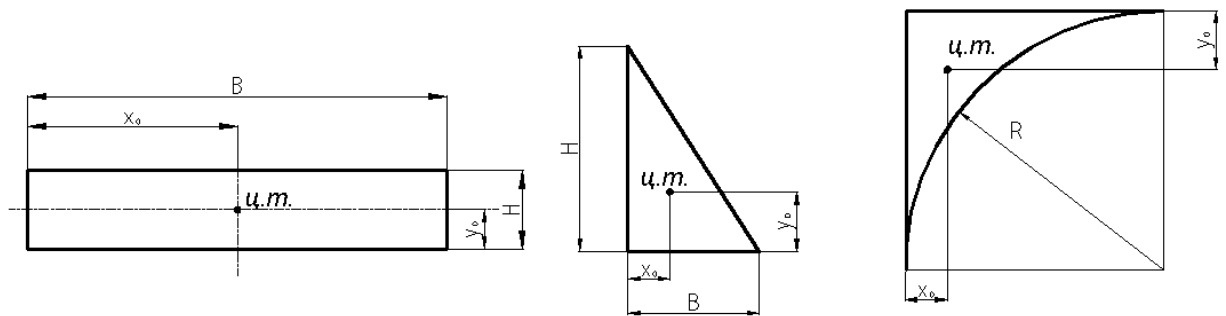


Рисунок 2.2 - Типовые элементы комплексного сечения детали

Определяем геометрические характеристики простых элементов, входящих в состав комплексного сечения.

Параметры прямоугольного элемента:

- координаты центра тяжести:

$$x_0 = \frac{B}{2}; y_0 = \frac{H}{2};$$

- площадь поперечного сечения F :

$$F = BH;$$

- момент инерции I_x по отношению к оси, проходящей через центр тяжести и параллельной оси X :

$$I_x = \frac{BH^3}{12};$$

- момент инерции I_y по отношению к оси, проходящей через центр тяжести и параллельной оси Y :

$$I_y = \frac{HB^3}{12}.$$

Параметры треугольного элемента:

- координаты центра тяжести:

$$x_0 = \frac{1}{3}B; x_0 = \frac{1}{3}H;$$

- площадь поперечного сечения F :

$$F = \frac{1}{2}BH;$$

- моменты инерции I_x, I_y :

$$I_x = \frac{BH^3}{36}; I_y = \frac{HB^3}{36}.$$

Основные параметры радиусного перехода определяются как:

$$x_0 = 0,223R;$$

$$y_0 = 0,223R;$$

$$F = 0,215R^2;$$

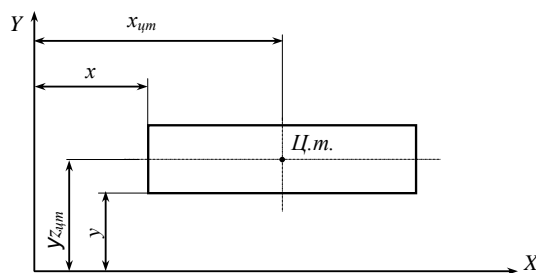
$$I_x = 0,00755R^4;$$

$$I_x = 0,00755R^4.$$

Теперь необходимо выделить типовые конструктивные элементы комплексных поперечных сечений обрабатываемых деталей, состоящие из набора простых элементов.

С целью типизации дальнейших расчетов комплексное сечение будем рассматривать как состоящее из конструктивных элементов, каждый из которых включает прямоугольный элемент с некоторым количеством переходов (от нуля до четырёх) и треугольные элементы. Для определения положения прямоугольных и треугольных конструктивных элементов будем использовать расстояния x и y между произвольно выбранными осями и осями центра тяжести прямоугольного и треугольного элемента соответственно. Положение переходов будем определять относительно сторон прямоугольного элемента. В связи с этим рассмотрим семь основных типов конструктивных элементов детали.

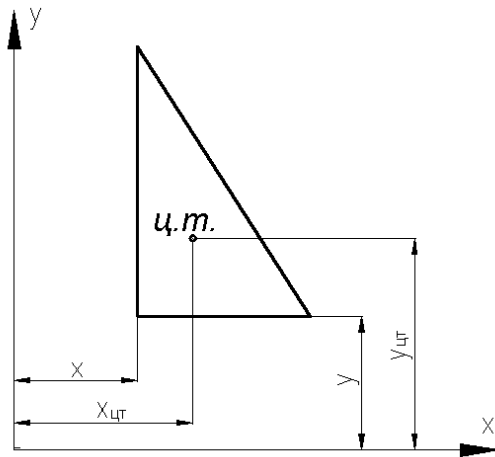
Конструктивный элемент 1-го типа – прямоугольный элемент без переходов показан на рисунке 2.3. Необходимые для расчета значения координат центра тяжести $x_{цт}$ и $y_{цт}$ данного элемента определяются как



$$\begin{aligned} x_{цт} &= x + B/2; \\ y_{цт} &= y + H/2. \end{aligned}$$

Рисунок 2.3 - Конструктивный элемент 1-го типа

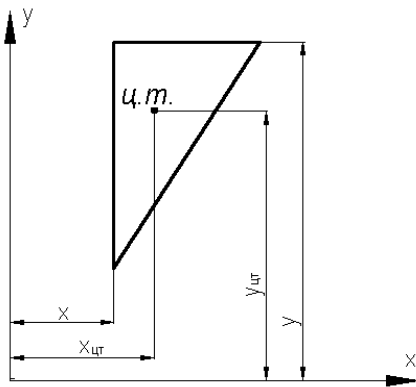
Конструктивные элементы со 2-го по 5-ый тип – треугольные элементы без переходов показаны на рисунках 2.4 – 2.7. Координаты центров тяжести элементов находят из выражений рядом с рисунками.



$$x_{цт} = x + B/3;$$

$$y_{цт} = y + H/3.$$

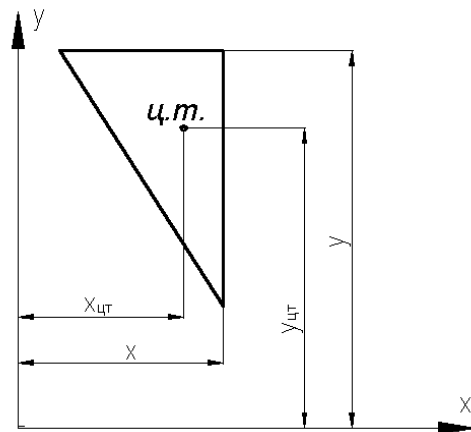
Рисунок 2.4 - Конструктивный элемент 2-го типа



$$x_{цт} = x + B/3;$$

$$y_{цт} = y - H/3.$$

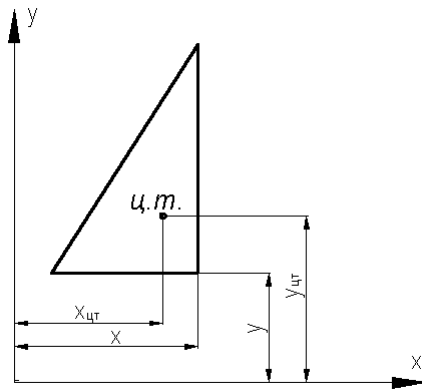
Рисунок 2.5 - Конструктивный элемент 3-го типа



$$x_{цт} = x - B/3;$$

$$y_{цт} = y - H/3.$$

Рисунок 2.6 - Конструктивный элемент 4-го типа

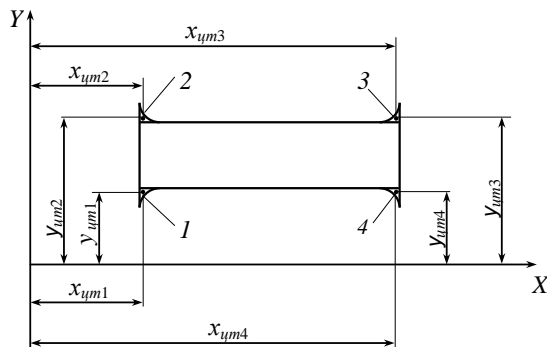


$$x_{цт} = x - B/3;$$

$$y_{цт} = y + H/3.$$

Рисунок 2.7 - Конструктивный элемент 5-го типа

Конструктивный элемент 6-го типа – прямоугольный элемент с переходами, расположенными по горизонтали, показан на рисунке 2.1.8.



$$x_{цт1} = x + 0,223R_1;$$

$$y_{цт1} = y - 0,223R_1;$$

$$x_{цт2} = x + 0,223R_2;$$

$$y_{цт2} = y + H + 0,223R_2;$$

$$x_{цт3} = x + B - 0,223R_3;$$

$$y_{цт3} = y + H + 0,223R_3;$$

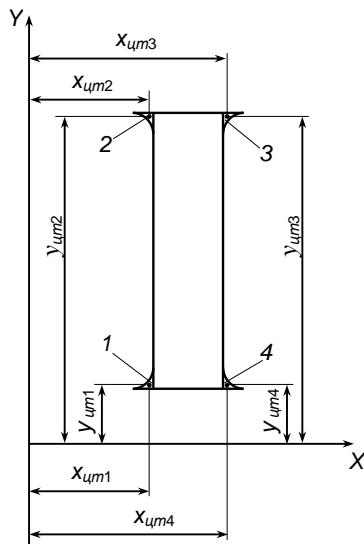
$$x_{цт4} = x + B - 0,223R_4;$$

$$y_{цт4} = y - 0,223R_4.$$

Рисунок 2.8 - Конструктивный элемент 6-го типа

Координаты центров тяжести переходов находят из выражений рядом с рисунком 2.8.

Конструктивный элемент 7-го типа – прямоугольный элемент с переходами, расположенными по вертикали, показан на рис. 2.9.



$$\begin{aligned}
 x_{цм1} &= x - 0,223R_1; \\
 y_{цм1} &= y + 0,223R_1; \\
 x_{цм2} &= x - 0,223R_2; \\
 y_{цм2} &= y + H - 0,223R_2; \\
 x_{цм3} &= x + B + 0,223R_3; \\
 y_{цм3} &= y + H - 0,223R_3; \\
 x_{цм4} &= x + B + 0,223R_4; \\
 y_{цм4} &= y + 0,223R_4.
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.9 - Конструктивный элемент седьмого типа

Координаты центров тяжести переходов данного конструктивного элемента определяются из выражений рядом с рисунком 2.9.

Таким образом, приведенный способ типизации конструктивных элементов позволяет с помощью электронного чертежа, выполненного, например, в системе AutoCAD, и который содержит все перечисленные выше размерные параметры для получения исходных данных, произвести расчет геометрических характеристик каждого расчетного сечения детали.

Для определения центров кручения и секториального момента инерции комплексного сечения воспользуемся методикой, изложенной в работе [47].

Как известно, секториальная площадь любого сечения зависит от трех параметров: двух координат центра кручения и одной координаты начальной точки A_0 на дуге контура сечения.

Для определения истинного центра кручения O_1 зададимся вначале произвольной точкой O' , пользуясь которой как центром кручения при произвольном начале отсчета A_1 , построим эпюру секториальной площади ω' (см. рисунок 2.10, а).

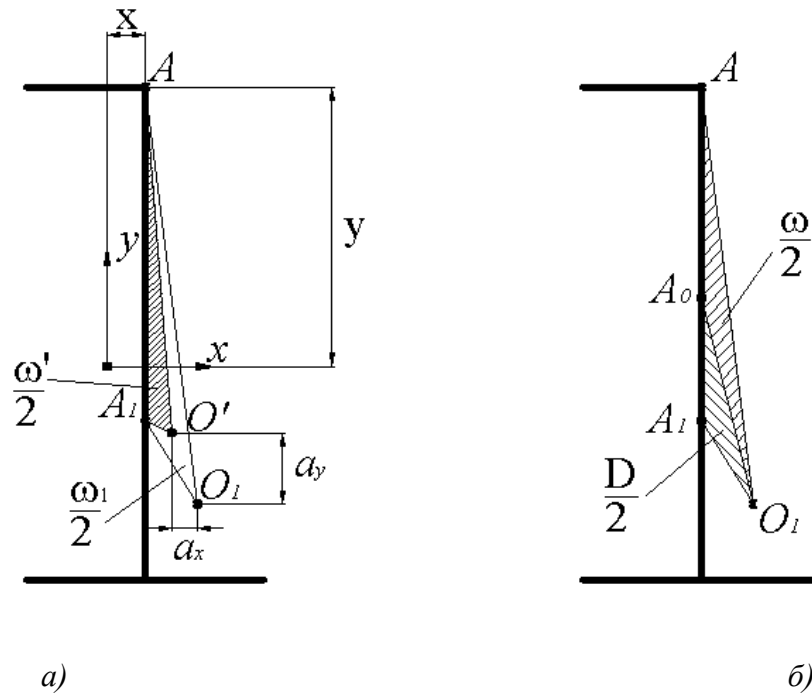


Рисунок 2.10 – Координаты a_x и a_y центра кручения относительно произвольно выбираемого центра (а) и определение нулевой точки A_0 (б)

Величиной секториальной площади для любой точки средней линии поперечного сечения является удвоенная площадь, покрываемая радиусом точки при ее движении вдоль контура из начальной точки A_0 в рассматриваемую точку A . Секториальная площадь положительна, если радиус вращается против хода часовой стрелки (при взгляде на сечение в положительном направлении оси z).

Для определения координат точки O_1 относительно главных осей используем следующие зависимости:

$$e_x = a_x + b_x = \frac{\int_{O_1} y \omega' dO_1}{\int_{O_1} y^2 dO_1} + b_x, \quad e_y = a_y + b_y = \frac{\int_{O_1} x \omega' dO_1}{\int_{O_1} x^2 dO_1} + b_y; \quad (2.3)$$

где b_x, b_y - координаты точки O' относительно главных осей, x, y - координаты точки O_1 в главной системе координат, ω' - величина секториальной площади с полюсом в точке O' .

Для нахождения положения начальной точки A_0 построим эпюру ω_1 при найденном центре кручения O_1 и произвольном начале отсчета A_1 . Из рисунка 2.1.10, б можно видеть, что ω_1 и ω , найденные для истинной точки A_0 , отличаются на некоторую постоянную D :

$$\omega = \omega_1 - D; \quad (2.4)$$

где D - величина, которую необходимо вычитать из ординат эпюры ω_1 , чтобы получить эпюру главных секториальных координат:

$$D = \frac{\int \omega_1 dO_1}{\int dO_1}. \quad (2.5)$$

При этом может образоваться не одна нулевая точка. Любая из них может быть принята в качестве A_0 .

Секториальный момент инерции определим по формуле:

$$J_\omega = \int_F \omega^2 dF. \quad (2.6)$$

Для его аналитического определения удобно воспользоваться правилом Верещагина, умножая эпюру ω “на себя”.

Для расчета момента кручения тонкостенных стержней можно использовать формулы, в которых интегрирование заменено приближенным суммированием:

$$J_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^3 L_i \quad (2.7)$$

где L_i , δ_i - длина и средняя толщина i -го участка.

2.2 Математическая модель деформированного состояния, возникающего в процессе правки деталей типа балок раскаткой роликами

При определении деформированного состояния деталей типа балок при раскатке роликами воспользуемся подходом основанным на теории начальных напряжений.

Типовые поперечные сечения маложестких подкрепленных деталей, подвергаемых правке раскаткой роликами, показаны на рисунке 2.11.

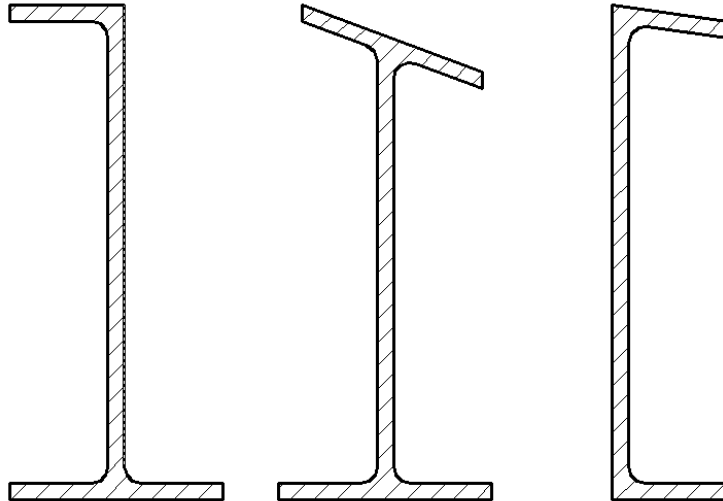


Рисунок 2.11- Типовые сечения конструктивных элементов силовых деталей каркаса самолета

Из рисунков 1.1 – 1.5, 2.11 видно, что эти детали, в общем случае, представляют собой относительно протяженные балки двутаврового и швеллерного сечений, полки которых могут быть непараллельными друг другу (так называемые «малкованные» полки, выходящие на аэродинамический обвод самолета). Количество полок в сечении может изменяться от двух до четырех.

Идентификация типа деталей по признаку пространственной протяженности основных элементов показывает, что создание методики расчета деформации таких деталей при раскатке роликами должно включать в себя разработку расчетной схемы обработки под действием растягивающих сил тонкостенных стержней с учетом их специфических свойств.

Тонкостенные стержни как пространственные системы типа оболочек при кручении испытывают деформации продольных удлинений, в результате которых возникают соответствующие нормальные напряжения, приводящиеся

в каждом поперечном сечении к системе самоуравновешенных продольных сил. Эти, не рассматриваемые в теории чистого кручения дополнительные продольные нормальные напряжения, возникающие вследствие относительной деформации сечения, могут достигать весьма больших значений в тонкостенных стержнях открытого (жесткого или деформируемого) профиля, а также и в стержнях закрытого деформируемого профиля.

Другими словами, расчет деформаций, возникающих в процессе правки мало жестких подкрепленных деталей раскаткой роликами необходимо вести по схеме расчета тонкостенных стержней, учитывающей одновременное образование изгиба в двух плоскостях и закручивания при приложении внецентровых продольных сил (см. рисунок 2.12).

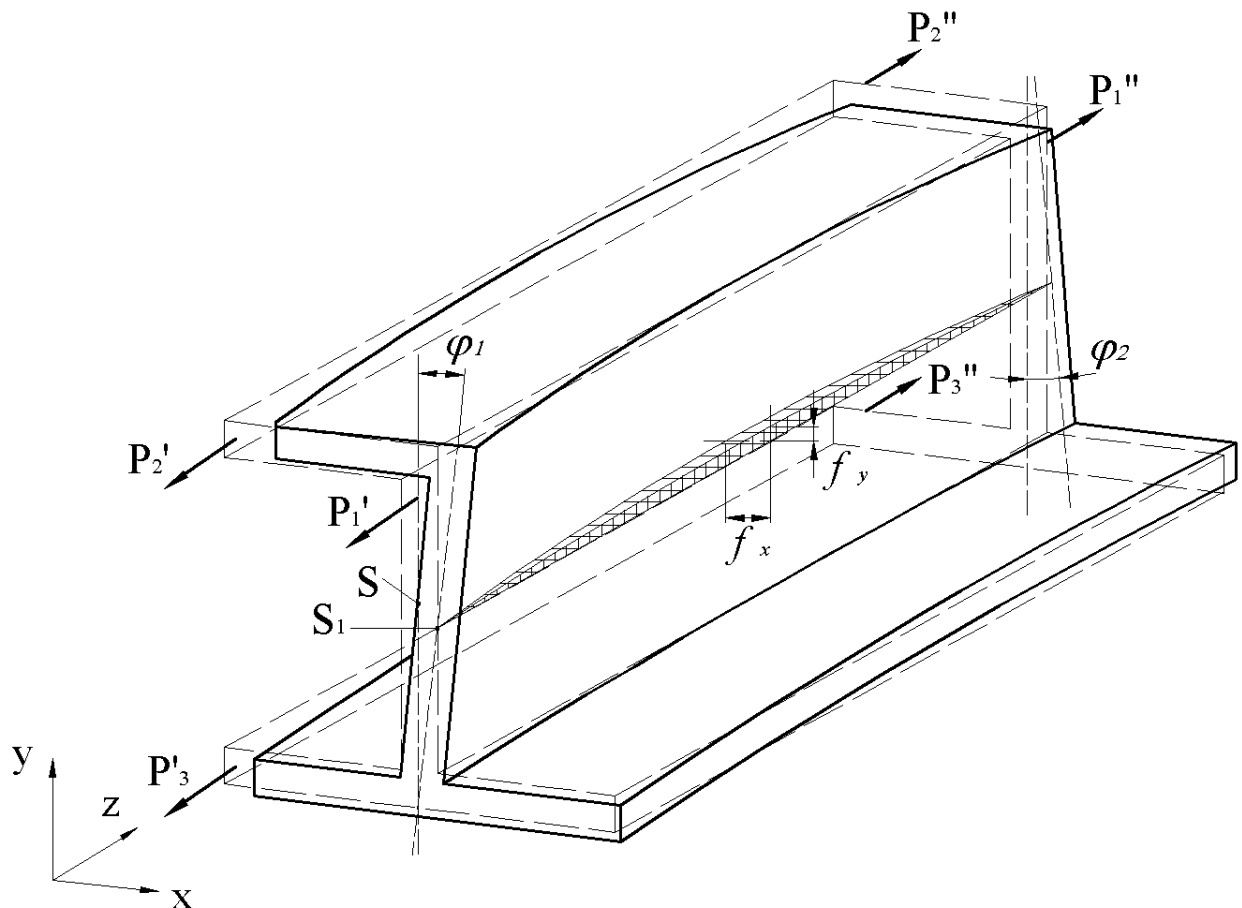


Рисунок 2.12 – Деформации при раскатке роликами

Используя данную схему расчета, можно получить аналитические зависимости значений каждого вида деформаций подкрепленных деталей от

действия образующихся в процессе раскатки роликами внецентровых растягивающих сил (величины, геометрических либо секториальных координат точки приложения).

На рисунке 2.13, *а* изображена схема к определению стрелы прогиба f_y в плоскости YOZ (саблевидности) балки при раскатке роликами, а на рисунке 2.13, *б* – схема к определению стрелы прогиба f_x в плоскости XOZ (отклонения от плоскостности) балки при раскатке роликами.

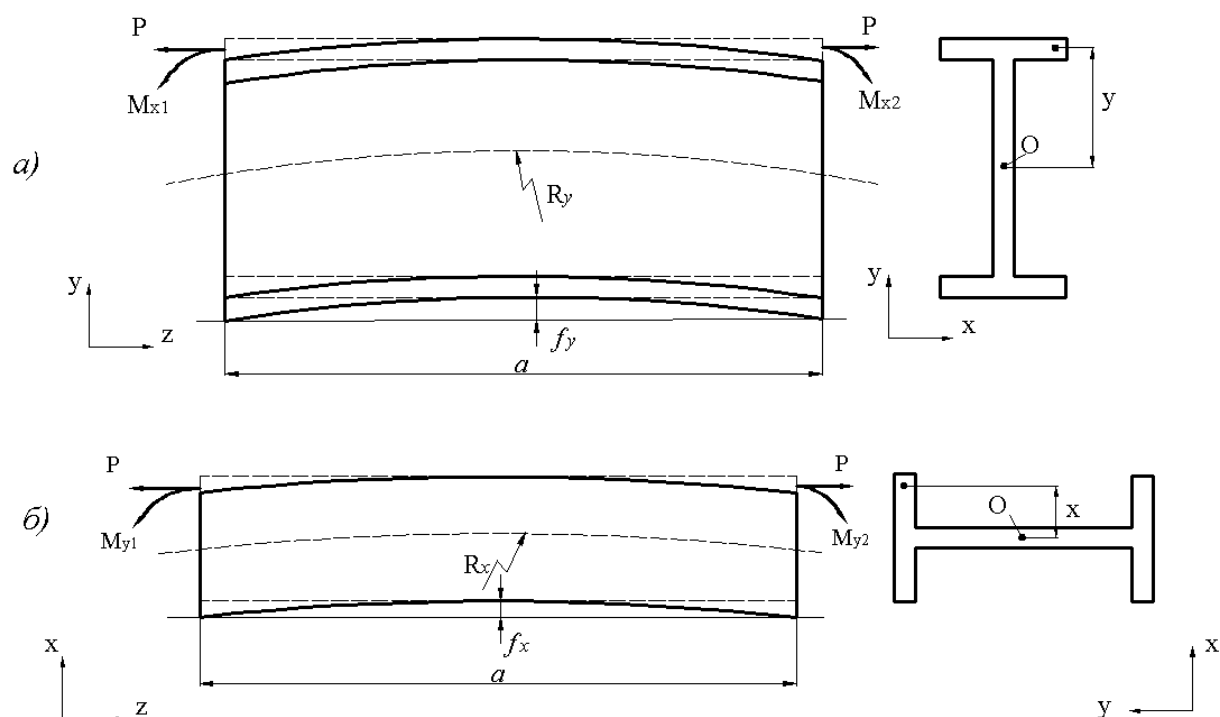


Рисунок 2.13 – Схемы к определению стрелы прогиба: а) в плоскости YOZ (саблевидности); б) в плоскости XOZ (отклонения от плоскостности) детали при раскатке роликами

Соотношения для определения величины стрел прогибов имеют следующий вид:

$$f_i = \frac{a^2}{8R_i} ; i = x, y ; \quad (2.8)$$

где R_x, R_y - радиусы кривизны нейтрального слоя образца (детали) в плоскостях YOZ и XOZ соответственно; a - база измерения прогиба.

Радиусы кривизны определяются следующим образом:

$$R_i = \frac{EJ_i}{M_i} ; i = x, y ; \quad (2.9)$$

где M_x , M_y - компоненты изгибающего момента, действующие в плоскостях YOZ и XOZ соответственно; J_y , J_x - моменты инерции поперечного сечения детали относительно соответствующих осей; E - модуль упругости материала образца (детали) первого рода.

Изгибающие моменты M_x и M_y , создаваемые продольной силой P , (см. рисунок 2.13), определяются по формулам:

$$M_x = P \cdot y, \quad M_y = P \cdot x, \quad (2.10)$$

где x , y - координаты от центра тяжести до оси продольной растягивающей силы P .

Подставляя выражения (2.9) с учетом формул (2.10), получаем окончательные соотношения для определения стрел прогибов:

$$f_x = \frac{a^2 \cdot x}{8EJ_x} \cdot P, \quad f_y = \frac{a^2 \cdot y}{8EJ_y} \cdot P. \quad (2.11)$$

При расчете угла закручивания балки при действии растягивающих сил, вызванных раскаткой роликами, начало системы координат удобно совместить с центром срединного поперечного сечения (см. рисунок 2.14), так как двусторонне растягивающее усилие не вызывает перемещение данного сечения вдоль оси z .

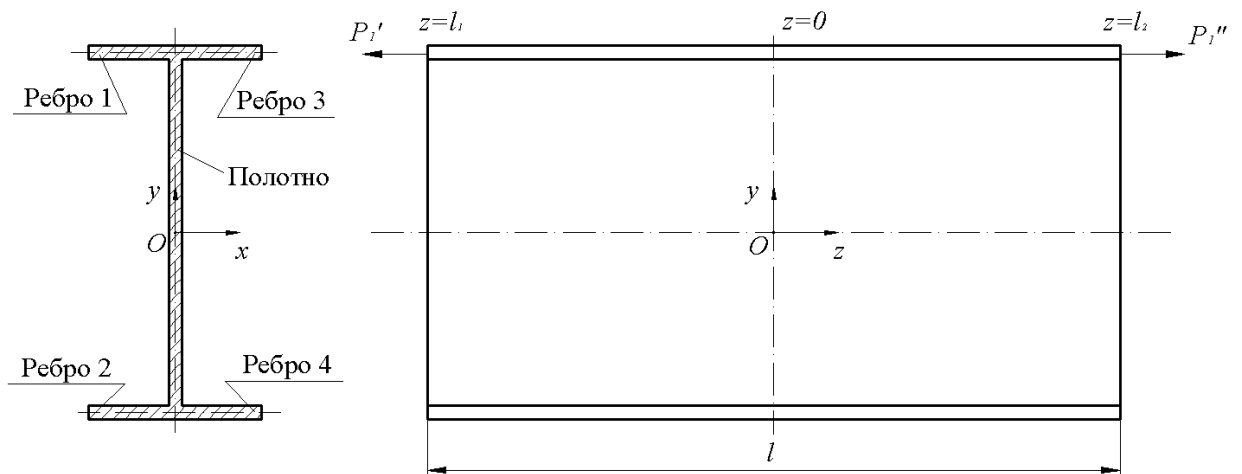


Рисунок 2.14 – Расчетная схема к определению закручивания балки при раскатке

В общем случае угол поворота поперечных сечений тонкостенных стержней определяется по формуле [48]:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi'_0 \operatorname{sh}(\beta z) + \frac{B_0}{GJ_d} (1 - \operatorname{ch}(\beta z)) + \frac{M_0}{\beta GJ_d} (\beta z - \operatorname{sh}(\beta z)); \quad (2.12)$$

где φ_0 - угол поворота поперечного сечения при $z=0$, φ'_0 - депланация поперечного сечения при $z=0$, z - расстояние между поперечными сечениями вдоль оси z , B_0 - бимомент, G - модуль сдвига, J_d - момент инерции на кручение поперечного сечения, M_0 - крутящий момент,

$$\beta = \sqrt{\frac{GJ_d}{EJ_\omega}}; \quad (2.13)$$

где J_ω - секториальный момент инерции, E - модуль упругости.

Применительно к схеме, показанной на рисунке 2.15, можно установить, что депланация $\varphi'_0 = 0$ (в сечении $z=0$), крутящий момент при действии только лишь продольных сил $M_0 = 0$.

Угол поворота между крайними поперечными сечениями равен:

$$\theta(l) = |\varphi(l_1)| + |\varphi(l_2)|; \quad (2.14)$$

где $\varphi(l_1)$, $\varphi(l_2)$ - углы поворота крайних поперечных сечений относительно срединного поперечного сечения.

$$\varphi(l_1) = \varphi_0 + \frac{B'_0}{GJ_d} (1 - \operatorname{ch}(\beta l / 2)). \quad (2.15)$$

$$\varphi(l_2) = \varphi_0 + \frac{B''_0}{GJ_d} (1 - \operatorname{ch}(\beta l / 2)). \quad (2.16)$$

Учитывая, что $B_0 = \sum_{i=1}^n P_i \omega_i$ и $\omega'_i = -\omega''_i$, получаем

$$\varphi(l_1) = \varphi_0 + \frac{\sum_{i=1}^n P_i \omega'_i}{GJ_d} (1 - ch(\beta l / 2)); \quad (2.17)$$

$$\varphi(l_2) = \varphi_0 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i \omega'_i}{GJ_d} (1 - ch(\beta l / 2)); \quad (2.18)$$

Подставляя выражения (2.17) и (2.18) в (2.14), получаем:

$$\theta(l) = \varphi(l_2) - \varphi(l_1) = -2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n P_i \omega_i}{GJ_d} (1 - ch(\beta l / 2)). \quad (2.19)$$

Полученные выражения позволяют определить компоненты деформированного состояния деталей типа балок при внецентренном растяжении.

Полученные выражения (2.11) и (2.19) показывают, что под действием каждой из сил при раскатке роликами происходит образование двухосного изгиба и закручивания.

При обработке раскаткой роликами одновременное образование двухосного изгиба и закручивания несимметричных поперечных сечений происходит при внецентровом приложении растягивающих сил как к полотну (сила P_1 на рисунке 2.13), так и ребрам (силы P_2 и P_3 на рисунке 2.13). Если же продольная сила проходит через одну из осей центра тяжести, то происходит образование деформации одноосного прогиба, а при прохождении через ось центра кручения – закручивание не происходит.

Также с помощью выражений (2.11) и (2.19) можно определить результирующие значения f_x , f_y и θ при действии нескольких сил, образованных при обработке различных участков поперечных сечений деталей.

Исходя из вышесказанного, для сравнительного анализа деформаций аналитический расчет и реальную обработку необходимо производить при последовательной раскатке ребер и полотна.

Определим основные зависимости для аналитического расчета деформированного состояния, возникающего в процессе правки деталей типа балок КПС последовательной раскаткой роликами.

При раскатке 1-го произвольно выбранного участка поперечного сечения детали расчет необходимо вести по схеме обработки с учетом действия одной растягивающей силы P_1 . Деформации, образующиеся в результате действия этой силы, можно определить, используя следующие выражения:

$$\begin{aligned} f_{x1} &= k_{x1} \cdot P_1, \\ f_{y1} &= k_{y1} \cdot P_1, \\ \theta_1 &= k_{\theta 1} \cdot P_1, \end{aligned} \quad (2.20)$$

где $k_{x1} = \frac{a^2 \cdot x_1}{8EJ_x}$, $k_{y1} = \frac{a^2 \cdot y_1}{8EJ_y}$, $k_{\theta} = -2 \cdot \frac{\omega_1}{GJ_d} (1 - \text{ch}(\beta l / 2))$.

При обработке 2-го и последующих участков расчет необходимо вести по схеме обработки с учетом совместного действия нескольких растягивающих сил $P_2, P_3 \dots P_n$. Деформации, образующиеся в результате действия этих сил, можно определить, используя следующие выражения:

$$\begin{aligned} f_{xi} &= f_{xi-1} \pm k_{xi} \cdot P_i, \\ f_{yi} &= f_{yi-1} \pm k_{yi} \cdot P_i, \\ \theta_i &= \theta_{i-1} \pm k_{\theta i} \cdot P_i, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где i – номер обрабатываемого участка.

Примечание: знак ” \pm ” в этих выражениях определяется изменением (увеличение или уменьшение стрел прогибов и угла закручивания) по сравнению с деформацией, образованной при обработке 1-го участка.

Постепенное увеличение продольной силы при увеличении давления со стороны роликов при обработке каждого i -го раскатываемого участка математически можно выразить:

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} + \dots + P_{in}, \quad (2.22)$$

где P_{i1} , P_{i2} , P_{in} - продольные растягивающие силы, под действием которых происходит обработка i -го раскатываемого участка.

Подставляя выражение (2.22) в (2.20) и (2.21), определяются зависимости деформаций от совместного действия растягивающих сил, приложенных к различным обрабатываемым участкам (ребрам, полотну) при раскатке роликами. Данная методика расчета позволяет получить аналитические зависимости деформаций при обработке раскаткой роликами и после проведения экспериментальных исследований произвести сравнительный анализ полученных данных с целью подтверждения возможности использования математической модели расчета деформаций, возникающих в процессе правки раскаткой роликами.

2.3 Методика расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами деталей типа балок

Разработанная математическая модель может применяться не только для расчета деформаций по известным растягивающим усилиям, возникающим в процессе раскатки роликами. При решении обратной задачи возможно создание и методики расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами маложестких деталей типа балок КПС по известным значениям деформаций, подлежащих устранению при обработке. Устраняемые деформации можно определить как:

$$\Delta f_x = f_{xисх} - f_{xмп}; \Delta f_y = f_{yисх} - f_{yмп}; \Delta \theta = \theta_{исх} - \theta_{мп}; \quad (2.23)$$

где $f_{xисх}$, $f_{yисх}$, $\theta_{исх}$ - исходные деформации обрабатываемого участка детали; $f_{xмп}$, $f_{yмп}$, $\theta_{мп}$ - деформации, которые требуется получить на обрабатываемом участке детали.

По аналогии с методикой расчета деформаций методика определения технологических параметров при раскатке предполагает нахождение геометрических и крутильных характеристик поперечного сечения

обрабатываемой области детали. Длина обрабатываемой области определяется следующим способом:

1. Перед расчетом деталь разбивается на участки, содержащие поперечные сечения постоянной конфигурации.

2. Для каждого участка определяются исходные деформации (прогиб в двух плоскостях и угол закрутки).

3. Далее каждый полученный участок необходимо разбить на участки с величинами исходных деформаций, имеющими постоянный знак, и определить величины требуемых деформаций для этих областей. Используя выражения (2.23) определяются устраняемые деформации для каждого обрабатываемого участка детали.

Теперь, зная величины устраняемых деформаций, геометрические и крутильные характеристики поперечного сечения обрабатываемого участка детали, можно определить совокупность растягивающих продольных сил и координаты точек их приложения. Для этого необходимо решить систему уравнений, где неизвестными кроме вышеперечисленных параметров являются и секториальные площади точек приложения растягивающих продольных сил:

$$\begin{aligned} \pm P_1 \cdot x_1 \pm P_2 \cdot x_2 \pm \dots \pm P_n \cdot x_n &= \frac{8EJ_x}{a^2} \cdot \Delta f_x; \\ \pm P_1 \cdot y_1 \pm P_2 \cdot y_2 \pm \dots \pm P_n \cdot y_n &= \frac{8EJ_y}{a^2} \cdot \Delta f_y; \\ P_1 \cdot \omega_1 + P_2 \cdot \omega_2 + \dots + P_n \cdot \omega_n &= -\frac{GJ_d}{2(1 - ch(\beta l / 2))} \cdot \Delta \theta. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Примечание: Здесь в первых двух выражениях знак "+" перед силой ставится в том случае, если изгибающий момент, создаваемый этой силой, устраняет исходный прогиб, знак "-" – если исходный прогиб увеличивается при действии изгибающего момента; x_i , y_i являются плечами изгибающих моментов и поэтому всегда положительны. В третьем выражении знак перед бимоментом определяется знаком секториальной площади.

При решении данной системы уравнений необходимо стремиться к тому, чтобы количество действующих растягивающих сил было минимальным. Если расчетные параметры не обеспечивают заданную точность, т.е. при заданных устраняемых деформациях обрабатываемого участка определение необходимой совокупности действующих сил не может быть достигнуто, то следует определять совокупность сил, при которой соответствующие этим усилиям устраняемые деформации наиболее близки к заданным. Теперь необходимо заново определить устраняемые деформации путем нахождения разности изначально заданных и расчетных устраняемых деформаций и повторить расчет усилий и точек их приложения. Данный расчет необходимо производить до тех пор, пока не будет обеспечена заданная точность, что на практике означает обработку в несколько проходов.

Выводы по главе

1. Представлены основные зависимости для определения геометрических и крутильных характеристик обрабатываемого участка детали, необходимых для выполнения расчета деформаций при обработке раскаткой роликами. Приведен способ типизации конструктивных элементов с целью упрощения расчетов геометрических характеристик комплексного сечения детали.

2. Получены выражения для определения деформаций двухосного изгиба и угла закручивания деталей типа балок КПС как тонкостенных стержней под действием растягивающих сил в процессе раскатки роликами.

3. Применительно к деталям типа балок разработана методика расчета деформированного состояния (двухосного изгиба и закручивания) при раскатке роликами конструктивных элементов поперечного сечения (ребра и полотно).

