

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет Материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН
Рецензент

А.Б. Кулаков

“ _____ ” _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____ В.Г.Шеркунов

“ _____ ” _____ 2017 г.

Тема работы: «Исследование конструкции прокатной клетки 150/750 с целью получения прямоугольных труб по 8 качеству точности»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-15..04.02-2017-00.00.00 ПЗ**

Руководитель работы:
В.С. Нагорнов _____ / /

Автор работы
А.П. Тихомиров _____ /

студент группы П-245

АННОТАЦИЯ

Тихомиров А.П. Исследование конструкции прокатной клетки 150/150 с целью получения прямоугольных профилей по 8 качеству точности. – Челябинск: ЮУрГУ, П; 2017, 63с. 23 ил., библиогр. список – 12 наименов., 5 листов чертежей формата 4хА1, 1хА4.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы, в рамках решения задачи получения прямоугольных труб на стане 150/150 по 8 качеству точности, разработано устройство для измерения сплющивания валков, проведён сравнительный анализ аналитических и экспериментальных данных.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Анализ патентно-информационных материалов по точности формовки труб прямоугольного поперечного сечения	5
1.1 Анализ способ получения прямоугольных труб	5
1.2 Анализ конструкции оборудования	12
1.3 Пути повышения точности прямоугольных труб.....	21
2. Разработка устройств и приспособления для исследования контактной жесткости.....	26
2.1 Методика проведения эксперимента	26
3. Исследование контактной жесткости	31
3.1 Аналитическое исследование	31
3.2 Экспериментальное исследование	37
4. Исследование точности продукции полученной на стане 150/150.....	43
5. Анализ результатов исследования	45
Заключение	48
Библиографический список	49
ПРИЛОЖЕНИЕ А	51

ВВЕДЕНИЕ

Профильные трубы используются во многих отраслях промышленности. Существует множество профильных труб с различными конфигурациями форм поперечного сечения. Вместе с тем, постоянно увеличивается сферы их применения и растет потребность в изготовлении точных форм профильных труб. Поэтому актуальным остается вопрос изучения процессов и машин производства профильных труб с целью их совершенствования. Для производства такого широкого диапазона сортамента требуется создание технологий и машин. Для реализации каждого из способов разработано специальное оборудование.

Современный рынок предъявляет высокие требования к качеству трубной продукции, требует постоянное создание новых видов форм при повышении уровня производительности и энергоэффективности процессов производства. В связи с широким использованием профильных труб и требованиями рынка, актуальными моментами являются установление влияния различных параметров на результат формоизменения и сам процесс профилирования, а также совершенствование действующего производства.

В первой главе данной работы выполнен анализ патентно-информационных материалов по точности формовки труб прямоугольного поперечного сечения, способ их получения и анализ конструкции оборудования. Во второй главе разработано устройство для исследования точности продукции. В третьей главе рассмотрена аналитическая и экспериментальная методика исследования контактной жесткости. В четвертой главе провели анализ полученной продукции на стане 150/150. В пятой главе выполнено сравнения результатов теоретических исследований с результатами эксперимента.

1. АНАЛИЗ ПАТЕНТНО-ИНФОРМАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТОЧНОСТИ ФОРМОВКИ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

1.1 Анализ способ получения прямоугольных труб

Выполним анализ способов и устройств для производства профильной трубной продукции с целью установления классификации и выявления достоинств и недостатков, что в дальнейшем позволит оценить и дать рекомендации по оптимизации и определения рационального способов производства.

Профильные трубы применяются во всех областях промышленности, что позволяет повысить прочностные характеристики отдельных узлов и машин в целом, облегчить их и, следовательно, сэкономить металл.

Профилировать трубы можно:

— волочением в кольцах как без, так и на оправке, а также в разных не приводных роликовых волоках (трубы квадратного, прямоугольного, овального и других сечений);

— холодной (теплой) прокаткой на станах (трубы с внутренним или наружным продольным или спиральным оребрением, круглые с внутренним профилем канала, с наружным профилем и с внутренним круглым каналом, многогранные с высокими требованиями к точности размеров, конические и др.);

— прокаткой в непрерывном стане (трубы многогранные, овальные и др.);

— горячей пилигримовой прокаткой (штанги бурильные, квадратного и прямоугольного сечений);

— прессованием (трубы толстостенные внутренним диаметром ≥ 20 мм);

— ротационной ковкой (трубы конические, ступенчатые многогранные и др.).

Заготовкой для изготовления профильных труб могут служить как бесшовные, так и электросварные трубы из разных сталей и сплавов. В некоторых случаях в качестве заготовки при профилировании служит профильная труба. Например, коническую трубу круглого поперечного сечения можно спрофилировать в коническую квадратного, прямоугольного, овального и другого сечения.

Волочение профильных труб.

Волочение – способ обработки металлов давлением, при котором заготовка протягивается через канал волочильного инструмента, поперечное сечение которого меньше поперечного сечения заготовки. В результате происходит уменьшение поперечного сечения изделия и увеличение его длины.

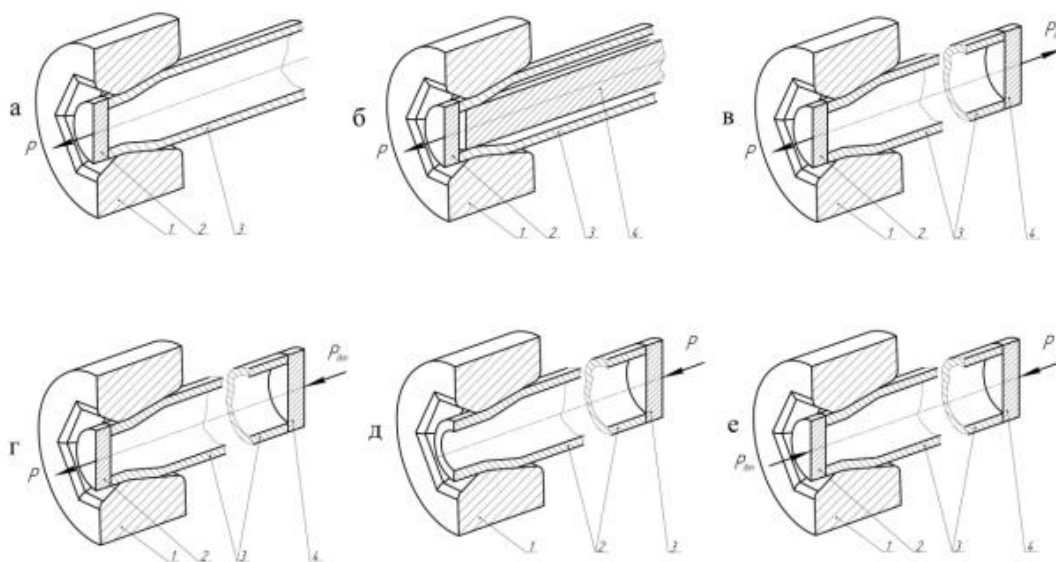


Рисунок 1.1 – Схема очага деформации процесса профилирования[1]

а – волочение; б – оправочное волочение; в – волочение с противонатяжением; г – волочение с проталкивающим усилием; д – проталкивание; е – проталкивание с опорой; 1 – волока; 2 – тяга; 3 – труба; 4 – контр тяга; P – усилие обработки; P_{доп} – дополнительная нагрузка.

Профилирование труб может осуществляться как при помощи волоки, так и сочетанием волоки и оправки. При помощи волочения получают широкий спектр

профильных труб: постоянной или переменной по периметру толщиной стенки, с постоянным и переменным по длине трубы сечением, ребристые. Процесс профилирования волочением заключается в том, что происходит преобразование круглой заготовки в трубу с заданной формой поперечного сечения.

Преимущества волочения состоят в том, что оно обеспечивает точные размеры изделия и упрочняет металл. Кроме того, волочением можно производить изделия с высокой чистотой поверхности. Для проведения волочения не требуется нагрев, затраты сравнительно низкие. Этот процесс имеет высокую производительность и возможность автоматизации. Возможен переход к производству труб другого сортамента при замене волоки. Недостатком волочения является необходимость использования специально подобранных смазок. В некоторых случаях, при многопереходном процессе волочения, технологический процесс весьма сложен, поскольку требуется повторное нанесение смазок, создание забивки для захвата трубы, а если труба приобрела наклёп, то необходимо проведение отжига и последующие операции по подготовке поверхности трубы. Высокие требования к твердости и износостойкости рабочего инструмента приводят к удорожанию волочильной продукции. Процесс волочения классифицируются по следующим отличительным признакам: вид рабочего инструмента; вид движения рабочего инструмента; вид используемой оправки или ее отсутствие; чистота обработки; количество переходов; наличие или отсутствие нагрева заготовки; режим обработки и способ приложения нагрузки; вид применяемой смазки.

В качестве машин для волочения широкое распространение получили непрерывные калибровочные станы [2]. По характеру работы прямолинейные станы можно разделить на периодические, полунепрерывные и непрерывные. По количеству параллельно обрабатываемых труб разделили на одноручьевые и многоручьевые станы. Прямолинейные станы для производства труб можно разделить на две группы, различающиеся по длине заготовок. К первой группе относятся заготовки ограниченной длины, ко второй не ограниченной длины. По

способу захвата и подачи трубы в рабочий инструмент станы делятся на станы тракового типа и на станы кареточного типа.

В станах кареточного типа труба захватывается клиновыми плашками, расположенными в корпусе каретки. Так, например, среди станов кареточного типа для производства труб из заготовок ограниченной длины известна конструкция согласно патенту США №US2002/0189314A1 от 12.12.2002 для одноручьевого волочения [3]. В патентах Китая №CN2899993Y от 16.05.2007 [4], и Японии №JP2002-301513A от 15.10.2002 [5] представлены конструкции подобных станов, но для многоручьевого волочения.

На рисунке 1.1 представлена схема волочильного одноручьевого прямолинейного стана тракового типа для непрерывного волочения труб бесконечной длины [2]. При помощи подобного оборудования можно как волочить, так и проталкивать заготовку через волоку. Если разработать и установить аналогичный траковый механизм перед волокой, то можно будет реализовать различные схемы процесса с приложением возможных вариантов дополнительного усилия, например, волочение с противонатяжением, проталкивание с дополнительным подпором и прочие.