4. Разработанная методика расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами деталей типа балок позволяет определить режимы обработки, необходимые для получения или устранения заданных значений двухосного изгиба с учетом требуемой величины закручивания в процессе раскатки.

3 Экспериментальные исследования по обработке раскаткой роликами

3.1 Методика экспериментальных исследований

В комплекс мероприятий по изучению процесса формообразования и правки раскаткой роликами входят:

1. Определение деформации образцов-пластин в процессе раскатки роликами:

- определение внутренних силовых факторов процесса – установление зависимости значения силы, действующей на деталь при раскатке от момента затяжки силового болта раскатного устройства;

- определение глубины отпечатков роликов на поверхности детали и установление ограничений диапазона технологических параметров в зависимости от допуска на толщину раскатываемых рёбер (стенок) деталей;

- определение изменения стрелы остаточного прогиба образцов-пластин при последующем нагреве;

2. Установление зависимостей деформации (двухосного изгиба и закручивания) от внутренних силовых факторов и последовательности процесса раскатки ребер и полотна в установленном технологическом диапазоне.

Для сравнительного анализа результатов теоретического расчета деформированного состояния при раскатке роликами деталей типа балок КПС с помощью полученных зависимостей (2.11) и (2.19) и результатов, полученных при проведении экспериментальных работ, включающих реальную обработку раскаткой роликами, в качестве объекта испытаний рационально использовать их конструктивно-подобные образцы (КПО).

3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных, направленный на получение оценки разработанной методики расчета деформированного состояния КПО при раскатке роликами.

4. Получение результатов о возможности применения разработанного специализированного инструмента для обработки деталей раскаткой роликами.

Для исследований по определению зависимостей значения силы, действующей на деталь при раскатке, от момента затяжки силового болта раскатного устройства и глубины отпечатков роликов на поверхности детали были изготовлены образцы в виде пластин размерами 4×30×250 мм из сплавов АК4-1, Д16Т, В95пчТ1, В95пчТ2 (см. рисунок 3.1).

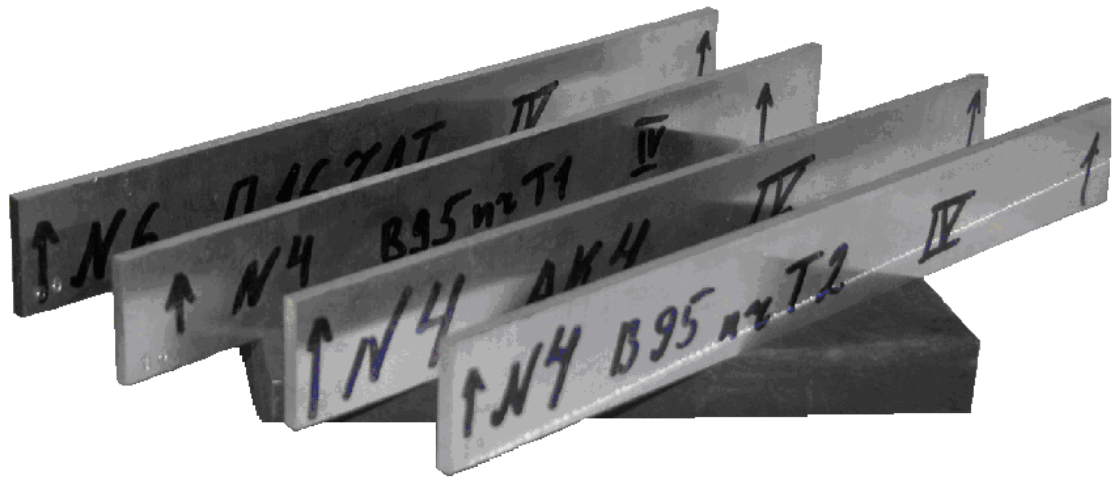


Рисунок 3.1. Образцы-пластины для тарировки процесса раскатки

На каждый образец-пластину была нанесена маркировка:

<u>XX</u>	<u>XXXXX</u>
	Марка материала
Номер образца	

Для установления зависимостей деформации (изгиба и закручивания поперечных сечений) типовых деталей от внутренних силовых факторов и стратегий процесса раскатки роликами были использованы конструктивно-подобные образцы (КПО) данных деталей, изготовленные фрезерованием из сплава В95пчТ2 (см. рисунки 3.2-3.8). Размеры КПО приведены в таблице 3.1.

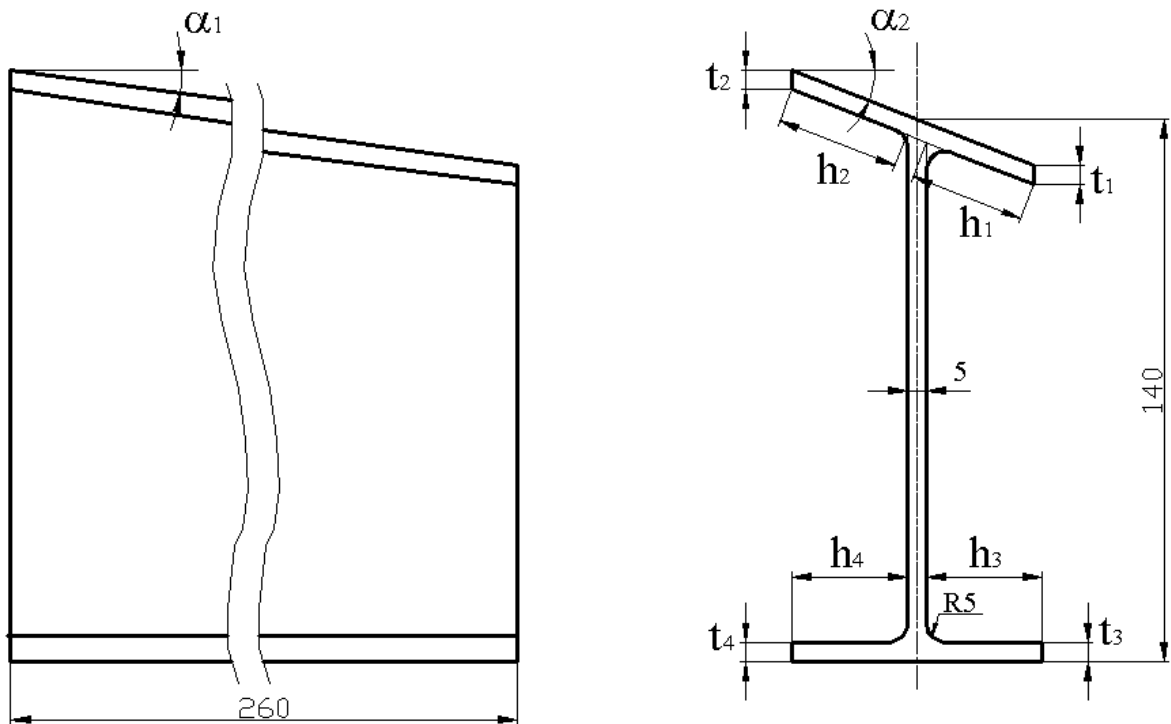


Рисунок 3.2 – Конструктивно – подобный образец

Размеры КПО

Таблица 3.1

№ п/п	Линейные размеры, мм								Углы, град.	
	h_1	h_2	h_3	h_4	t_1	t_2	t_3	t_4	α_1	α_2
1.	30	30	30	30	5	5	5	5	0	0
2.	30	0	30	30	5	-	5	5	0	0
3.	30	0	30	0	5	-	5	-	0	0
4.	30	0	30	0	5	-	5	-	5	0
5.	30	0	30	0	5	-	5	-	0	15
6.	30	0	30	0	5	-	5	-	5	15



Рисунок 3.3 - Конструктивно-подобный образец № 1



Рисунок 3.4 - Конструктивно-подобный образец № 2



Рисунок 3.5 - Конструктивно-подобный образец № 3



Рисунок 3.6 - Конструктивно-подобный образец № 4



Рисунок 3.7 - Конструктивно-подобный образец № 5



Рисунок 3.8 - Конструктивно-подобный образец № 6

Раскатку образцов-пластин осуществляли раскатниками (см. рисунок 3.8), предназначенными для обработки ребер (*a*) и полотна деталей (*b*) согласно схеме, показанной на рисунке 3.9. Перед раскаткой образцы-пластины помещали в прорезь (250x4) плиты (350x110x15). Усилие сжатия

роликов раскатника регулировали затяжкой силового болта динамометрическим ключом UNIOR ART.264 1/4" 2-24Nm. Моменты затяжки болтов при раскатке образцов приведены в таблице 3.1.

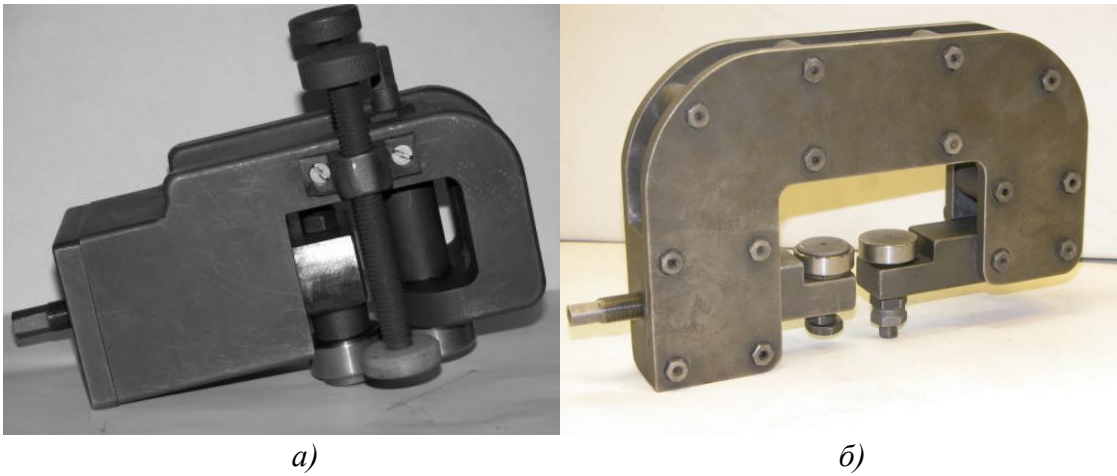


Рисунок 3.8 – Раскатники для обработки ребер (а) и полотна (б) деталей

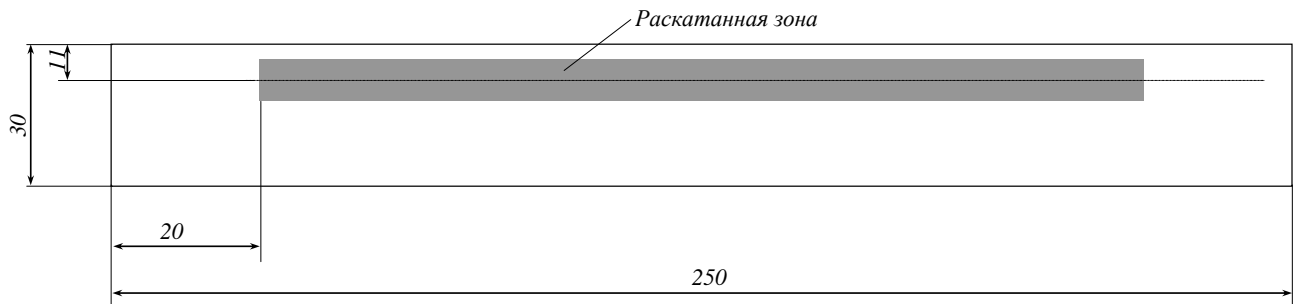


Рисунок 3.9 - Схема раскатки образцов-пластин

Моменты затяжки и последовательность нагружения образцов-пластин

Таблица 3.1

Параметры обработки	Номер образца				
	1	2	3	4	5
Момент затяжки, Нм	3				
Последовательность обработки	6	6			
	9	9	9		
	12	12	12	12	
	15	15	15	15	15

Стрелу прогиба f раскатанных образцов измеряли при помощи специального приспособления (см. рисунок 3.11) согласно схеме, приведённой на рисунке 3.10. Изменение глубины отпечатков роликов на

поверхности образцов-пластин осуществляли при помощи микрометра с ценой деления 0,01 мм.

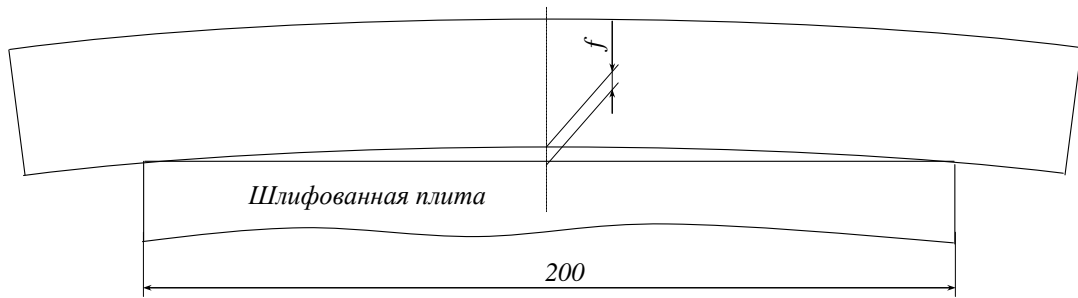


Рисунок 3.10 - Схема измерения образцов-пластин после раскатки

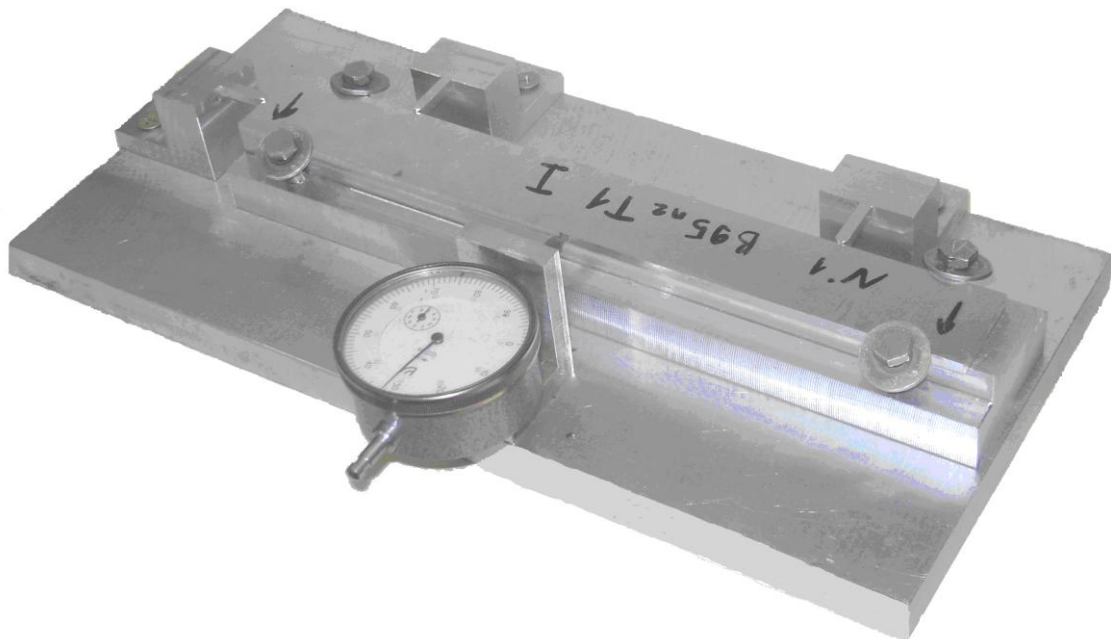


Рисунок 3.11 - Приспособление для измерения образцов-пластин после раскатки

3.2 Результаты исследований и их обработка

3.2.1 Установление зависимостей деформации образцов-пластин в процессе раскатки роликами

Результаты измерения стрелы прогиба образцов-пластин приведены в таблицах 3.2, 3.4, глубины отпечатков роликов – в таблицах 3.3, 3.5.

Результаты измерения стрелы прогиба образцов-пластин, образовавшейся после обработки раскатником для ребер

Таблица 3.2

Марка материала	Момент затяжки, Н/м	№ образца				
		1	2	3	4	5
АК4	3	0,02	-	-	-	-
	6	0,026	0,03	-	-	-
	9	0,1	0,11	0,12	-	-
	12	0,15	0,16	0,19	0,25	-
	15	0,24	0,28	0,32	0,38	0,45
В95пчТ2	3	0,01	-	-	-	-
	6	0,05	0,02	-	-	-
	9	0,09	0,05	0,07	-	-
	12	0,11	0,1	0,15	0,2	-
	15	0,13	0,15	0,22	0,28	0,35
В95пчТ1	3	0,01	-	-	-	-
	6	0,03	0,05	-	-	-
	9	0,08	0,1	0,13	-	-
	12	0,13	0,14	0,17	0,2	-
	15	0,15	0,19	0,25	0,28	0,37
Д16чат	3	0,04	-	-	-	-
	6	0,21	0,25	-	-	-
	9	0,36	0,36	0,39	-	-
	12	0,41	0,59	0,62	0,7	-
	15	0,74	0,78	0,8	0,87	1,05

Результаты измерения толщины образцов-пластин, до и после обработки раскатником для ребер

Таблица 3.3

Марка материала	№ образца									
	1		2		3		4		5	
	До	После	До	После	До	После	До	После	До	После
АК4	3,94	3,81	3,91	3,88	3,83	3,8	3,88	3,8	3,93	3,88
Д16Т	3,9	3,87	3,92	3,85	3,87	3,82	3,88	3,84	3,92	3,89
В95пчТ1	3,88	3,8	3,89	3,79	3,95	3,91	3,88	3,84	3,88	3,84
В95пчТ2	3,92	3,86	3,92	3,78	3,89	3,83	3,87	3,81	3,9	3,77

Средние значения изменения толщины раскатанной зоны следующие:
 АК4 – 0,06 мм; В95пчТ2 – 0,09 мм; В95пчТ1 – 0,06 мм; Д16чат – 0,04 мм.
 Максимальное значение – 0,14 мм (В95пчТ2). Согласно ОСТ 1 00022-80 допуск на размер ребра при толщине 4 мм составляет 0,3 мм.

Результаты измерения стрелы прогиба (мм) образцов-пластин, образовавшейся после обработки раскатником для полотна

Таблица 3.4

Марка материала	Момент затяжки, Н/м	№ образца				
		1	2	3	4	5
АК4	3	0,02	-	-	-	-
	6	0,13	0,12	-	-	-
	9	0,16	0,19	0,2	-	-
	12	0,36	0,31	0,38	0,45	-
	15	0,4	0,49	0,64	0,58	0,75
В95пчТ2	3	0,04	-	-	-	-
	6	0,13	0,17	-	-	-
	9	0,17	0,21	0,18	-	-
	12	0,34	0,27	0,16	0,38	-
	15	0,37	0,49	0,44	0,53	0,38
В95пчТ1	3	0,01	-	-	-	-
	6	0,08	0,02	-	-	-
	9	0,11	0,06	0,08	-	-
	12	0,25	0,2	0,16	0,1	-
	15	0,35	0,22	0,2	0,17	0,3
Д16чат	3	0,07	-	-	-	-
	6	0,14	0,19	-	-	-
	9	0,25	0,27	0,52	-	-
	12	0,6	0,58	0,64	0,46	-
	15	0,68	0,72	0,72	0,81	0,87

Результаты измерения толщины образцов-пластин, до и после обработки раскатником для полотна

Таблица 3.5

Марка материала	№ образца									
	1		2		3		4		5	
	До	После	До	После	До	После	До	После	До	После
АК4	3,92	3,88	3,94	3,82	3,94	3,87	3,81	3,78	3,95	3,85
Д16Т	3,88	3,82	3,87	3,83	3,98	3,89	3,91	3,86	3,88	3,81
В95пчТ1	3,85	3,8	3,87	3,81	3,88	3,83	3,88	3,8	3,89	3,79
В95пчТ2	3,94	3,87	3,9	3,86	3,91	3,84	3,88	3,82	4,02	3,89

Средние значения толщины раскатанной зоны следующие: АК4 – 0,07 мм; В95пчТ2 – 0,07 мм; В95пчТ1 – 0,07 мм; Д16чат – 0,06 мм. Максимальное значение – 0,13 мм (В95пчТ2). Согласно ОСТ 1 00022-80 допуск на размер ребра при толщине 4 мм составляет 0,3 мм.

Зависимости стрелы прогиба образцов от момента затяжки силового болта, последовательно увеличиваемого при раскатке одного образца (последовательное нагружение), приведены на рисунках 3.12, 3.13. Аналогичные зависимости, полученные при раскатке разных образцов (единовременное нагружение), показаны на рисунке 3.14, 3.15.

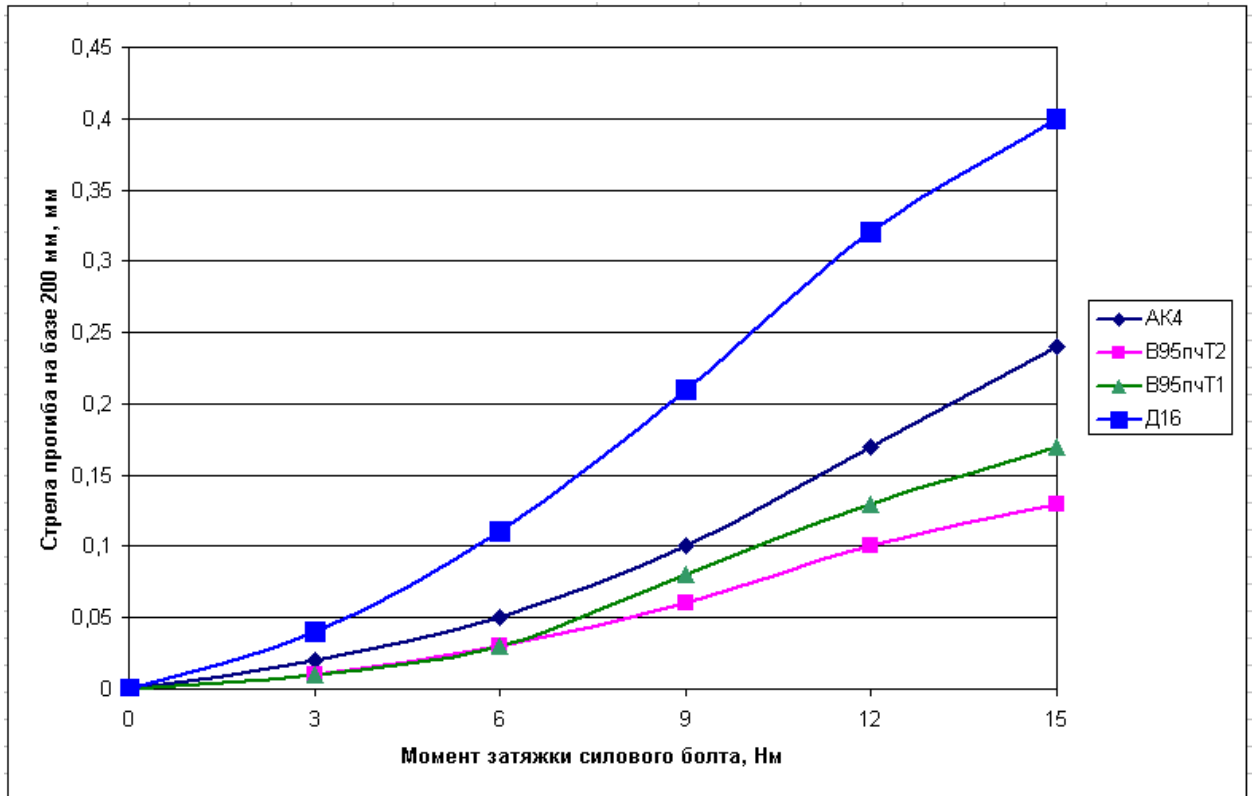


Рисунок 3.12 - Зависимости стрел прогибов образцов от момента затяжки силового болта раскатника для ребер при последовательном нагружении

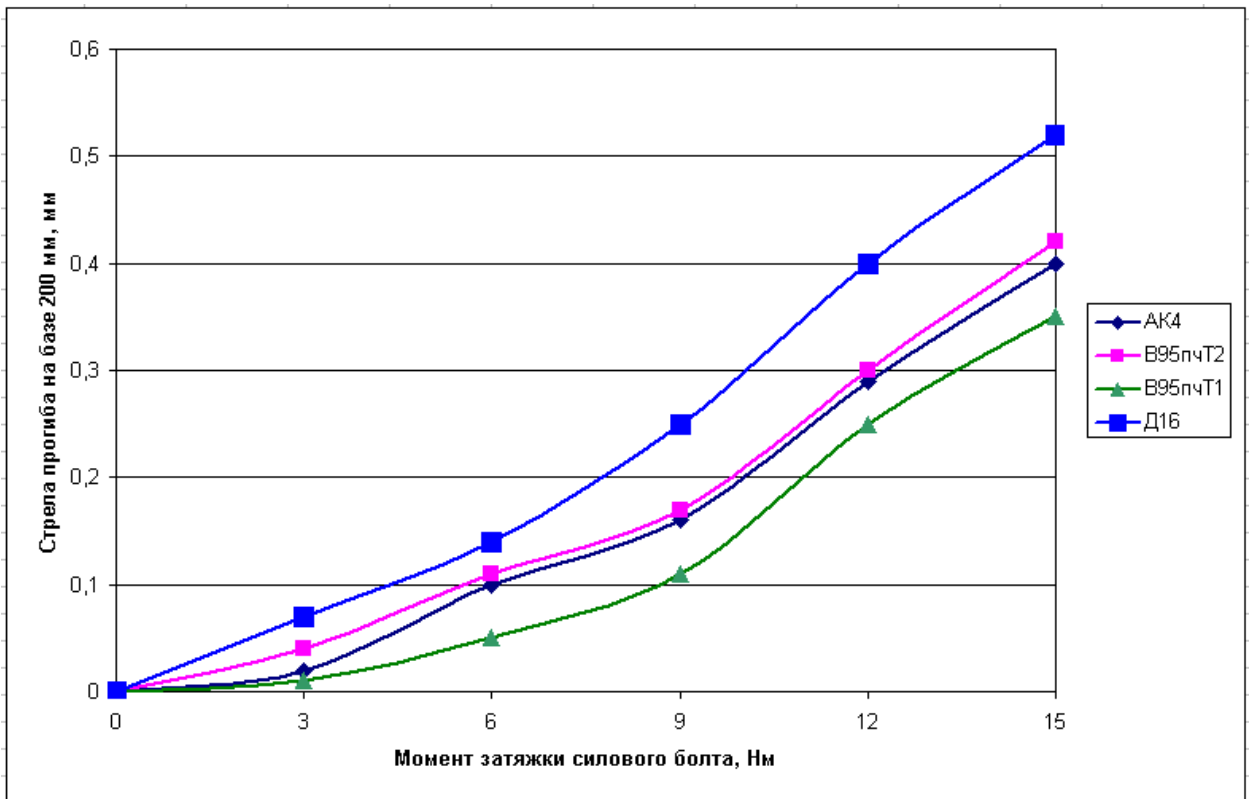


Рисунок 3.13 - Зависимости стрел прогибов образцов от момента затяжки силового болта раскатника для полотна при последовательном нагружении

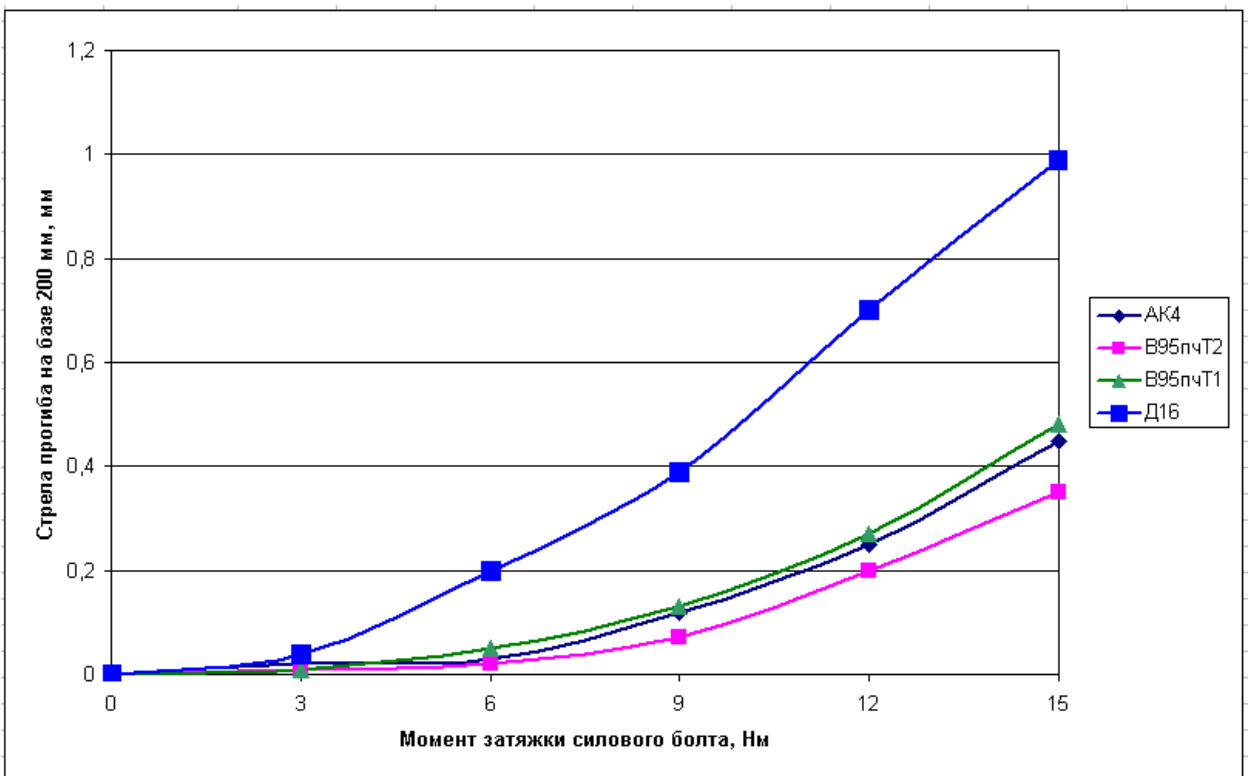


Рисунок 3.14 - Зависимости стрел прогибов образцов от момента затяжки силового болта раскатника для ребер при одновременном нагружении

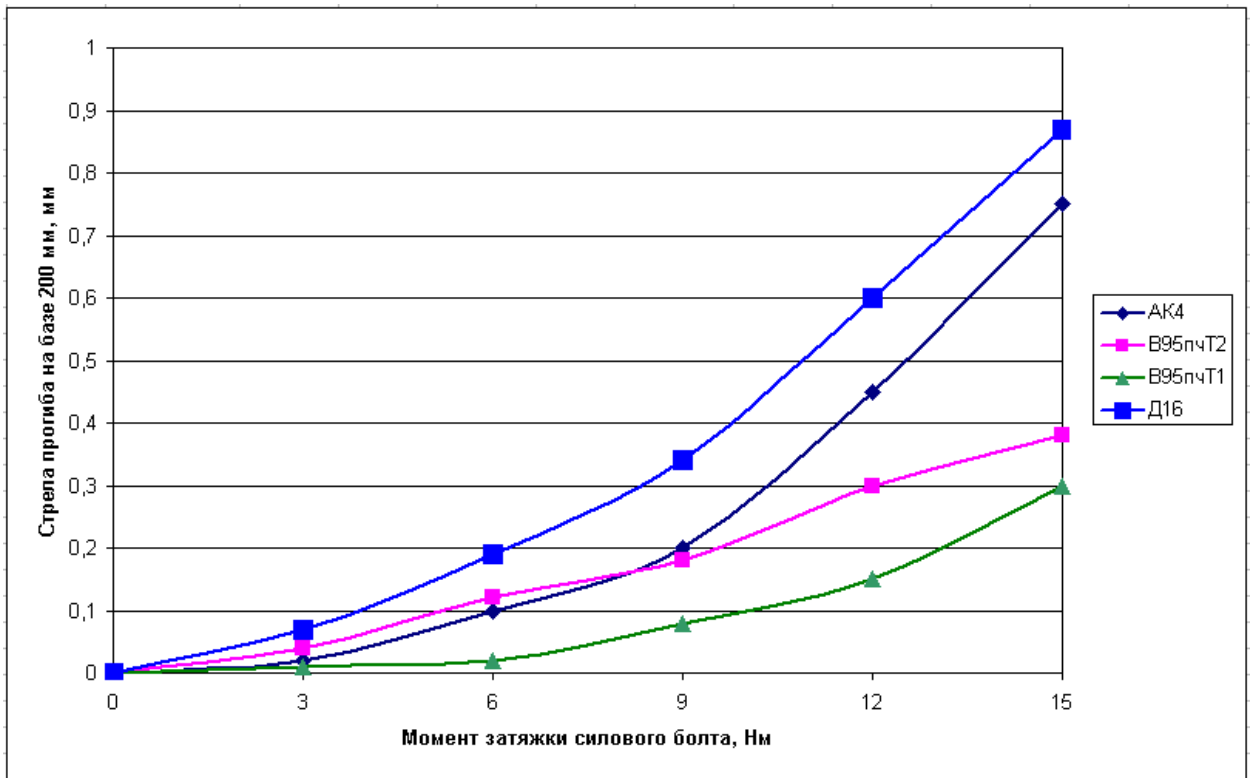


Рисунок 3.15 - Зависимости стрел прогибов образцов от момента затяжки силового болта раскатника для полотна при одновременном нагружении

Для определения удельной (на единицу толщины) внутренней силы P , приводящей к деформации образца в результате его раскатки, использовали следующую формулу:

$$P = \frac{4ENB^3 f}{3a^2(B - 2z_c)}, \quad (3.1)$$

где E – модуль упругости первого рода; B – ширина образца, $B = 30$ мм; H – толщина образца, $H = 4$ мм; f – стрела прогиба образца (см. рисунки 3.2.5 – 3.2.8); a – база измерения прогиба, $a = 200$ мм; z_c – расстояние от верхней грани образца до точки приложения силы P , определяемое конструкцией раскатника (см. рисунок 3.2.2), для раскатника, предназначенного обрабатывать ребра $z_c = 7,5$ мм, для раскатника, предназначенного обрабатывать полотно $z_c = 7,5$ мм.

Зависимости удельных внутренних сил, действующих на образец, от момента затяжки силового болта, последовательно увеличиваемого при раскатке одного образца (последовательное нагружение), приведены на рисунках 3.16,

3.17. Аналогичные зависимости, полученные при раскатке разных образцов (единовременное нагружение), показаны на рисунках 3.18, 3.19.