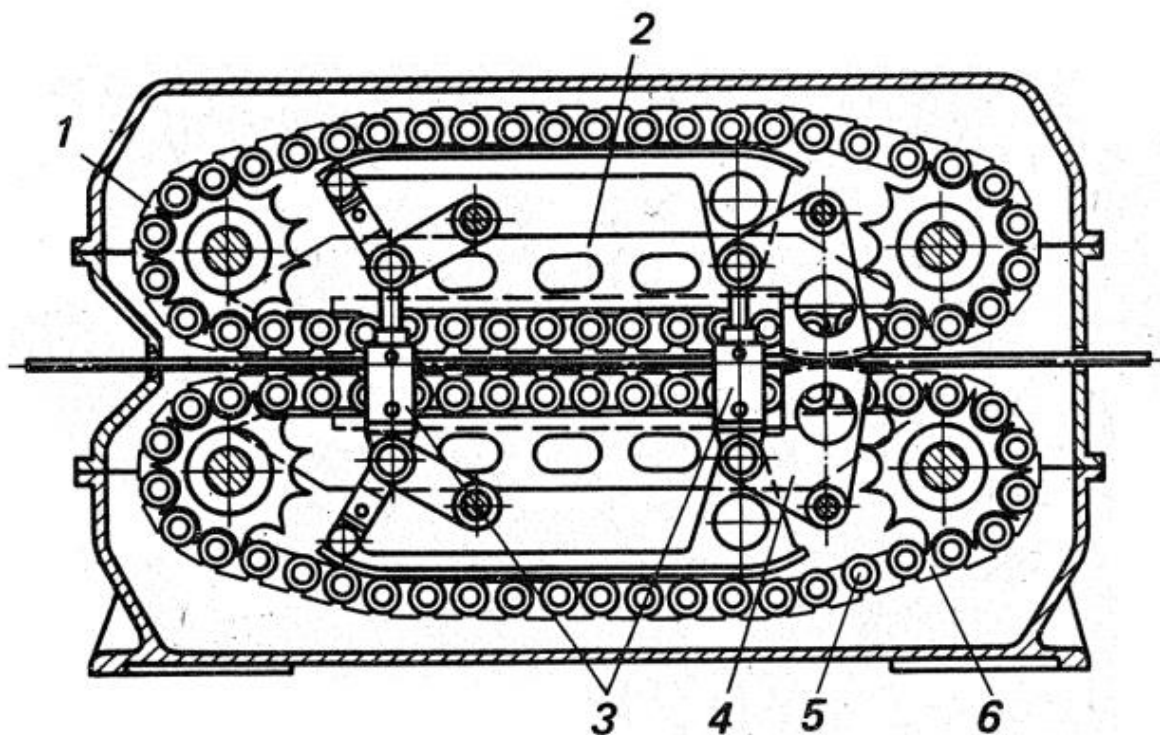


Рисунок 1.2 – Схема тракового стана

1 – тяговая цепь; 2 – прижимные балки; 3 – гидроцилиндры; 4 – зубчатые сегменты; 5 – ролики; 6 – плашки.

Прокатка профильных труб.

Прокатка – процесс пластической деформации тел между вращающимися приводными валками, причем некоторая часть валков клетки может быть холостой. Прокатку используют не только для изготовления изделий требуемой формы, но также для того чтобы изделие приобрело требуемую структуру и свойства.

Среди преимуществ процесса прокатки выделим следующие: в процессе обработки в очаге деформации складывается благоприятная схема напряженно-деформированного состояния происходит всестороннее сжатие металла, в следствии чего происходит значительное повышение пластичности материала, что позволяет деформировать его с высокими степенью деформации без разрушения; высокая точность формы изделия после обработки.

К недостаткам процесса относятся: высокие требования к качеству поверхности, точности формы и твердости рабочего инструмента, что удорожает реализацию процесса

Прессование профильных труб.

Метод обработки прессованием заключается в придании металлу формы и размеров при выдавливании его через отверстие матрицы. Процессы и машины по реализации прессования рассмотрены в работах [6]. Прессуют профильные трубы из цветных металлов и сплавов. К металлу, из которого изготавливают контейнер и матрица, предъявляются высокие требования к жаростойкости, сопротивлению давлению, и низкой адгезии к прессуемому материалу. Поэтому их изготавливают из высоколегированной стали, что сказывается на повышении стоимости процесса.

К достоинствам процесса прессования относятся: в процессе обработки в очаге деформации складывается благоприятная схема напряженно-деформированного состояния происходит всесторонней сжатие металла, в следствии чего происходит существенное повышение пластичности материала, что позволяет деформировать

его с высокими степенью деформации без разрушения; широкий диапазон типоразмеров производимых изделий из различных материалов. Мобильность при замене типоразмера изделия; точность размеров и качество поверхностей, а также отсутствие у изделия внутренних дефектов.

Недочетами прессования являются: низкая скорость процесса производства и высокая энергоемкость.

В итоге проведенного анализа видно, что существует много способов и машин для производства трубной продукции. При выборе способа и устройства нужно учитывать множество факторов и отталкиваться от стоящих задач. При производстве труб имеет значение особенности формы и размеров поперечного сечения. Также нужно учитывать серийность производства. Данный обзор позволит облегчить выбор и принять рациональное решение при поиске параметров машин и способов, которое позволит достигнуть поставленных целей.

1.2 Анализ конструкции оборудования

Патентно-информационный анализ проведен по следующим источникам:

Монографии

информационные издания ВИНТИ по машиностроению

периодические публикации по машиностроению

патентные материалы

научно-техническая литература.

Рассмотрены патенты таких стран как:

Германия

Россия

Китай

США

14.04-15Д.179. Повышение равномерности деформации и минимизация шероховатости внутренней поверхности при волочении прямоугольных труб. Improving the Deformation Uniformity and Minimizing the Inner Surface Roughness in Rectangular Tube Drawing Process / Xu Wu-Jiao, Wang Kai-Qing, Zou Ming-Ping, Wang Peng-Cheng // J. Mater. Eng. and Perform. - 2013. - 22, № 4. - С. 974-982. - Англ.

Спроектированы волока и оправка для повышения качества алюминиевых прямоугольных труб.

09.07-15Д.157. Волочение прямоугольных труб с наложением подпора или противонапряжения / Паршин С. В. // Пр-во проката. - 2008. - № 12. - С. 13-16. - Рус.

Показано, что если целью профилирования является получение профилей, имеющих повышенную точность, а также снижение технологических усилий, то следует использовать способы волочения, а также волочения с противонапряжением. Применение этих способов для профилирования малопластичных материалов, особенно высокоуглеродистых легированных сталей и титановых сплавов является затруднительным или вовсе невозможным. В этом случае следует применять методы волочения с подпором, проталкивание, и проталкивание с противодавлением на переднем конце трубы, что при рациональном выборе формы канала и точном определении соответствующих периметров трубной заготовки и канала волокна и позволяет повысить надежность готовой продукции или получить принципиальную возможность ее изготовления. Библиограф. 4.

09.09-15Д.171П. Способ и линия для изготовления труб прямоугольного профиля : Пат. 2354475 Россия, МПКВ 21 С 37/15 (2006.01)%В 23 D 21/04 (2006.01) / Пасечник Н. В., Буров А. С., Подольская Е. В., Чекулаев А. В.; ОАО Акционер. холдинг. комп. Всерос. н.-и. и проектн.-конструкт. ин-т металлургич. машиностр. - N 2007119329/02; Заявл. 24.05.2007; Опубл. 10.05.2009

Изобретение относится к изготовлению труб прямоугольного профиля. Способ включает образование цилиндрической трубы, формирование профиля и отрезку, при этом цилиндрическую трубу разрезают многолезцовым трубоотрезным станком при зажиме ее с двух сторон от линии реза, причем конец трубы для удержания ее во время разрезания зажимают линейками с гидроприводом, затем передний конец трубы для задачи в профилировочные валки обжимают линейками до получения профиля, который соответствует готовому изделию.

Способ и линия для изготовления труб прямоугольных профилей позволяет повысить технико-экономические показатели стана. Многорезцовый трубоотрезной станок при разрезании высокопрочных труб с применением твердосплавных резцов значительно снизит простой стана, причем использование резцов одного размера облегчит их замену, а фаска на круглой трубе сохранится и на прямоугольном профиле.

13.01-15Д.144. Совершенствование процесса получения прямоугольных труб с большим отношением длин граней профиля / Паршин С. В. // Пр-во проката. - 2012. - № 5. - С. 34-35. - Рус.

Рассмотрен процесс многопереходного волочения прямоугольных труб с большим отношением длин граней профиля. Путем моделирования с использованием метода конечных элементов получено распределение интенсивности напряжений и предела текучести на сдвиг по сечению деформируемого профиля. Показаны преимущества данного способа изготовления прямоугольных труб.

10.04-14В.107П. Способ изготовления изделий с изогнутой и ступенчатой осью из полых заготовок : Пат. 2329109 Россия, МПКВ 21 D 9/00 (2006.01)%В 21 С 37/29 (2006.01) / Матвеев А. С., Грецов А. Н., Бекетов В. Н., Шестаков В. С.; ООО Грант. - N 2006106861/02; Заявл. 06.03.2006; Оpubл. 20.07.2008

Согласно патентуемому способу осуществляют штамповку трубных прямоугольных или квадратных в сечении заготовок путем заполнения полостей заготовок наполнителем и их герметизации осевыми пуансонами, создания в полостях заготовок высокого гидростатического давления наполнителя и перемещения срединных частей заготовок или их концевых участков в направлении, перпендикулярном их первоначальным осям. Штампуют одновременно несколько заготовок, которые устанавливают перед штамповкой

параллельно друг другу с контактом боковой поверхности последующей заготовки с боковой поверхностью предыдущей заготовки и контактом крайних заготовок со стенками полуматрицы. Ил. 7.

В результате обзора для последующего рассмотрения выбраны следующие материалы:

1) Универсальная четырехвалковая клеть для профилирования труб В21в31/ №2302305.

Технической особенностью изобретения является уменьшение трудозатрат за счет упрощения и улучшения настройки валков универсальной клетки, а также повышение качества изделий и расширение технических возможностей такой клетки.

Для решения указанной задачи у предлагаемой универсальной четырехвалковой клетки, содержащей расположенные в одной диаметральной плоскости и установленные на Г-образных опорах, стянутых на входе и выходе из клетки кольцами, подушки с валками, с возможностью перемещения в этой плоскости пар цилиндрических горизонтальных и вертикальных валков заданных диаметров, образующих калибр с изменяемой конфигурацией и площадью его сечения, горизонтальные валки выполнены приводными и нижний из них имеет возможность перемещения в поперечном направлении к оси профилирования, при этом в опорах установлены с взаимно противоположных сторон нажимные винты для перемещения подушек-кассет и упругие элементы, которые у горизонтальных валков расположены со стороны привода, в качестве упругих элементов использованы цилиндрические пружины сжатия, установленные между наружной гранью опор и подушками, и охватывающие у горизонтальных валков приводную часть их оси.

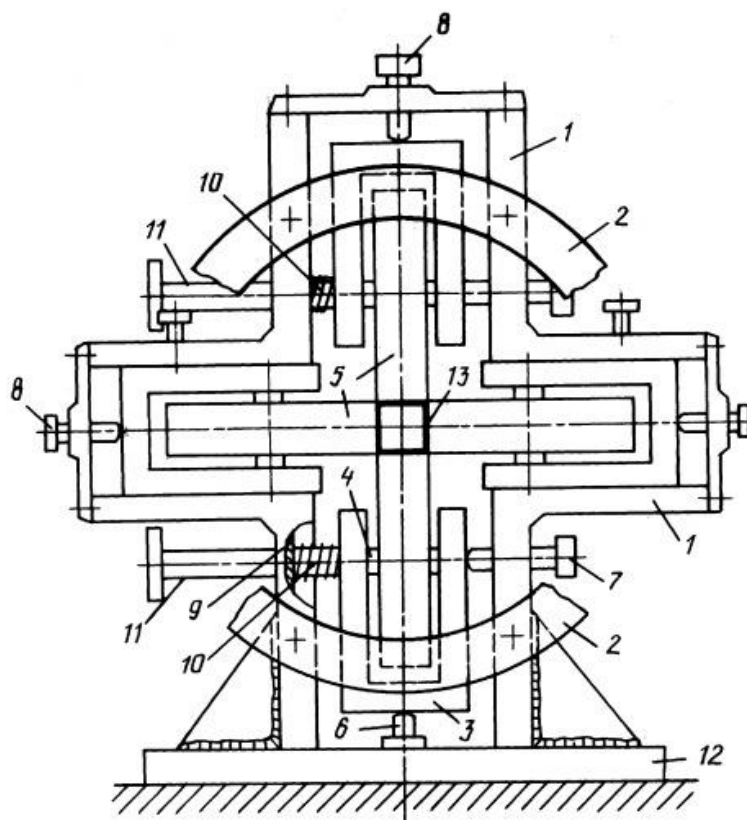


Рисунок 1.3 – Универсальная четырехвалковая клеть для профилирования труб, патент РФ №2302305:

1 – опора; 2 – кольцо; 3 – пошука-кассета; 4 – ось; 5 – валок; 6 – регулировочный вертикальный винт; 7 – нажимной винт; 8 – регулировочный винт; 9 – грань; 10 – цилиндрические пружины; 11 – приводная часть горизонтальных валков; 12 – опорная плита

В Г-образных опорах 1, стянутых на входе и выходе из клетки кольцами 2 (показана только часть одного кольца), установлены подушки-кассеты 3. В опорах-кассетах на осях 4 установлены формующие цилиндрические валки 5, причем опора нижнего горизонтального валка опирается на регулировочный вертикальный винт 6.

Для перемещения горизонтальных валков по горизонтали и вертикальных валков по вертикали в опорах расположены нажимные винты 7, упирающиеся в соответствующие грани подушек 3; кроме того, для регулирования положения этих подушек при настройке клетки имеются регулировочные винты 8, аналогичные тем, что установлены в известной универсальной клетки.

Между наружными гранями 9 опор и подушками 3 расположены на стороне, противоположной нажимным винтам 7, упругие элементы (цилиндрическими пружины) 10, охватывающими у горизонтальных валков приводную часть 11 их осей 4. Клеть установлена на опорной плите 12.

2) Прокатная клеть В21В13/10 №2204448

Используется для производства сортового проката, преимущественно фасонного профиля высокой точности. Прокатная клеть содержит станины, связанные между собой и образующие корпус, в котором располагаются подушки, в которых установлены две пары взаимно перпендикулярных рабочих валков, оси которых расположены в разных плоскостях на расстоянии друг от друга. Каждая подушка установлена с возможностью поворота вокруг оси, проходящей через ее одну сторону и связывающей ее с корпусом. На другой ее стороне смонтировано нажимное устройство, которое взаимодействует с корпусом и уравновешивающим механизмом, жестко связанным с подушкой с возможностью упора в корпус. Контур наружной стороны боковой поверхности подушки на участке, обращенном внутрь клетки, выполнен с уклоном, равным 40-50°.

Изобретение обеспечивает создание прокатной клетки достаточно простой конструкции, которая позволяет облегчить настройку технологических параметров прокатки.

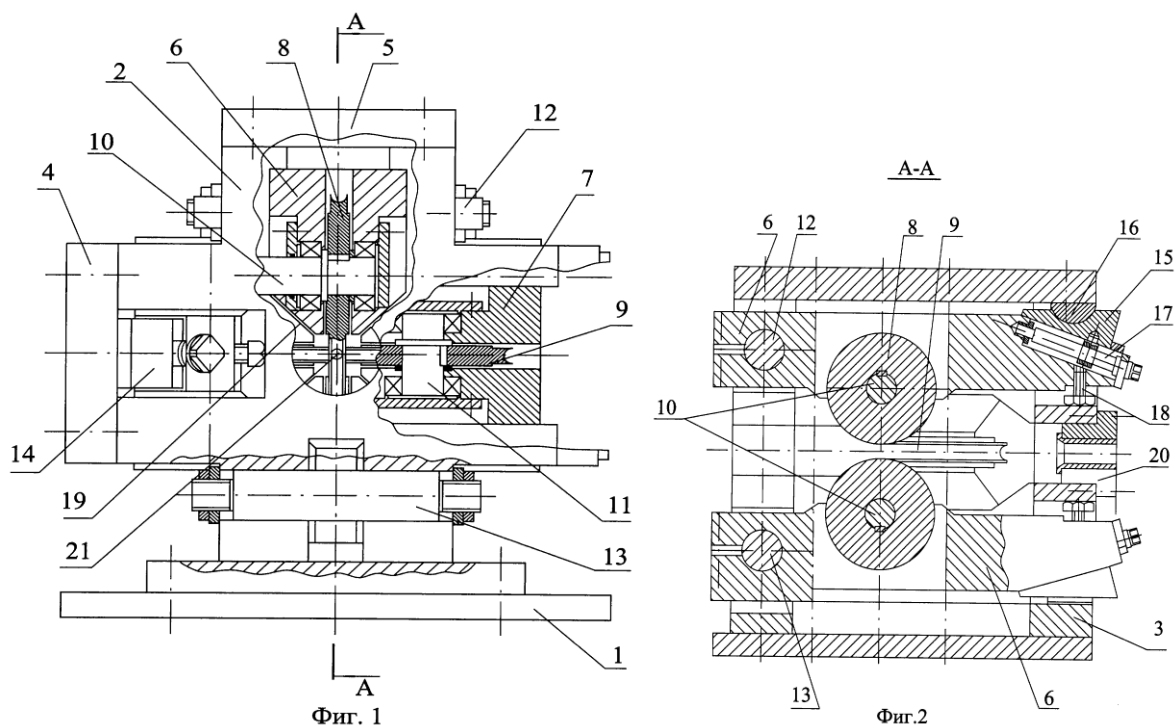


Рисунок 1.4 – Прокатная клетка, патент РФ №2204448:

1 – плитавина; 2 – станина; 3 – станина; 4 – боковая планка; 5 – переключатель; 6,7 – подушка; 8,9 – рабочие валки; 10, 11,12,13 – ось; 14 – нажимное устройство, 15 – клин; 16 – подушка; 17 – болт; 18 – уравнивающий механизм; 19 – уклон контура; 20 – вводная арматура; 21 – заготовка

Прокатная клеть, установленная и закрепленная на плитавине 1, содержит корпус, выполненный из станин 2 и 3, связанных между собой боковой планкой 4 и верхней переключиной 5, в корпусе размещены две пары идентичных подушек 6 и 7, в которых смонтированы две пары взаимно перпендикулярных рабочих валков 8 и 9 на осях 10 и 11, которые установлены в корпусе на осях 12 и 13, нажимные устройства 14, содержащие клин 15, установленный с возможностью взаимодействия с компенсатором угловых перемещений подушек 16 и болтом 17, уравнивающие механизмы 18, жестко связанные с подушками 6, 7, установленные с возможностью упора в станину 2 корпуса, уклон контура 19 наружной стороны боковой поверхности подушки 6, 7 на участке, обращенном внутрь клетки, вводную арматуру 20, заготовку 21.

3) Прокатная клеть В21В31/10 №194037 (рисунок 1.6) [6].

Калибр клетки образован четырьмя рабочими валками, оси которых расположены в одной плоскости. Рабочие валки, установленные на подшипниках 2, помещённых в подушках 3, крепятся клиньями 4 с планками 5 в сменном корпусе 6. В этом корпусе помещается также вводная арматура 7. Корпус с валками и вводной арматурой помещается в сквозном проёме станины 8 и крепится планками 9. В горизонтальных расточках станины на подшипниках 10, помещённых во втулках 11, установлены приводные опорные валки 12. Один из вертикальных опорных валков 13 (например, левый), также расположен в расточке станины. Правый вертикальный опорный валок 14 на подшипниках 15, помещённых во втулках 16, смонтирован в подушках 17, расположенных в прямоугольных окнах станины. Валок 14 имеет установочное устройство 18 клинового типа, причём обе подушки 17 перемещаются одним клином. Следовательно из четырёх опорных валков 3 являются неподвижными: приводные валки 12 и опорный валок 13. Рабочие валки прижаты друг к другу и каждый к своему опорному. Это достигается перемещением сменного корпуса вдоль оси прокатки с помощью планок 9 и болтов 19 с гайками 20 (эффект клина).