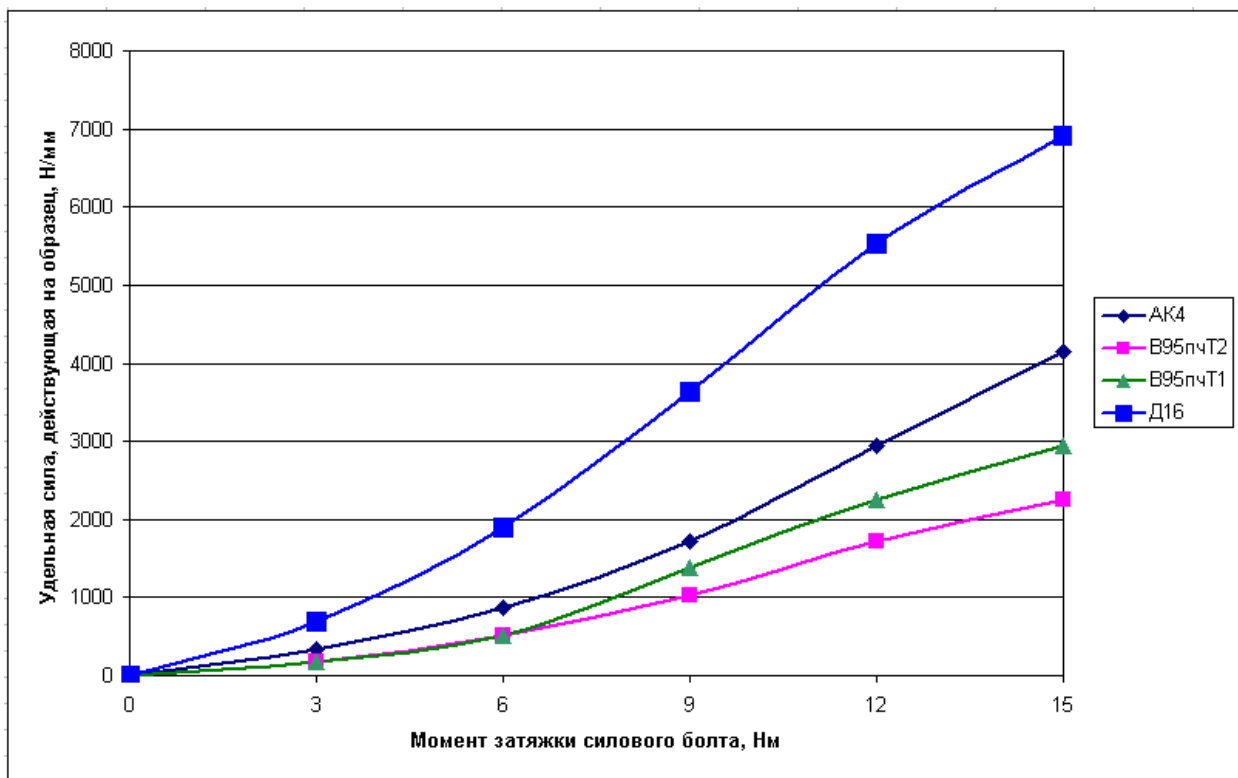


Рисунок 3.16 - Зависимости удельной внутренней силы, действующей на образец, от момента затяжки силового болта раскатника для ребер при последовательном нагружении

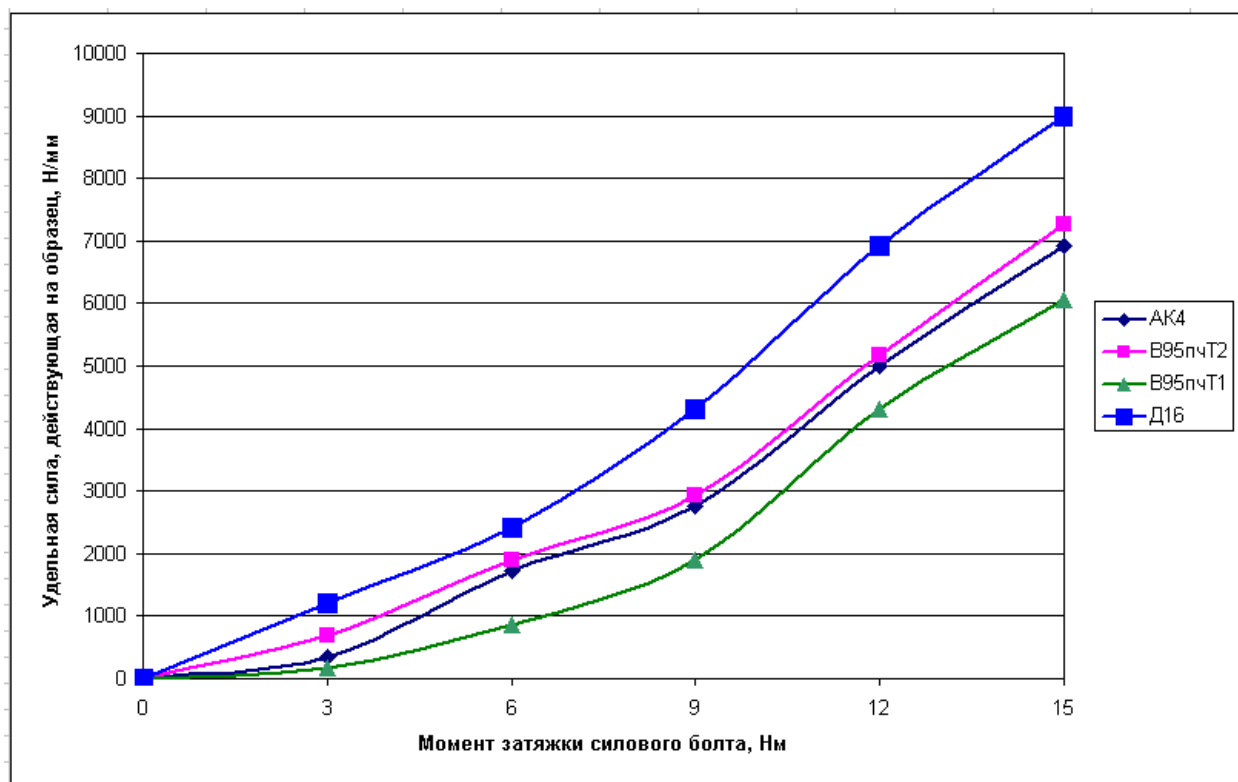


Рисунок 3.17 - Зависимости удельной внутренней силы, действующей на образец, от момента затяжки силового болта раскатника для полотна при последовательном нагружении

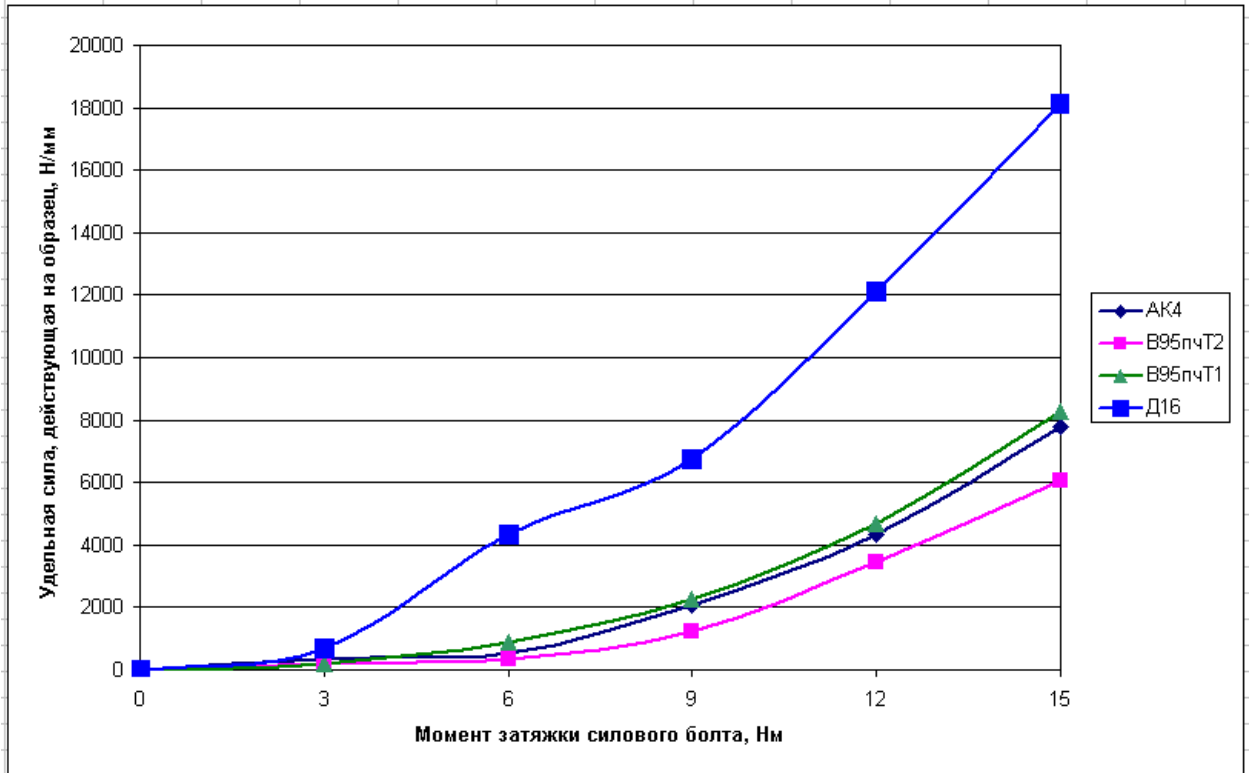


Рисунок 3.18 - Зависимости удельной внутренней силы, действующей на образец, от момента затяжки силового болта раскатника для ребер при одновременном нагружении

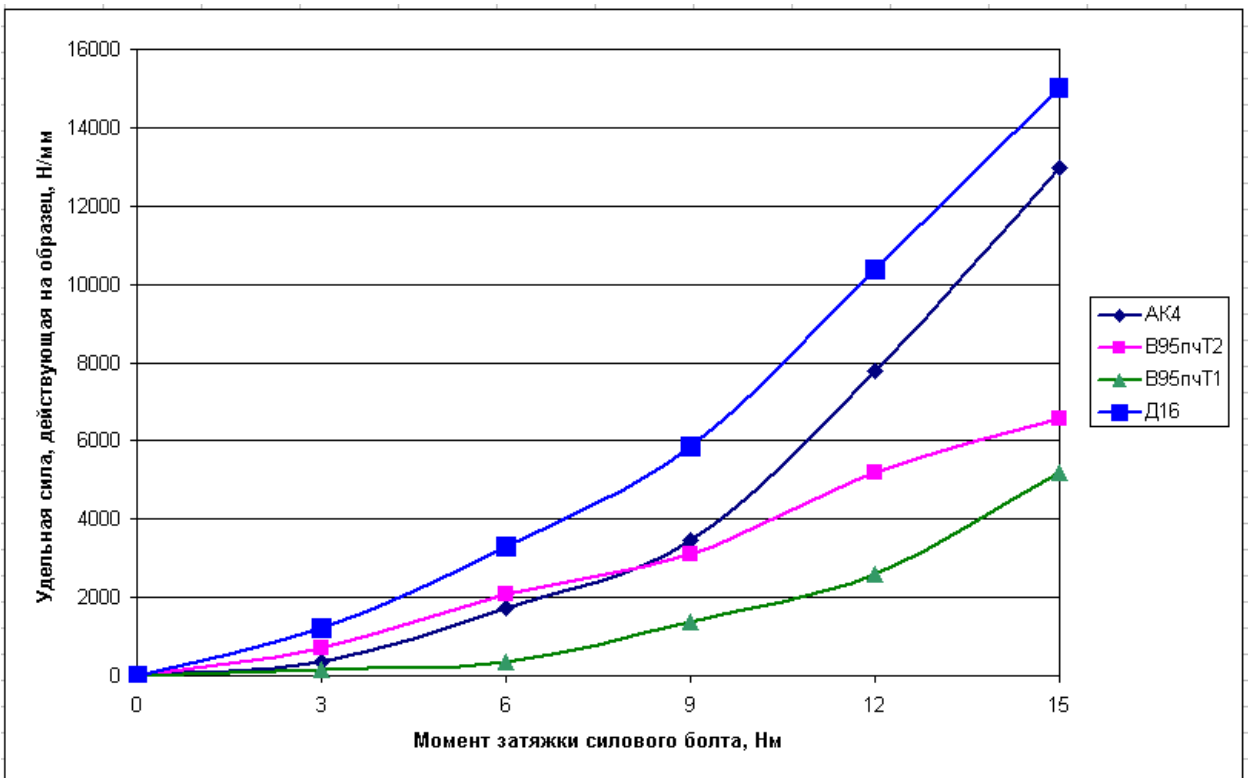


Рисунок 3.19 - Зависимости удельной внутренней силы, действующей на образец, от момента затяжки силового болта раскатника для полотна при одновременном нагружении

Образцы-пластины использовались и для получения сведений об изменении формы при нагреве обработанных раскаткой роликами деталей в ходе эксплуатации (эффекте релаксации). Моменты затяжки болтов при раскатке и температура нагрева образцов приведены в таблице 3.6.

Моменты затяжки, температура нагрева, последовательность нагружения и нагрева образцов-пластин

Таблица 3.6

Параметры обработки	Номер образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Момент затяжки, Нм					3	3	3	3	3	
Последовательность обработки			9	6	6	6	6		6	
	15	12			9	9			9	
					12				12	15
Температура нагрева, °	120	120	120	120	120	120	120	120	120	
Последовательность обработки	130	130	130	130	130	130	130	130	130	
	140	140	140	140	140	140	140	140	140	
	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150

Результаты измерения стрелы прогиба образцов-пластин приведены в таблицах 3.7, 3.8, 3.9 и 3.10.

Зависимости стрелы прогиба образцов из сплава АК4, В95пчТ1, В95пчТ2, Д16чат от момента затяжки силового болта при обработке раскатником для ребер и последующем нагреве показаны на рисунках 3.20 – 3.23.

Результаты измерения стрелы прогиба (мм) образцов-пластин (АК 4), образовавшейся после раскатки и последующего нагрева

Таблица 3.7

№ образца	Исх. прогиб	Момент затяжки, Нм					Температура нагрева			
		3	6	9	12	15	120°	130°	140°	150°
1	0,14	-	-	-	-	0,31	0,297	0,284	0,29	0,29
2	0,17	-	-	-	0,27	-	0,27	0,27	0,26	0,27
3	0,23	-	-	0,34	-	-	0,282	0,28	0,27	0,28
4	0,24	-	0,28	-	-	-	0,26	0,25	0,25	0,25
5	0,187	0,205	0,222	0,28	0,34	-	0,326	0,31	0,31	0,31
6	0,2	0,21	0,212	0,247	-	-	0,24	0,23	0,23	0,24
7	0,22	0,25	0,27	-	-	-	0,265	0,26	0,25	0,26
8	0,17	0,22	-	-	-	-	0,205	0,203	0,2	0,2
9	0,16	0,18	0,19	0,218	0,5	0,675	0,65	0,63	0,63	0,63
10	0,22	-	-	-	-	0,55	-	-	-	0,51

Результаты измерения стрелы прогиба (мм) образцов-пластин (В95пчТ1),
образовавшейся после раскатки и последующего нагрева

Таблица 3.8

№ образца	Исх. прогиб	Момент затяжки, Нм					Температура нагрева			
		3	6	9	12	15	120°	130°	140°	150°
1	0	-	-	-	-	0,43	0,37	0,35	0,335	0,345
2	-0,02	-	-	-	0,224	-	0,195	0,18	0,18	0,18
3	0,053	-	-	0,17	-	-	0,15	0,14	0,135	0,14
4	0,032	-	0,06	-	-	-	0,04	0,04	0,04	0,04
5	-0,04	-0,033	0	0,08	0,17	-	0,15	0,13	0,145	0,14
6	0,17	0,183	0,21	0,23	-	-	0,217	0,21	0,21	0,21
7	0,14	0,145	0,15	-	-	-	0,15	0,13	0,15	0,135
8	0,035	0,04	-	-	-	-	0,035	0,02	0,03	0,03
9	-0,03	0,03	-0,01	0,024	0,084	0,132	0,118	0,103	0,11	0,1
10	0,035	-	-	-	-	0,465	-	-	-	0,48

Результаты измерения стрелы прогиба (мм) образцов-пластин (В95пчТ2),
образовавшейся после раскатки и последующего нагрева

Таблица 3.9

№ образца	Исх. прогиб	Момент затяжки, Нм					Температура нагрева			
		3	6	9	12	15	120°	130°	140°	150°
1	0,25	-	-	-	-	0,43	0,342	0,34	0,35	0,34
2	0,16	-	-	-	0,25	-	0,21	0,21	0,21	0,2
3	0,31	-	-	0,34	-	-	0,34	0,33	0,34	0,33
4	0,25	-	0,27	-	-	-	0,27	0,26	0,27	0,26
5	0,058	0,11	0,114	0,13	0,19	-	0,19	0,17	0,19	0,17
6	0,18	0,19	0,195	0,2	-	-	0,2	0,2	0,18	0,18
7	0,056	0,075	0,08	-	-	-	0,08	0,07	0,09	0,07
8	0,36	0,38	-	-	-	-	0,38	0,36	0,37	0,36
9	0,148	0,15	0,18	0,21	0,27	0,32	0,32	0,29	0,293	0,29
10	0,088	-	-	-	-	0,5	-	-	-	0,475

Результаты измерения стрелы прогиба (мм) образцов-пластин (Д1бчат),
образовавшейся после раскатки и последующего нагрева

Таблица 3.10

№ образца	Исх. прогиб	Момент затяжки, Нм					Температура нагрева			
		3	6	9	12	15	120°	130°	140°	150°
1	0,072	-	-	-	-	0,21	0,21	0,2	0,21	0,21
2	0,2	-	-	-	0,35	-	0,35	0,34	0,33	0,34
3	0,173	-	-	0,25	-	-	0,25	0,24	0,25	0,26
4	0,3	-	0,33	-	-	-	0,34	0,32	0,33	0,33
5	0,12	0,15	0,18	0,22	0,35	-	0,35	0,34	0,35	0,355
6	0,11	0,12	0,147	0,205	-	-	0,205	0,195	0,2	0,21
7	0,14	0,147	0,17	-	-	-	0,17	0,15	0,16	0,16
8	0,28	0,34	-	-	-	-	0,33	0,32	0,322	0,33
9	0,2	0,2	0,268	0,308	0,38	0,41	0,403	0,4	0,4	0,4
10	0,28	-	-	-	-	0,59	-	-	-	0,59

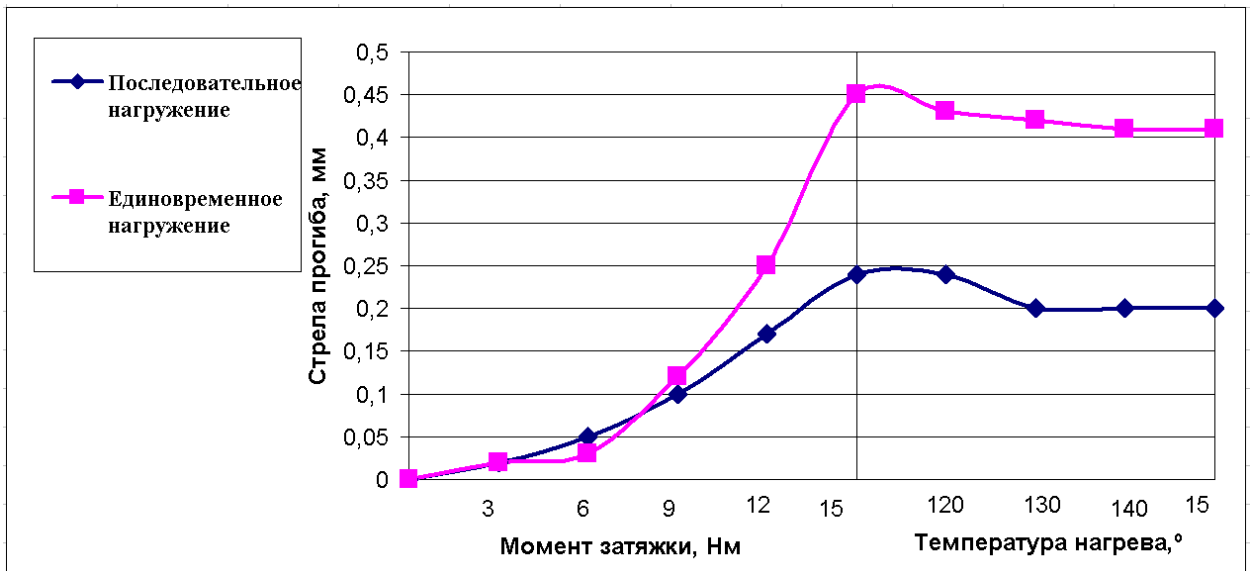


Рисунок 3.20 - Зависимости стрелы прогиба образцов из сплава АК4 от момента затяжки силового болта при обработке раскатником для ребер и последующего нагрева

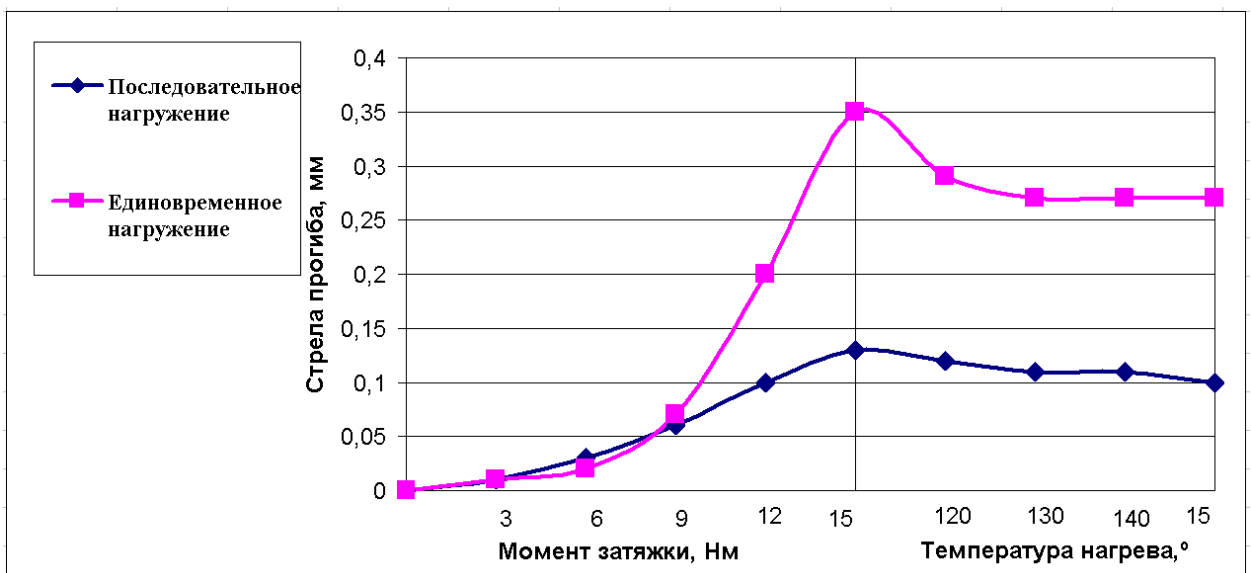


Рисунок 3.21 - Зависимости стрелы прогиба образцов из сплава В95пчТ2 от момента затяжки силового болта при обработке раскатником для ребер и последующего нагрева

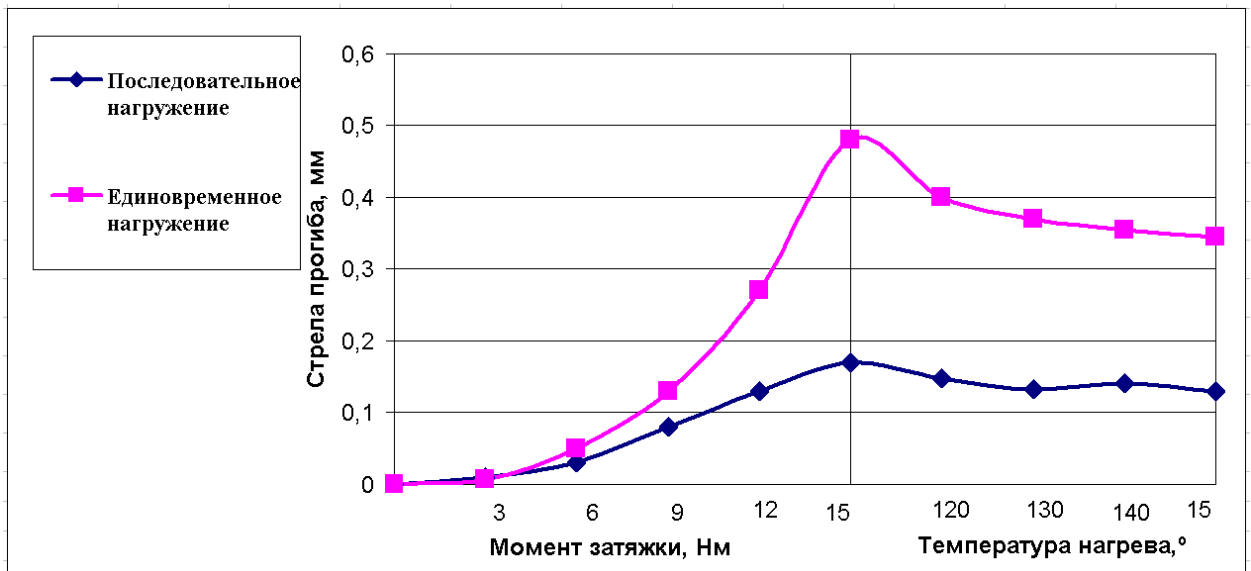


Рисунок 3.22 - Зависимости стрелы прогиба образцов из сплава В95пчТ1 от момента затяжки силового болта при обработке раскатником для ребер и последующего нагрева

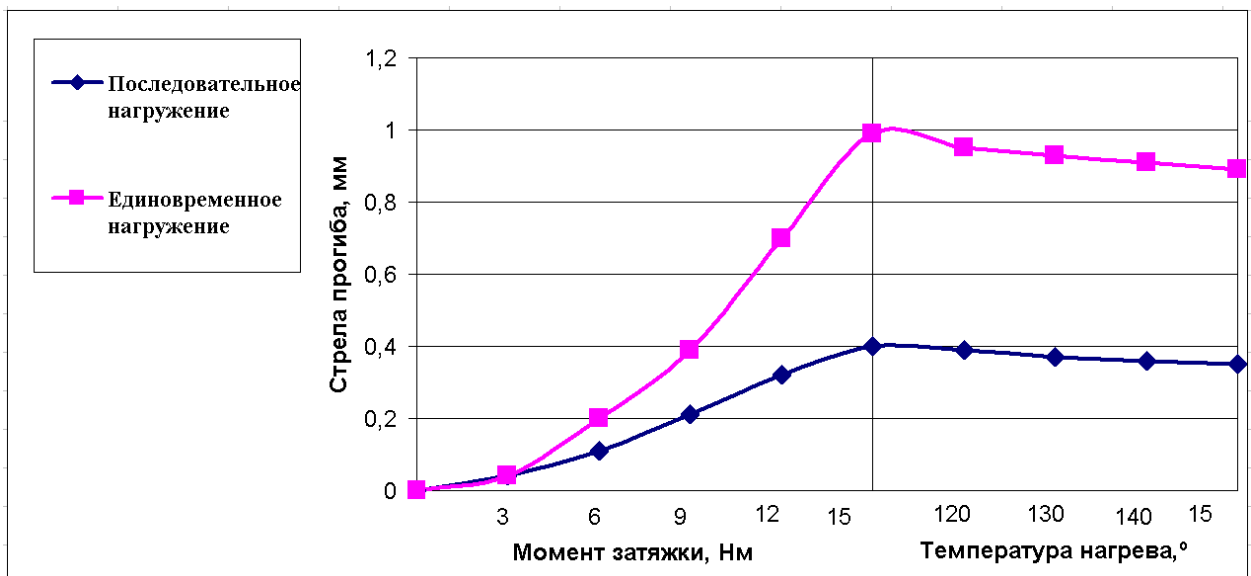


Рисунок 3.23 - Зависимости стрелы прогиба образцов из сплава Д16чат от момента затяжки силового болта при обработке раскатником для ребер и последующего нагрева

3.2.2 Установление зависимости деформации КПО от внутренних силовых факторов и стратегий процесса раскатки

При раскатке и измерении в последовательности, приведённой на рисунке 3.24, конструктивно-подобных образцов обработке поочередно подвергали:

1. Ребра КПО при помощи раскатника для обработки ребер (см. рисунок 3.8, а);
2. Полотно КПО при помощи раскатника для обработки полотна (см. рисунок 3.8, б).

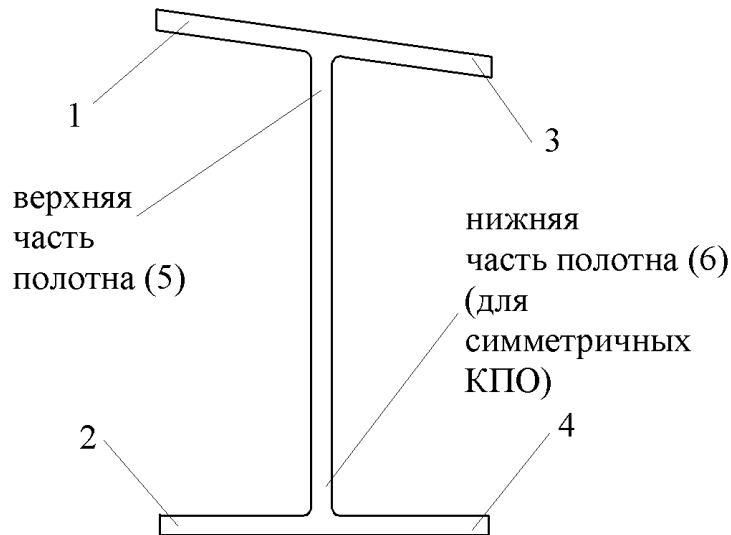


Рисунок 3.24 – Последовательность обработки КПО при проведении экспериментальных исследований

При этом обработку ребер и полотна производили на участках, расположенных на максимально возможном расстоянии от осей центров тяжести и кручения, определяемых конфигурацией КПО и конструкцией обрабатывающего инструмента.

Усилие сжатия роликов раскатников регулировали затяжкой силового болта динамометрическим ключом UNIOR ART.264 1/4" 2-24Nm. Моменты затяжки болтов при раскатке каждого обрабатываемого участка КПО: 3, 6, 9, 12, 15 Нм.

Для определения стрелы прогиба в плоскости XOZ (отклонения от плоскостности) и единичного угла закручивания поперечных сечений в исходном положении и после каждого нагружения производилось измерение перемещений в девяти точках полотна КПО согласно схеме, показанной на рисунке 3.25. Для выполнения измерений было спроектировано и изготовлено специальное приспособление (см. рисунок 3.26).

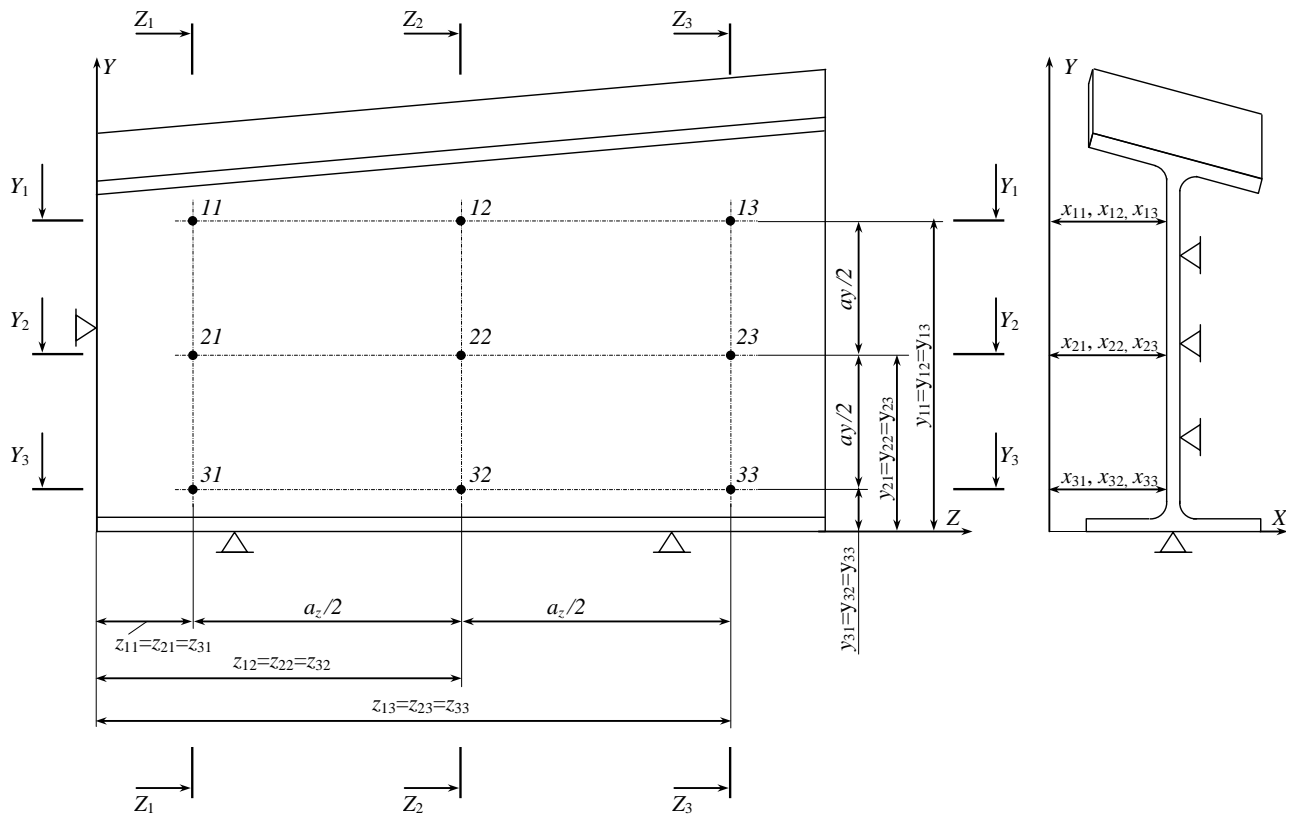


Рисунок 3.25 - Схема измерения КПО после раскатки

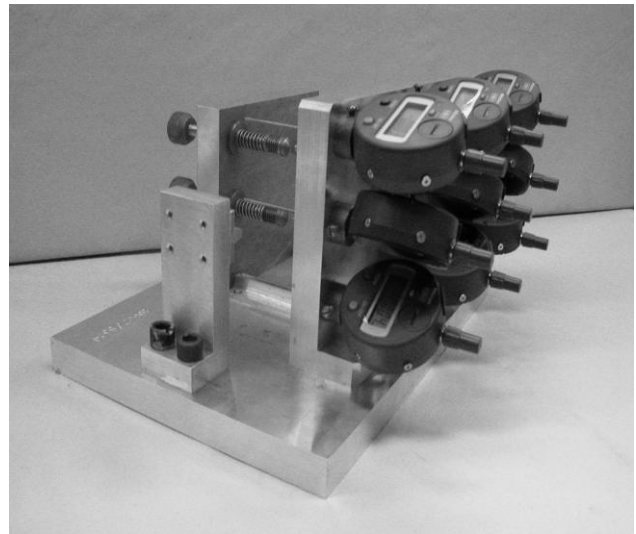
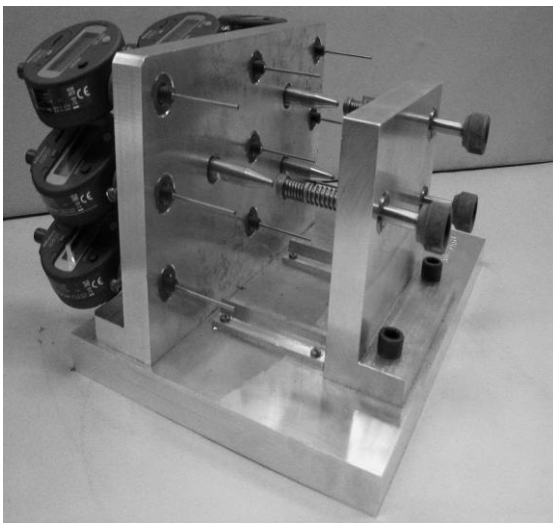


Рисунок 3.26 - Приспособления для измерения перемещений контрольных точек КПО

Для определения стрелы прогиба в плоскости YOZ (саблевидности) измерение КПО осуществляли при помощи индикаторной планки на базе 200 мм посередине образца (см. рисунок 3.27).

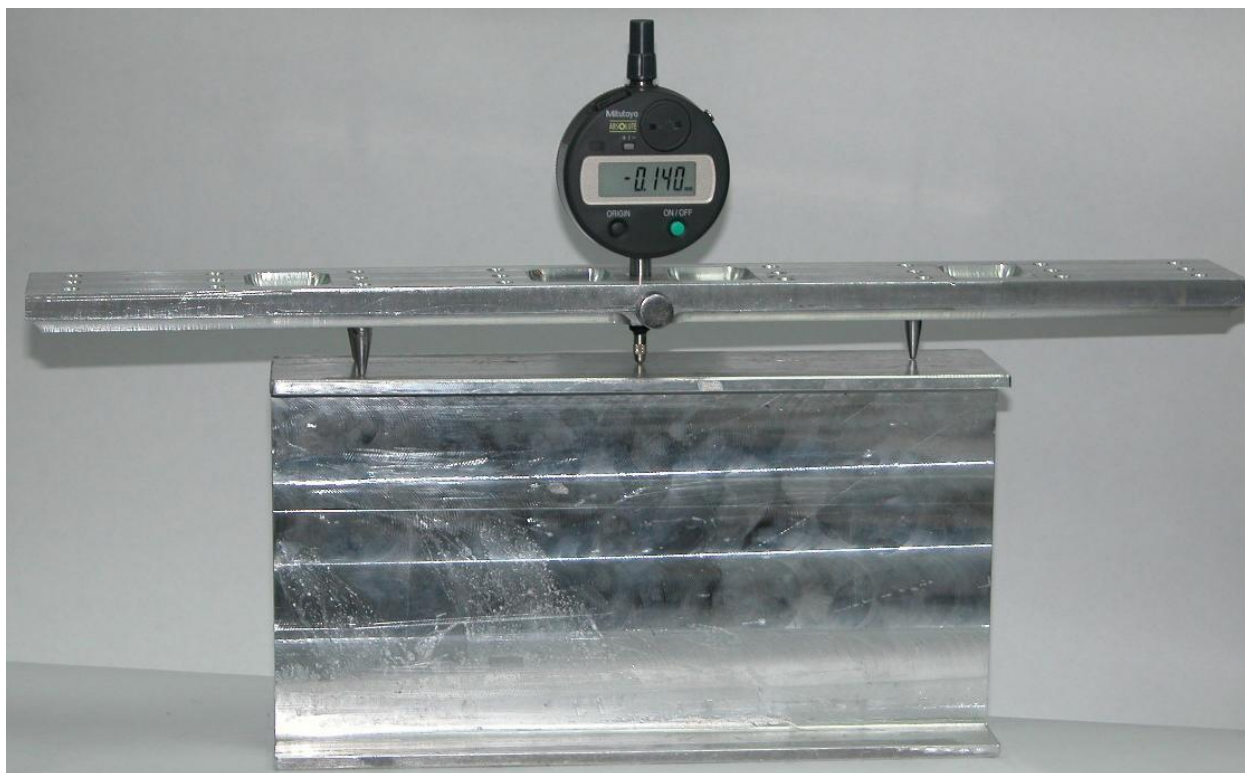


Рисунок 3.27 – Индикаторная планка

Результаты измерения перемещения точек полотна КПО при раскатке рёбер приведены в таблице 3.11.