Для обеспечения равномерного прижатия рабочих валков к опорным (опорный валок 14) выполняют с установочным устройством 18. Вращение все рабочие валки получают от двух приводных опорных валков за счёт сил трения, возникающих между валками при их сжатии. На задней стороне станины устанавливается выводная арматура 21. Для перевалки рабочих валков отпускают гайки 20 на болтах 18 и планки 9 сдвигают в сторону, освобождая лапы сменного корпуса, который вынимают из станины вместе с установленными в нём рабочими валками и вводной арматурой.

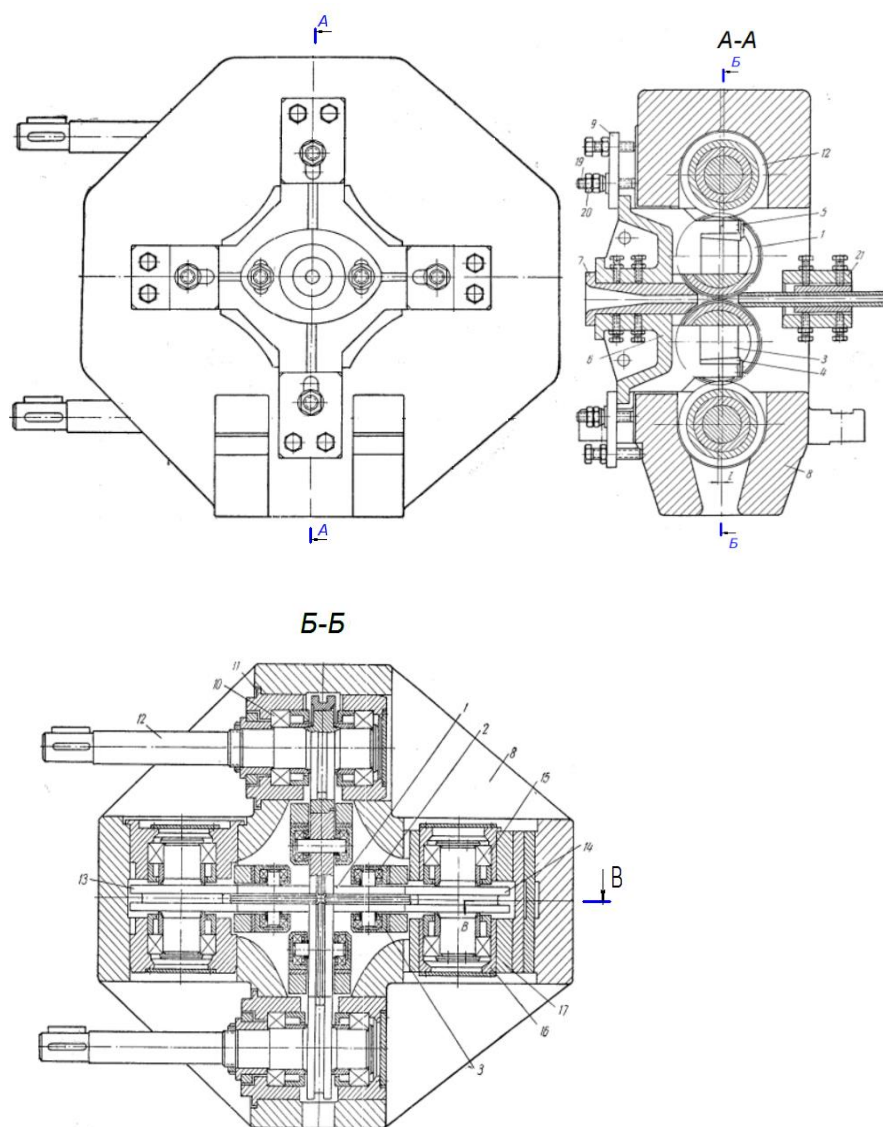


Рисунок 1.6 – Клеть с многовалковым калибром, авторское свидетельство СССР №194037

1.3 Пути повышения точности прямоугольных труб

Одним из важнейших критериев качества готовой металлопродукции прокатного производства является точность геометрических размеров получаемых профилей.

Существует следующая особенность обработки профильных труб в отличие от круглых. Для размеров профильных труб, определяющих их геометрию показателей больше, чем для круглой трубы. Это может быть: радиусы сопряжения граней по наружному контуру и по внутреннему контуру, прогибы грани, изменение толщины стенки по периметру (рисунок. 1.7). Сказанное означает, что отклонения размеров нормируется по большому их количеству.

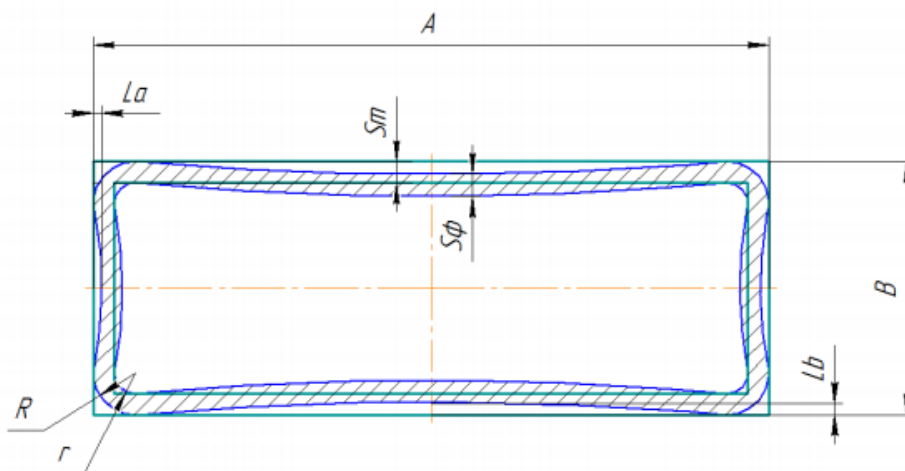


Рисунок 1.7 - Схема поперечного сечения прямоугольной трубы:

L – прогиб стенки в центре грани; S_t и S_f – теоретическая и фактическая толщины стенки; R и r – радиусы сопряжения граней по наружной и внутренней поверхностям; A и B – ширина и высота грани трубы, L_a и L_b – прогибы стенки в центре грани по ширине и высоте.

Так, например, теоретическая толщина стенки на практике отличается от фактической. Фактическая толщина стенки после прокатки или волочения, может быть как меньше теоретической, так и больше. Кроме того, фактическая толщина стенки изменяется по периметру трубы.

На качество трубной продукции оказывает влияние множество факторов, начиная от износа рабочего инструмента или от химического состава сырья и другие. Более подробно о различного рода факторах и их влиянии сказано в работе[7]. Для производства профильных труб используют заготовки круглых труб. Соответственно, отклонения размеров заготовки влечет за собой образования отклонений уже у профильной продукции. Отклонения размеров, точности и о причинах их образования изучил Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. в 1975 г. [7].

В настоящее время существуют следующие пути повышения точности геометрических размеров проката:

- установка прокатных клетей с высокой жесткостью;
- применение эффективных систем автоматического регулирования геометрических размеров проката;
- установка отдельных прокатных клетей, обеспечивающих калибровку прокатываемых профилей;

В рамках данной работы сделаем акцент на изучение допустимых предельных отклонений размеров профиля и толщины стенки, а также на допустимых предельных отклонениях формы. Например, в ГОСТ Р 54157-2010 (таблица 1), который распространяется на прямоугольные трубы, оговариваются нижеперечисленные требования к предельным отклонениям профиля, толщины стенки и формы:

Таблица 1- Предельные отклонения размеров

Наименование параметра	Предельное отклонение при точности изготовления или значения параметра
<p>1) Наружный размер профиля труб для всех форм профиля:</p> <p>а) бесшовных горячедеформированных</p> <p>б) холоднодеформированных размером:- до 30 мм включительно - свыше 30 мм до 50 мм включительно - свыше 50 мм</p> <p>в) сварных размером: - до 30 мм включительно - свыше 30 мм до 50 мм включительно - свыше 50 мм</p>	<p>$\pm 1,50 \%$;</p> <p>$\pm 0,30$ мм;</p> <p>$\pm 0,40$ мм;</p> <p>$\pm 0,80 \%$.</p> <p>$\pm 0,30$ мм;</p> <p>$\pm 0,40$ мм;</p> <p>$\pm 0,80 \%$.</p>
<p>2) Толщина стенки труб для всех форм профиля:</p> <p>а) бесшовных горячедеформированных</p> <p>б) холоднодеформированных размером: - до 3,5 мм включительно - свыше 3,5 мм</p> <p>в) сварных</p>	<p>+ 12,5 % / - 15,0 %;</p> <p>$\pm 12,5 \%$;</p> <p>$\pm 12,5 \%$;</p> <p>$\pm 10,0 \%$.</p>
<p>3) Радиус скругления углов профиля труб для прямоугольных форм при толщине стенки:</p>	
<p>- до 3,0 мм включительно</p>	<p>– не более 2,0 от номинальной толщины стенки;</p>
<p>- свыше 3,0 мм до 6,0 мм включительно</p>	<p>– в диапазоне 1,6÷2,4 от номинальной толщины стенки;</p>
<p>- свыше 6,0 мм до 10,0 мм включительно</p>	<p>– в диапазоне 2,0÷3,0 от номинальной толщины стенки;</p>

- свыше 10 мм – в диапазоне	2,4÷3,6 от номинальной толщины стенки.
<p>4) Вогнутость или выпуклость сторон труб прямоугольных форм профиля:</p> <p>а) для бесшовных горячедеформированных труб со сторонами размером:</p> <ul style="list-style-type: none"> - до 50 мм включительно - свыше 50 мм до 70 мм включительно - свыше 70 мм до 100 мм включительно - свыше 100 мм 	<ul style="list-style-type: none"> 0,75 мм 1,0 мм 1,5 мм 2,0 мм.
<p>б) для бесшовных холоднодеформированных, сварных и сварных холоднодеформированных труб со сторонами размером:</p> <ul style="list-style-type: none"> - до 50 мм включительно - свыше 50 мм до 70 мм включительно - свыше 70 мм до 100 мм включительно - свыше 100 мм 	<ul style="list-style-type: none"> 0,5 мм; 0,75 мм; 1,0 мм; 1,0 %.