Результаты измерений перемещений полотна КПО в контрольных точках, мм

Таблица 3.11

№ контр. точки	Момент затяжки, Нм				
	3	6	9	12	15
КПО №1					
Раскатка ребра №1					
11	0,003	0,005	0,008	0,01	0,015
12	0,001	0,002	0,002	0,004	0,008
13	-0,004	-0,02	-0,045	-0,055	-0,067
21	0	-0,001	-0,003	-0,009	-0,008
22	0,02	0,029	0,029	0,03	0,032
23	-0,005	-0,009	-0,017	-0,017	-0,022
31	0,02	0,016	0,016	0,008	0,009
32	0,003	0,004	0,005	0,005	0,007
33	0,005	0,019	0,025	0,033	0,032
Раскатка ребра №2					
11	0,018	0,024	0,033	0,045	0,035
12	0,012	0,016	0,025	0,031	0,026
13	-0,061	-0,054	-0,048	-0,06	-0,061
21	-0,01	-0,017	-0,018	-0,028	-0,029
22	0,034	0,036	0,038	0,04	0,045
23	-0,023	-0,027	-0,031	-0,033	-0,039

Продолжение таблицы 3.11

31	0,001	-0,015	-0,036	-0,075	-0,06
32	0,006	0,005	0,008	0,003	0,015
33	0,028	0,015	0,007	0,019	0,005
Раскатка ребра № 3					
11	0,024	0,032	0,03	0,029	0,034
12	0,015	0,025	0,017	0,012	0,018
13	-0,07	-0,056	-0,056	-0,055	-0,043
21	-0,028	-0,026	-0,025	-0,024	-0,021
22	0,044	0,047	0,04	0,046	0,047
23	-0,042	-0,037	-0,05	-0,034	-0,028
31	-0,048	-0,055	-0,05	-0,044	-0,048
32	0,028	0,02	0,025	0,031	0,018
33	0,007	0,006	0,011	0,015	0,007
Раскатка ребра № 4					
11	0,034	0,032	0,025	0,029	0,039
12	0,016	0,015	0,003	0,007	0,016
13	-0,037	-0,036	-0,058	-0,058	-0,045
21	-0,021	-0,025	-0,016	-0,015	-0,014
22	0,045	0,044	0,044	0,041	0,031
23	-0,026	-0,024	-0,032	-0,024	-0,019
31	-0,042	-0,04	-0,029	-0,032	-0,038
32	0,02	0,022	0,027	0,026	0,019
33	0,012	0,016	0,016	0,027	0,026
Раскатка верхней части полотна					
11	0,021	0,027	0,026	0,022	0,003
12	0,024	0,031	0,04	0,035	0,031
13	-0,015	-0,012	-0,017	-0,009	0
21	-0,029	-0,025	-0,015	0,044	-0,012
22	0,05	0,055	0,054	0,057	0,061
23	0,034	0,036	0,019	0,031	0,015
31	-0,043	-0,045	-0,021	0,315	0,008
32	0,025	0,021	0,032	0,239	0,038
33	0,036	0,033	0,031	0,097	0,019
Раскатка нижней части полотна					
11	-0,02	-0,03	-0,04	-0,06	-0,07
12	0,02	0,03	0,02	0	0,01
13	0,01	-0,02	0,03	0,01	0,03
21	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
22	0	0	0	0,01	0,01
23	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03
31	0,05	0,09	0,09	0,08	0,11
32	0,03	0,02	0,02	0,03	-0,01
33	0,04	-0,02	0,01	0,05	0,03
КПО №2					
Раскатка ребра № 1					
11	-0,012	-0,014	-0,015	-0,015	-0,016
12	-0,005	-0,013	-0,013	-0,018	-0,026

Продолжение таблицы 3.11

13	0,006	0,01	0,02	0,04	0,056
21	0,001	0,004	0,007	0,01	0,016
22	0	-0,001	0,001	-0,001	-0,004
23	0,002	0,004	0,006	0,016	0,023
31	0,004	0,007	0,01	0,014	0,02
32	0,007	0,01	0,012	0,014	0,017
33	0,004	0,006	0,007	0,01	0,013
Раскатка ребра № 2					
11	-0,01	-0,015	-0,013	-0,012	-0,01
12	-0,024	-0,027	-0,03	-0,03	-0,03
13	0,065	0,059	0,063	0,06	0,051
21	0,019	0,02	0,026	0,03	0,034
22	-0,003	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004
23	0,025	0,031	0,034	0,037	0,041
31	0,017	0,024	0,03	0,037	0,043
32	0,018	0,014	0,015	0,011	0,007
33	0,017	0,027	0,033	0,039	0,045
Раскатка ребра № 3					
11	-0,011	-0,009	-0,008	-0,004	-0,004
12	-0,031	-0,029	-0,029	-0,028	-0,026
13	0,055	0,054	0,051	0,055	0,048
21	0,032	0,031	0,03	-0,01	0,022
22	-0,004	-0,004	-0,002	-0,004	-0,001
23	0,042	0,041	0,04	0,06	0,033
31	0,044	0,038	0,034	0,035	0,016
32	0,012	0,01	0,01	0,005	0,017
33	0,039	0,039	0,039	0,03	0,031
Раскатка верхней части полотна					
11	-0,007	-0,014	-0,016	-0,02	-0,024
12	-0,013	-0,013	-0,014	-0,007	0,001
13	0,069	0,062	0,054	0,046	0,041
21	0,006	0,004	-0,003	-0,008	-0,019
22	0,007	0,008	0,009	0,014	0,016
23	0,07	0,065	0,058	0,057	0,054
31	-0,004	0	-0,009	-0,012	-0,027
32	0,02	0,021	0,019	0,018	0,015
33	0,028	0,025	0,028	0,029	0,031
КПО №3					
Раскатка ребра № 1					
11	0,016	0,035	0,062	0,097	0,114
12	0	-0,001	-0,009	-0,016	-0,031
13	0,01	0,013	0,034	0,075	0,108
21	0,003	0,008	0,021	0,036	0,053
22	0	-0,001	-0,005	-0,008	-0,012
23	0,005	0,009	0,025	0,046	0,063
31	0,003	-0,001	0,005	0,002	0,015
32	0,003	0	-0,001	-0,002	-0,001
33	0,002	0,003	0,002	0,012	0,014

Продолжение таблицы 3.11

Раскатка ребра № 2					
11	0,139	0,125	0,128	0,088	0,136
12	-0,049	-0,027	-0,024	-0,006	-0,022
13	0,128	0,106	0,1	0,047	0,11
21	0,087	0,064	0,069	0,068	0,092
22	-0,021	-0,014	-0,017	-0,023	-0,019
23	0,059	0,071	0,072	0,08	0,088
31	0,077	0,022	0,025	0,073	0,038
32	0,032	-0,009	-0,011	-0,044	-0,017
33	0	0,037	0,044	0,099	0,072
Раскатка верхней части полотна					
11	0,146	0,132	0,101	0,093	0,04
12	-0,002	0,004	0,009	0,013	0,032
13	0,101	0,101	0,11	0,111	0,093
21	0,084	0,087	0,058	0,06	0,057
22	-0,011	-0,014	-0,005	0,002	0
23	0,081	0,083	0,082	0,076	0,06
31	0,007	0,017	0,003	0,019	0,043
32	-0,03	-0,029	-0,029	-0,024	-0,017
33	0,073	0,075	0,076	0,062	0,066
Раскатка нижней части полотна					
11	0	0	0,02	-0,02	0,01
12	0,01	0,02	0,047	0,01	0,05
13	0,07	0,08	0,1	0,07	0,13
21	0,05	0,04	0,06	0,05	0,07
22	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
23	0,05	0,07	0,03	0,06	0,05
31	0,05	0,02	0,05	0,08	0,12
32	0	-0,01	-0,07	-0,02	-0,09
33	0,01	0,04	-0,06	0,03	-0,07
КПО №4					
Раскатка ребра № 1					
11	0,006	-0,002	0,098	0,118	0,123
12	-0,002	-0,007	-0,024	-0,058	-0,065
13	0,005	0,018	0,06	0,143	0,155
21	0,004	0,021	0,051	0,083	0,091
22	-3,999	-0,009	-0,012	-0,016	-0,018
23	0,005	0,007	0,046	0,079	0,085
31	0,006	0,028	0,01	0,047	0,054
32	0,005	-0,009	-0,004	0,005	0,008
33	0,003	0,028	0,014	0,015	0,016
Раскатка ребра № 2					
11	0,103	0,13	0,135	0,14	0,078
12	-0,047	-0,063	-0,062	-0,06	-0,017
13	0,13	0,153	0,155	0,156	0,089
21	0,066	0,097	0,102	0,113	0,068
22	-0,009	-0,019	-0,022	-0,026	-0,027
23	0,089	0,093	0,099	0,111	0,105

Продолжение таблицы 3.11

31	0	0,056	0,061	1,078	0,125
32	-0,022	0,003	-0,003	-0,009	-0,058
33	0,05	0,039	0,051	0,076	0,148
Раскатка верхней части полотна					
11	0,149	0,166	0,202	0,235	0,272
12	-0,034	-0,021	-0,007	-0,005	0,005
13	0,164	0,16	0,144	0,13	0,115
21	0,116	0,116	0,111	1,103	0,098
22	-0,028	-0,024	-0,022	-0,018	-0,02
23	0,109	0,114	0,105	0,107	0,1
31	0,052	0,053	0,038	0,024	0,011
32	-0,028	-0,024	-0,029	-0,027	-0,037
33	0,082	0,082	0,084	0,099	0,097
КПО №5					
Раскатка ребра № 1					
11	0,001	0,003	0,009	0,009	0,023
12	0,002	0,003	-2,996	0	0,004
13	-0,001	-0,001	0,001	-0,015	0,013
21	0,001	0,001	0,008	0,012	0,05
22	0	-0,001	-0,002	-0,009	-0,017
23	0,001	0,004	0,01	0,004	0,062
31	0,001	0,002	0,007	0,012	0,028
32	0,001	-0,003	-0,011	0,274	0,249
33	0,003	0,009	0,021	0,028	0,112
Раскатка ребра № 2					
11	0,028	0,035	0,065	0,08	0,091
12	0,006	0,008	-0,005	0,004	-0,005
13	0,016	0,019	0,026	0,039	0,058
21	0,052	0,054	0,066	0,073	0,081
22	-0,015	-0,017	-0,025	-0,023	-0,025
23	0,065	0,067	0,071	0,087	0,098
31	0,031	0,028	0,026	0,025	0,031
32	-0,049	-0,05	-0,057	-0,053	-0,05
33	0,114	0,114	0,12	0,123	0,129
Раскатка верхней части полотна					
11	0,097	0,087	0,075	0,041	0,014
12	-0,006	-0,003	-0,026	-0,01	-0,031
13	0,059	0,052	0,048	0,032	0,02
21	0,08	0,078	0,074	0,075	0,064
22	-0,026	-0,026	-0,036	-0,018	-0,024
23	0,094	0,091	0,088	0,08	0,062
31	0,029	0,029	0,03	0,056	0,061
32	-0,064	-0,063	-0,078	-0,051	-0,058
33	0,13	0,131	0,13	0,124	0,121
КПО №6					
Раскатка ребра № 1					
11	0,003	0,003	0,007	-0,129	0,009
12	0,001	0,002	0,004	0,005	0

Продолжение таблицы 3.11

13	0,004	0,004	0	0,012	0,012
21	0,001	0,003	0,004	0,017	0,021
22	-0,002	-0,002	-0,002	-0,007	-0,011
23	0,004	0,008	0,009	0,034	0,047
31	0,001	0,002	0,002	0,023	-0,006
32	-0,004	-0,004	-0,011	-0,026	-0,033
33	0,006	0,011	0,019	0,065	0,087
Раскатка ребра № 2					
11	0,015	0,027	0,04	0,059	0,063
12	0,002	0,007	0,007	0,005	0,01
13	0,013	0,015	0,02	0,029	0,031
21	0,023	0,026	0,031	0,04	0,043
22	-0,01	-0,012	-0,015	-0,018	-0,019
23	0,048	0,051	0,056	0,064	0,072
31	-0,006	-0,007	-0,01	-0,012	-0,013
32	-0,034	-0,038	-0,039	-0,038	-0,038
33	0,088	0,087	0,089	0,094	0,095
Раскатка верхней части полотна					
11	0,067	0,107	0,15	0,213	0,301
12	-0,006	0,026	0,05	0,082	0,124
13	0,034	0,039	0,034	0,036	0,03
21	0,047	0,048	0,048	0,05	0,05
22	-0,02	-0,021	-0,021	-0,018	-0,015
23	0,067	0,068	0,068	0,063	0,045
31	-0,007	-0,012	-0,024	-0,01	0,018
32	-0,04	-0,044	-0,049	-0,047	-0,035
33	0,095	0,098	0,101	0,095	0,083

На основании измеренных значений перемещений контрольных точек КПО вычисляли стрелы прогибов f_y (в плоскости YOZ) и f_x (в плоскости XOZ) и угол закручивания крайних сечений друг относительно друга.

Схема к определению прогиба f_x (в плоскости XOZ) в продольном сечении $Y_2 - Y_2$ показана на рисунке 3.28.

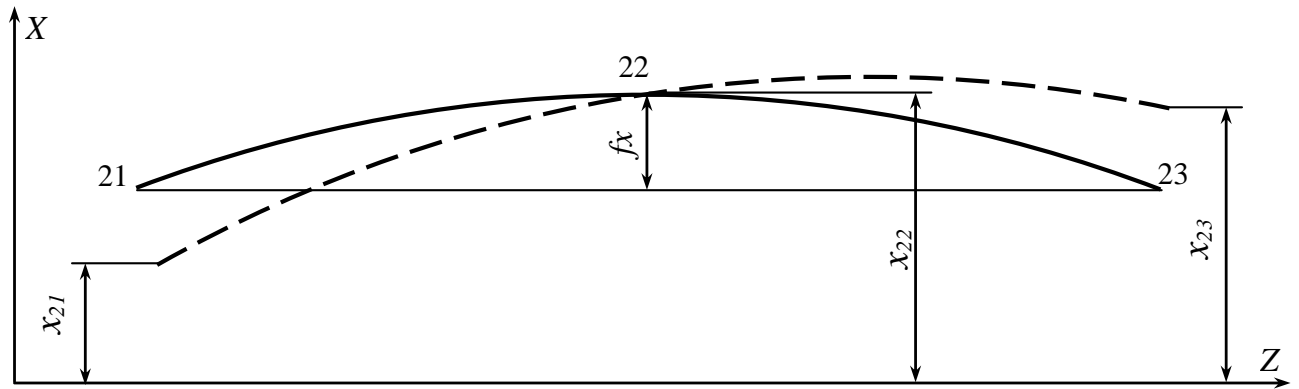


Рисунок 3.28 - Схема к определению прогиба сечения

Из рисунка 3.28 следуют формула определения стрелы прогиба f_x :

$$f_x = x_{22} - (x_{21} + x_{23}) / 2 \quad (3.2)$$

Схема к определению угла θ между хордами сечений $Y_1 - Y_1$ и $Y_3 - Y_3$ показана на рисунке 3.29.

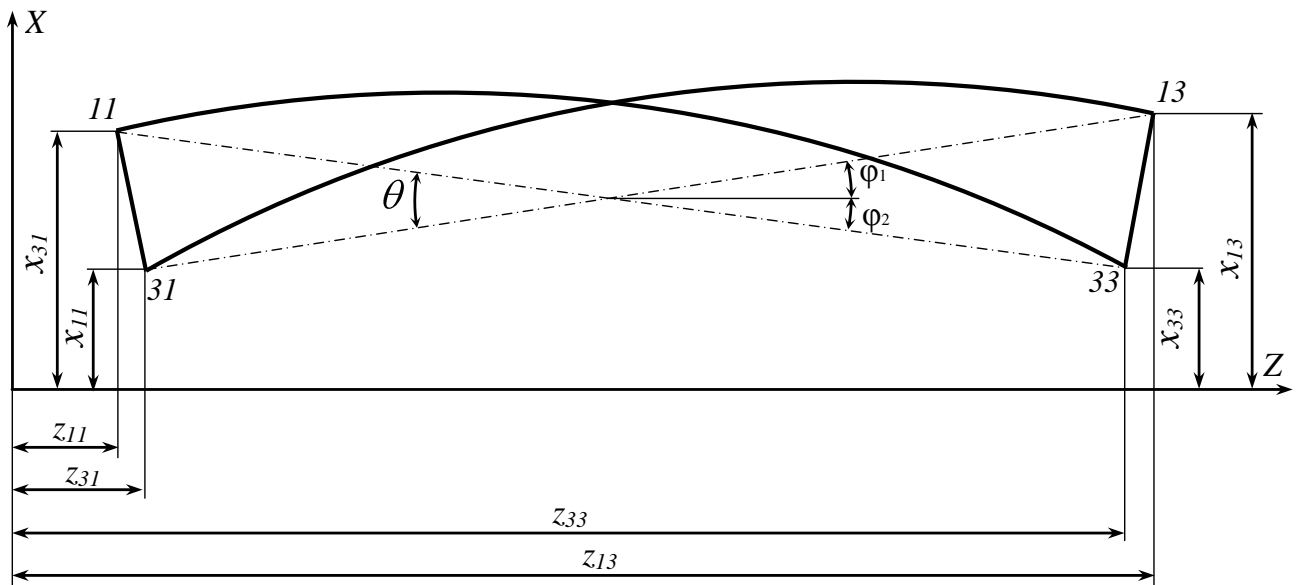


Рисунок 3.29 - Схема к определению угла между хордами сечений

Как следует из рисунка 3.29

$$\theta = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (3.3)$$

при этом

$$\varphi_1 = \arctg \frac{x_{33} - x_{11}}{\sqrt{(z_{33} - z_{11})^2 + (y_{11} - y_{33})^2}}; \quad (3.4)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{x_{13} - x_{31}}{\sqrt{(z_{13} - z_{31})^2 + (y_{13} - y_{31})^2}}. \quad (3.5)$$

Из схемы измерений, показанной на рисунке 3.25 видно, что

$$z_{33} - z_{11} = z_{13} - z_{31} \text{ и } y_{11} - y_{33} = y_{13} - y_{31}.$$

Таким образом, были получены формулы для определения единичного угла закручивания сечений КПО:

$$\theta_{\text{единич}} = \theta / l = \frac{\arctg[|x_{33} - x_{11}| / a] + \arctg[|x_{13} - x_{31}| / a]}{l}; \quad (3.6)$$

где $a = \sqrt{(z_{13} - z_{31})^2 + (y_{13} - y_{31})^2}$.

Полученные выражения для расчета стрел прогибов (3.2) и единичного угла закручивания поперечных сечений (3.6) необходимо использовать для определения экспериментальных зависимостей деформаций КПО от момента затяжки силового болта раскатника при сравнительном анализе с расчетными зависимостями.

3.3 Расчет деформаций конструктивно-подобных образцов, образованных при обработке раскаткой роликами

Используя методику, приведенную в п 2.3, произведем расчет деформаций КПО, возникающих в процессе правки деталей типа балок раскаткой роликами. При расчете будем использовать последовательность обработки ребер и полотна КПО, применяемую в ходе проведения экспериментальных исследований.

3.3.1 Определение значений прогибов конструктивно-подобных образцов

Для вычисления осевых моментов инерции комплексных сечений КПО разобьём их на прямоугольные и треугольные (прямоугольные) элементы и поместим в систему координат XO_2Y , совместив ее с центром тяжести поперечного сечения срединного элемента (полотна) КПО O_n как имеющего наибольшую площадь (см. рисунок 3.30).

Примечание: при определении осевых моментов необходимо учитывать, что размеры поперечных сечений КПО №1, 2, 3, 5 по длине остаются неизменными, а размеры поперечных сечений КПО №4, 6 рассчитываются в плоскости стрелы прогиба.

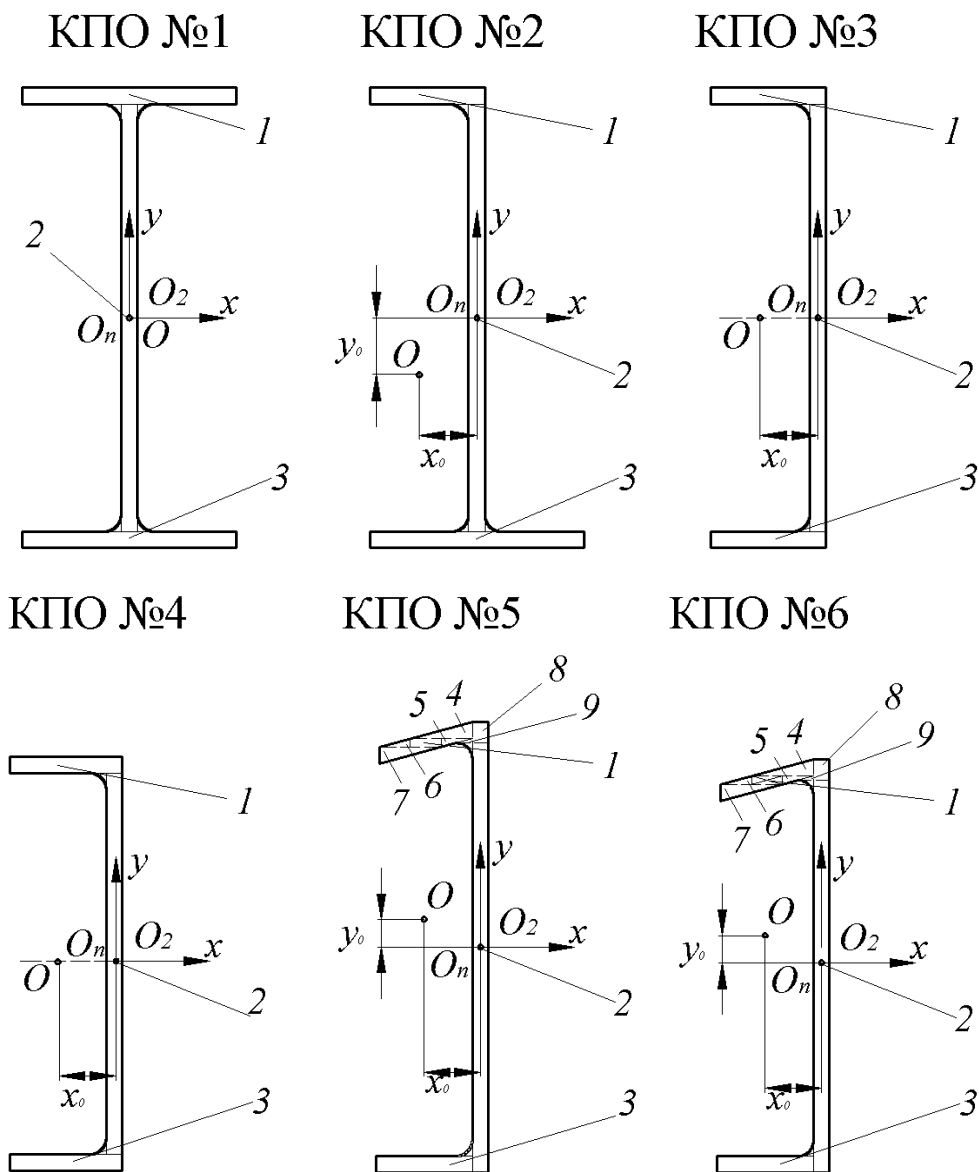


Рисунок 3.30 – Расчетные схемы к определению центров тяжести поперечных сечений КПО

Определим координаты x_0 , y_0 центров тяжести сечений КПО по отношению к выбранным осям, используя зависимости (2.1), и осевые моменты J_x , J_y инерции комплексного сечения, используя зависимости (2.2). Результаты расчета центров тяжести и осевых моментов инерции для КПО приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12

№ КПО	$x_0, м$	$y_0, м$	$J_x, м^4$	$J_y, м^4$
1	0	0	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$19,46 \cdot 10^{-6}$
2	-0,002	-0,009	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$14,63 \cdot 10^{-6}$
3	-0,005	0	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$9,73 \cdot 10^{-6}$
4	-0,006	0	$9,79 \cdot 10^{-7}$	$8,19 \cdot 10^{-6}$
5	-0,005	-0,0008	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$9,03 \cdot 10^{-6}$
6	-0,005	-0,0004	$9,55 \cdot 10^{-7}$	$7,91 \cdot 10^{-6}$

Используя зависимости (2.11), определяем значения прогибов в плоскостях YOZ (саблевидности) и XOZ (отклонения от плоскостности) КПО (материал: В95пчТ2), образующихся при обработке раскаткой роликами.

Примечание: для определения прогибов в плоскости YOZ у КПО №4, 6 при обработке наклонного ребра плоскость действия растягивающей силы располагается под углом к плоскости, содержащую базу измерения и поэтому необходимо использовать проекцию этой силы.

Результаты расчета прогибов КПО при раскатке приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13

Прогиб	Момент затяжки, Нм				
	3	6	9	12	15
КПО №1					
Раскатка ребра № 1					
$f_y \cdot 10^{-3}, м$	0,001	0,003	0,010	0,029	0,051
$f_x \cdot 10^{-3}, м$	0,001	0,002	0,009	0,025	0,043
Раскатка ребра № 2					
$f_y \cdot 10^{-3}, м$	0,050	0,048	0,041	0,022	0,000
$f_x \cdot 10^{-3}, м$	0,045	0,046	0,052	0,068	0,087

Раскатка ребра № 3					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,003	0,010	0,029	0,051
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,086	0,084	0,078	0,062	0,043
Раскатка ребра № 4					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,050	0,048	0,041	0,022	0,000
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,042	0,041	0,035	0,019	0,000
Раскатка верхней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,002	0,008	0,023	0,040
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Раскатка нижней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,039	0,037	0,032	0,017	0,000
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
КПО №2					
Раскатка ребра № 1					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,002	0,004	0,015	0,044	0,077
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,002	0,008	0,024	0,041
Раскатка ребра № 2					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,075	0,073	0,065	0,043	0,018
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,042	0,044	0,050	0,065	0,083
Раскатка ребра № 3					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,016	0,014	0,006	-0,016	-0,041
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,081	0,080	0,073	0,055	0,034
Раскатка верхней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	-0,040	-0,038	-0,031	-0,011	0,011
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,034	0,034	0,033	0,032	0,030
Раскатка нижней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,010	0,008	0,001	-0,019	-0,041
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,030	0,030	0,029	0,028	0,026
КПО №3					
Раскатка ребра № 1					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,003	0,006	0,020	0,058	0,102
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,002	0,008	0,022	0,038
Раскатка ребра № 2					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,099	0,096	0,082	0,044	0,000
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,039	0,040	0,045	0,059	0,076
Раскатка верхней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,002	0,005	0,016	0,045	0,079
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,075	0,075	0,074	0,071	0,067

Раскатка нижней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,077	0,075	0,063	0,034	0,000
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,066	0,066	0,065	0,062	0,058
КПО №4					
Раскатка ребра № 1					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,003	0,006	0,021	0,059	0,103
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,003	0,009	0,027	0,047
Раскатка ребра № 2					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,100	0,097	0,082	0,042	-0,004
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,048	0,050	0,056	0,074	0,094
Раскатка верхней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	-0,002	0,001	0,011	0,039	0,070
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,094	0,093	0,092	0,087	0,082
Раскатка нижней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,068	0,066	0,055	0,028	-0,004
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,082	0,081	0,080	0,075	0,070
КПО №5					
Раскатка ребра № 1					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,003	0,006	0,022	0,063	0,111
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,002	0,008	0,022	0,039
Раскатка ребра № 2					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,108	0,105	0,089	0,049	0,003
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,040	0,041	0,047	0,061	0,078
Раскатка верхней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,005	0,008	0,020	0,052	0,089
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,077	0,077	0,076	0,072	0,069
Раскатка нижней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,087	0,084	0,072	0,041	0,005
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,068	0,068	0,067	0,064	0,060
КПО №6					
Раскатка ребра № 1					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,003	0,006	0,021	0,061	0,107
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,001	0,003	0,010	0,028	0,049
Раскатка ребра № 2					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,104	0,101	0,085	0,045	-0,002
$f_x \cdot 10^{-3}$, м	0,050	0,051	0,058	0,076	0,097
Раскатка верхней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}$, м	0,000	0,002	0,013	0,042	0,075

$f_x \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	0,097	0,096	0,095	0,090	0,085
Раскатка нижней части полотна					
$f_y \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	0,073	0,070	0,060	0,031	-0,001
$f_x \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	0,085	0,085	0,083	0,078	0,073

3.3.2 Определение значений закручивания конструктивно-подобных образцов

При определении центра кручения КПО первоначально задаемся точкой O' , совместив ее с началом координат главных осей. Начало отсчета A_1 совместим с центром тяжести элемента, имеющего наибольшую площадь (полотна КПО). Эпюры секториальных площадей ω' сечений КПО (с полюсом в точке O) показаны на рисунке 3.31.

Очевидно, что в поперечном сечении КПО №1 точки O_1 , O и A_0 совпадают, так как оно имеет две оси симметрии. Для сечений КПО №3 и №4, имеющих одну ось симметрии, точки O_1 , O и A_0 лежат на этой оси.

Для определения координат точки O_1 поперечных сечений КПО относительно главных осей используются зависимости (2.3). Результаты определения координат центра кручения приведены в таблице 3.14. Для нахождения положения начальной точки A_0 строится эпюра ω_1 при найденном центре кручения O_1 и произвольном начале отсчета A_1 . Эпюры секториальных площадей ω_1 сечений КПО (с полюсом в точке O_1) показаны на рисунке 3.32. Результаты расчета величины D для поперечных сечений КПО приведены в таблицы 3.14.

Эпюры секториальных площадей ω_1 сечений КПО №1, 3, 4 являются и эпюрами главных секториальных координат ω . Эпюры главных секториальных координат ω сечений КПО №2, 5, 6 показаны на рисунке 3.33.

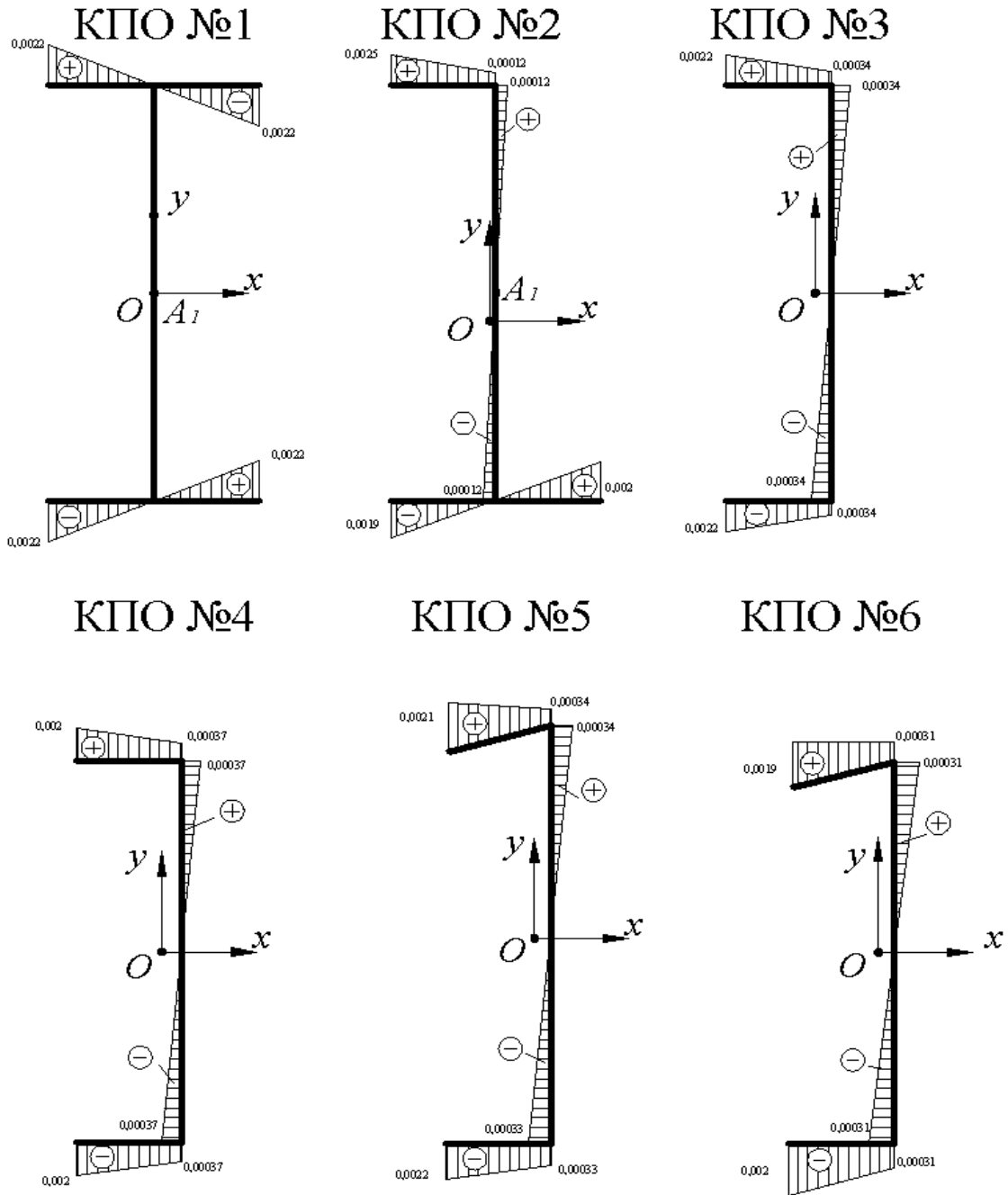


Рисунок 3.31 – Эпюры секториальных площадей ω' КПО (с полюсом в точке O)

Таблица 3.14

№ КПО	Координаты центра кручения		D, m^2
	e_x, m	e_y, m	
1	0	0	0
2	0,00876	0,02446	0,000231
3	0,01472	0	0
4	0,01479	0	0
5	0,01469	0,00192	0,00011
6	0,01477	0,00193	0,00033

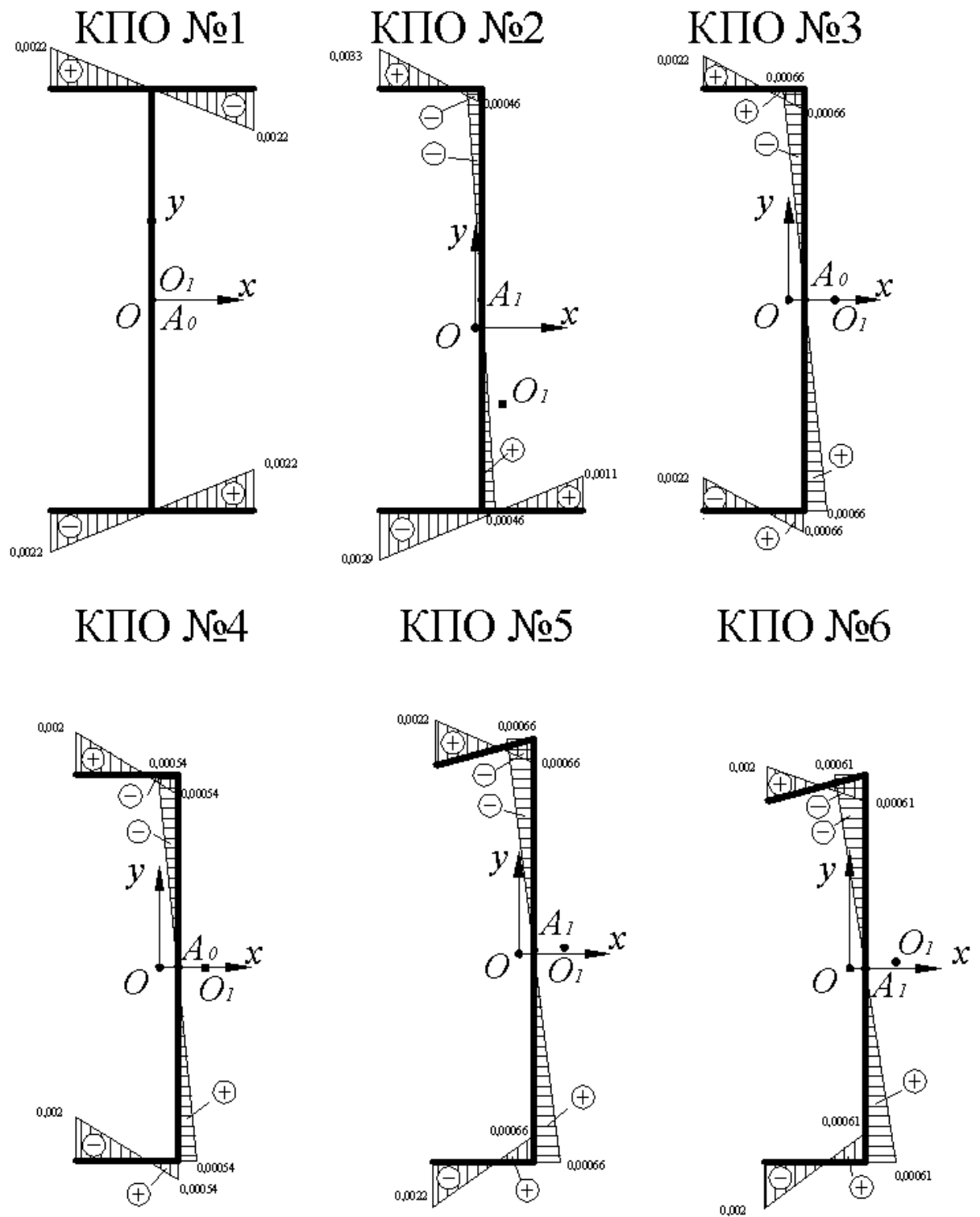


Рисунок 3.32 - Эпюры секториальных площадей ω_1 сечений КПО (с полюсом в точке O_1)

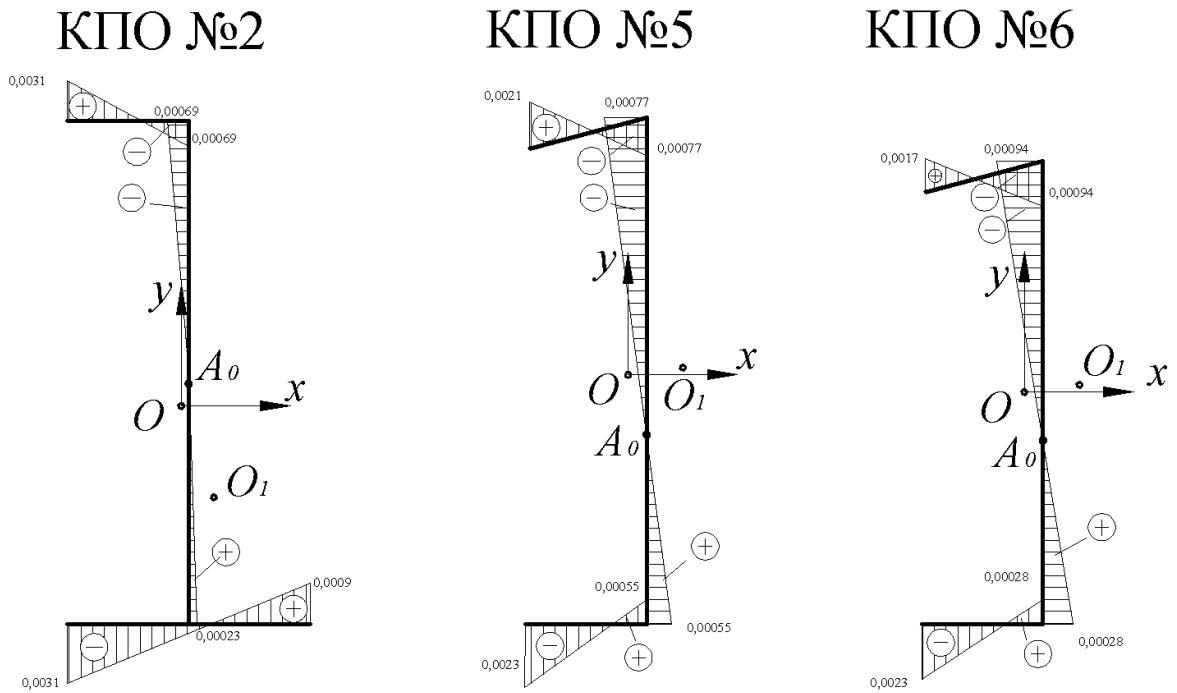


Рисунок 3.33 – Эпюры главных секториальных координат ω сечений КПО №2, 5, 6

Используя зависимости (2.6) и (2.7), определяем секториальный момент инерции J_ω и момент кручения J_d для поперечных сечений КПО. Результаты расчета секториального момента инерции J_ω и момента кручения J_d приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15

№ КПО	Секториальный момент инерции $J_\omega, м^6$	Момент кручения $J_d, м^4$
1	$1039,51 \cdot 10^{-12}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$
2	$523,82 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$
3	$294,214 \cdot 10^{-12}$	$0,89 \cdot 10^{-8}$
4	$287,18 \cdot 10^{-12}$	$0,88 \cdot 10^{-8}$
5	$306,465 \cdot 10^{-12}$	$0,88 \cdot 10^{-8}$
6	$299,31 \cdot 10^{-12}$	$0,88 \cdot 10^{-8}$

Используя выражение (2.19), определяем угол закручивания поперечных сечений КПО (материал: В95пчГ2) при обработке их раскаткой роликами.

Результаты расчета единичного угла закручивания КПО при раскатке приведены в таблице 3.16.

Таблица 3.16

Единич. угол закручивания	Момент затяжки, Нм				
	3	6	9	12	15
КПО №1					
Раскатка ребра № 1					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	1,222346	2,444692	8,549356	24,41866	42,73265
Раскатка ребра № 2					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	41,5103	40,28796	34,18329	18,31399	0
Раскатка ребра № 3					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	-1,22235	-2,44469	-8,54936	-24,4187	-42,7326
Раскатка ребра № 4					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	-41,5103	-40,288	-34,1833	-18,314	0
Раскатка полотна					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	0	0	0	0	0
КПО №2					
Раскатка ребра № 1					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	7,153802	14,3076	50,03526	142,9106	250,0936
Раскатка ребра № 2					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	242,9398	235,786	200,0583	107,183	0
Раскатка ребра № 3					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	2,07691	4,15382	14,52637	41,49018	72,60782
Раскатка полотна					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	66,24599	53,52234	43,97959	24,89411	12,17045
КПО №3					
Раскатка ребра № 1					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	6,56465	13,1293	45,9146	131,1412	229,4971
Раскатка ребра № 2					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	222,9325	216,3678	183,5825	98,35591	0
Раскатка полотна					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	5,435052	16,30516	24,45773	40,76289	51,63299
КПО №4					
Раскатка ребра № 1					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	4,223715	8,44743	29,54159	84,37664	147,6591
Раскатка ребра № 2					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	143,4354	139,2117	118,1175	63,28248	0
Раскатка полотна					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	-4,55634	-13,669	-20,5035	-34,1725	-43,2852
КПО №5					
Раскатка ребра № 1					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	4,153319	8,306639	29,04923	82,97036	145,1981
Раскатка ребра № 2					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	140,6493	136,1004	113,3823	54,32583	-13,8284
Раскатка полотна					

$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	-19,9129	-32,0819	-41,2086	-59,4621	-71,6311
КПО №6					
Раскатка ребра № 1					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	3,443324	6,886647	24,08336	68,78686	120,377
Раскатка ребра № 2					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	115,7184	111,0598	87,79363	27,31243	-42,486
Раскатка верхней части полотна					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	115,7184	111,0598	87,79363	27,31243	-42,486
Раскатка нижней части полотна					
$\theta \cdot 10^{-6}$, град/мм	-50,093	-65,3071	-76,7176	-99,5386	-114,753

3.4 Сравнительный анализ деформаций конструктивно-подобных образцов при раскатке роликами, полученных экспериментальным и расчетным методами

Графики изменения рассчитанных и экспериментальных стрел прогибов f_y и f_x КПО приведены на рисунках 3.34 – 3.39, единичного угла закручивания поперечных сечений - на рисунках 3.40 – 3.45.

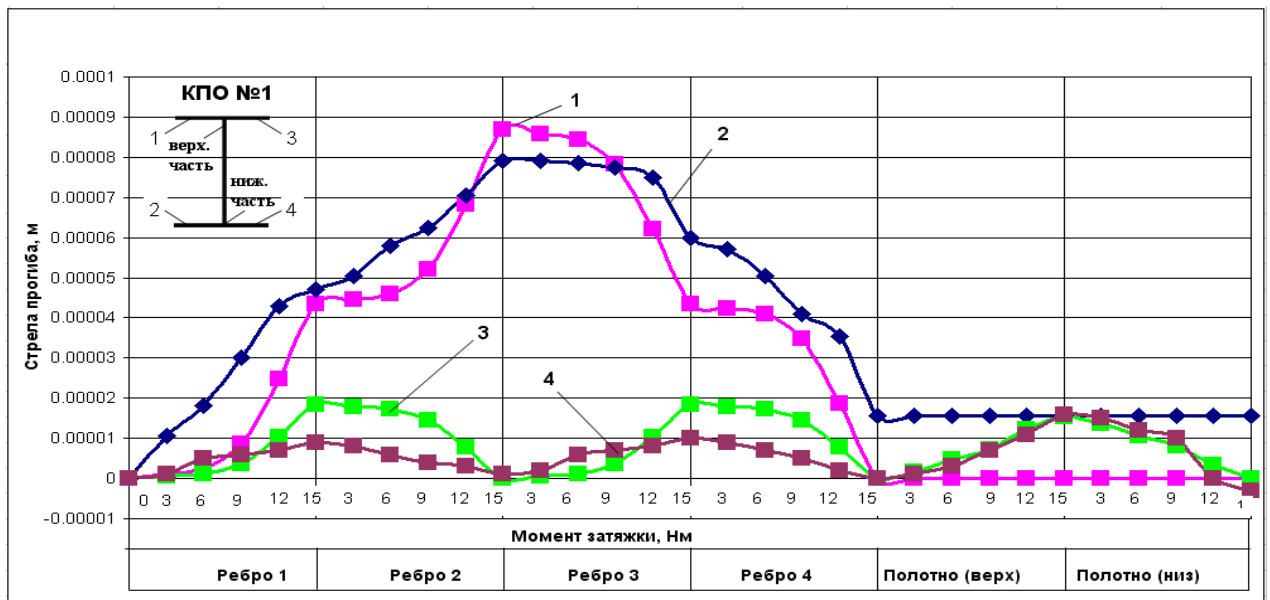


Рисунок 3.34 - Зависимость изменения двухосного прогиба КПО №1 от момента затяжки силового болта: 1 – рассчитанной стрелы прогиба f_x , 2 – экспериментальной

стрелы прогиба f_x , 3 - рассчитанной стрелы прогиба f_y , 4 – экспериментальной стрелы прогиба f_y

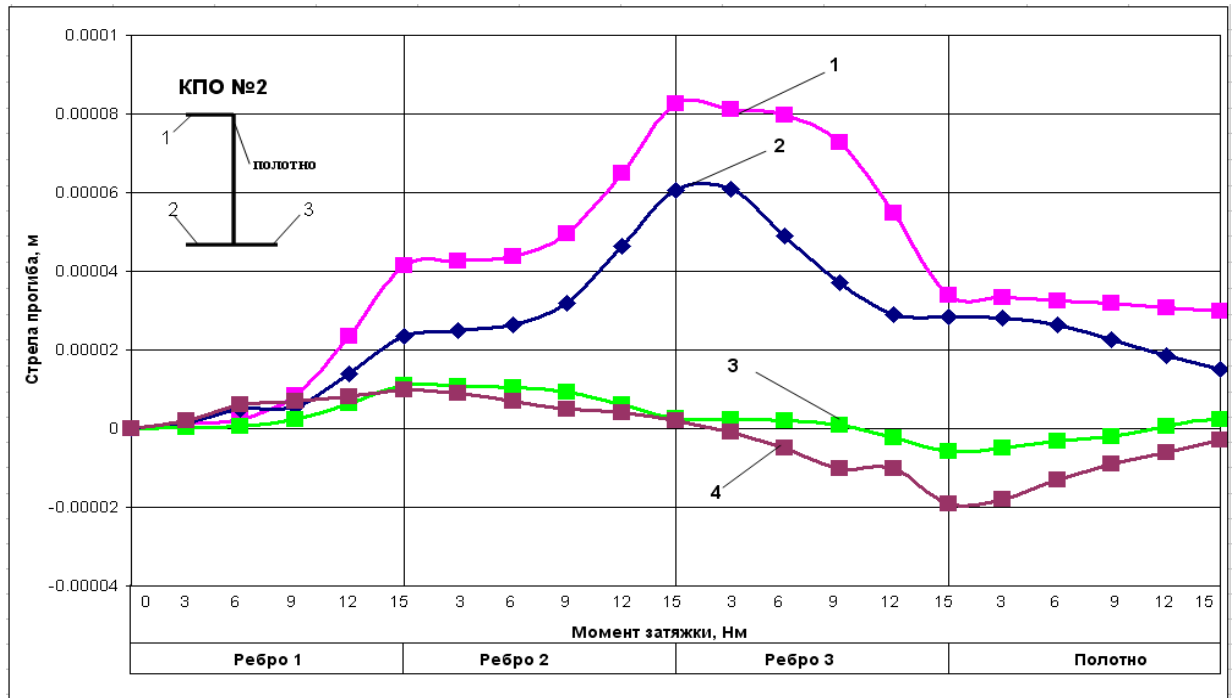


Рисунок 3.35 - Зависимость изменения двухосного прогиба КПО №2 от момента затяжки силового болта: 1 – рассчитанной стрелы прогиба f_x , 2 – экспериментальной стрелы прогиба f_x , 3 - рассчитанной стрелы прогиба f_y , 4 – экспериментальной стрелы прогиба f_y

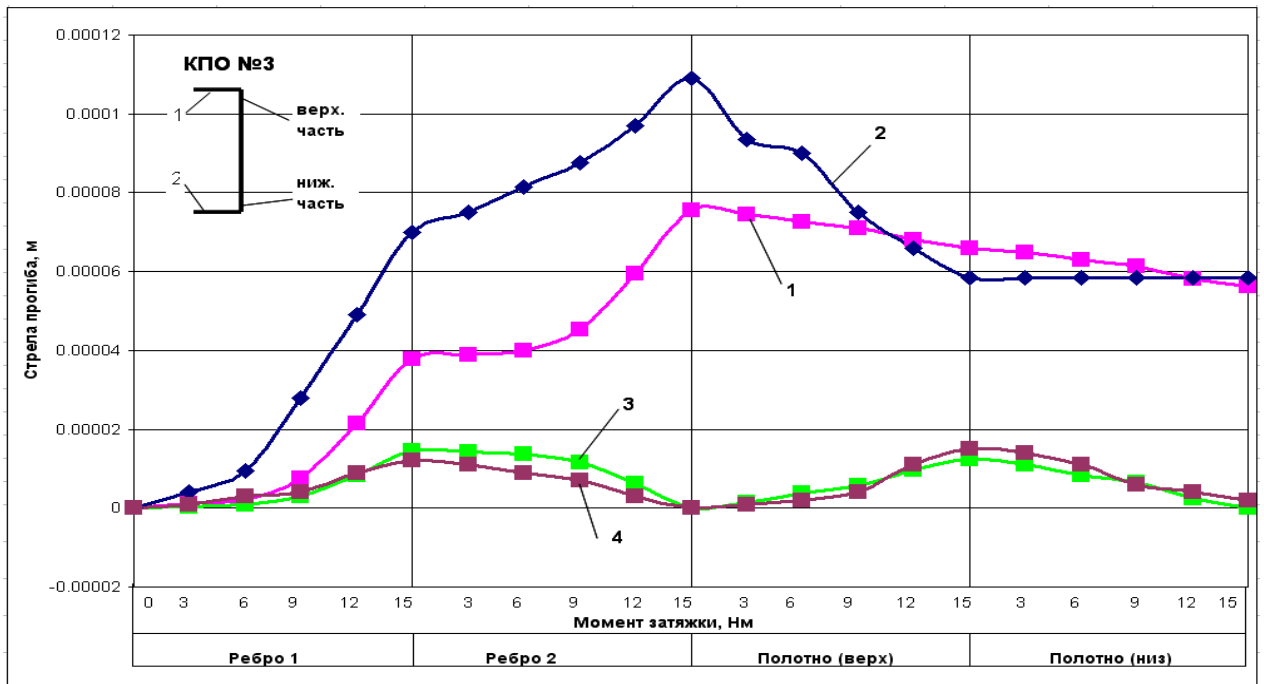


Рисунок 3.36 - Зависимость изменения двухосного прогиба КПО №3 от момента затяжки силового болта: 1 – рассчитанной стрелы прогиба f_x , 2 – экспериментальной

стрелы прогиба f_x , 3 - рассчитанной стрелы прогиба f_y , 4 – экспериментальной стрелы прогиба f_y

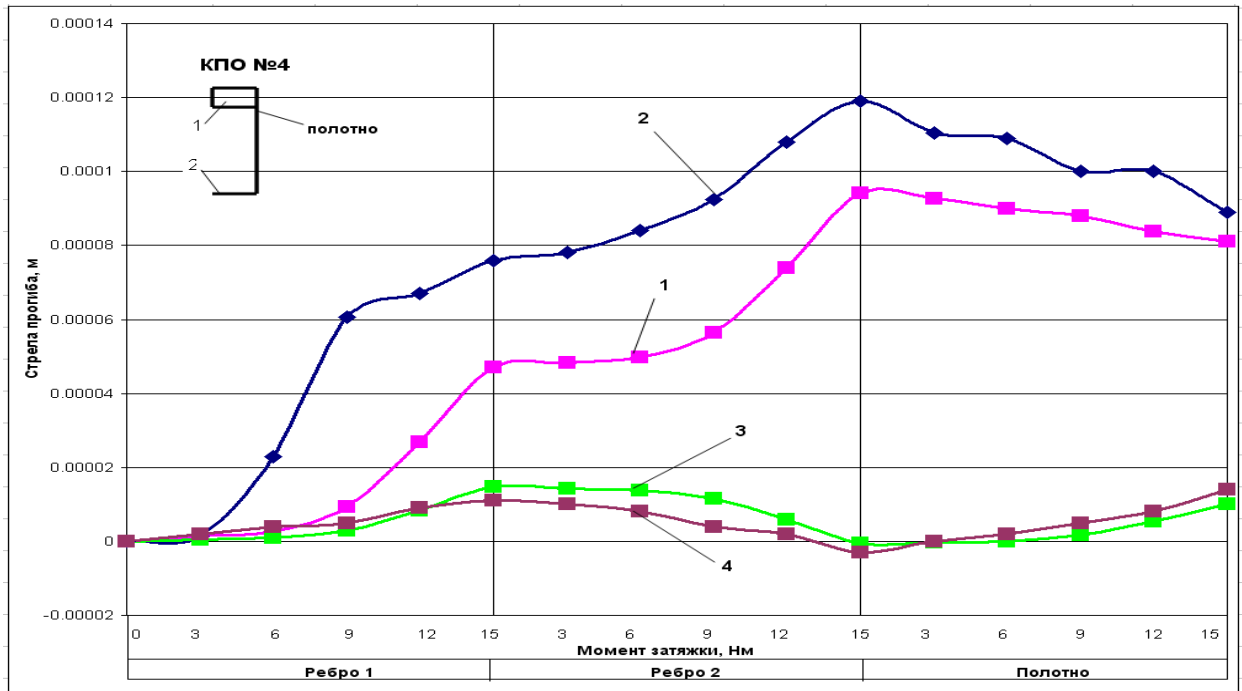


Рисунок 3.37 - Зависимость изменения двухосного прогиба КПО №4 от момента затяжки силового болта: 1 – рассчитанной стрелы прогиба f_x , 2 – экспериментальной стрелы прогиба f_x , 3 - рассчитанной стрелы прогиба f_y , 4 – экспериментальной стрелы прогиба f_y

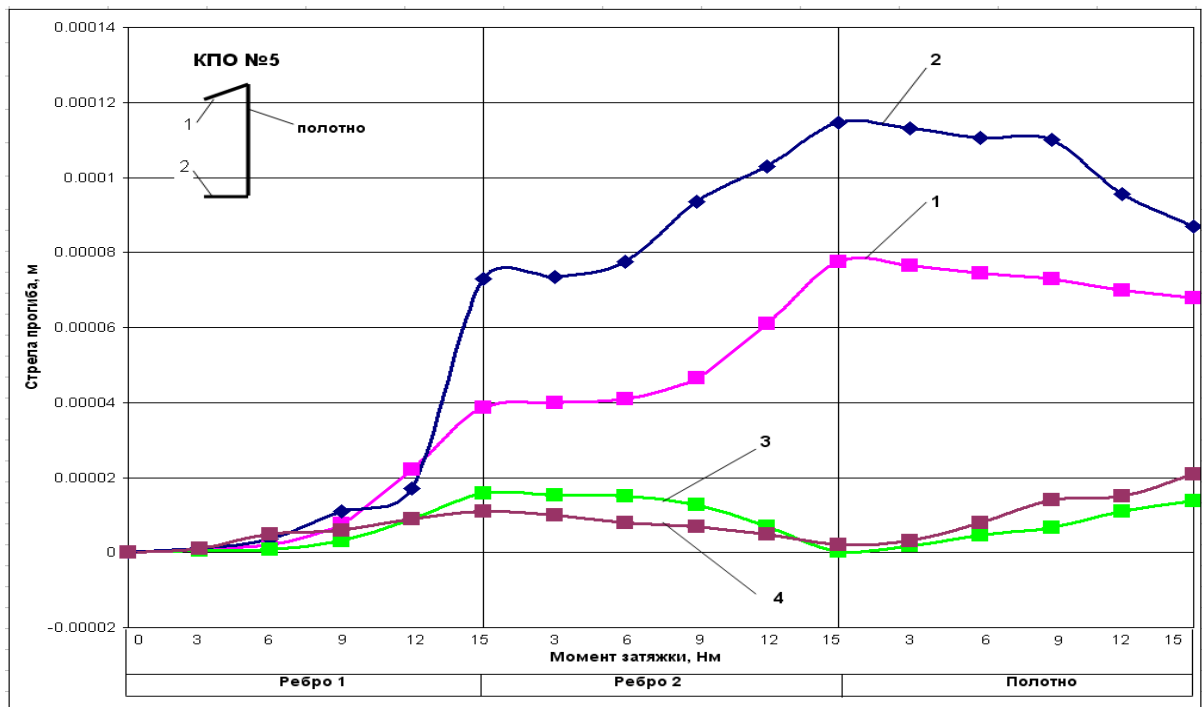


Рисунок 3.38 - Зависимость изменения двухосного прогиба КПО №5 от момента затяжки силового болта: 1 – рассчитанной стрелы прогиба f_x , 2 – экспериментальной

стрелы прогиба f_x , 3 - рассчитанной стрелы прогиба f_y , 4 – экспериментальной стрелы прогиба f_y

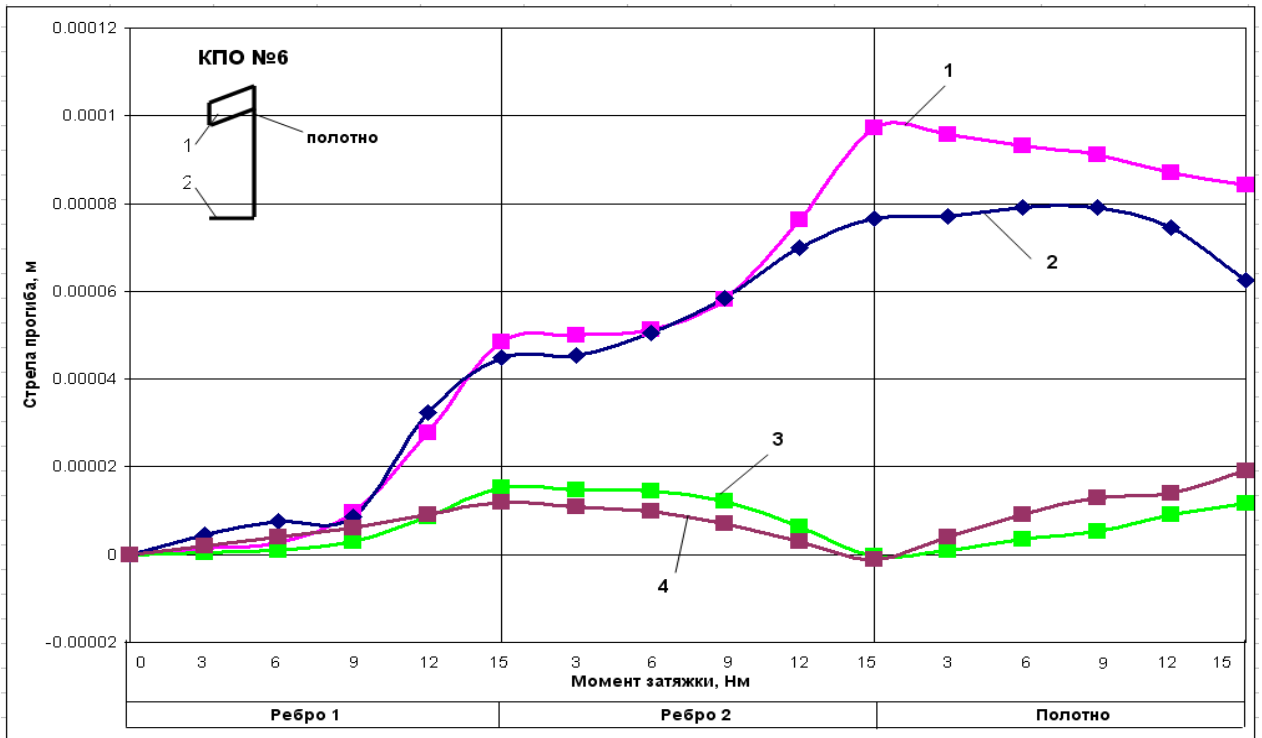


Рисунок 3.39 - Зависимость изменения двухосного прогиба КПО №6 от момента затяжки силового болта: 1 – рассчитанной стрелы прогиба f_x , 2 – экспериментальной стрелы прогиба f_x , 3 - рассчитанной стрелы прогиба f_y , 4 – экспериментальной стрелы прогиба f_y

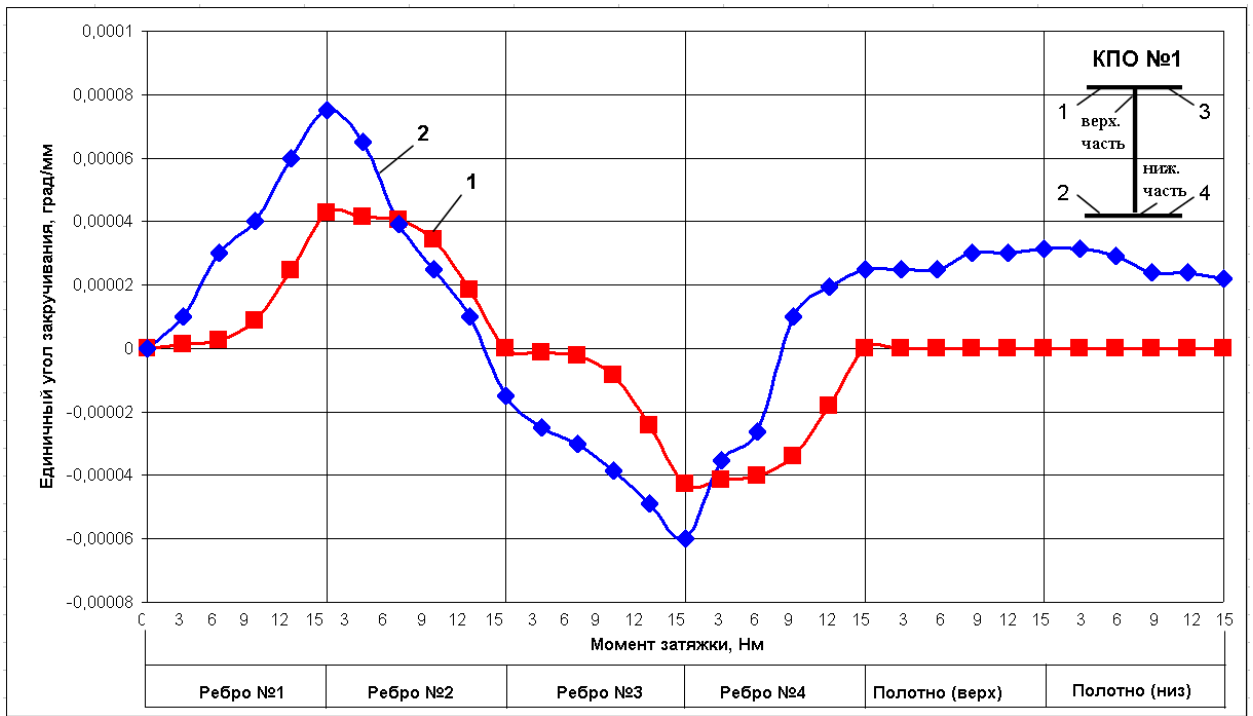


Рисунок 3.40 - Зависимость изменения рассчитанного (1) и экспериментального (2) единичного угла закручивания КПО №1 от момента затяжки силового болта

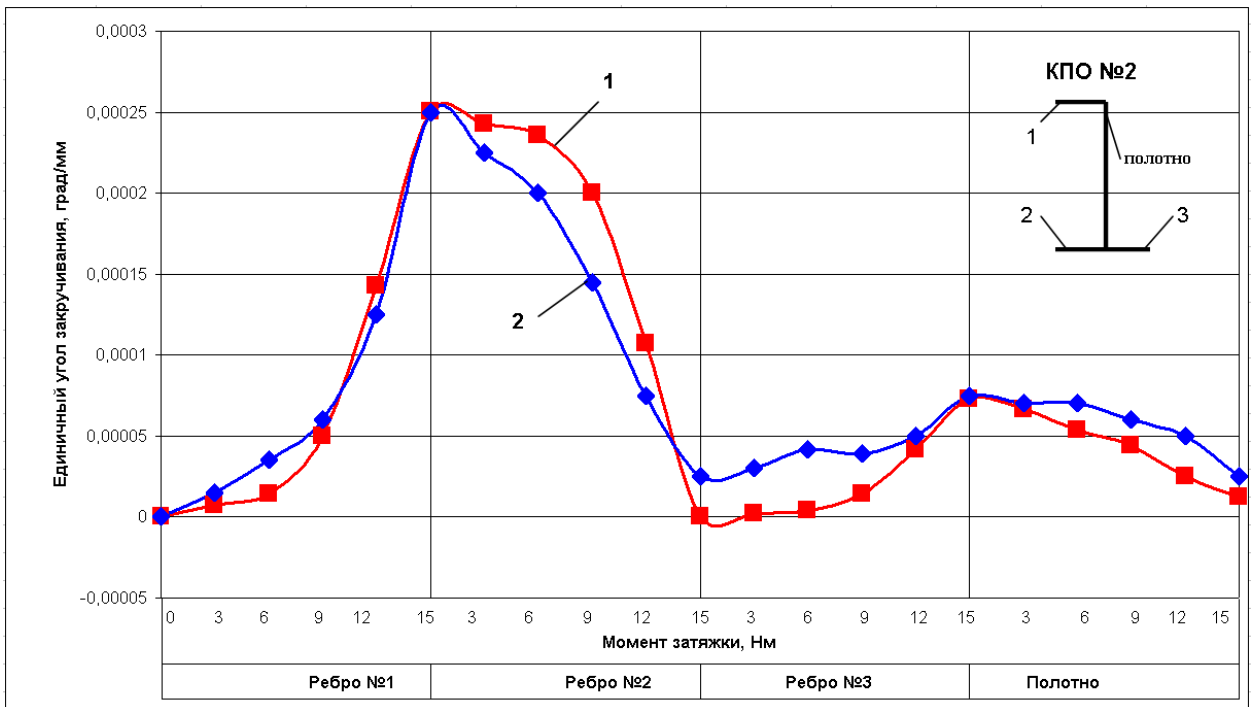


Рисунок 3.41 - Зависимость изменения рассчитанного (1) и экспериментального (2) единичного угла закручивания КПО №2 от момента затяжки силового болта

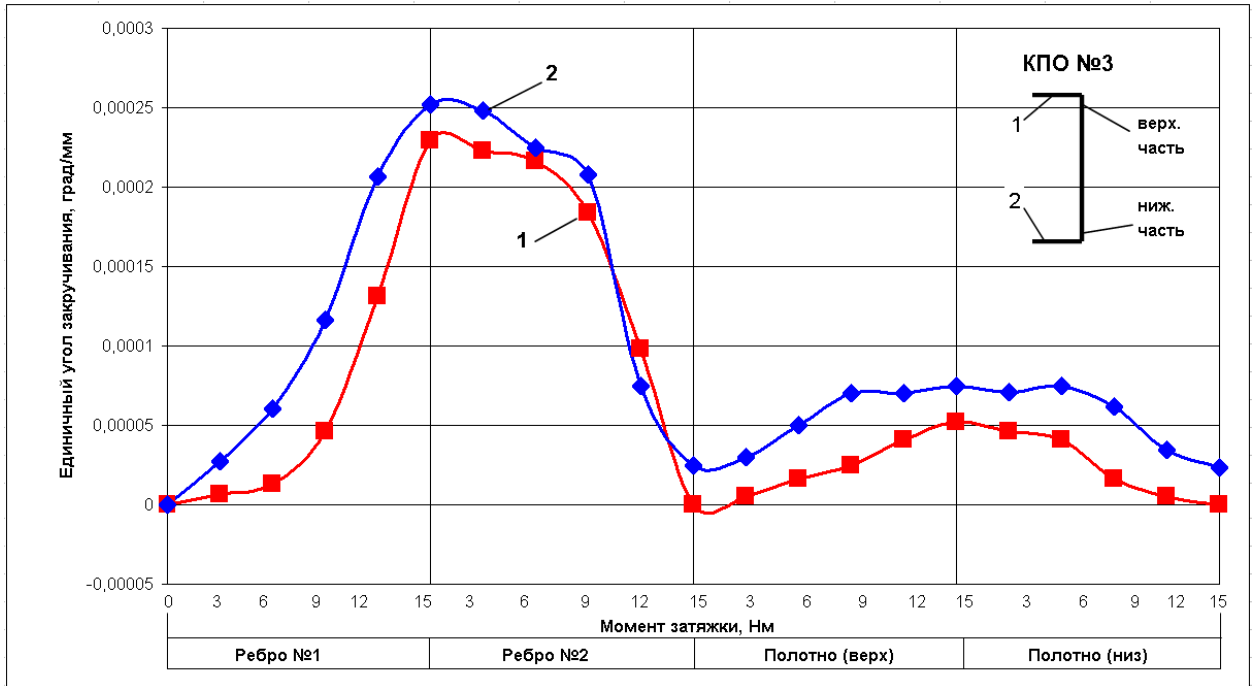


Рисунок 3.42 - Зависимость изменения рассчитанного (1) и экспериментального (2) единичного угла закручивания КПО №3 от момента затяжки силового болта

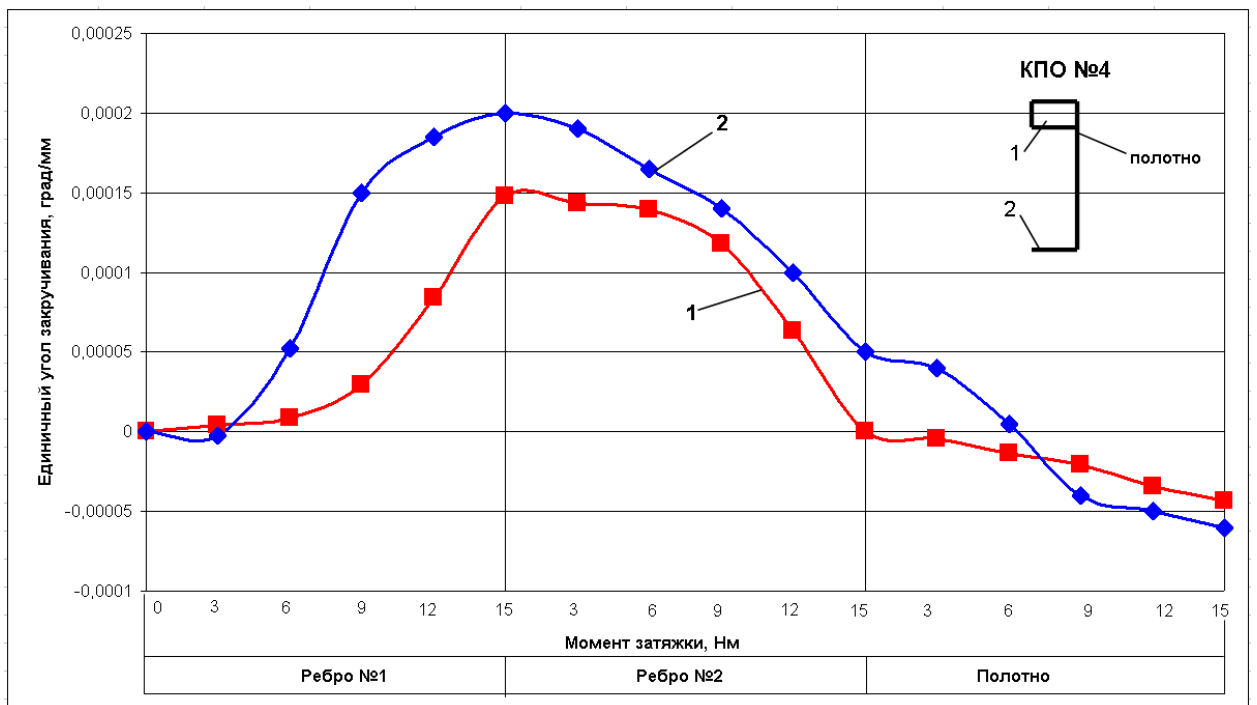


Рисунок 3.43 - Зависимость изменения рассчитанного (1) и экспериментального (2) единичного угла закручивания КПО №4 от момента затяжки силового болта

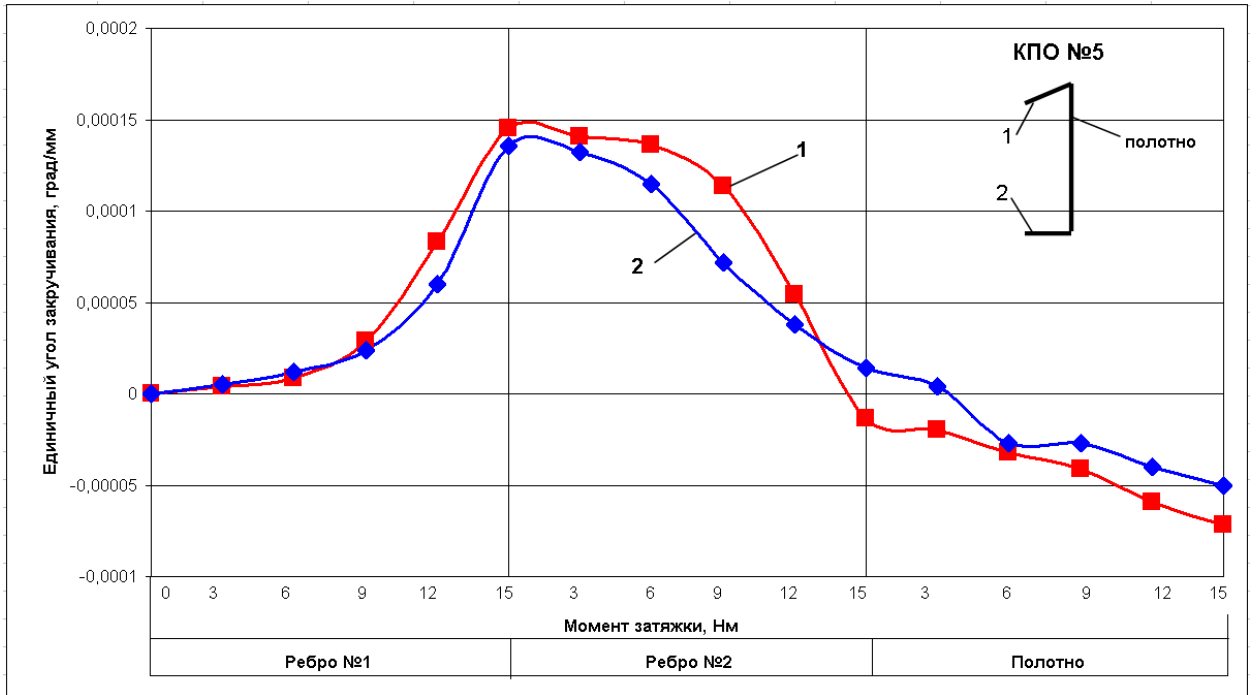


Рисунок 3.44 - Зависимость изменения рассчитанного (1) и экспериментального (2) единичного угла закручивания КПО №5 от момента затяжки силового болта

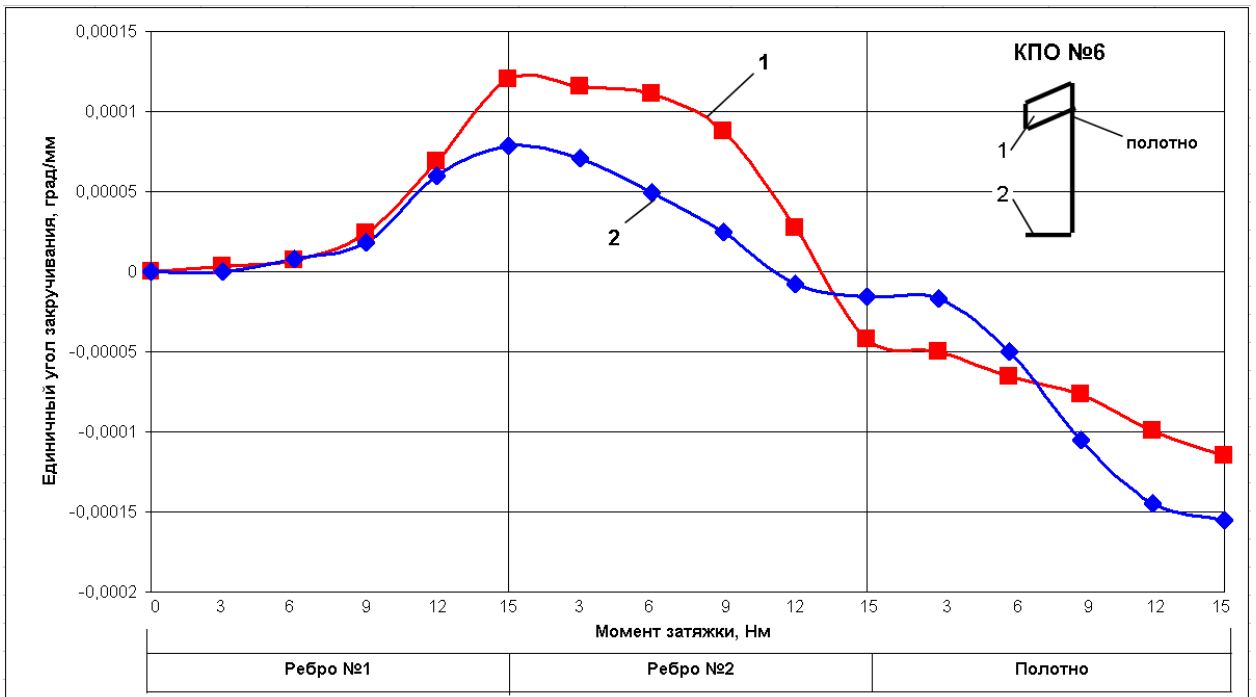


Рисунок 3.45 - Зависимость изменения рассчитанного (1) и экспериментального (2) единичного угла закручивания КПО №6 от момента затяжки силового болта

Выводы по главе

1. Проведено экспериментальное исследование технологического процесса правки деталей типа балок КПС раскаткой роликами, в результате которого:

- получены зависимости значения растягивающей силы, действующей на деталь при раскатке от момента затяжки силового болта. Данные зависимости могут быть использованы для практического определения режимов раскатки реальных деталей;

- проведен анализ изменения толщины деформированного участка при обработке раскаткой роликами для материалов АК4, В95пчТ1, В95пчТ1, Д16чат. На основании данного анализа можно сделать вывод о том, что использованный диапазон технологических параметров обработки обеспечивает требуемую точность изготовления деталей;

- получены зависимости изменения образованных при раскатке стрел прогибов для разных стратегий обработки от температуры последующего нагрева. С учетом эксплуатационного диапазона температур для летательных аппаратов военного назначения как наибольшего по величине (от -55° до $+125^{\circ}$) максимальные изменения стрел прогибов обработанных раскаткой роликами образцов после нагрева не превышают 5%. Дальнейший нагрев способствует уменьшению образованных прогибов и поэтому нежелателен;

- получены зависимости деформации (изгиба и закручивания поперечных сечений) конструктивно-подобных образцов от режимов процесса раскатки ребер и полотна роликами в установленном технологическом диапазоне;

- установлена возможность применения разработанной конструкции переносного специализированного инструмента (роликовых раскатников) в процессе правки маложестких подкрепленных деталей раскаткой роликами.