Вывод:

Профильные трубы используются во многих отраслях промышленности. Существует множество профильных труб с различными конфигурациями форм поперечного сечения. Вместе с тем, постоянно увеличивается сферы их применения и растет потребность в изготовлении точных форм профильных труб. Поэтому актуальным остается вопрос изучения процессов и машин производства профильных труб с целью их совершенствования. Для производства такого широкого диапазона сортамента требуется создание технологий и машин. Для реализации каждого из способов разработано специальное оборудование. Выполненный обзор требований к точности геометрических размеров, поверхности и другим параметрам профильных труб показал, что одно из требований современного рынка, предъявляемого к производителям продукции – является повышение качества выпускаемых изделий. Так как у профильных труб определяющий размеров форму больше чем у круглых, поэтому особенно актуальным моментом становится изучение и рассмотрения данного вопроса в контексте совершенствования процессов и машин про их производству.

В результате анализа видно, что существует много способов и машин для производства трубной продукции. При производстве труб имеет значение особенности формы и размеров поперечного сечения. Прокатка является наиболее подходящим для нас способом, так как отличается от волочения меньшим количеством технологических операций для получения готового продукта. Берем за основу прокатную клеть В21в31/10 №194037[6]. Выбранная клеть имеет ряд преимуществ, она обладает базой для настройки и обеспечивает получение всех граней трубы за один проход. Недостатком является то, что калибр клетки не регулируется и для получения точных размеров нужно скомпенсировать деформацию клетки.

2. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Устройство измерения сплющивания валков прокатной клетки 150/150 (рисунок 2.1) состоит из индикатора часового типа 1 закрепленного в специальном корпусе 2 с помощью винта 3, который выполняет и регулировочную функцию перемещения в горизонтальном положении индикатора 1. Корпус 2 жестко установлен на стенке экспериментальной установки с помощью винта 4. На шейку рабочего валка 8 насаживают кольцо 5, которое фиксируют с помощью винта 6. На фрезерованной поверхности кольца 5 выполнены резьбовые отверстия для крепления пластины 7 с помощью винтов.

Прокатные валки 8 закреплены между плитовин корпуса 9 при помощи болтов 10 и распорных втулок в четырех местах под отверстие. Верхний валок перемещается по направляющим выточенным в плитавине, нижний валок неподвижен к перемещению.

2.1 Методика проведения эксперимента

Описываемое устройство работает следующим образом (рисунок 2.1-2.2): на плитовину корпуса 9 устанавливаются болты и распорные втулки в четырех местах под отверстие. Прокатные валки 8 устанавливают между плитовин в корпус 9 и затягивают с зазором 0,01 мм (для их вращения) с помощью болтов 10 и распорных втулок, зазор проверяется щупом. После фиксации валков устанавливают корпус 2, который фиксируется в стенке корпуса 9 с помощью винта 4. На шейку верхнего прокатного валка устанавливают кольцо 5 в сборе с пластиной 7 так, чтобы между кольцом и стенкой корпуса 9 оставался зазор не менее 1 мм, после установки фиксируют с помощью винта 6. В корпусе 3 выполнено отверстие, в которое устанавливают индикатор часового типа 1 и фиксируют в горизонтальном положении с помощью винта. Далее установку в собранном виде устанавливают в винтовой пресс 12 на вкладыши 10 по оси

винтового пресса. Под корпус 9 с зазором 1мм устанавливают деревянные подкладки в форме куба для избегания перекоса корпуса. На верхний вкладыш 10 устанавливают гидравлический домкрат 13. На домкрат 13 сверху устанавливают тарированный динамометр 14, и прижимают с помощью винта винтового пресса 12 для фиксации и проверки соосности конструкции.

После установки всего оборудования задаем предварительное натяжение с помощью винта винтового пресса 12, которое определяем по отклонениям индикатора на динамометре 14, записываем предварительные показания на индикаторе 1 и динамометре 14. С записанных показаний начинаем отчет о упругом сжатии рабочего и опорного валка. После того как задали предварительное натяжения и избавились от зазоров начинаем создавать усилия на валки с помощью домкрата 13.

Эксперимент с кассетой прокатной клетки 150/150.

Эксперимент с кассетой прокатной клетки 150/150 проводили тремя разными способами: В первом способе нагружали кассету с помощью винтового пресса, во втором способе с помощью гидравлического домкрата, в третьем с помощью винтового пресса, но устанавливали пластину на торец.

В винтовой пресс в собранном виде устанавливаем кассету 1 (рисунок 2.3) по оси пресса, на специальные вкладыши 2 под валки. В первом положении на верхний 2 вкладыш устанавливают рабочую пластину 3, а на нее гидравлический домкрат 13(рисунок 2.2).Во втором положении пластину закрепляют на торец. На домкрат сверху устанавливают тарированный динамометр 14 или месдозу и прижимают с помощью винта винтового пресса 12 для фиксации и проверки соосности конструкции. После проверки конструкции устанавливаем индикаторную стойку 4, регулируем ее по высоте. Далее проводим испытание по известному способу.