2. Для расчета деформаций определены геометрические и крутильные характеристики поперечных сечений КПО. С помощью полученных

выражений для расчета деформаций КПО были получены аналитические зависимости двухосного прогиба и угла закручивания КПО при обработке раскаткой роликами от режимов процесса раскатки ребер и полотна роликами в установленном технологическом диапазоне.

3. При сравнительном анализе зависимостей деформаций от технологических параметров обработки, полученных экспериментальным и расчетным путями, установлено, что полученные выражения для расчета двухосного изгиба и угла закручивания могут быть использованы для практического определения режимов раскатки. Средний процент сходимости по прогибам составляет 4,12%, по единичному углу закручивания – 3,67%.

4 Практическая реализация результатов исследования

4.1 Технологические рекомендации по правке деталей типа балок комплексного поперечного сечения раскаткой роликами

С целью разработки рекомендаций по управлению процессом формообразования и правки деталей силового каркаса летательных аппаратов типа стрингеров, лонжеронов, рам, нервюр и т.п., которые изготавливаются фрезерованием из термически упрочненных плит и пресованных профилей алюминиевых сплавов раскаткой роликами, на Иркутском авиационном заводе – филиале ОАО «Корпорация «Иркут» была разработана технологическая инструкция, включающая в себя описание данного метода формообразования и методику расчета технологических параметров. Разработанная инструкция применяется при производстве изделий отечественной авиационной техники, выпускаемых ИАЗ.

4.1.1 Общие требования к процессу правки раскаткой роликами

Правка применяется для придания детали формы, указанной в чертеже. При этом изменения не затрагивают свойств материала и назначения детали.

При раскатке ребер роликами происходит пластическая деформация поверхностного слоя металла под действием прижатых к обрабатываемой поверхности роликов. В результате локального воздействия на ребра детали – её форма меняется (схема нагружения детали при раскатке роликами аналогична схеме нагружения процесса разводки). Допустимая деформация в зоне раскатки определяется допуском на указанную в чертеже толщину стенки в зависимости от материала обрабатываемых деталей.

К искажениям пространственной форме подкрепленных деталей, устраняемым раскаткой роликами относятся саблевидность, неплоскостность, отклонение от заданного контура, закрутка.

Правка деталей типа балок КПС осуществляется комплексной обработкой, т.е. поочередной раскаткой полотна и ребер специальными инструментами.

При раскатке как ребер, так и полотна деталей типа балок КПС с несимметричным поперечным сечением в большинстве случаев одновременно образуются двухосный изгиб и закручивание. Достижение требуемой формы таких деталей может быть обеспечено двумя методами:

- итерационным – путем последовательной раскатки ребер и полотна с контролем формы деталей после каждого цикла раскатки и постепенным увеличением момента затяжки силовых болтов;
- на основе расчета режимов раскатки с использованием электронной модели или чертежа детали.

4.1.2 Требования к деталям, подвергаемым правке раскаткой роликами

Деталь, поступающая на участок правки раскаткой роликами, должна быть подвергнута контролю согласно технологическому процессу ее изготовления и иметь карту измерений. Для деталей, подвергаемых правке, в рабочей технологической документации должно быть указано *«Правка детали раскаткой»*.

Правка деталей из алюминиевых сплавов раскаткой ребер допускается только после окончательной термообработки. Правке подвергаются только детали, правка сборочных единиц и узлов недопустима.

Правке раскаткой роликами должны подвергаться детали с отсутствием трещин, царапин, сколов, вмятин, наплывов и других поверхностных дефектов.

Кроме этого имеются ряд других ограничений. Так, правка методом роликовой раскатки запрещена в следующих случаях:

- при подвергании на производстве детали воздействию температур выше $+120^{\circ}\text{C}$;
- на деталях с защищёнными покрытиями (анодирование хромовой кислотой, окраска, электролитическое осаждение и т.д.);
- в районе отверстий (см. рисунок 4.1). Величина отступа указывается в технологической документации;

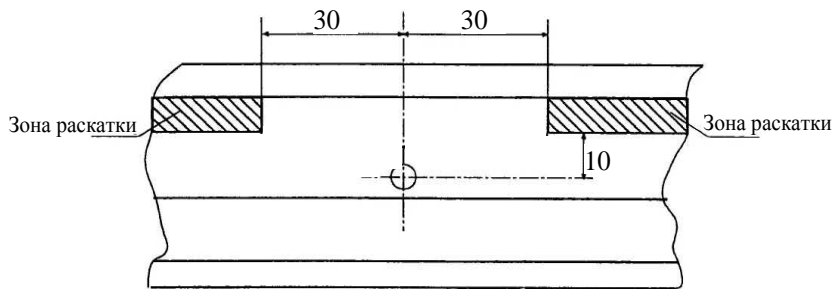


Рисунок 4.1 - Обработка детали с отверстиями

- на острых кромках, не соответствующих требованиям конструкторской документации, на обрабатываемых поверхностях детали.

Перед правкой детали должны быть очищены от коррозии, тщательно промыты и обезжирены. Поверхностные дефекты в виде вмятин и царапин необходимо удалить зачисткой. Шероховатость обрабатываемых поверхностей должна быть не выше Ra 3,2.

Особое внимание необходимо уделить мерам по предотвращению образования трещин в деталях, подвергнутых правке раскаткой. Поскольку раскатка может привести к «закатыванию» мелких трещин, обязательным требованием к технологическому процессу является включение в него операций контроля – цветной или люминесцентной дефектоскопии.

Давление роликов на деталь должно быть ограничено по следующей причине. В определённом диапазоне технологических нагрузок, когда глубина пластически деформированного слоя меньше половины толщины раскатываемого участка детали, раскатку можно отнести к процессам

поверхностного пластического деформирования. В этом случае, вследствие влияния срединных упруго деформированных слоёв, у поверхности образуются остаточные напряжения сжатия. Если же пластическая область распространится на всю толщину участка, на поверхности вследствие неполной разгрузки, могут образоваться растягивающие остаточные напряжения, что отрицательно скажется на ресурсе детали. Исходя из этого, предельно допустимое давление роликов на деталь должно определяться на основе измерения остаточных напряжений или глубины пластически деформированного слоя.

4.1.3 Требования к инструменту, применяемому в процессе правки раскаткой роликами

В качестве инструмента при выполнении правильных работ можно использовать специальные роликовые раскатные устройства (раскатники). Затяжку роликов такого инструмента необходимо осуществлять с помощью ключа с регулируемым крутящим моментом.

Для работы должны использоваться только раскатники, прошедшие процедуры паспортизации и поверки.

При проектировании раскатников подразделением-разработчиком конструкторской документации выпускается комплект эксплуатационных документов, в общем случае включающий паспорт и руководство по эксплуатации.

В дополнение к стандартным требованиям паспорт раскатника должен содержать следующую информацию:

а) На титульном листе паспорта после наименования и обозначения раскатника делается надпись:

«Применяется в ТП ».

(Обозначение, наименование)

б) Раздел I «Основные технические данные» паспорта заполняется конструктором. Состав параметров в графе 1 и их количественные

(качественные) характеристики в графе 2 согласовывается с технологом. При этом в графе 2 конструктором указываются требуемые значения параметров. Фактические значения данных параметров заносятся цехом-изготовителем при проведении приемо-сдаточных испытаний и указываются в скобках.

В разделе I приводятся:

- твердость рабочих поверхностей роликов раскатника;
- шероховатость рабочей поверхности роликов;
- шероховатость направляющих пластин;
- усилие вращения нагружающего винта;
- усилие вращения приводного вала;
- легкость вращения роликов;
- допустимый люфт и зазоры в нажимном и приводном роликах;
- состояние поверхности и отсутствие следов коррозии.

в) В разделе II указывается комплект поставки раскатника, в общем случае: раскатник; паспорт; руководство эксплуатации.

Руководство по эксплуатации раскатника должно содержать следующую информацию:

а) в подразделе «Проверка работоспособности изделия» раздела «Техническое обслуживание изделия» указываются:

1) Порядок проведения проверок раскатника перед началом работы:

- проверка вращения роликов. Ролики должны вращаться от руки свободно, без заеданий и рывков, хруст и щелчки при вращении роликов недопустимы;
- проверка усилия вращения приводного вала. Вращение должно быть легким и плавным;
- проверка усилия вращения нажимного винта, проверка его резьбовой поверхности. Смятие и выкрашивание резьбовой поверхности недопустимы;
- проверка поверхности концевых участков приводного вала и нажимного винта, смятие граней на шестигранных хвостовиках недопустимы;

- проверка отсутствия задиров, вмятин, трещин на рабочих поверхностях роликов и на направляющих планках;
- проверка параллельности осей роликов под нагрузкой.

2) Сроки и порядок проведения централизованных профилактических проверок и регулировок раскатника в цехе-изготовителе или другом подразделении, осуществляющим проверку с занесением результатов проверок в паспорт раскатника.

Проведенные ремонтные работы и доработки приводятся с указанием содержания ремонтных работ и основанием для их проведения. Периодичность проведения ремонтных профилактических работ не реже одного раза в полугодие.

б) в разделе «Текущий ремонт изделия» указывается межремонтный период эксплуатации раскатника.

в) меры предосторожности при работе с раскатником.

г) уровень подготовки персонала допускаемого к работе раскатником. Персонал, задействованный в процессе правки деталей из алюминиевых сплавов раскаткой роликами, должен быть обучен и аттестован на право выполнения работ.

4.1.4 Правка деталей раскаткой полотна и ребер итерационным методом

Перед обработкой деталей необходимо разметить на контролируемых поверхностях детали линии контрольных сечений и нанести на них контрольные точки для измерения стрелы прогиба. Составить схему расположения контрольных сечений с номерами контрольных точек (см. рисунок 4.2).

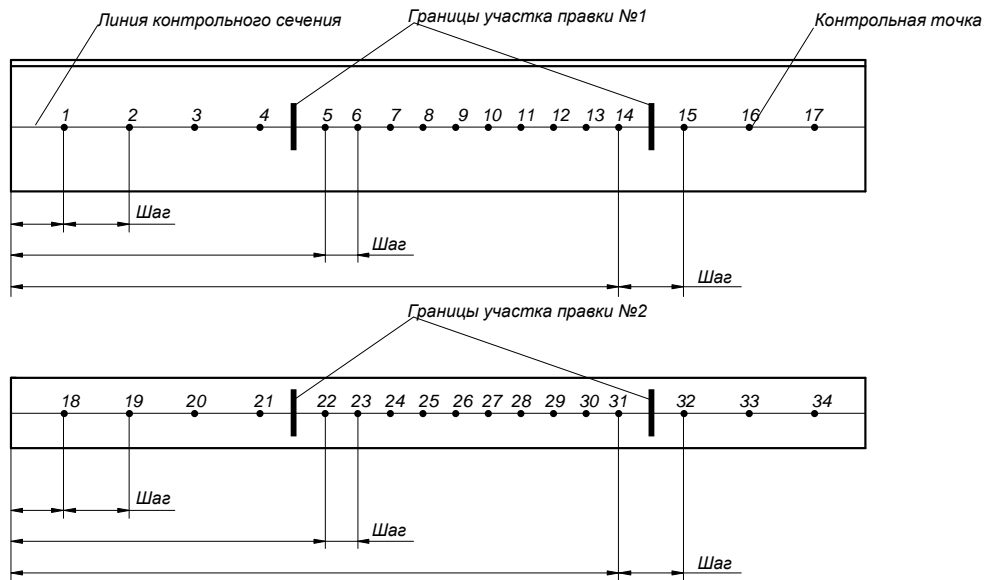


Рисунок 4.2 – Разметка контрольных точек на детали

Контрольные сечения наносятся:

- на базовую поверхность детали, для которой выполняются измерения отклонений от базовых поверхностей контрольной оснастки согласно технологическому процессу изготовления;
- на поверхность, перпендикулярную базовой поверхности детали.

Положение контрольных точек выбирается с учетом возможности измерения стрелы прогиба индикаторной планкой. На плоские или прямолинейные контролируемые поверхности контрольные точки наносятся с шагом 50...200 мм на основании предварительных замеров стрелы прогиба. На поверхностях с теоретическим контуром положение контрольных точек уточняется по чертежу или электронной модели и по возможности совмещается с контрольными точками оснастки.

После этого необходимо произвести измерение стрелы прогиба f_0 в контрольных точках при помощи индикаторной планки согласно схеме, показанной на рисунке 4.3.

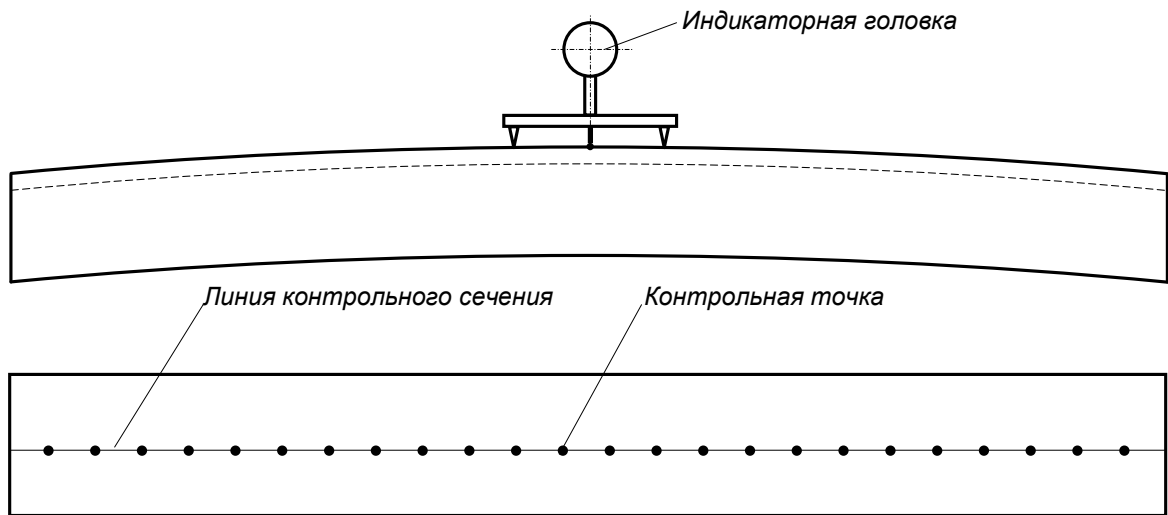


Рисунок 4.3 – Схема измерения стрелы прогиба в контрольных точках детали

Измерение стрелы прогиба в зависимости от его величины может производиться на базе 100 или 200 мм с применением индикаторных головок с ценой деления 0,01 или 0,001 мм.

Затем следует занести в карту измерений (см. таблицу 4.1) требуемые f_{mp} и измеренные f_0 значения стрелы прогиба в контрольных точках. В карту измерений заносятся значения стрел прогибов для всех контрольных точек, размечаемых на контрольных сечениях.

Таблица 4.1

Карта измерений при правке деталей раскаткой роликами

Параметры правки детали	Номера контрольных точек																			
	Базовое сечение										Перпендикулярное сечение									
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Требуемая стрела прогиба f_{mp} , мм																				
Стрела прогиба до обработки f_0 , мм																				
Устраняемая стрела прогиба $f_{уст} = f_{mp} - f_0$, мм																				
Относительная стрела прогиба $f_{оти} = f_{уст} i / f_{уст max}$																				
Номер участка правки согласно схеме																				
Средняя																				

Параметры правки детали	Номера контрольных точек																			
	Базовое сечение										Перпендикулярное сечение									
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
устраняемая стрела прогиба участка f_{cp0} , мм																				
Момент затяжки болта раскатника, Н•м																				
Стрела прогиба после обработки f_1 , мм																				
Устраняемая стрела прогиба $f_{ycm} = f_{mp} - f_1$, мм																				
Номер участка правки согласно схеме																				
Средняя устраняемая стрела прогиба участка f_{cp1} , мм																				
Момент затяжки болта раскатника, Н•м																				
Стрела прогиба после обработки f_2 , мм																				

Для плоских (прямолинейных) поверхностей деталей $f_{mp} = 0$.

Требуемые значения f_{mp} стрелы прогиба поверхностей деталей, имеющих теоретический контур, определяются по источникам геометрической информации (чертеж, электронная модель и т.п.).

Примечание. Стрела прогиба f связана с радиусом R кривизны поверхности следующей зависимостью:

$$f = a^2 / 8R, \quad (4.1)$$

где a – база измерения прогиба.

Затем необходимо определить и занести в карту измерений значения f_{ycm} устраняемой стрелы прогиба:

$$f_{ycm} = f_{mp} - f_0. \quad (4.2)$$

После этого определить и занести в карту измерений:

- относительные значения $f_{отн}$ устраняемой стрелы прогиба в контрольных точках:

$$f_{отн} = f_{уст i} / f_{уст max}, \quad (4.3)$$

где $f_{уст i}$ – устраняемая стрела прогиба в i -той контрольной точке; $f_{уст max}$ – максимальное значение стрелы прогиба в контрольном сечении;

- среднее значение f_{cp} устраняемой стрелы прогиба

$$f_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N f_{уст i}}{N}, \quad (4.4)$$

где N – количество контрольных точек на участке, подлежащем правке.

Затем необходимо определить, отметить на схеме обработки (см. рисунок 4.2) и на контролируемых поверхностях детали номера и границы выявленных участков, подлежащих правке. Под участком, подлежащим правке (участком правки), подразумевается область контрольного сечения, в пределах которой величина относительного значения $f_{отн}$ устраняемой стрелы прогиба составляет $f_{отн} = 0,4 \dots 1,0$, а изменение относительного значения $f_{отн}$ устраняемой стрелы прогиба не превышает 0,2.

В зависимости от характера устраняемого отклонения необходимо выбрать схему раскатки для устранения саблевидности и неплоскостности (отклонения от заданного контура) детали согласно рисунка 4.4.

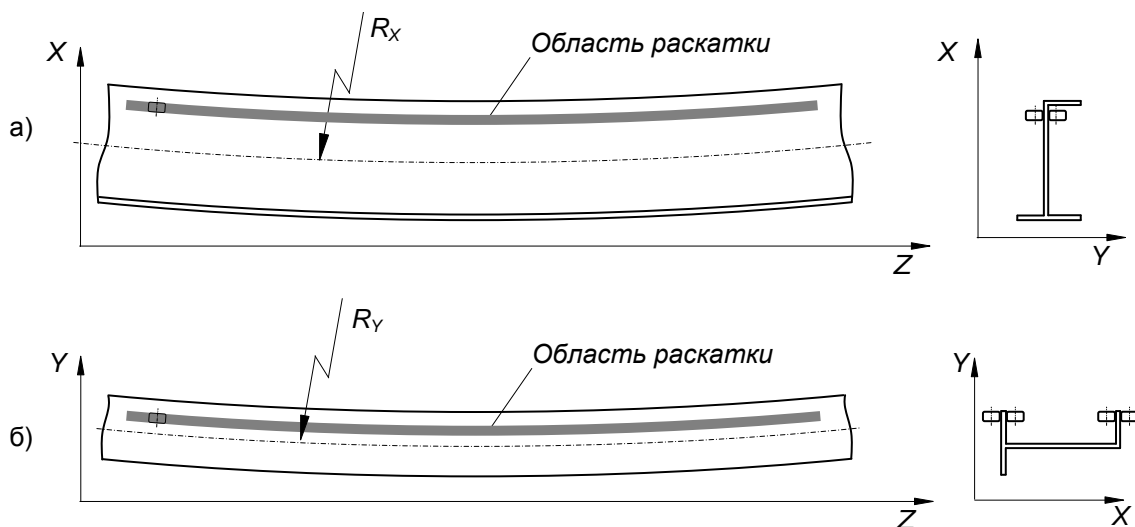


Рисунок 4.4 – Схемы правки: а) саблевидности; б) неплоскостности (отклонения от заданного контура)

При обработке рекомендуется раскатку начинать с участков, имеющих наибольшую величину f_{cp} средней устраняемой стрелы прогиба.

Раскатку полотна и ребер детали рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

Установить значение момента затяжки на ключе с регулируемым крутящим моментом – 2 Н·м. Затянуть винт сжатия роликов до срабатывания механизма ограничения момента затяжки на ключе. Минимальное значение момента затяжки – 2 Н·м. Начальное значение момента затяжки для ребер толщиной 4-6 мм – 4 Н·м, для ребер толщиной 8-10 мм - 6 Н·м. Записать в карту измерений установленное значение момента затяжки ключа.

Вращать приводной ролик раскатника, обеспечивая движение раскатника вдоль ребра. В случае наличия отверстий в рёбрах раскатка ребра допускается только в области, не менее 30 мм от отверстия (см. рисунок 4.1.1). Движение раскатника по ребру должно быть плавным, без рывков и заеданий. В случае затруднения движения, вращение приводного ролика прекратить и ослабить винт сжатия роликов, а раскатку продолжить с противоположного конца ребра. В случае ослабления нажима роликов (переменной толщины ребра) корректировку момента затяжки на ребре выполнять через каждые 100 мм перемещения раскатника.

После каждого рабочего хода раскатника производить:

- измерение стрелы прогиба f_k , где k – номер рабочего хода, во всех контрольных точках, размеченных на контрольных сечениях детали. Результаты измерений заносить в карту измерений и выполнять вычисления, используя выражения (4.1) – (4.4);

- контроль формы детали на поверочной плите или на приспособлении согласно технологическому процессу.

Увеличивая каждый раз момент затяжки на 2 Н·м, правку продолжать до достижения требуемых отклонений согласно технологическому процессу.

По завершению правки необходимо окончательно заполнить карту измерений.

4.2 Правка деталей раскаткой полотна и ребер с расчетом режимов обработки

Используя методику расчета технологических параметров процесса формообразования и правки маложестких подкрепленных деталей раскаткой роликами, описанную в разделе 2.4, можно значительно увеличить производительность данного процесса за счет сокращения времени обработки деталей. Ниже приведен пример расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами детали "Лонжерон" с применением данной методики.

Для определения исходных данных, используемых при расчете геометрических параметров детали, необходим электронный чертёж ее поперечных сечений, выполненный, например, в системе AutoCAD.

Перед расчетом деталь разбивается на участки, содержащие поперечные сечения постоянной конфигурации. Для каждого участка определяются исходные и требуемые деформации (прогиб в двух плоскостях и угол закрутки). Расчет выполняется для поперечного сечения участка обработки, имеющего по своей длине деформации постоянного знака, в следующей последовательности.

Сечение разбиваем на конструктивные элементы. При этом количество и размер конструктивных элементов определяется из условия их принадлежности к I-VII типам согласно методике, описанной в разделе 2. (см. рисунки 2.3-2.9). Присваиваем им порядковые номера и определяем принадлежность к тому или иному типу. На рисунке 4.5 показана деталь "Лонжерон" и ее поперечные сечения. Пример разбиения сечений данной детали показан на рисунке 4.6.

Для упрощения процедуры ввода исходных данных систематизируем информацию о типах конструктивных элементах сечения и наличии на них переходов в таблице, созданной в программе Excel (табл. 4.2). В таблицу заносим: тип каждого элемента, значения размеров B и H прямоугольного и треугольного элементов, координаты x и z левого нижнего угла (ближайшего к системе координат XOZ) – для прямоугольного элемента, координаты x и z вершины с прямоугольным углом - для треугольного элемента, а также радиусов переходов R_1, R_2, R_3, R_4 , примыкающих к прямоугольному элементу.

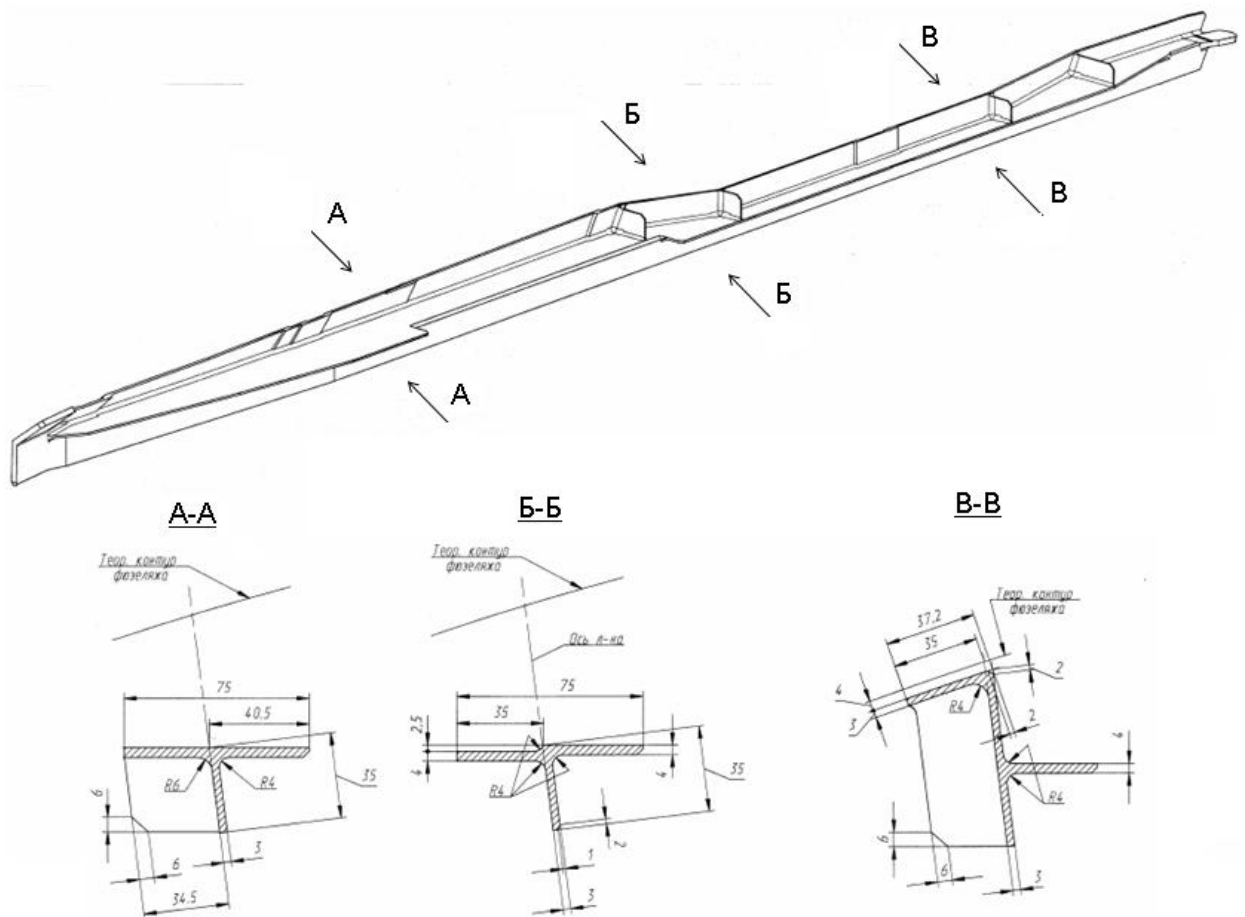


Рисунок 4.5 – Деталь "Лонжерон" и ее поперечные сечения

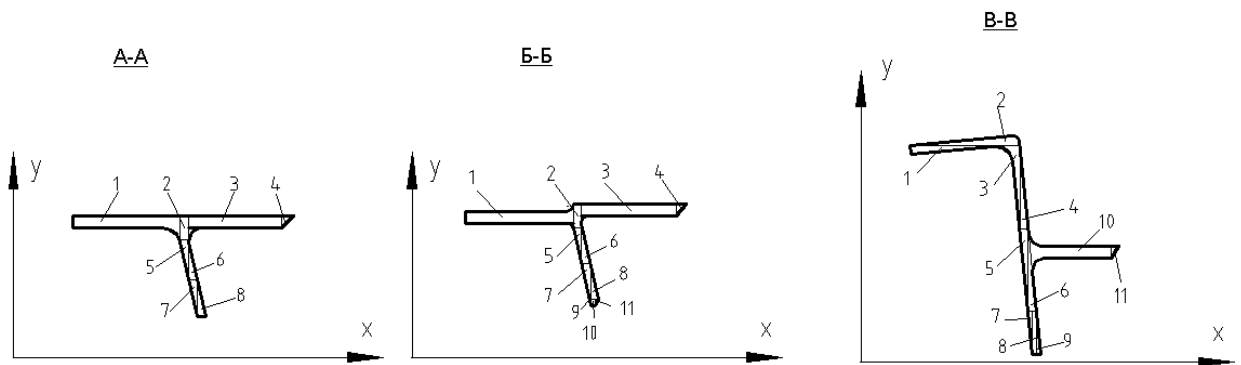


Рисунок 4.6 - Пример разбиения сечений детали "Лонжерон" на конструктивные элементы

Таблица 4.2

Исходные данные: параметры конструктивных элементов сечений

Сечение А-А									
Элементы		Размеры, мм		Координаты, мм		Радиусы переходов, мм			
№	Тип	В	Н	X	Y	R1	R2	R3	R4
1	VI	36,5	4	20	44				6
2	I	3	8	56,5	40				
3	VI	31,5	4	60	44	4			
4	III	4	4	91	48				
5	IV	3	13,67	59,53	40				
6	II	3	12,8	59,53	26,37				
7	IV	3	12,46	62,53	26,37				
8	II	3	12,46	62,53	13,91				
Сечение Б-Б									
Элементы		Размеры, мм		Координаты, мм		Радиусы переходов, мм			
№	Тип	В	Н	X	Y	R1	R2	R3	R4
1	VI	36,85	4	18	45,5			4	4
2	I	2,68	8	55	44				
3	VI	32,34	4	57,61	48	4			
4	III	3,13	4	90	52				
5	IV	2,68	11,93	57,61	43,95				
6	II	3	13,49	57,61	32				
7	IV	3	12	60,68	32,02				
8	II	2,68	12,09	60,68	19,93				
9	IV	0,49	2,19	60,82	19,93				
10	I	1,53	2,19	60,82	17,74				
11	III	1,06	2,19	62,35	19,93				
Сечение В-В									
Элементы		Размеры, мм		Координаты, мм		Радиусы переходов, мм			
№	Тип	В	Н	X	Y	R1	R2	R3	R4
1	III	28,36	3	13,73	73,4				
2	V	37,38	3	54,11	73,4				
3	IV	3	28,1	54,11	73,4				
4	II	3	28,1	54,11	45,3				
5	IV	3	28,1	56,9	45,3				
6	II	3	28,1	56,9	17,19				
7	IV	1,5	14,74	58,22	17,19				
8	I	1,51	14,74	58,22	2,3				
9	II	1,51	14,74	59,67	2,3				
10	VI	27,16	3	57,91	35,27	4	4		
11	III	2,4	3	85,12	38,4				

Конструктивные элементы сечения сортируем по типу, после чего копируем строки таблицы исходных данных в таблицу, ячейки которой связаны с необходимыми для расчета формулами (2.1), (2.2) (см. рисунок 4.7).

Расчет													Деталь															
геометрических параметров сечений													Лонжерон															
													наименование						обозначение									
Сечение А-А																												
№	Тип	В	Н	Х	У	Р1	Р2	Р3	Р4																			
1	VI	36,6	4	20	44				6																			
2	I	3	8	56,5	40																							
3	VI	31,6	4	60	44	4																						
4	III	4	4	91	48																							
5	IV	3	13,67	59,53	40																							
6	II	3	12,8	59,53	26,37																							
7	IV	3	12,46	62,53	26,37																							
8	II	3	12,46	62,53	13,91																							
Сечение Б-Б																												
№	Тип	В	Н	Х	У	Р1	Р2	Р3	Р4																			
1	VI	36,85	4	18	46,5			4	4																			
2	I	2,68	8	55	44			4																				
3	VI	32,34	4	57,61	48																							
4	III	3,13	4	90	52																							
5	IV	2,68	11,93	57,61	43,95																							
6	II	3	13,49	57,61	32																							
7	IV	3	12	60,68	32,02																							
8	II	2,68	12,09	60,68	19,93																							
9	IV	0,49	2,19	60,82	19,93																							
10	I	1,53	2,19	60,82	17,74																							
11	III	1,06	2,19	62,35	19,93																							
Сечение В-В																												
№	Тип	В	Н	Х	У	Р1	Р2	Р3	Р4																			
1	III	28,36	3	13,73	73,4																							
2	V	37,38	3	54,11	73,4																							
3	IV	3	28,1	54,11	73,4																							
4	II	3	28,1	54,11	46,3																							
5	IV	3	28,1	59,9	46,3																							
6	II	3	28,1	59,9	17,19																							
7	IV	1,6	14,74	58,22	17,19																							
8	I	1,51	14,74	58,22	2,3																							
9	II	1,51	14,74	59,67	2,3																							
10	VI	27,16	3	57,91	35,27	4	4																					
11	III	2,4	3	85,12	38,4																							
Сортировка по типам элементов сечения В-В																												
													Хцт	Уцт	Хцт1	Уцт1	Хцт2	Уцт2	Хцт3	Уцт3	Хцт4	Уцт4	F	F1	F2	F3		
I													58,875	9,87									22,2574					
II													0	0									0					
III													55,11	64,86867									42,15					
IV													57,9	20,55887									42,15					
V													60,13333	7,313333									11,1282					
VI													23,18333	72,4									42,64					
VII													85,92	37,4									3,6					
VIII													0	0									0					
IX													52,11	84,03333									42,15					
X													55,9	35,83333									42,15					
XI													57,72	12,27667									11,055					
XII													41,65	74,4									58,07					
XIII													0	0									0					
XIV													71,49	36,77	58,802	36,162	57,018	39,162	0	0	0	0	31,48	3,44	3,44	0	0	
XV													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XVI													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XVII													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XVIII													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 4.7 - Электронная таблица для расчета геометрических параметров

Результатами расчета параметров сечения участка детали являются координаты центра тяжести (x_0, y_0) (2.1), осевые моменты J_x и J_y инерции комплексного сечения (2.1). Результаты расчета для поперечных сечений детали "Лонжерон" приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчета геометрических характеристик поперечных сечений детали "Лонжерон"

Сечение	$x_0, м$	$y_0, м$	$J_x, м^4$	$J_y, м^4$
А-А	0,00004	-0,005	$0,95 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-7}$
Б-Б	0,00004	-0,0051	$0,95 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-7}$
В-В	0,00022	0,0398	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$0,92 \cdot 10^{-7}$

Для определения крутильных деформаций, возникающих в процессе раскатки, необходимо определить значения секториальных площадей в точках срединных линий поперечных сечений, в которых будет действовать растягивающая сила, а также секториальный момент инерции и момент кручения.

Очевидно, что секториальные характеристики необходимо определять только для сечения В-В, так как другие два сечения детали "Лонжерон" имеют радиальную точку (т.е. такую точку, из которой выходят все срединные линии поперечного сечения), а, значит, секториальная площадь в каждой точке этих сечений будет равна нулю и крутильных деформаций не возникнет.

Координаты центра кручения сечения В-В относительно главных осей можно определить, используя зависимости (2.3). Для этого строится эпюра секториальных площадей с центром кручения и началом отсчета в произвольных точках. При выборе координат центра кручения O' для данного сечения удобно его совместить с центром тяжести O (см. рисунок 4.8, а). Затем строится эпюра секториальных площадей с найденным центром кручения и началом отсчета в произвольной точке (см. рисунок 4.8, б). Используя выражение (2.4), определяются истинные значения секториальных площадей в точках сечения (см. рисунок 4.8, в).

После этого, используя выражения (2.6) и (2.7), определяются секториальный момент инерции и момент кручения. Результаты расчета секториального момента инерции J_o и момента кручения J_d приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Сечение	Секториальный момент инерции $J_o, м^6$	Момент кручения $J_d, м^4$
В-В	$626,7 \cdot 10^{-12}$	$2,47 \cdot 10^{-8}$

Теперь, зная величины исходных и требуемых деформаций, определяются устраняемые прогибы в двух плоскостях и угол закручивания с помощью выражения (2.23) и, решая систему уравнений (2.24), где неизвестными являются растягивающие силы, координаты и секториальные площади точек их приложения, находится совокупность сил, при действии которых будут образовываться требуемые прогибы в двух плоскостях и угол закрутки.

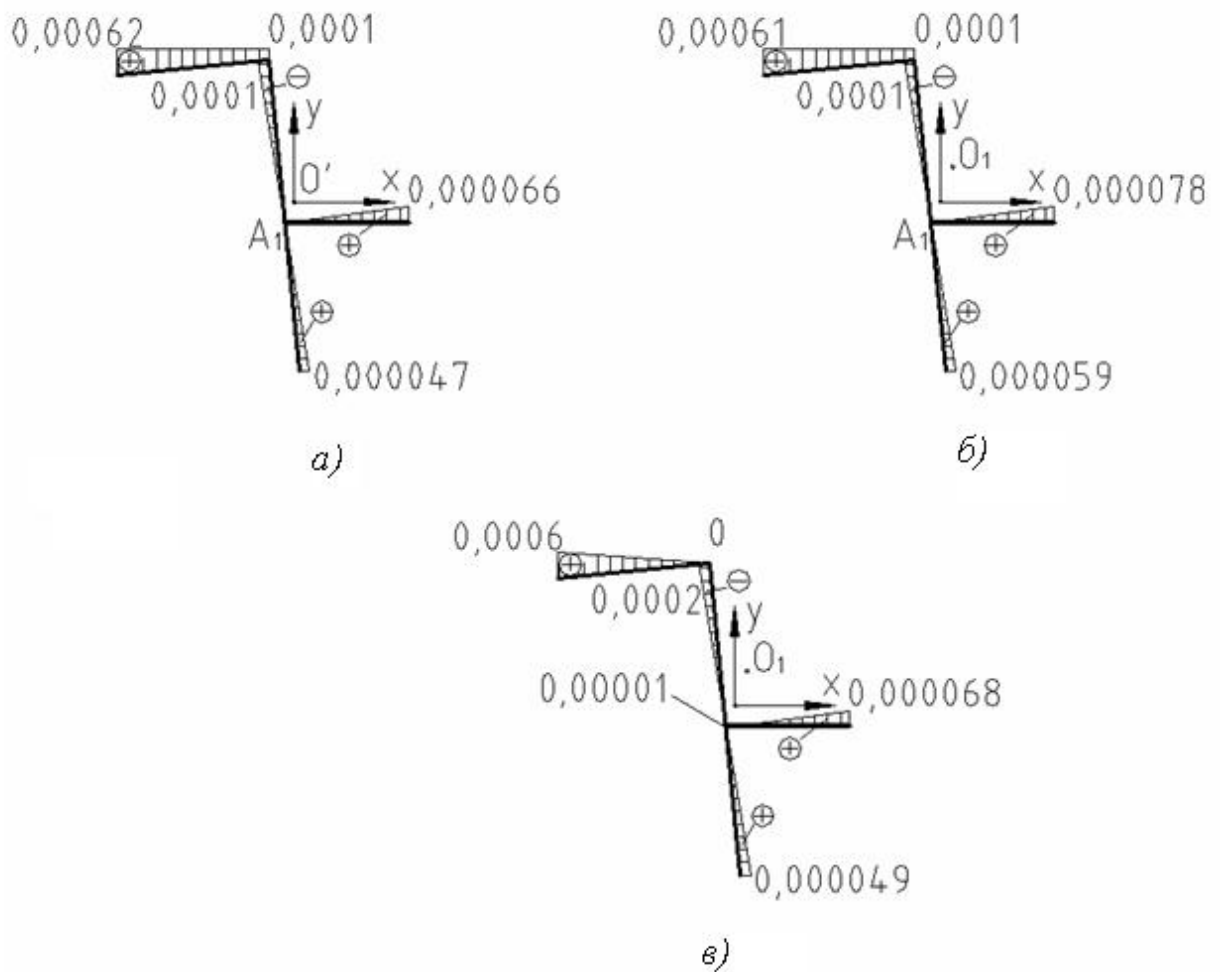


Рисунок 4.8 – Эпюры секториальных площадей сечения В-В

Для автоматизированного расчета необходимого комплекса растягивающих сил и координат точек их приложения на основе требуемых деформаций был разработан программный модуль в среде Borland Delphi 7 (см. рисунок 4.9).

Исходными данными для расчета являются: максимально возможное количество обрабатываемых участков поперечного сечения детали, база измерений стрелы прогиба обрабатываемого продольного участка детали, модули сдвига и упругости, моменты инерции относительно осей X и Y , момент инерции на кручение, секториальный момент инерции, расстояние между поперечными сечениями, на котором измеряется угол закручивания продольного участка детали и устраняемые деформации участка детали (прогибы в двух плоскостях и угол закручивания).

Максимально возможное количество обрабатываемых участков: 6

База измерений стрелы прогиба, $a=$ 0,2 Модуль упругости, $E=$ 72000000 Модуль сдвига, $G=$ 27067669,17

Момент инерции, $J_x=$ 0,00000132833 Момент инерции, $J_y=$ 0,00000278021 Момент инерции на кручение, $J_d=$ 0,00000001083

Секториальный момент инерции, $J_w=$ 0,00000000112 Расстояние между поперечными сечениями, $l=$ 0,2

Устраняемый прогиб $F_x=$ 0,00000869798 Устраняемый прогиб $F_y=$ 0,00000145721 Устраняемый угол закручивания: 0,00170987114

1-й участок:	2-й участок:
X изменяется от 0 до 0,035	X изменяется от 0 до 0,035
Y изменяется от 0,0665 до 0,0665	Y изменяется от -0,07 до -0,07
φ изменяется от 0 до 0,002275	φ изменяется от -0,0022 до 0
3-й участок:	4-й участок:
X изменяется от 0 до -0,035	X изменяется от 0 до -0,035
Y изменяется от 0,07 до 0,07	Y изменяется от -0,07 до -0,07
φ изменяется от -0,0022 до 0	φ изменяется от 0 до 0,0022
5-й участок:	6-й участок:
X изменяется от 0 до 0	X изменяется от 0 до 0
Y изменяется от 0,07 до 0,07	Y изменяется от -0,07 до -0,07
φ изменяется от 0 до 0	φ изменяется от 0 до 0

Результаты:
 $P1= 6,049999999999992$ $X1= 0,026$ $Y1= 0,0675$
 $P2= 0$ $X2= 0$ $Y2= 0$
 $P3= 0$ $X3= 0$ $Y3= 0$
 $P4= 0$ $X4= 0$ $Y4= 0$
 $P5= 0$ $X5= 0$ $Y5= 0$
 $P6= 0$ $X6= 0$ $Y6= 0$
Расчетный прогиб $F_x:$ 8,22356726951206E-6
Расчетный прогиб $F_y:$ 1,45720621309694E-6
Расчетный угол закручивания $Q:$ 0,000526766467857379
Остаточный прогиб $F_x:$ -4,74412730487937E-7
Остаточный прогиб $F_y:$ -3,78690306499315E-12
Остаточный угол закручивания $Q:$ -0,00118310467214262

Рисунок 4.9 – Интерфейс программного модуля для расчета комплекса продольных сил и координат точек их приложения на основе требуемых деформаций

Здесь для расчета поперечное сечение разбивается относительно центральных осей на участки, которые могут обрабатываться раскаткой роликами (см. рисунок 4.10).

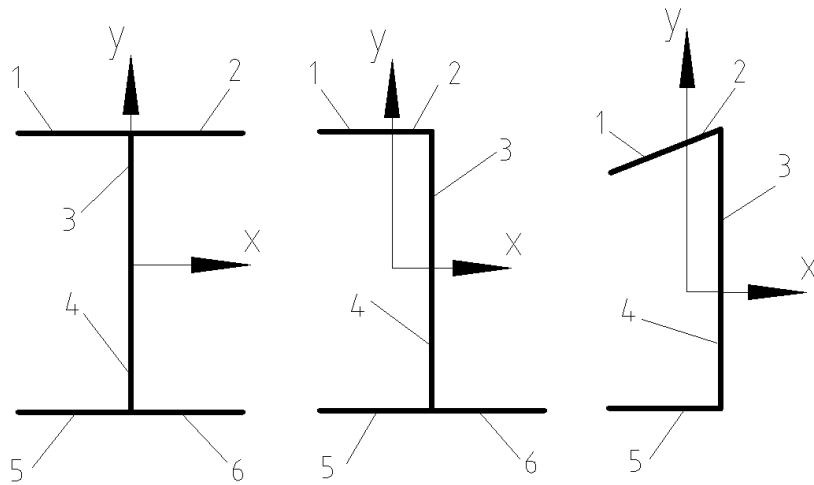


Рисунок 4.10 – Разбиение поперечного сечения детали на участки

После выбора количества участков каждый участок в программном модуле описывается диапазонами координат x , y , являющихся плечами момента, создаваемого продольной растягивающей силой, а также диапазоном секториальных площадей. Диапазон координат x или y имеет знак "+" если изгибающий момент, создаваемый продольной силой, устраняет исходный прогиб, знак "-" – исходный прогиб увеличивается. Знак диапазона секториальных площадей может изменяться и соответствует знакам на эпюре секториальных площадей.

Расчетными параметрами программного модуля являются значения растягивающих сил, под действием которых образуются деформации двухосного изгиба и закрутки участка детали наиболее близкие к требуемым, координаты точек их приложения, деформации, созданные моментами и бимоментами этих сил, а также остаточные деформации (отклонение расчетных деформаций от требуемых).

Расчет построен таким образом, что при одинаковых расчетных деформациях, наиболее близких к требуемым, выбирается стратегия с минимальным количеством обрабатываемых участков. Если после расчета не

достигается требуемая точность обработки за один проход, необходимо повторить расчет с вводом остаточных деформаций.

После окончательного расчета всех действующих при раскатке продольных растягивающих сил, необходимых для получения требуемых деформаций, по тарировочным графикам определяются моменты затяжки силового болта раскатников (см. рисунки 3.16 – 3.19).

4.3 Разработанный инструмент, применяемый при обработке раскаткой роликами

Для реализации процесса правки деталей типа балок был разработан комплект переносного инструмента, включающий в себя раскатные устройства (раскатники) с возможностью обработки ребер и полотна деталей.

Конструкция раскатника для обработки ребер показана на рисунке 4.11. Данный раскатник существует в двух исполнениях: один для правки деталей с шириной ребер от 2 до 15 мм, а другой - для правки деталей с шириной ребер от 10 до 30 мм.

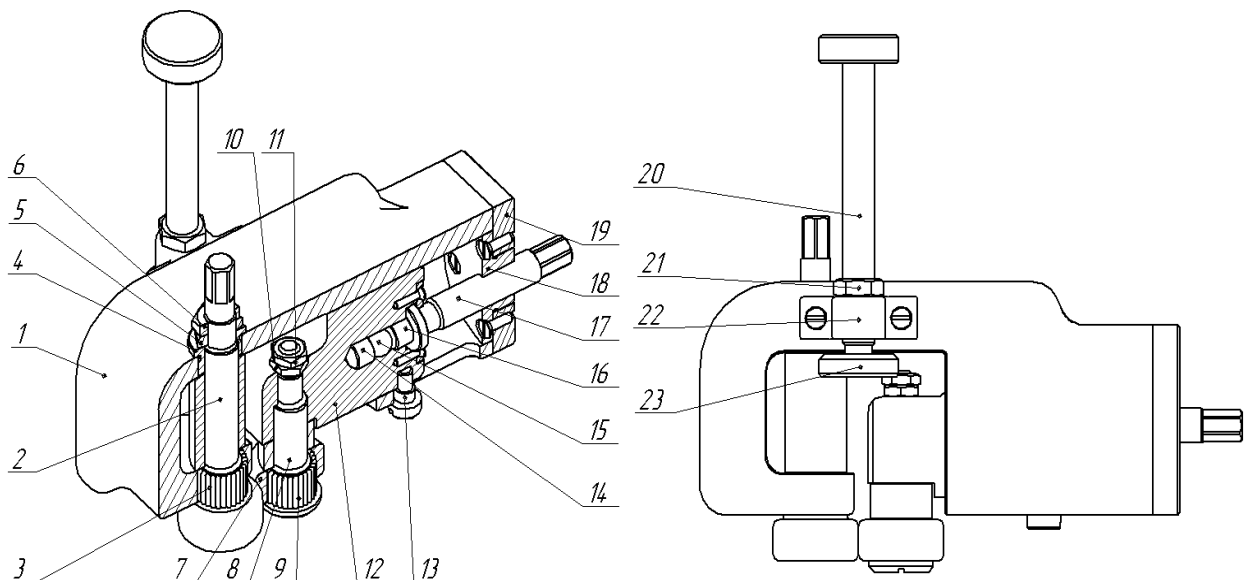


Рисунок 4.11 – Конструкция раскатника для обработки ребер

Обозначения:

1 – корпус; 2 – приводной валик; 3, 9 – игольчатый подшипник; 4, 14, 16, 18 – втулка; 5, 6, 10, 11, 21 – гайка; 7 – нажимной ролик; 8 – ось; 12 – ползун; 13 – болт; 15 – шар; 17 – винт; 19 – крышка; 20 – винт; 22 – кронштейн; 23 – фторопластовый упор.

Корпус 1 раскатника выполнен из стали 30ХГСА цельно фрезерованной деталью с прямоугольным сечением. На переднем торце и верхней части корпуса имеются ребра жесткости для предотвращения упругой деформации скобы корпуса. В основании корпуса закреплен приводной валик 2 с помощью игольчатого подшипника 3 из отдельных игл и втулки 4. Ограничение вертикального перемещение приводного валика выполняется при помощи двух гаек 5, 6. Уменьшение силы трения гайки 5 о корпус 1, возникающей при вращении приводного валика 2, происходит при помощи втулки 4. Верх приводного валика 2 обточен под шестигранную головку для передачи вращающего момента с помощью ключа или специальной рукоятки. Низ приводного валика имеет форму ролика. Нажимной ролик 7 крепится на ось 8 с помощью игольчатого подшипника 9 из отдельных игл. Ось вставлена в ползун 12 и закреплен при помощи двух гаек 10, 11. Ползун 12 вставлен в корпус 1 с возможностью горизонтального и вращательного перемещения. Вращательное движение необходимо для монтажа и смены нажимного ролика 7. Ограничение вращательного движения ползуна 12 осуществляется с помощью болта 13 в нижней части корпуса 1. Давления нажимного ролика 7 выполняется винтом 17. Винт 17 крепится во втулке 18 крышки 13 корпуса 1 и упирается во втулку 16. Та в свою очередь упирается в шар 15, а он во втулку 14, которая и давит на ползун 12. Такая конструкция уменьшает силу трения при вращении нажимного винта 17 и служит для предотвращения заминания винта 17. Свободный конец винта 17 обточен под ключ. С обеих сторон корпуса 1 прикреплены кронштейны 22 с винтами 20 для регулирования раскатника по высоте и обеспечения устойчивого положения при раскатке. Внизу винтов 20 закреплены фторопластовые упоры 23, верх

винта выполнен в виде ручки для удобства регулирования. Стопорение винта выполняется с помощью гайки 21.

Раскатное устройство работает следующим образом. Раскатник устанавливается на детали, обжимая роликом 7 и приводным валиком 2 обрабатываемое ребро. При помощи винта 17 регулируется расстояния между роликами 2, 7. Винт 17 затягивается при помощи динамометрического ключа на требуемый момент. Вращением приводного валика 2 с помощью ключа достигается перемещение раскатника в необходимом направлении.

В ходе экспериментального исследования по изучению процесса правки маложестких деталей раскаткой роликами было выявлено, что после обработки ребер толщиной до 10 мм при моментах затяжки нажимного винта начиная с 12 Нм наблюдается остаточный след из-за непараллельности осей роликов. Причиной большой податливости нажимного ролика и появления люфта при обработке является наличие зазора в посадке ползуна в корпусе. С увеличением толщины раскатываемого ребра (расстояния между центрами роликов) глубина остаточного следа уменьшается за счёт увеличения площади контактных поверхностей ползуна и корпуса, а также уменьшения консоли ползуна. Указанная особенность, а также высокая жёсткость корпуса раскатника позволяет рекомендовать его использование при правке раскаткой рёбер толщиной от 10 до 30мм. Для обработки ребер толщиной от 2 до 15 мм был спроектирован и изготовлен раскатник с уменьшенными размером окна, обеспечивающим ход ползуна с нажимным роликом, и габаритными размерами (см. рисунок 4.12).

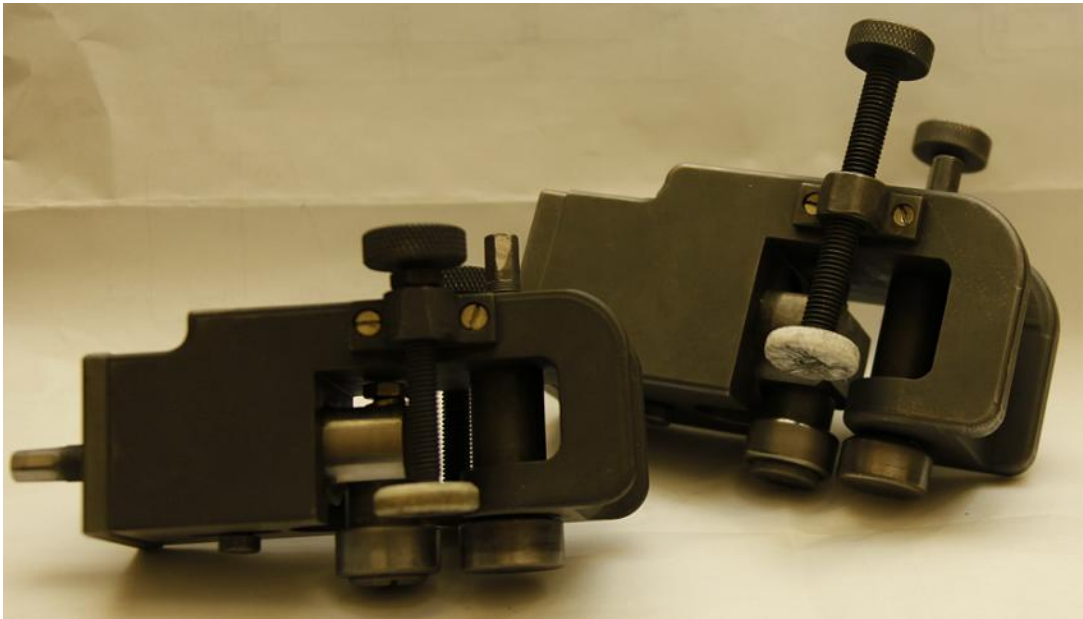


Рисунок 4.12 – Раскатники для обработки ребер

Также в процессе обработки данными раскатниками были получены следующие сведения о технологических возможностях разработанной конструкции раскатника для ребер:

1) достаточная жёсткость корпуса 1 (см. рисунок 4.1.1) за счёт выполненных монолитно с корпусом силовых элементов, а также используемого материала с применением термообработки препятствует его деформации в процессе обработки во всем исследуемом диапазоне момента затяжки силового болта;

2) включение в конструкцию бронзовой втулки 4 в качестве опоры скольжения в верхней части корпуса для приводного валика 2 уменьшает его податливость, что исключает образование перекоса осей роликов в процессе обработки;

3) жёсткость опоры нажимного ролика 7 достигается использованием широкого опорного кольца в консольной части крепления ролика, а также применением скользящей опорной поверхности большой площади (ползуна 12) в области передачи силы реакции нажимного ролика 7 корпусу 1;

4) узел регулировки (настройки) раскатника на требуемую толщину ребра совмещён с элементом формирования требуемого усилия сжатия роликов, что существенно увеличивает удобство работы с раскатником;

5) применение точечной опоры при передаче вращательного движения нажимного винта 17 в поступательное перемещение ползуна 12 снижает механические потери на трение при затягивании нажимного винта и, соответственно, увеличивает КПД. Для этой цели были использованы закладной сухарь 14 и стальной шарик из стали 15, закалённый до твёрдости 60HRC;

6) возможность правки рёбер с непараллельными стенками обеспечивается заменой цилиндрического нажимного ролика 7 коническим. Угол сменного конического ролика определяется углом наклона стенки ребра относительно полотна. Это позволяет обеспечить независимость углового положения контактной поверхности нажимного ролика от величины момента затяжки нажимного винта 17.

Конструкция раскатника для обработки полотна маложестких деталей показана на рисунке 4.13.

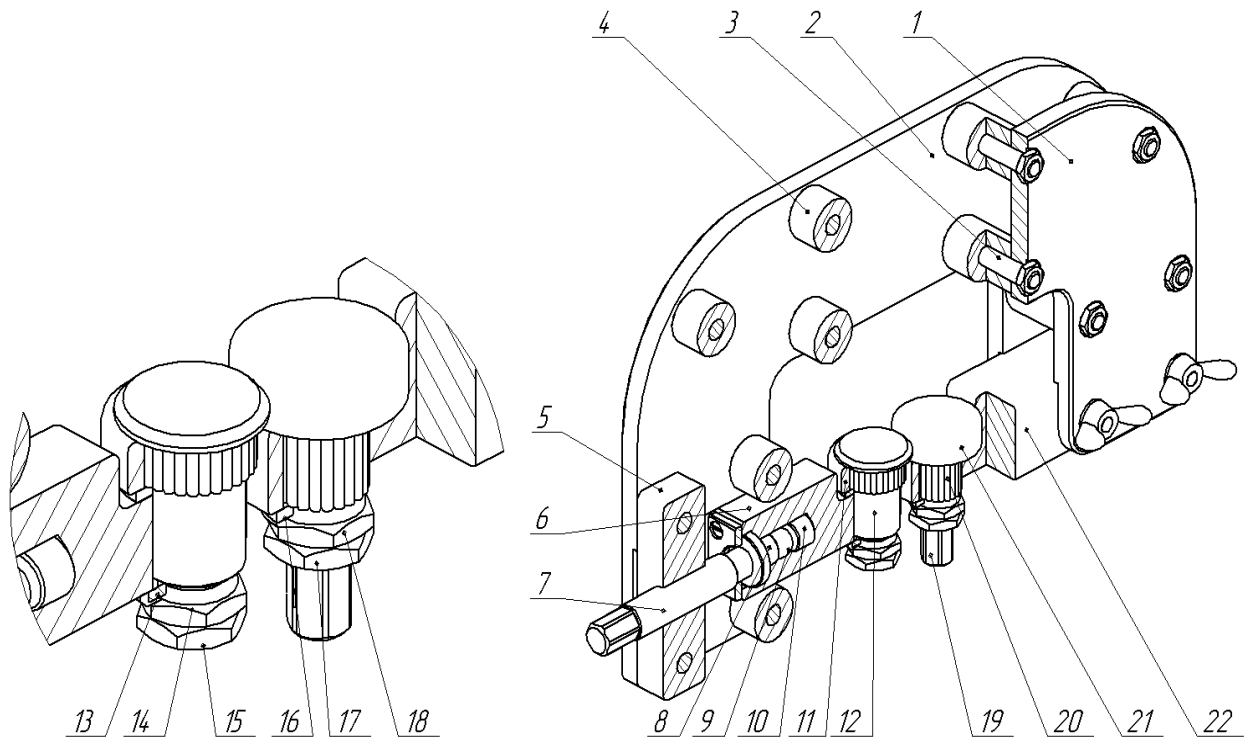


Рисунок 4.13 – Конструкция раскатника для обработки полотна

Обозначения:

1, 2 – пластина; 3 – болт; 4 – втулка; 5 – упор; 6 – ползун; 7 – винт нажимной; 8, 10 – втулка; 9 – шар; 11 – подшипник; 12 – ось; 13, 16 – шайба; 14, 15, 17, 18 – гайка; 19 – приводной валик; 20 – игольчатый подшипник; 21 – ролик; 22 – втулка.

Корпус раскатника выполнен в виде рамы состоящей из двух пластин 1, 2 из стали 30ХГСА, соединенных между собой болтами 3. Расстояние между пластинами обеспечивается втулками 4. Приводной ролик 21 крепится на валик 19. Вертикальное перемещение ограничивает крышка, а вращательное шпонка. Приводной валик 19 с помощью игольчатого подшипника 20 из отдельных игл крепится к втулке 22, которая присоединена к корпусу при помощи двух болтов. Ограничение вертикального перемещение приводного валика 19 выполняется при помощи двух гаек 17, 18 и специальной шайбы 16. Задача шайбы 16 уменьшать силу трения гайки 18 о корпус, возникающую при вращении приводного валика 19. Низ приводного валика 19 обточен под шестигранную головку для передачи вращающего момента с помощью ключа или специальной рукоятки. Приводной ролик 11 является подшипником, присоединенным к оси 12. Вертикальное перемещение ролика 11 ограничено сверху шляпкой оси, а снизу гайками 14, 15 и шайбой 13. Ось 12 крепится в ползуне 6, который обжат в пазах пластин 1, 2 корпуса. Давление осуществляется винтом 7, закрепленным в упоре 5 корпуса и упирающегося во втулку 8. Та упирается в шар 9, а он во втулку 10, которая и давит на ползун 6. Такая конструкция уменьшает силу трения при вращении нажимного винта 7. Свободный конец винта 7 обточен под ключ.

Общий вид раскатника для обработки полотна показан на рисунке 4.14.

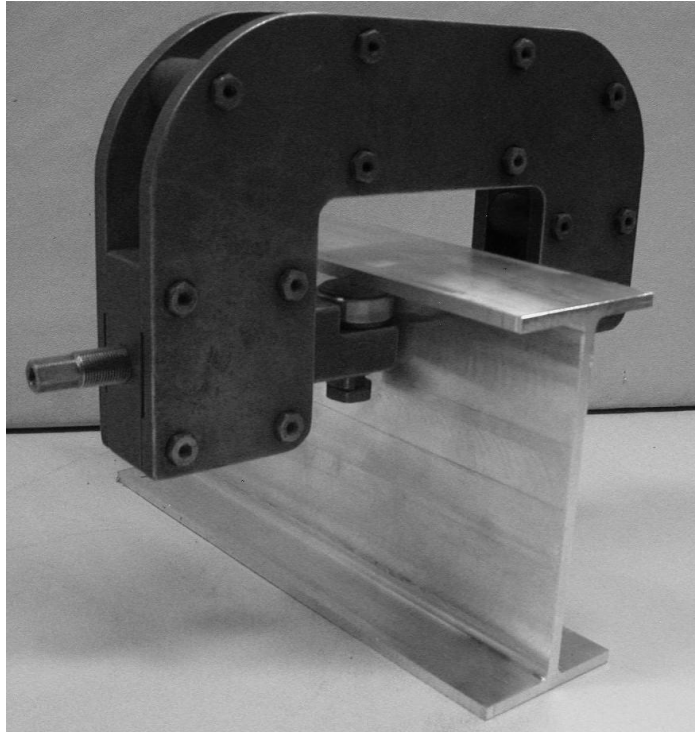


Рисунок 4.14 - Общий вид раскатника для обработки полотна

Раскатное устройство работает следующим образом. Раскатник устанавливается на детали, обжимая роликами 11, 21 обрабатываемый участок полотна. При помощи винта 7 регулируется расстояния между роликами 11, 21. Винт 7 затягивается динамометрического ключа на требуемый момент. К приводному валу 19 прикладывается усилие с помощью ключа для передвижения раскатника в необходимом направлении.

В ходе отработки конструкции данного раскатника было выявлено следующее:

1 достаточная жёсткость корпуса препятствует его деформации в процессе обработки во всем исследуемом диапазоне момента затяжки силового болта;

2 при перемещении раскатника вдоль обрабатываемого участка вращение приводного валика при помощи ключа на полный оборот затруднительно (требует постоянного перехвата). В этих целях удобно использовать ключ-трещетку.

Выводы по главе

1. Эффективным методом правки тонкостенных деталей типа балок КПС с целью устранения неплоскостности, саблевидности и закручивания является раскатка роликами, при этом в процессе обработки требуется соблюдение требований, предъявляемых к деталям, инструменту, персоналу и др. С этой целью были разработаны технологические рекомендации, описывающие общий порядок проведения выполняемых работ. Технологические рекомендации подразумевают два метода обработки: итерационный (поочередную обработку требуемых участков детали с постепенным увеличением момента затяжки силового болта раскатника до достижения требуемой формы) и метод с предварительными расчетами технологических параметрами обработки.

2. Разработанная методика позволяет определить режимы обработки, необходимые для получения требуемых значений двухосного изгиба тонкостенных деталей типа балок КПС с учетом требуемой величины закручивания в процессе правки раскаткой роликами. Моменты затяжки силового болта раскатника и стратегия обработки определяются после расчета комплекса необходимых продольных растягивающих сил и координат точек их приложения.

3. Для автоматизированного расчета создан программный модуль, способный при вводе геометрических и крутильных характеристик обрабатываемого участка детали, а также требуемых устранению деформаций вычислять требуемые силы с координатами точек их приложения.

4. При правке тонкостенных деталей типа балок КПС обработка должна быть комплексной, т.е. обработке должны подвергаться как ребра так и полотно детали. Для реализации этих целей был спроектирован и изготовлен ряд раскатных устройств (роликовых раскатников).

Общие выводы

1. В диссертационной работе решена задача управления технологическим процессом правки тонкостенных деталей типа балок КПС летательных аппаратов типа лонжеронов, рам, нервюр и т.д. раскаткой роликами с использованием основных зависимостей, которые связывают внутренние силовые факторы и образующиеся в процессе раскатки роликами деформации двухосного изгиба и закручивания.

2. В результате экспериментального исследования процесса правки раскаткой роликами:

- получены зависимости значения растягивающей силы, действующей на деталь при раскатке от момента затяжки силового болта. Данные зависимости могут быть использованы для практического определения режимов раскатки ребер;

- проведен анализ изменения толщины деформированного участка при обработке раскаткой роликами для материалов АК4, В95пчТ1, В95пчТ1, Д16чат, который создал предпосылки для установления возможности использования диапазона технологических параметров обработки с обеспечением при этом требуемой точности изготовления деталей;

3. Экспериментальная проверка разработанной математической модели проведена с использованием конструктивно-подобных образцов, по итогам которой сделан вывод об адекватности полученных теоретических и экспериментальных зависимостей.

4. На основе разработанной математической модели с использованием экспериментальных зависимостей внутренних силовых факторов от момента затяжки силового болта раскатного устройства предложена методика расчета технологических параметров процесса правки раскаткой роликами, включающая в себя методику расчета геометрических характеристик поперечных сечений деталей.

5. Создан программный модуль для автоматизированного расчета необходимого комплекса продольных растягивающих сил и координат точек их приложения с учетом требуемых деформаций.

6. На основе разработанной методики предложен способ формообразования (правки) деталей типа балок, заключающийся в последовательной раскатке ребер и полотна для получения (устранения) двухосного изгиба с обеспечением требуемого угла закручивания. Для реализации предложенного способа разработаны технологические рекомендации, позволяющие определять режимы и условия обработки при правке мало жестких деталей типа балок.

7. Для устранения изгиба в двух плоскостях и закручивания при обработке конструктивных элементов деталей типа балок КПС создан, в процессе экспериментальных исследований испытан и предложен для практического использования комплект переносного инструмента для правки деталей раскаткой роликами.

Список литературы

1. Козирук Г.М. Наследования при формировании остаточных напряжений // Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и режущего инструмента технологическими методами: Тез. докл. науч.-техн. конф. / Г.М. Козирук. – Иркутск, 1979. – С. 31–35.
2. Кочетов Н.Н. Оптимизация параметров механической обработки по критерию минимального коробления / Н.Н. Кочетов. - Авиационная промышленность, 1996. – № 3. – С. 53–54.
3. Маталин А.А. Коробление тонкостенных деталей в процессе их механической обработки // Технология и автоматизация машиностроения. / А.А. Маталин, И.П. Моисеев. – Киев: Техника, 1968. – Вып. 4. – С. 47–53.
4. Металловедение алюминия и его сплавов. Справоч. – М.: Металлургия, 1983. – 280 с.
5. Овсеенко А.Н. Повышение точности обработки маложестких деталей путем регулирования технологических деформаций // Поверхностный слой, точность и эксплуатационные детали машин и приборов. Материалы семинара. / А.Н. Овсеенко. – М., 1980.
6. Промптов А.И. Технологические остаточные напряжения. Лекции. / А.И. Промптов. – Иркутск, ИПИ, 1980. – 51 с.
7. Промптов А.И., Остаточные напряжения и деформации при обработке маложестких деталей / А.И. Промптов, Ю.И. Замащиков. - Вестник машиностроения, 1975. – № 4. – С. 42–45.
8. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. / В.В. Абрамов. – М.: Машиностроение, 1963. – 355 с.
9. Алюминий. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 664 с.
10. Ботвенко С.И., Распределение остаточных напряжений в деталях типа пластин с подкреплениями // Повышение эффективности технологических процессов механообработки: Сб. начн. тр. / С.И.

- Ботвенко, А.И. Промптов. – Иркутск: ИПИ, 1990. – С. 82–90.
11. Каргапольцев С.К. Термические остаточные напряжения в заготовках призматической формы // Технологическое и инструментальное обеспечение механообработки: Сб. научн. тр. / С.К. Каргапольцев, С.И. Ботвенко. – Иркутск: ИПИ, 1993. – С. 9–12.
 12. Шнейдер Г.П. Остаточные напряжения в полуфабрикатах и деталях из алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. / Г.П. Шнейдер. – 1983. – № 10. – С. 9–16.
 13. Козирук Г.М. Исследование остаточных напряжений и деформаций крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов : автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Г.М. Козирук. - КПИ. – Куйбышев, 1980. – 18 с.
 14. Колобнев И.Ф. Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов. / И.Ф. Колобнев, Н.А. Аристов. – М.: Металлургия, 1977. – 143 с.
 15. Леонов В.А. Исследование остаточных напряжений и деформаций при фрезеровании мало жестких деталей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.03 / В.А. Леонов. - КПИ. Куйбышев, 1975. – 29 с.
 16. Кравченко Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 132 с.
 17. Биргер И.А. Остаточные напряжения. / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
 18. Абибов А.Л. Технология самолётостроения. / А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов – М.: Машиностроение, 1982. – 551 с.
 19. Лысов М.И. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники. / М.И. Лысов, И.М. Закиров – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
 20. Рыковский Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом. / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин. – М.: Машиностроение,

1985. – 152 с.
21. Кононенко В.Г. Расчет основных технологических параметров гибки монолитных панелей методами локального деформирования ребер // Обработка металлов давлением в машиностроении. Вып. 16. / В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский. – 1980. – С. 6-10
 22. Кононенко В.Г., Исследование возможностей формоизменения монолитных панелей путём последовательного деформирования ребер // Проблемы машиностроения: Республиканский межведомственный сборник. Вып. 14. / В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский. – 1981. – С. 32-36
 23. Сикульский В.Т. Формоизменение монолитных панелей локальным деформированием ребер // Обработка металлов давлением в машиностроении. Вып. 18. / В.Т. Сикульский. – 1982. – С. 16-17
 24. Скосоренко К.Н. Формообразование длинномерных панелей двойной кривизны методом раскатки ребер жесткости и дробеударной обработки в авиастроении : автореф. дисс. канд. техн. наук / К.Н. Скосоренко М. - МАИ, 1990. – 16 с.
 25. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др.; под ред. Г.Н. Мельникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 640 с., ил.
 26. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
 27. Тимошенко С.П. Курс теории упругости / С.П. Тимошенко. - Киев: Наукова думка, 1972. – 508 с.
 28. Томлёнов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением / А.Д. Томлёнов. - М.: Машгиз, 1963.
 29. Ильюшин А.А. Пластичность. / А.А. Ильюшин – Гостехиздат, 1948. – 376 с.
 30. Кениг. Технологические аспекты высокоскоростной обработки / Кениг . - Industrie Enzeiger. – 1981. – 103, № 1/2. – с. 14 – 20.
 31. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в

- производстве самолетов / М.Н. Горбунов. - М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
32. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
33. Захаров В.А. Формообразование и правка длинномерных профильных деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / В.А. Захаров. - Иркутск, 1992. 21 с.
34. Викулова С.В. Повышение эффективности формообразования – упрочнения ребренных панелей: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / С.В. Викулова. - Иркутск, 2011. 20 с.
35. Перевалов А.А. Исследование процесса гибки с одновременной закруткой длинномерных деталей летательных аппаратов из прессованных профилей: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / А.А. Перевалов. - Комсомольск – на - Амуре, 2012. 24 с.
36. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.И. Лысов. - М.: Машиностроение, 1966. – 236 с
37. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей / А.Е. Пашков. - Иркутск, ИрГТУ, 2005. – 140 с.
38. Исаев А.И.. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое / А.И. Исаев, А.Н. Овсеенко. - Вестник машиностроения. – 1967. № 8. – С. 74-76.
39. Овсеенко А.Н. Технологические остаточные напряжения и методы их определения // Прогрессивные технологические процессы механосборочного производства в турбостроении: Сб. научн. тр. ЦНИИТМАШ. / А.Н. Овсеенко. – М., 1986. –Вып. № 196. – С. 9-15.
40. Прочность устойчивых колебаний. Справочник в 3х томах, том 1. Под ред. докт. техн. наук, профессора И.А. Биргера. – М., Машиностроение, 1968, 832 с.
41. Веричев С.Н. К анализу формообразования ребренных панелей при

- медленных режимах / С.Н. Веричев, Г.А. Раевская, Б.В. Горев. - Авиационная промышленность. №2, 1990. – С. 8-11
42. Дрозд М.С. Исследование влияния начальной напряженности деталей на эпюру остаточных напряжений после ППД // Тез. докл. семинара «Повышение точности и качества обработки деталей машин и приборов». / М.С. Дрозд, А.В. Федоров, С.Л. Лебский. – М., 1977 с. 23-29
43. Крысин В.Н. Технологическая подготовка авиационного производства / В.Н. Крысин. - М.: Машиностроение, 1984. 200 с.
44. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование напряжённого состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство // Металловедение и прочность металлов: Сб. научн. тр. / М.С. Дрозд, А.П. Осипенко. – Волгоград: ВПИ, 1977. – С. 58-68
45. Замашиков Ю.И. Об исследовании на образцах начальных и остаточных напряжений в поверхностном слое // Механика деформируемых сред в технологических процессах: Сб. научн. тр. / Ю.И. Замашиков. – Иркутск: ИрГТУ, 1997. – С. 44-48.
46. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. Государственное издательство физико-математической литературы. / В.З. Власов. – Москва, 1959. – 574 с.
47. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1986. – 560 с.
48. Александров А.В. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; Под ред. А.В. Александрова. – 3-е изд. испр. – М.: высш. шк., 2003. – 560 с.: ил.
49. Захаров В.А. Правка длинномерных профилей ППД // Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием: Тез. докл. на обл. научн. техн. конф. По секции № 2 «Динамические методы ППД». / В.А. Захаров. - Тольятти, 1989. – с. 66.