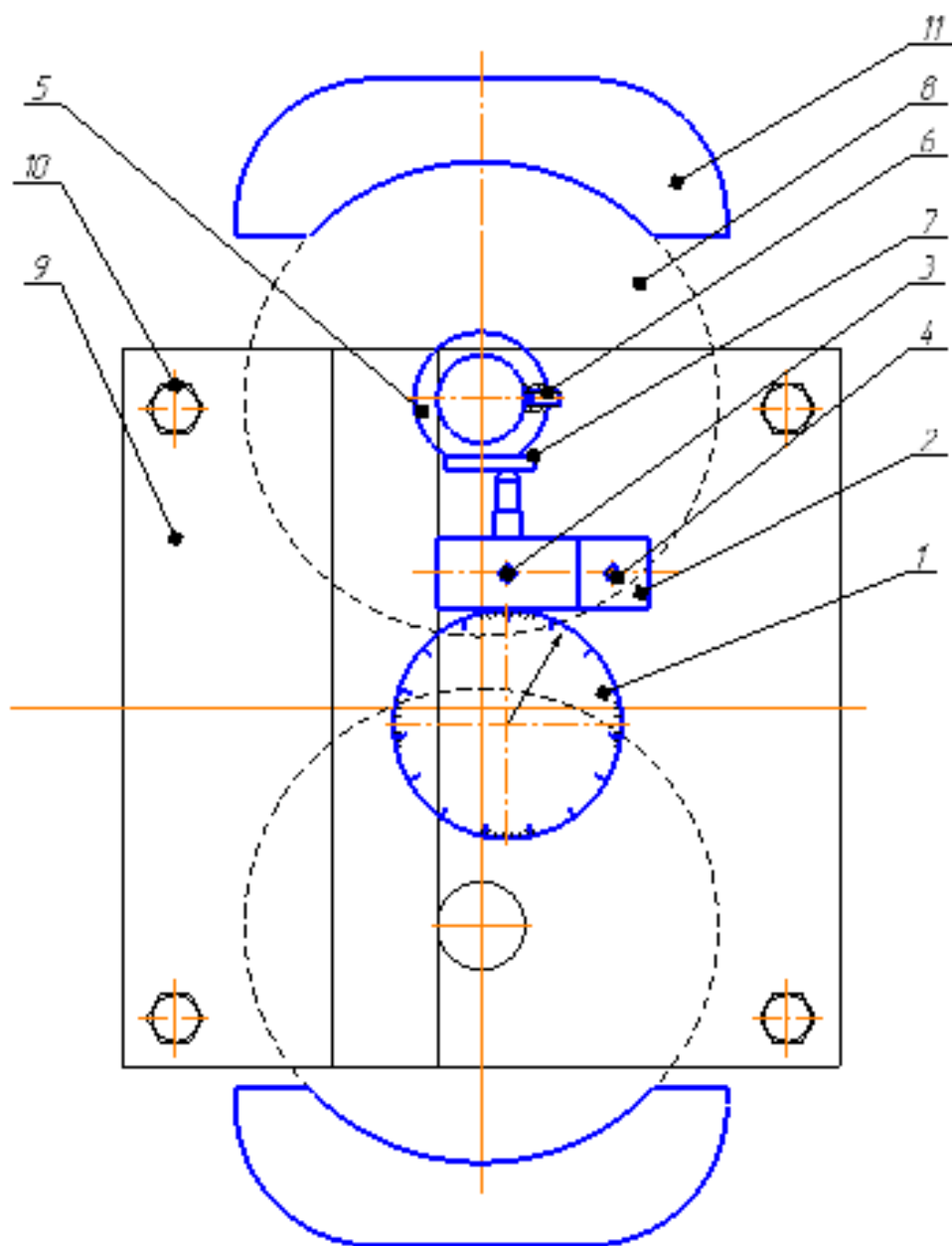


Рисунок 2.1 – экспериментальная установка

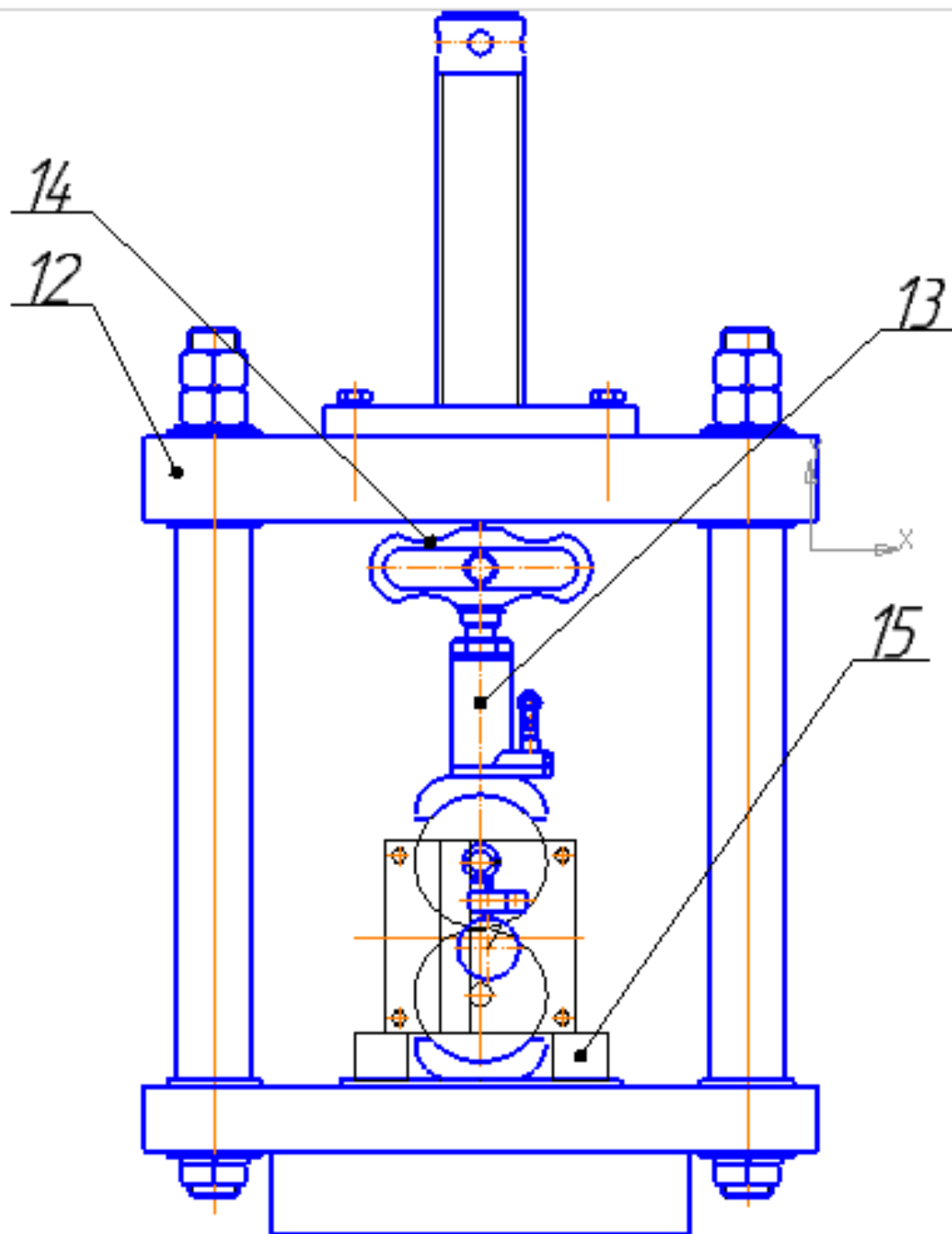


Рисунок 2.2 – экспериментальная установка в сборе

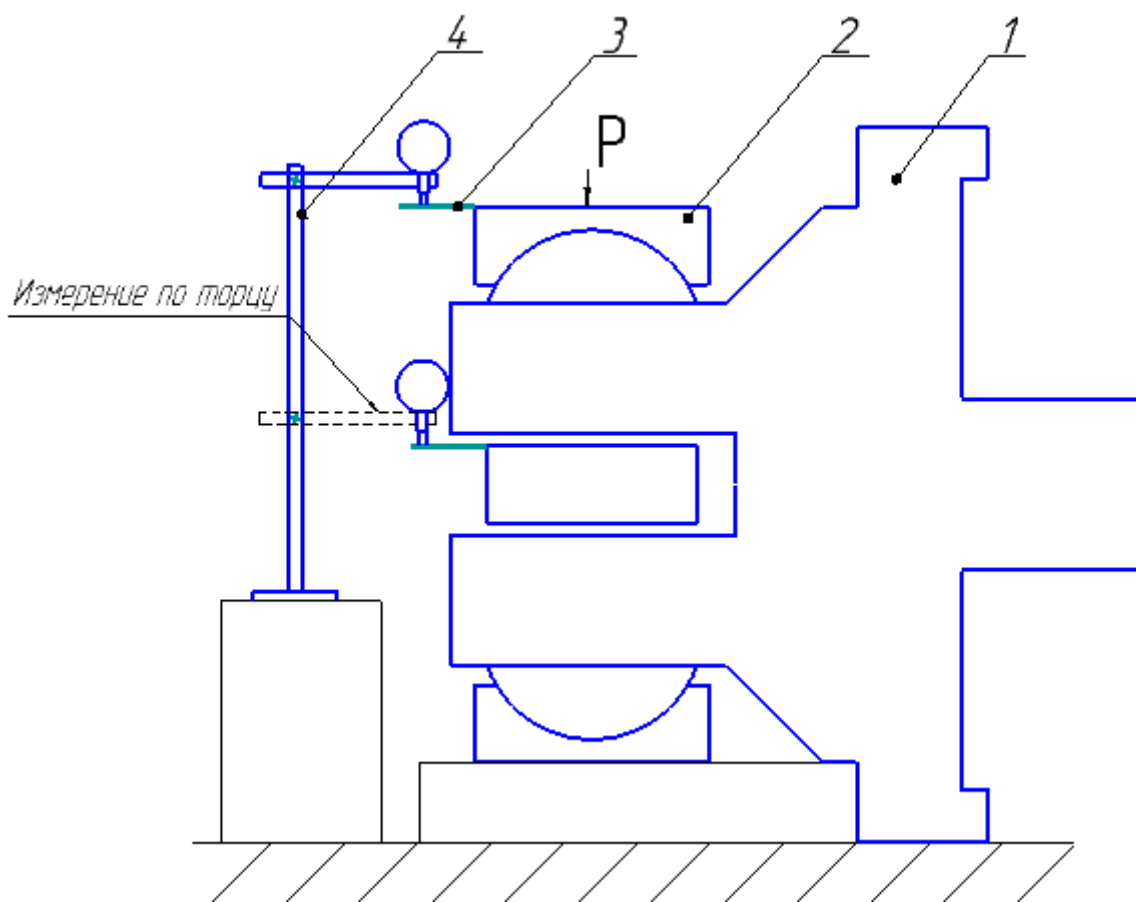


Рисунок 2.3 – схема эксперимента с кассетой прокатной клетки 150/150

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ

3.1 Аналитическое исследование

Исследования деформаций и напряжений в местах силового контакта деталей представляет собой один из наиболее сложных разделов теории упругости. Начало теории деформации упругих тел в местах контакта на основе использования общих уравнений теории упругости и методов теории потенциала положено работой Г. Герца [9]. Герц впервые выполнил достаточно полный анализ напряжений при контакте двух упругих тел.

Совместное упругое сжатие рабочего и опорного вала с достаточной для прокатки точностью рассчитывается по формулам Б.С Ковальского [10].

$$\delta = \frac{2q_m}{\pi} \left[\frac{1-\vartheta_1^2}{b} \left(\ln + \frac{2R_1}{b} + 0,407 \right) + \frac{1-\vartheta_2^2}{b} \left(\ln + \frac{2R_2}{b} + 0,407 \right) \right], \quad (1)$$

где δ – деформация сжатия (сближение осей) соприкасающихся цилиндров (валков); b – полуширина площадки контактов валков

$$b = 1,128 \sqrt{nq_m \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}; \quad (2)$$

$$n = \frac{1 - \vartheta_1^2}{E_1} + \frac{1 - \vartheta_2^2}{E_2}. \quad (3)$$

Здесь ϑ_1 и ϑ_2 , E_1 и E_2 , – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости; R_1 и R_2 – радиусы соприкасающихся цилиндров (валков), см; q_m – нагрузка на единицу длины цилиндров.

$$q_m = \frac{P}{L}, \quad (4)$$

где P – нагрузка, Н; L – ширина цилиндра (валка), см.

Результаты расчетов представлены в таблице 1 (приложении А).

Контакт цилиндра, с поверхностью полупространства рассчитывается по формулам Биргера И.А [11].

Сближение центра цилиндра с поверхностью полупространства.

$$\delta = 2P \frac{\theta}{\pi} (0,41 + \ln \frac{2R}{b}), \quad (5)$$

где δ – деформация сжатия (сближение осей) соприкасающихся цилиндров (валков); b – полуширина площадки контактов валков; R – радиус соприкасающегося цилиндра

$$\text{коэффициент } \theta = \frac{1-\vartheta^2}{E},$$

где ϑ , E – соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости;

$$b = 0,798 \sqrt{2PR (\theta_1 + \theta_2)}; \quad (6)$$

где R_1 и R_2 – радиусы соприкасающихся цилиндров (валков), см;

P – нагрузка на единицу длины, Н.

Контакт двух цилиндров, с параллельными осями рассчитывается по формулам И.А Биргера [12].

$$\delta = 2P \frac{\theta}{\pi} (0,815 + \ln \frac{4R_1R_2}{b^2}); \quad (7)$$

$$b = 0,798 \sqrt{2P \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} (\theta_1 + \theta_2)}, \quad (8)$$

где δ – деформация сжатия (сближение осей) соприкасающихся цилиндров (валков); b – полуширина площадки контактов валков; R_1 и R_2 – радиусы соприкасающихся цилиндров (валков), см; P – нагрузка на единицу длины, Н.

$$\text{коэффициент: } \theta = \frac{1-\nu}{E},$$

где ν , E – соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости;

Для аналогичных цилиндров с одинаковыми модулями упругостями $E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{см}^2}$ и коэффициент Пуансона $\nu = 0,30$.

Результаты расчетов представлены в таблице 2 (приложении А).

Сближение упругих тел конечных размеров решается задача по Нахатакяну Ф.Г. [12].

Для аналогичных цилиндров с одинаковыми модулями упругостями $E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{см}^2}$ и коэффициент Пуансона $\nu = 0,30$.

Размеры площадки контакта:

$$b = 1,52 \sqrt{\frac{q}{E} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}, \quad (9)$$

где – R_1 и R_2 – радиусы соприкасающихся цилиндров (валков), см;

q – нагрузка на единицу длины цилиндра

E – модуль упругости

Сближение соприкасающихся тел:

$$\delta = \frac{4(1-\nu^2)q}{\pi E} \ln \left[1,06 \sqrt{\frac{E(R_1+R_2)}{q}} \right], \quad (10)$$

где – δ деформация сжатия (сближение осей) соприкасающихся цилиндров (валков); R_1 и R_2 – радиусы соприкасающихся цилиндров (валков).

Результаты расчетов представлены в таблице 4 (приложение А).