50. Дрозд М.С. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, С.Ю. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с., ил.
51. Богатов А.А. Пластичность металлов при знакопеременной деформации // Известия вузов / А.А. Богатов, Г.Д. Козлов, В.Л. Колмогоров. - Черная металлургия, 1978. №2, с 62 65.
52. Бояршинов М.Г. Комплекс программ для исследования процессов знакопеременного изгиба // Краевые задачи / М.Г. Бояршинов, М.Б. Гитман. - Пермь, 1988, С. 6- 10.
53. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. - М., Металлургия 1989. -456 с.
54. Гуров В. А. Разработка научных основ построения элементов торможения технологического припуска в вытяжных штампах, обеспечивающих экономию металла и повышение качества деталей : дисс. .канд. техн. наук. / В. А. Гуров. - М.: МАМИ. - 1990. - 127 с.
55. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. / М.Е. Зубцов. - Л.: Машиностроение. - 1980. -431 с.
56. Лыков А.В. Теория теплопроводности. / А.В. Лыков. - М., Высшая школа, 1967
57. Ковка и штамповка // Справочник. Т. 4. Листовая штамповка. - М.: Машиностроение. 1987. - 544 с.
58. Колмогоров В.Л. Некоторые актуальные задачи теории обработки металлов давлением. / В.Л. Колмогоров. - М., ВИЛС, 1979. 122 с.
59. Ершов В.И. Круговой изгиб идеально пластичного листа // Известия вузов. / В.И. Ершов. - Машиностроение. 1975. - №5. - С. 150 - 153.14.
60. Макклиток Ф. Деформация и разрушение материалов. / Ф. Макклиток, А. Аргон. - М.: изд. «Мир» - 1970.- С. 152 - 163.
61. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. / Н.Н. Малинин. - М.: Машиностроение. - 1975. - 399 с.
62. Матвеев А.Д. Пластический изгиб листа из неоднородного металла //

- Вопросы исследования прочности деталей машин / сб. научн. трудов каф. «Прикл. механика» под ред. акад. Холина Н.Н., вып. 5. / А.Д. Матвеев, Н.Ф. Шпунькин, С.А. Типалин. - М., МГАПИ, 1998. С. 32-38
63. Мошнин Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. / Е.Н. Мошнин. - М., Машгиз. -1959.-360 с.
64. Норицын Н.А. Определение удельных усилий при правке листовых заготовок в штампах / Н.А. Норицын, Ю.Г. Калпин, А.И. Бойченко. - Вестник машиностроения. 1967. - №3. - С. 63 - 66.
65. Пастернак Н.И. Исследование холодной и горячей правки металла. / Н.И. Пастернак. - М.: Машгиз, 1953.- 100 с.
66. Попов Е.А. О теории изгиба широкой полосы / Е.А. Попов. - Вестник машиностроения. 1963. - №10. - С. 58 - 60.
67. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. / Е.А. Попов. - М.: Машиностроение. - 1977. - 278 с.
68. Прудников М.И. Изгибающий момент при пластическом изгибе листа // Кузнечно-штамповочное производство. / М.И. Прудников. - 1961. - №4. - С. 32 – 35.
69. Рахштадт А.Г. Пружинные сплавы: свойства и термическая обработка. / А.Г. Рахштадт. - М., Metallurgia, 1965. 362 с.
70. Рябов В.А., Андрейченко В.А. Напряженно- деформированное состояние в тонкой пластине, подвергнутой гибке и поперечному сжатию. // депонир. ст. в информ. сб. «Экономика угольной промышленности» / В.А. Рябов, В.А. Андрейченко. - М., изд. ННЦ ГП-ИГД им. А.А.Скочинского, 1998. №1- 14 с.
71. Сахненко В.Л. Холодная гибка и правка деталей. / В.Л. Сахненко. - Киев, Машгиз. -1951,- 139 с.
72. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. / Г. А. Смирнов-Аляев. - Л.: Машиностроение. - 1978. - 368 с.
73. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при

- обработке давлением. / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. - М., Metallurgy, 1973. 224 с.
74. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. / Я.Б. Фридман. - М.: машиностроение. 1974. - 472 с.
75. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. - 608 с.
76. Хилл Р. Математическая теория пластичности. / Р. Хилл. - М.: ГИТТЛ. 1956. -407 с.
77. Ширшов А.А. Исследование пластического изгиба листа с учетом упрочнения // Известия вузов. / А.А. Ширшов. - Машиностроение. 1965. - №2.1. С. 65 173.
78. Энергетическая модель обратимых и необратимых деформаций/ Ю.А. Алюшин, С.А. Еленев, С.А. Кузнецов и др. М.Машиностроение, 1995. 128 с.
79. Яковлев С.С. Пластический изгиб полосы из анизотропного материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию // Известия вузов. / С.С. Яковлев, В.М. Арефьев. - Машиностроение. 1988. - №4. - С. 3 - 6.
80. Cottrell A. The mechanical properties of matter. / A. Cottrell. - Wiley, 1964, p. 338.
81. Hockett J.E. Large Strain Deformation of Polycrystalline Metals at Low Homologous Temperature//J. Mech. Phys. Solids. Vol. 23. / J.E. Hockett, O.D. Sherby. -1975. -P. 87.54.0rowan E., в сборнике: Internal Stresses and Fatigue in Metals, General.

Приложение 1

Листинг программного модуля для автоматизированного расчета необходимого комплекса продольных растягивающих сил и координат точек их приложения с учетом требуемых деформаций (язык программирования – Pascal).

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Buttons, Math;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Label4: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    Label6: TLabel;
    Edit5: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    BitBtn1: TBitBtn;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Edit7: TEdit;
    Label10: TLabel;
    Edit8: TEdit;
    Label11: TLabel;
    Edit9: TEdit;
    Label12: TLabel;
    Edit10: TEdit;
    Label13: TLabel;
    Edit11: TEdit;
    Label14: TLabel;
    Label15: TLabel;
    Edit12: TEdit;
    Label16: TLabel;
    Edit13: TEdit;
    Label17: TLabel;
    Edit14: TEdit;
    Label18: TLabel;
    Label19: TLabel;
    Edit15: TEdit;
    Edit16: TEdit;
```

Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
Edit17: TEdit;
Label22: TLabel;
Edit18: TEdit;
Label23: TLabel;
Label24: TLabel;
Edit19: TEdit;
Label25: TLabel;
Edit20: TEdit;
Label26: TLabel;
Edit21: TEdit;
Label27: TLabel;
Edit22: TEdit;
Label28: TLabel;
Label29: TLabel;
Edit23: TEdit;
Label30: TLabel;
Edit24: TEdit;
Label31: TLabel;
Edit25: TEdit;
Label32: TLabel;
Edit26: TEdit;
Label33: TLabel;
Label34: TLabel;
Edit27: TEdit;
Label35: TLabel;
Edit28: TEdit;
Label36: TLabel;
Edit29: TEdit;
Label37: TLabel;
Edit30: TEdit;
ComboBox1: TComboBox;
Label38: TLabel;
Label39: TLabel;
Label40: TLabel;
Edit31: TEdit;
Edit32: TEdit;
Label41: TLabel;
Label42: TLabel;
Edit33: TEdit;
Label43: TLabel;
Edit34: TEdit;
Label44: TLabel;
Edit35: TEdit;
Label45: TLabel;
Label46: TLabel;
Edit36: TEdit;
Label47: TLabel;
Label48: TLabel;
Edit37: TEdit;
Label49: TLabel;

```
Edit38: TEdit;
Label50: TLabel;
Label51: TLabel;
Edit39: TEdit;
Label52: TLabel;
Edit40: TEdit;
Label53: TLabel;
Label54: TLabel;
Edit41: TEdit;
Label55: TLabel;
Edit42: TEdit;
Label56: TLabel;
Edit43: TEdit;
Label57: TLabel;
Edit44: TEdit;
Label58: TLabel;
Edit45: TEdit;
Label59: TLabel;
Edit46: TEdit;
Label60: TLabel;
Label61: TLabel;
Edit47: TEdit;
Memo1: TMemo;
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
procedure ComboBox1Change(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
  Fx1 : Real;
  Fy1 : Real;
  Q1 : Real;
  Fx2 : Real;
  Fy2 : Real;
  Q2 : Real;
  a : Real;
  E : Real;
  G : Real;
  Jx : Real;
  Jy : Real;
  Jd : Real;
  Jw : Real;
  l : Real;
  B : Real;
  K1 : Real;
  K2 : Real;
  K3 : Real;
  xn1 : Real;
  yn1 : Real;
  wn1 : Real;
  pn1 : Real;
  xn2 : Real;
```

```

yn2 : Real;
wn2 : Real;
pn2 : Real;
xn3 : Real;
yn3 : Real;
wn3 : Real;
pn3 : Real;
xn4 : Real;
yn4 : Real;
wn4 : Real;
pn4 : Real;
xn5 : Real;
yn5 : Real;
wn5 : Real;
pn5 : Real;
xn6 : Real;
yn6 : Real;
wn6 : Real;
pn6 : Real;
P1p, P2p, P3p, P4p, P5p, P6p : Real;
X1p, X2p, X3p, X4p, X5p, X6p : Real;
Y1p, Y2p, Y3p, Y4p, Y5p, Y6p : Real;
Fx, Fy, Q : Real;
min1, min2, min3 : Real;
end;

```

```
var
```

```
Form1: TForm1;
```

```
implementation
```

```
{ $R *.dfm }
```

```
procedure TForm1.ComboBox1Change(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
case ComboBox1.ItemIndex of
```

```
0: begin
```

```
Label1.Show; Label2.Show; Label3.Show; Label4.Show; Label5.Show; Label6.Show;
```

```
Label7.Show; Label8.Show; Label9.Show; Label10.Show; Label11.Show; Label12.Show;
```

```
Label38.Show; Label39.Show; Label40.Show;
```

```
Edit1.Show; Edit2.Show; Edit3.Show; Edit4.Show; Edit5.Show; Edit6.Show;
```

```
Edit7.Show; Edit8.Show; Edit9.Show; Edit10.Show;
```

```
Edit31.Show; Edit32.Show;
```

```
end;
```

```
1: begin
```

```
Label1.Show; Label2.Show; Label3.Show; Label4.Show; Label5.Show; Label6.Show;
```

```
Label7.Show; Label8.Show; Label9.Show; Label10.Show; Label11.Show; Label12.Show;
```

```
Label13.Show;
```

```
Label14.Show; Label15.Show; Label16.Show; Label17.Show;
```

```
Label38.Show; Label39.Show; Label40.Show; Label41.Show;
```

```
Label42.Show; Label43.Show;
```

```
Edit1.Show; Edit2.Show; Edit3.Show; Edit4.Show; Edit5.Show; Edit6.Show;
```

```

Edit7.Show; Edit8.Show; Edit9.Show; Edit10.Show; Edit11.Show; Edit12.Show; Edit13.Show;
Edit14.Show;
Edit31.Show; Edit32.Show; Edit33.Show; Edit34.Show;
end;
2: begin
Label1.Show; Label2.Show; Label3.Show; Label4.Show; Label5.Show; Label6.Show;
Label7.Show; Label8.Show; Label9.Show; Label10.Show; Label11.Show; Label12.Show;
Label13.Show;
Label14.Show; Label15.Show; Label16.Show; Label17.Show; Label18.Show; Label19.Show;
Label20.Show;
Label21.Show; Label22.Show;
Label38.Show; Label39.Show; Label40.Show; Label41.Show;
Label42.Show; Label43.Show; Label44.Show; Label45.Show; Label46.Show;
Edit1.Show; Edit2.Show; Edit3.Show; Edit4.Show; Edit5.Show; Edit6.Show;
Edit7.Show; Edit8.Show; Edit9.Show; Edit10.Show; Edit11.Show; Edit12.Show; Edit13.Show;
Edit14.Show; Edit15.Show; Edit16.Show; Edit17.Show; Edit18.Show;
Edit31.Show; Edit32.Show; Edit33.Show; Edit34.Show; Edit35.Show; Edit36.Show;
end;
3: begin
Label1.Show; Label2.Show; Label3.Show; Label4.Show; Label5.Show; Label6.Show;
Label7.Show; Label8.Show; Label9.Show; Label10.Show; Label11.Show; Label12.Show;
Label13.Show;
Label14.Show; Label15.Show; Label16.Show; Label17.Show; Label18.Show; Label19.Show;
Label20.Show;
Label21.Show; Label22.Show; Label23.Show; Label24.Show; Label25.Show; Label26.Show;
Label27.Show;
Label38.Show; Label39.Show; Label40.Show; Label41.Show;
Label42.Show; Label43.Show; Label44.Show; Label45.Show; Label46.Show; Label47.Show;
Label48.Show;
Label49.Show;
Edit1.Show; Edit2.Show; Edit3.Show; Edit4.Show; Edit5.Show; Edit6.Show;
Edit7.Show; Edit8.Show; Edit9.Show; Edit10.Show; Edit11.Show; Edit12.Show; Edit13.Show;
Edit14.Show; Edit15.Show; Edit16.Show; Edit17.Show; Edit18.Show; Edit19.Show;
Edit20.Show;
Edit21.Show; Edit22.Show;
Edit31.Show; Edit32.Show; Edit33.Show; Edit34.Show; Edit35.Show; Edit36.Show;
Edit37.Show; Edit38.Show;
end;
4: begin
Label1.Show; Label2.Show; Label3.Show; Label4.Show; Label5.Show; Label6.Show;
Label7.Show; Label8.Show; Label9.Show; Label10.Show; Label11.Show; Label12.Show;
Label13.Show;
Label14.Show; Label15.Show; Label16.Show; Label17.Show; Label18.Show; Label19.Show;
Label20.Show;
Label21.Show; Label22.Show; Label23.Show; Label24.Show; Label25.Show; Label26.Show;
Label27.Show;
Label28.Show; Label29.Show; Label30.Show; Label31.Show; Label32.Show;
Label38.Show; Label39.Show; Label40.Show; Label41.Show;
Label42.Show; Label43.Show; Label44.Show; Label45.Show; Label46.Show; Label47.Show;
Label48.Show;
Label49.Show; Label50.Show; Label51.Show; Label52.Show;
Edit1.Show; Edit2.Show; Edit3.Show; Edit4.Show; Edit5.Show; Edit6.Show;

```

```

Edit7.Show; Edit8.Show; Edit9.Show; Edit10.Show; Edit11.Show; Edit12.Show; Edit13.Show;
Edit14.Show; Edit15.Show; Edit16.Show; Edit17.Show; Edit18.Show; Edit19.Show;
Edit20.Show;
Edit21.Show; Edit22.Show; Edit23.Show; Edit24.Show; Edit25.Show; Edit26.Show;
Edit31.Show; Edit32.Show; Edit33.Show; Edit34.Show; Edit35.Show; Edit36.Show;
Edit37.Show; Edit38.Show; Edit39.Show; Edit40.Show;
end;
5: begin
Label1.Show; Label2.Show; Label3.Show; Label4.Show; Label5.Show; Label6.Show;
Label7.Show; Label8.Show; Label9.Show; Label10.Show; Label11.Show; Label12.Show;
Label13.Show;
Label14.Show; Label15.Show; Label16.Show; Label17.Show; Label18.Show; Label19.Show;
Label20.Show;
Label21.Show; Label22.Show; Label23.Show; Label24.Show; Label25.Show; Label26.Show;
Label27.Show;
Label28.Show; Label29.Show; Label30.Show; Label31.Show; Label32.Show; Label33.Show;
Label34.Show; Label35.Show;
Label36.Show; Label37.Show; Label38.Show; Label39.Show; Label40.Show; Label41.Show;
Label42.Show; Label43.Show; Label44.Show; Label45.Show; Label46.Show; Label47.Show;
Label48.Show;
Label49.Show; Label50.Show; Label51.Show; Label52.Show; Label53.Show;
Label54.Show; Label55.Show;
Edit1.Show; Edit2.Show; Edit3.Show; Edit4.Show; Edit5.Show; Edit6.Show;
Edit7.Show; Edit8.Show; Edit9.Show; Edit10.Show; Edit11.Show; Edit12.Show; Edit13.Show;
Edit14.Show; Edit15.Show; Edit16.Show; Edit17.Show; Edit18.Show; Edit19.Show;
Edit20.Show;
Edit21.Show; Edit22.Show; Edit23.Show; Edit24.Show; Edit25.Show; Edit26.Show;
Edit27.Show;
Edit28.Show; Edit29.Show; Edit30.Show; Edit31.Show; Edit32.Show; Edit33.Show;
Edit34.Show; Edit35.Show; Edit36.Show;
Edit37.Show; Edit38.Show; Edit39.Show; Edit40.Show; Edit41.Show; Edit42.Show;
end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.BitBtn1Click(Sender: TObject);

```

```

var

```

```

  x1 : array [0..1000] of Real;
  y1 : array [0..1000] of Real;
  w1 : array [0..10000] of Real;
  p1 : array [0..1000] of Real;
  x2 : array [0..1000] of Real;
  y2 : array [0..1000] of Real;
  w2 : array [0..10000] of Real;
  p2 : array [0..1000] of Real;
  x3 : array [0..1000] of Real;
  y3 : array [0..1000] of Real;
  w3 : array [0..10000] of Real;
  p3 : array [0..1000] of Real;
  x4 : array [0..1000] of Real;
  y4 : array [0..1000] of Real;
  w4 : array [0..10000] of Real;

```

```

p4 : array [0..1000] of Real;
x5 : array [0..1000] of Real;
y5 : array [0..1000] of Real;
w5 : array [0..10000] of Real;
p5 : array [0..1000] of Real;
x6 : array [0..1000] of Real;
y6 : array [0..1000] of Real;
w6 : array [0..10000] of Real;
p6 : array [0..1000] of Real;
i1, j1, l1, f1, i2, j2, l2, f2, i3, j3, l3, f3 : Integer;
i4, j4, l4, f4, i5, j5, l5, f5, i6, i7, j6, l6, f6 : Integer;
minA, c11, c12, c13, c14, c21, c22, c23, c24, c31, c32, c33, c34, c41, c42, c43, c44, c51, c52,
c53, c54, c61, c62, c63, c64 : Real;
begin
BitBtn1.Hide;
Fx1 := StrToFloat(Trim(Edit4.Text));
Fy1 := StrToFloat(Trim(Edit5.Text));
Q1 := StrToFloat(Trim(Edit6.Text));
a := StrToFloat(Trim(Edit1.Text));
E := StrToFloat(Trim(Edit2.Text));
G := StrToFloat(Trim(Edit44.Text));
Jx := StrToFloat(Trim(Edit3.Text));
Jy := StrToFloat(Trim(Edit43.Text));
Jd := StrToFloat(Trim(Edit45.Text));
Jw := StrToFloat(Trim(Edit46.Text));
l := StrToFloat(Trim(Edit47.Text));
B := sqrt(G*Jd/(E*Jw));
K1 := sqr(a)/(8*E*Jx);
K2 := sqr(a)/(8*7*E*Jy);
K3 := 2*(cosh(B*1/2)-1)/(G*Jd); //????????????????????????????????
min1 := 100000; min2 := 100000; min3 := 100000;

case ComboBox1.ItemIndex of
5: begin
x1[0] := StrToFloat(Trim(Edit7.Text)); x2[0] := StrToFloat(Trim(Edit11.Text));
x3[0] := StrToFloat(Trim(Edit15.Text)); x4[0] := StrToFloat(Trim(Edit19.Text));
x5[0] := StrToFloat(Trim(Edit23.Text)); x6[0] := StrToFloat(Trim(Edit27.Text));
xn1 := StrToFloat(Trim(Edit8.Text)); xn2 := StrToFloat(Trim(Edit12.Text));
xn3 := StrToFloat(Trim(Edit16.Text)); xn4 := StrToFloat(Trim(Edit20.Text));
xn5 := StrToFloat(Trim(Edit24.Text)); xn6 := StrToFloat(Trim(Edit28.Text));
y1[0] := StrToFloat(Trim(Edit9.Text)); y2[0] := StrToFloat(Trim(Edit13.Text));
y3[0] := StrToFloat(Trim(Edit17.Text)); y4[0] := StrToFloat(Trim(Edit21.Text));
y5[0] := StrToFloat(Trim(Edit25.Text)); y6[0] := StrToFloat(Trim(Edit29.Text));
yn1 := StrToFloat(Trim(Edit10.Text)); yn2 := StrToFloat(Trim(Edit14.Text));
yn3 := StrToFloat(Trim(Edit18.Text)); yn4 := StrToFloat(Trim(Edit22.Text));
yn5 := StrToFloat(Trim(Edit26.Text)); yn6 := StrToFloat(Trim(Edit30.Text));
w1[0] := StrToFloat(Trim(Edit31.Text)); w2[0] := StrToFloat(Trim(Edit33.Text));
w3[0] := StrToFloat(Trim(Edit35.Text)); w4[0] := StrToFloat(Trim(Edit37.Text));
w5[0] := StrToFloat(Trim(Edit39.Text)); w6[0] := StrToFloat(Trim(Edit41.Text));
wn1 := StrToFloat(Trim(Edit32.Text)); wn2 := StrToFloat(Trim(Edit34.Text));
wn3 := StrToFloat(Trim(Edit36.Text)); wn4 := StrToFloat(Trim(Edit36.Text));
wn5 := StrToFloat(Trim(Edit40.Text)); wn6 := StrToFloat(Trim(Edit42.Text));

```


p1[0] := -0.01; p2[0] := -0.01; p3[0] := -0.01; p4[0] := -0.01; p5[0] := -0.01; p6[0] := -0.01;

```

for i6 := 1 to trunc (abs(xn6-x6[0])*999+1) do
begin
x6[i6] := x6[i6-1]+0.001;
for j6 := 1 to trunc (abs(yn6-y6[0])*999+1) do
begin
y6[j6] := y6[j6-1]+0.001;
for l6 := 1 to trunc (abs(wn6-w6[0])*9999+1) do
begin
w6[l6] := w6[l6-1]+0.0001;
for f6 :=1 to 999 do
begin
p6[f6] := p6[f6-1]+0.01;

```

```

for i5 := 1 to trunc (abs(xn5-x5[0])*999+1) do
begin
x5[i5] := x5[i5-1]+0.001;
for j5 := 1 to trunc (abs(yn5-y5[0])*999+1) do
begin
y5[j5] := y5[j5-1]+0.0001;
for l5 := 1 to trunc (abs(wn5-w5[0])*9999+1) do
begin
w5[l5] := w5[l5-1]+0.0001;
for f5 :=1 to 999 do
begin
p5[f5] := p5[f5-1]+0.01;

```

```

for i4 := 1 to trunc (abs(xn4-x4[0])*999+1) do
begin
x4[i4] := x4[i4-1]+0.001;
for j4 := 1 to trunc (abs(yn4-y4[0])*999+1) do
begin
y4[j4] := y4[j4-1]+0.0001;
for l4 := 1 to trunc (abs(wn4-w4[0])*9999+1) do
begin
w4[l4] := w4[l4-1]+0.0001;
for f4 :=1 to 999 do
begin
p4[f4] := p4[f4-1]+0.01;

```

```

for i3 := 1 to trunc (abs(xn3-x3[0])*999+1) do
begin
x3[i3] := x3[i3-1]+0.001;
for j3 := 1 to trunc (abs(yn3-y3[0])*999+1) do
begin
y3[j3] := y3[j3-1]+0.001;
for l3 := 1 to trunc (abs(wn3-w3[0])*9999+1) do
begin
w3[l3] := w3[l3-1]+0.0001;
for f3 :=1 to 999 do
begin

```

```

p3[f3] := p3[f3-1]+0.01;

for i2 := 1 to trunc (abs(xn2-x2[0])*999+1) do
begin
x2[i2] := x2[i2-1]+0.001;
for j2 := 1 to trunc (abs(yn2-y2[0])*999+1) do
begin
y2[j2] := y2[j2-1]+0.001;
for l2 := 1 to trunc (abs(wn2-w2[0])*9999+1) do
begin
w2[l2] := w2[l2-1]+0.0001;
for f2 :=1 to 999 do
begin
p2[f2] := p2[f2-1]+0.01;

for i1 := 1 to trunc (abs(xn1-x1[0])*999+1) do
begin
x1[i1] := x1[i1-1]+0.001;
for j1 := 1 to trunc (abs(yn1-y1[0])*999+1) do
begin
y1[j1] := y1[j1-1]+0.001;
for l1 := 1 to trunc (abs(wn1-w1[0])*9999+1) do
begin
w1[l1] := w1[l1-1]+0.0001;
for f1 :=1 to 999 do
begin
p1[f1] := p1[f1-1]+0.01;
if ((xn1 - x1[0]) = 0) then
begin
c13 := (abs(w1[l1]+x1[j1])-abs(x1[0]+w1[0]))/abs(y1[i1]-y1[0]); c14 := (abs(xn1+wn1)-
abs(x1[0]+w1[0]))/abs(yn1-y1[0]);
if (abs(c13-c14)/abs (c13) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := 0; P3p := 0; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := 0; X3p := 0; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := Y1[j1]; y2p := 0; Y3p := 0; Y4p := 0; Y5p := 0; Y6p := 0;
end;
end;
end;

if ((yn1 - y1[0]) = 0) then
begin
c13 := (abs(w1[l1]+y1[j1])-abs(y1[0]+w1[0]))/abs(x1[i1]-x1[0]); c14 := (abs(yn1+wn1)-
abs(y1[0]+w1[0]))/abs(xn1-x1[0]);
if (abs(c13 - c14)/abs(c13) < 0.01) then

```

```

begin
  Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]);
  Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]);
  Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]);
  if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
    begin
      min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
      P1p := p1[f1]; P2p := 0; P3p := 0; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
      X1p := x1[i1]; X2p := 0; X3p := 0; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
      Y1p := Y1[j1]; y2p := 0; Y3p := 0; Y4p := 0; Y5p := 0; Y6p := 0;
      end;
    end;
  end;

  if ((xn1 - x1[0]) <> 0) and ((yn1 - y1[0]) <> 0) then
    begin
      c11 := abs(x1[i1])/abs(y1[j1]); c12 := abs(xn1-x1[0])/abs(yn1-y1[0]); c13 :=
(abs(w1[l1]+y1[j1])-abs(y1[0]+w1[0]))/abs(x1[i1]-x1[0]); c14 := (abs(yn1+wn1)-
abs(y1[0]+w1[0]))/abs(xn1-x1[0]);
      if (abs(c11 - c12)/abs(c11) < 0.01) and (abs(c13 - c14)/abs(c13) < 0.01) then
        begin
          Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]);
          Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]);
          Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]);
          end;
          if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
            begin
              min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
              P1p := p1[f1]; P2p := 0; P3p := 0; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
              X1p := x1[i1]; X2p := 0; X3p := 0; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
              Y1p := Y1[j1]; y2p := 0; Y3p := 0; Y4p := 0; Y5p := 0; Y6p := 0;
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  if ((xn2 - x2[0]) = 0) then
    begin
      c23 := (abs(w2[l2]+x1[j2])-abs(x2[0]+w2[0]))/abs(y2[i2]-y2[0]); c24 := (abs(xn2+wn2)-
abs(x2[0]+w2[0]))/abs(yn2-y2[0]);
      if (abs(c23-c24)/abs(c23) < 0.01) then
        begin
          Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]);
          Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]);
          Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]);
          if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
            begin
              min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;

```

```

P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := 0; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := 0; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := Y1[j1]; Y2p := Y2[j2]; Y3p := 0; Y4p := 0; Y5p := 0; y6p := 0;
end;
end;
end;

if ((yn2 - y2[0]) = 0) then
begin
c23 := (abs(w2[l2]+y2[j2])-abs(y2[0]+w2[0]))/abs(x2[i2]-x2[0]); c24 := (abs(yn2+wn2)-
abs(y2[0]+w2[0]))/abs(xn2-x2[0]);
if (abs(c23-c24)/abs(c23) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := 0; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := 0; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := Y1[j1]; Y2p := Y2[j2]; Y3p := 0; Y4p := 0; Y5p := 0; y6p := 0;
end;
end;
end;

if ((xn2 - x2[0]) <> 0) and ((yn2 - y2[0]) <> 0) then
begin
c21 := abs(x2[i2])/abs(y2[j2]); c22 := abs(xn2-x2[0])/abs(yn2-y2[0]); c23 :=
(abs(w2[l2]+y2[j2])-abs(y2[0]+w2[0]))/abs(x2[i2]-x2[0]); c24 := (abs(yn2+wn2)-
abs(y2[0]+w2[0]))/abs(xn2-x2[0]);
if (abs(c21 - c22)/abs(c21) < 0.01) and (abs(c23 - c24)/abs(c23) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]);
end;
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := 0; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := 0; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := Y1[j1]; Y2p := Y2[j2]; Y3p := 0; Y4p := 0; Y5p := 0; y6p := 0;
end;
end;
end;
end;
end;
if ((xn3 - x3[0]) = 0) then

```

```

begin
c33 := (abs(w3[l3]+x3[j3])-abs(x3[0]+w3[0]))/abs(y3[i3]-y3[0]); c34 := (abs(xn3+wn3)-
abs(x3[0]+w3[0]))/abs(yn3-y3[0]);
  if (abs(c33-c34)/abs (c33) < 0.01) then
    begin
      Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]);
      Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]);
      Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]);
      if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
        begin
          min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
          P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
          X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
          Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := 0; Y5p := 0; Y6p := 0;
        end;
      end;
    end;

  if ((yn3 - y3[0]) = 0) then
    begin
c33 := (abs(w3[l3]+y3[j3])-abs(y3[0]+w3[0]))/abs(x3[i3]-x3[0]); c34 := (abs(yn3+wn3)-
abs(y3[0]+w3[0]))/abs(xn3-x3[0]);
      if (abs(c33-c34)/abs (c33) < 0.01) then
        begin
          Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]);
          Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]);
          Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]);
          if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
            begin
              min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
              P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
              X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
              Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := 0; Y5p := 0; Y6p := 0;
            end;
          end;
        end;

      if ((xn3 - x3[0]) <> 0) and ((yn3 - y3[0]) <> 0) then
        begin
c31 := abs(x3[i3])/abs(y3[j3]); c32 := abs(xn3-x3[0])/abs(yn3-y3[0]); c33 :=
(abs(w3[l3]+y3[j3])-abs(y3[0]+w3[0]))/abs(x3[i3]-x3[0]); c34 := (abs(yn3+wn3)-
abs(y3[0]+w3[0]))/abs(xn3-x3[0]);
          if (abs(c31 - c32)/abs(c31) < 0.01) and (abs(c33 - c34)/abs(c33) < 0.01) then
            begin
              Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]);
              Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]);
              Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]);
            end;
            if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then

```

```

begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := 0; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := 0; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := 0; Y5p := 0; Y6p := 0;
end;
end;
end;
end;

if ((xn4 - x4[0]) = 0) then
begin
c43 := (abs(w4[l4]+x4[j4])-abs(x4[0]+w4[0]))/abs(y4[i4]-y4[0]); c44 := (abs(xn4+wn4)-
abs(x4[0]+w4[0]))/abs(yn4-y4[0]);
if (abs(c43-c44)/abs (c43) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := 0; Y6p := 0;
end;
end;
end;

if ((yn4 - y4[0]) = 0) then
begin
c43 := (abs(w4[l4]+y4[j4])-abs(y4[0]+w4[0]))/abs(x4[i4]-x4[0]); c44 := (abs(yn4+wn4)-
abs(y4[0]+w4[0]))/abs(xn4-x4[0]);
if (abs(c43-c44)/abs (c43) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := 0; Y6p := 0;
end;
end;
end;

```

```

if ((xn4 - x4[0]) <> 0) and ((yn4 - y4[0]) <> 0) then
begin
c41 := abs(x4[i4])/abs(y4[j4]); c42 := abs(xn4-x4[0])/abs(yn4-y4[0]); c43 :=
(abs(w4[l4]+y4[j4])-abs(y4[0]+w4[0]))/abs(x4[i4]-x4[0]); c44 := (abs(yn4+wn4)-
abs(y4[0]+w4[0]))/abs(xn4-x4[0]);
if (abs(c41 - c42)/abs(c41) < 0.01) and (abs(c43 - c44)/abs(c43) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]);
end;
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := 0; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := 0; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := 0; Y6p := 0;
end;
end;
end;
end;
end;
if ((xn5 - x5[0]) = 0) then
begin
c53 := (abs(w5[l5]+x5[j5])-abs(x5[0]+w5[0]))/abs(y5[i5]-y5[0]); c54 := (abs(xn5+wn5)-
abs(x5[0]+w5[0]))/abs(yn5-y5[0]);
if (abs(c53-c54)/abs(c53) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]+p5[f5]*x5[i5]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]+p5[f5]*y5[j5]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]+p5[f5]*w5[l5]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := p5[f5]; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := x5[i5]; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := Y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := y5[j5]; Y6p := 0;
end;
end;
end;
end;
if ((yn5 - y5[0]) = 0) then
begin
c53 := (abs(w5[l5]+y5[j5])-abs(y5[0]+w5[0]))/abs(x5[i5]-x5[0]); c54 := (abs(yn5+wn5)-
abs(y5[0]+w5[0]))/abs(xn5-x5[0]);
if (abs(c53-c54)/abs(c53) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]+p5[f5]*x5[i5]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]+p5[f5]*y5[j5]);

```

```

Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]+p5[f5]*w5[l5]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := p5[f5]; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := x5[i5]; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := Y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := y5[j5]; Y6p := 0;
end;
end;
end;

if ((xn5 - x5[0]) <> 0) and ((yn5 - y5[0]) <> 0) then
begin
c51 := abs(x5[i5])/abs(y5[j5]); c52 := abs(xn5-x5[0])/abs(yn5-y5[0]); c53 :=
(abs(w5[l5]+y5[j5])-abs(y5[0]+w5[0]))/abs(x5[i5]-x5[0]); c54 := (abs(yn5+wn5)-
abs(y5[0]+w5[0]))/abs(xn5-x5[0]);
if (abs(c51 - c52)/abs(c51) < 0.01) and (abs(c53 - c54)/abs(c53) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]+p5[f5]*x5[i5]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]+p5[f5]*y5[j5]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]+p5[f5]*w5[l5]);
end;
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := p5[f5]; P6p := 0;
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := x5[i5]; X6p := 0;
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := Y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := y5[j5]; Y6p := 0;
end;
end;
end;
end;

if ((xn6 - x6[0]) = 0) then
begin
c63 := (abs(w6[l6]+x6[j6])-abs(x6[0]+w6[0]))/abs(y6[i6]-y6[0]); c64 := (abs(xn6+wn6)-
abs(x6[0]+w6[0]))/abs(yn6-y6[0]);
if (abs(c63-c64)/abs(c63) < 0.01) then
begin
Fx2 := K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]+p5[f5]*x5[i5]+p6[f6]*x6[i6]);
Fy2 := K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]+p5[f5]*y5[j5]+p6[f6]*y6[j6]);
Q2 := K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]+p5[f5]*w5[l5]+p6[f6]*w6[l6]);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin

```



```

min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := p5[f5]; P6p := p6[f6];
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := x5[i5]; X6p := x6[i6];
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := y5[j5]; Y6p := y6[j6];
end;
end;
end;

if ((yn6 - y6[0]) = 0) then
begin
c63 := (abs(w6[l6]+y6[j6])-abs(y6[0]+w6[0]))/abs(x6[i5]-x6[0]); c64 := (abs(yn6+wn6)-
abs(y6[0]+w6[0]))/abs(xn6-x6[0]);
if (abs(c63-c64)/abs(c63) < 0.01) then
begin
Fx2 :=
K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]+p5[f5]*x5[i5]+p6[f6]*x6[i6]);
Fy2 :=
K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]+p5[f5]*y5[j5]+p6[f6]*y6[j6]);
Q2 :=
K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]+p5[f5]*w5[l5]+p6[f6]*w6[l6]
);
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := p5[f5]; P6p := p6[f6];
X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := x5[i5]; X6p := x6[i6];
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := y5[j5]; Y6p := y6[j6];
end;
end;
end;

if ((xn6 - x6[0]) <> 0) and ((yn6 - y6[0]) <> 0) then
begin
c61 := abs(x6[i6])/abs(y6[j6]); c62 := abs(xn6-x6[0])/abs(yn6-y6[0]); c63 :=
(abs(w6[l5]+y6[j6])-abs(y6[0]+w6[0]))/abs(x6[i6]-x6[0]); c64 := (abs(yn6+wn6)-
abs(y6[0]+w6[0]))/abs(xn6-x6[0]);
if (abs(c61 - c62)/abs(c61) < 0.01) and (abs(c63 - c64)/abs(c63) < 0.01) then
begin
Fx2 :=
K1*(p1[f1]*x1[i1]+p2[f2]*x2[i2]+p3[f3]*x3[i3]+p4[f4]*x4[i4]+p5[f5]*x5[i5]+p6[f6]*x6[i6]);
Fy2 :=
K2*(p1[f1]*y1[j1]+p2[f2]*y2[j2]+p3[f3]*y3[j3]+p4[f4]*y4[j4]+p5[f5]*y5[j5]+p6[f6]*y6[j6]);
Q2 :=
K3*(p1[f1]*w1[l1]+p2[f2]*w2[l2]+p3[f3]*w3[l3]+p4[f4]*w4[l4]+p5[f5]*w5[l5]+p6[f6]*w6[l6]
);
end;
if (abs(Fx2-Fx1) <= abs(min1)) and (abs(Fy2-Fy1) <= abs(min2)) and (abs(Q2-Q1) <=
abs(min3)) then
begin
min1 := Fx2-Fx1; min2 := Fy2-Fy1; min3 := Q2-Q1; Fx := Fx2; Fy := Fy2; Q := Q2;
P1p := p1[f1]; P2p := p2[f2]; P3p := p3[f3]; P4p := p4[f4]; P5p := p5[f5]; P6p := p6[f6];

```

```

X1p := x1[i1]; X2p := x2[i2]; X3p := x3[i3]; X4p := x4[i4]; X5p := x5[i5]; X6p := x6[i6];
Y1p := y1[j1]; Y2p := y2[j2]; Y3p := y3[j3]; Y4p := y4[j4]; Y5p := y5[j5]; Y6p := y6[j6];
end;
end;
end;
end;

Memo1.Lines.Add('Результаты:');
Memo1.Lines.Add('P1= ' + FloatToStr(P1p)+ ' X1= '+FloatToStr(X1p)+' Y1=
'+FloatToStr(Y1p));
Memo1.Lines.Add('P2= ' + FloatToStr(P2p)+ ' X2= '+FloatToStr(X2p)+' Y2=
'+FloatToStr(Y2p));
Memo1.Lines.Add('P3= ' + FloatToStr(P3p)+ ' X3= '+FloatToStr(X3p)+' Y3=
'+FloatToStr(Y3p));
Memo1.Lines.Add('P4= ' + FloatToStr(P4p)+ ' X4= '+FloatToStr(X4p)+' Y4=
'+FloatToStr(Y4p));
Memo1.Lines.Add('P5= ' + FloatToStr(P5p)+ ' X5= '+FloatToStr(X5p)+' Y5=
'+FloatToStr(Y5p));
Memo1.Lines.Add('P6= ' + FloatToStr(P6p)+ ' X6= '+FloatToStr(X6p)+' Y6=
'+FloatToStr(Y6p));
Memo1.Lines.Add('Расчетный прогиб Fx: ' + FloatToStr(Fx));
Memo1.Lines.Add('Расчетный прогиб Fy: ' + FloatToStr(Fy));
Memo1.Lines.Add('Расчетный угол закручивания Q : ' + FloatToStr(Q));
Memo1.Lines.Add('Остаточный прогиб Fx : ' + FloatToStr(min1));
Memo1.Lines.Add('Остаточный прогиб Fy: : ' + FloatToStr(min2));
Memo1.Lines.Add('Остаточный угол закручивания Q : ' + FloatToStr(min3));

end;
end;
end;
end.

```

Приложение 2