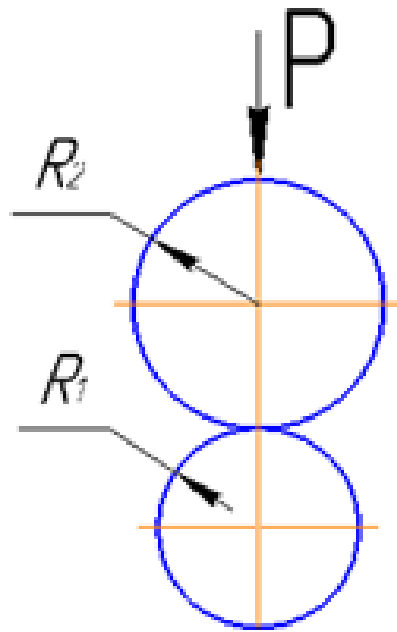


Рисунок 3.1 – Схема контакта двух цилиндров:

P – прикладываемая нагрузка; R – радиусы цилиндров

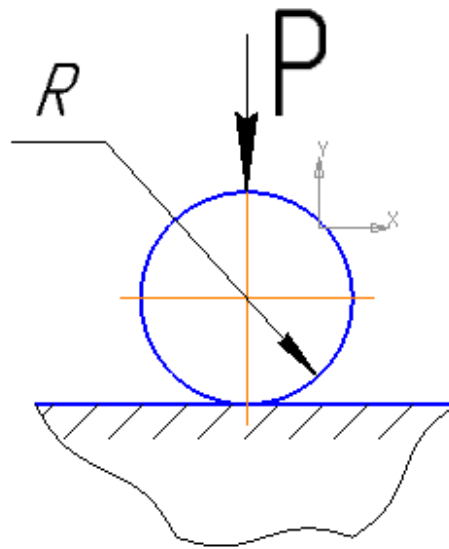


Рисунок 3.2– Схема контакта цилиндра и полупространства:

P – прикладываемая нагрузка; R – радиус цилиндра

В результате анализа, по методикам определения сближения осей двух цилиндров (валков) и оси цилиндра с полупространством использовались формулы 1 – 10. Получили зависимости рисунок 3.3 по разным вариантам расчета. В приведенной зависимости видно, что не зависимо от выбора методики расчета конечный результат у большинства кривых имеет схожую тенденцию.

На рисунке 3.3 видно, что полученные зависимости имеют не линейных характер сближения осей двух цилиндров (валков) от величины нагрузки.

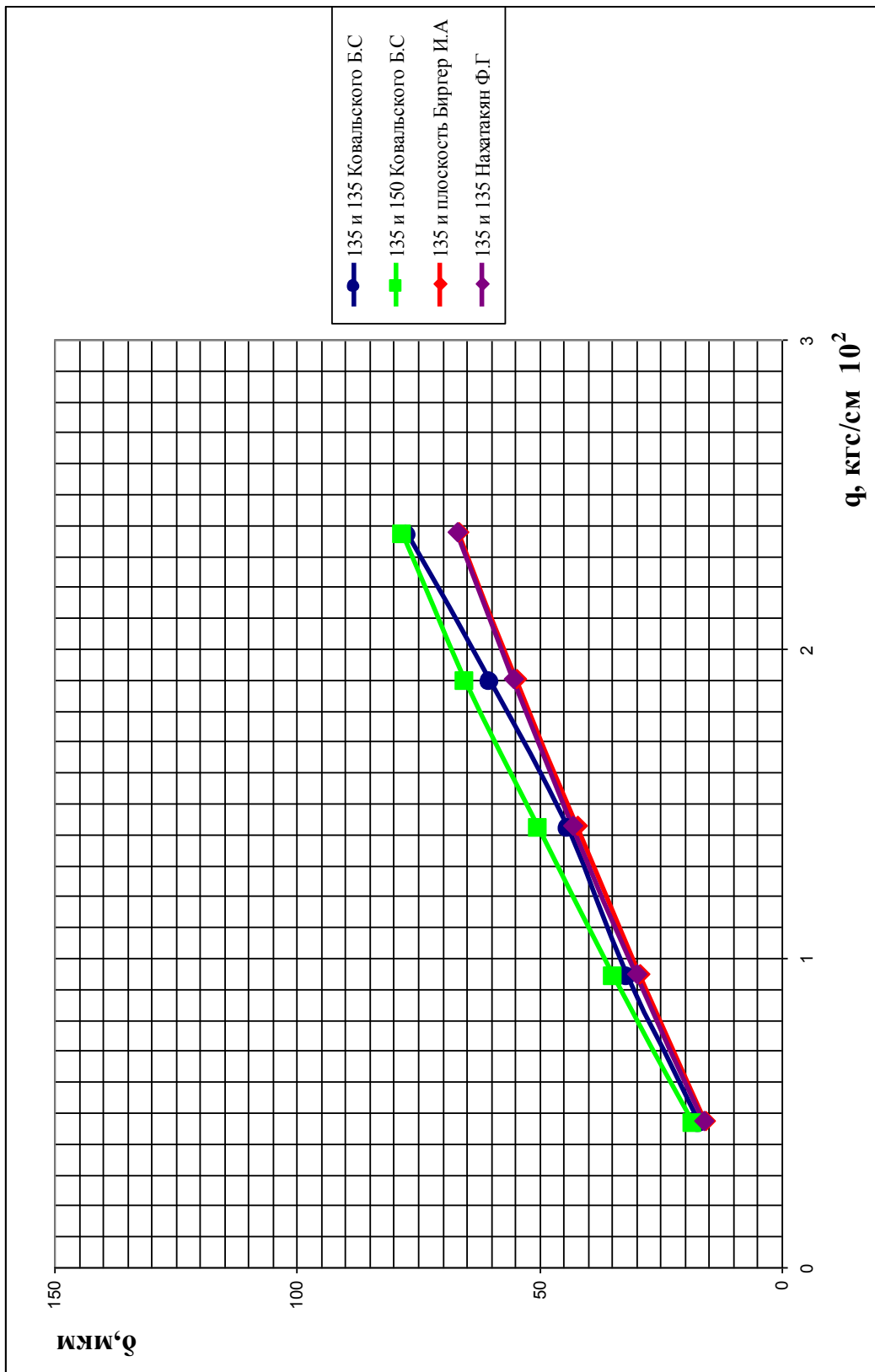


Рисунок 3.3 – Результаты расчетных данных

3.2 Экспериментальное исследование

В ходе проведения исследования была разработана установка для измерения сближения осей двух цилиндров (валков) и цилиндра с полупространством, применяемая к прокатным валкам и кассете прокатной клетки 150/150 (рисунок 2.1 -2.3). Эксперименты проводились на рабочих валках прокатной клетки 150/150 и кассеты этой клетки в сборе.

Рабочие валки: $\varnothing = 135$ мм, ширина валков $B = 38$ мм, шероховатость поверхности $Ra 0,32$. Твёрдость валков составляет $HRC_{\Sigma} 50...52$ ед. Проверку твердости проводили на твердомере кафедры «Материаловедение и физико – химия материалов», методом проверки по Роквеллу.

Проверив рабочие валки, на наличие перекосов были выявлены следующие отклонения: отклонения диаметров валков получилось меньше 0,01 мм, отклонение по торцу составило 0,02 и 0,015 мм. Измерения проводили с помощью измерительной скобы.

Экспериментальное исследование кассеты прокатной клетки 150/150 проводили с тремя вариантами нагрузки:

- винтовым прессом;
- гидравлическим домкратом;
- винтовым прессом с проверкой по торцу.

На основе полученных в результате эксперимента данных, построены зависимости рисунок 3.4.

На рисунке 3.4 эксперимента с кассетой прокатной клетки 150/150 видно, что кривые испытания 2 и 3 имеют схожий характер в отличие от кривой испытания 1.

На рисунке 3.5 испытания с рабочими валками прокатной клетки на экспериментальной установке нагружали рабочие валки с помощью винта винтового пресса. На основе полученных в результате эксперимента данных, построены зависимости рисунок 3.5.

На рисунках 3.6 - 3.7 представлена реальная использовавшаяся для проведения экспериментов установка.

Разбив кривую, рисунок 3.4 испытания 2 на две части с 0,5 до 1,5 кгс/см 10^3 и с 1,5 кгс/см 10^3 до 3 кгс/см 10^3 видим, что в первой части кривой наблюдается скачки по мере нагрузки на валки. Скачки получилась, вероятно, потому что предварительной нагрузки не хватило, и возможно продолжилась выборка зазоров в кассете, становление в окончательное положение рабочих валков. Во второй части нашей кривой сближение валков проходит без выраженных отклонений.

Разбив вторую кривую, рисунок 3.5 испытания 4 на две части с ее начала до 2,5 кгс/см 10^3 и 2,5 кгс/см 10^3 до ее конца видим, что в первой части кривой снова наблюдаются, скачки по мере нагрузки на валки. На этот раз скачки кривой получилась, вероятно, потому что присутствовали торцевые зазоры между валками и стенками экспериментальной установки.

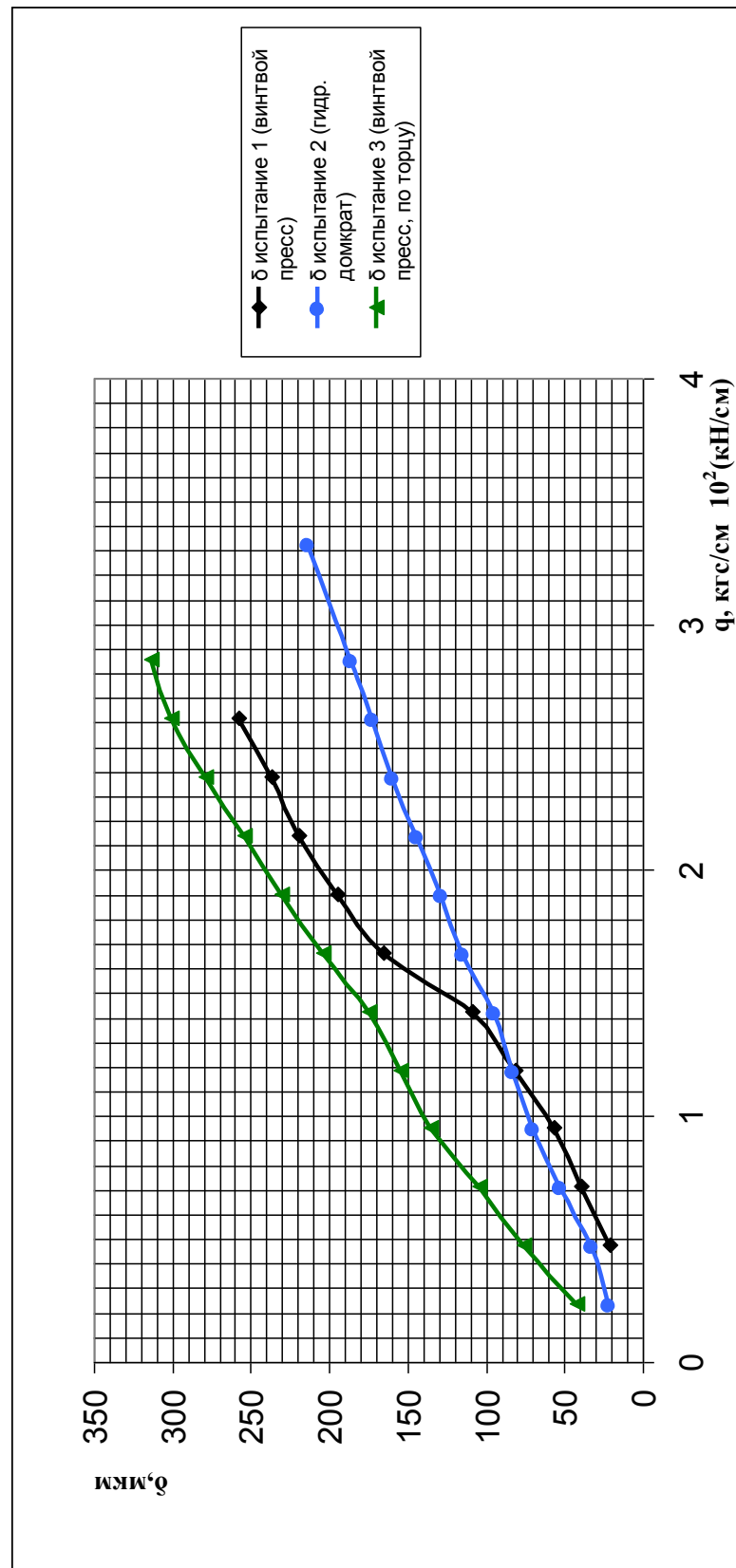


Рисунок 3.4 – Результаты эксперимента с кассетой прокатной клети 150/150

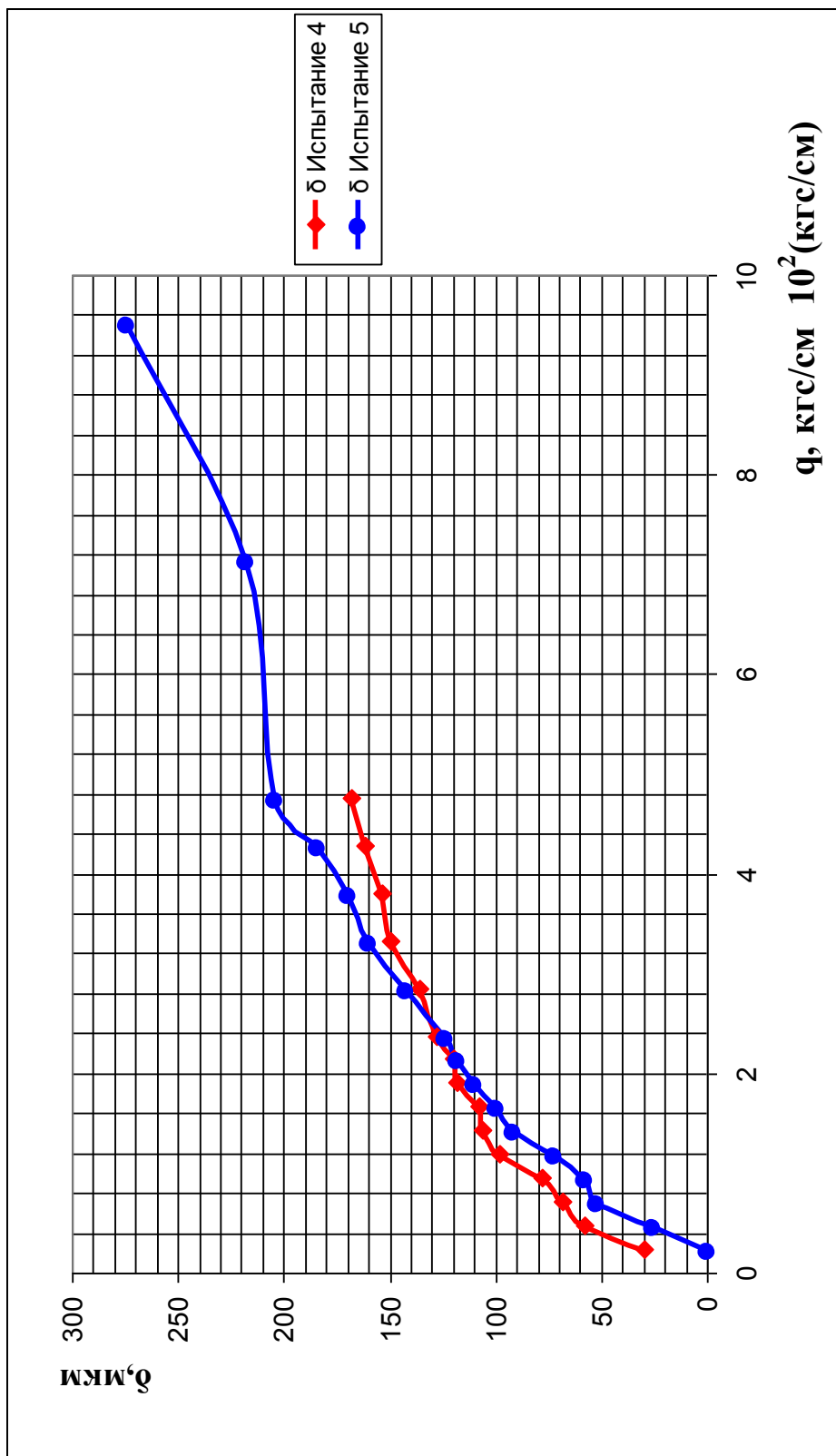


Рисунок 3.5 – Результаты эксперимента с валками прокатной клети 150/150



Рисунок 3.6 – Установка для измерений



Рисунок 3.7 – экспериментальная установка
(нагрузка с помощью винтового пресса)

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОДУКЦИИ ПОЛУЧЕННОЙ НА СТАНЕ 150/150

На изготовление прямоугольной трубы из материала 12X18 Н10Т, АМц и АМцС технические условия приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – исходные данные

Материал	h, мм	b, мм
12X18 Н10Т	5	6,5 _{-0,02}
	5	7 _{-0,02}
АМц и АМцС	3,2 _{-0,02}	5

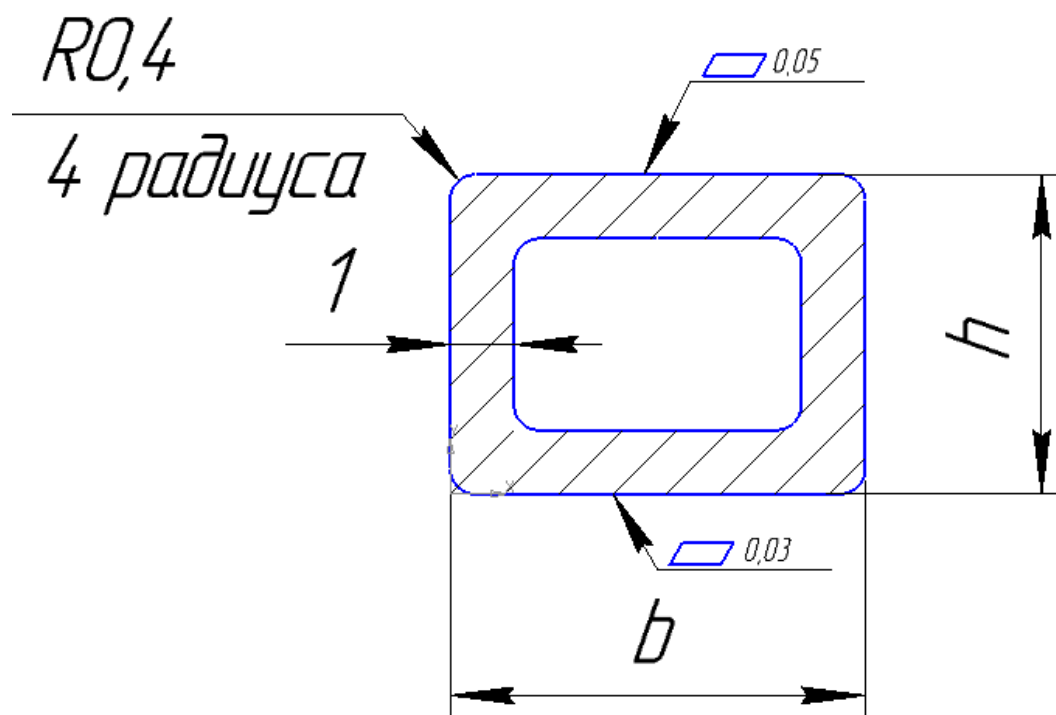


Рисунок 4.1 – Сечение трубы

После прокатки на стане 150/150 с четырехвалковым калибром [6] получи образец прямоугольной трубы рисунок 4.2. Для получения точного проката компенсировали деформацию клетки путем предварительного сжатия рабочего и опорного валка.

Проверку точности полученной продукции проверяли с помощью измерительной скобы и резьбового микрометра с двух сторон в десяти разных точках на краях и по центру по длине трубы. По результатам измерения 5 труб было установлено, что неплоскостность составила 0,005 мм на краю и 0,01 мм в центре. Наибольший прогиб был на переднем конце трубы. Точность полученных размеров нас устраивает, так как укладываемся в поле допуска.



Рисунок 4.2 – образец трубы

Таблица 4.2 – Таблица квалитетов ГОСТ 25346 - 89

Интервал номинальных размеров, мм		Квалитет	
Свыше	До	8	9
		мкм	мкм
6	10	22	33

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате анализа зависимостей, представленных на рисунке 3.3, расчетные данные, посчитанные по формулам 1-10 приведенным ранее в главе 3, отличаются от результатов полученных экспериментальным путем (рисунок 3.6) нагрузки при помощи разработанной установки для испытаний (Рисунок 3.4-3.5). Обусловлено это тем, что данные полученные аналитическим путем решения не учитывают ряд аспектов, таких как: контактирующие поверхности имеют отклонения от правильной геометрической формы, т.е. нецилиндричность, наличием шероховатости, перекосом осей валков, распределением давления по площади наличие зазоров в конструкции и т.д.

В эксперименте в отличие от аналитических данных рабочие валки использовались в реальной эксплуатации применительно к промышленному оборудованию.

Во время поверки рабочих валков, на наличие перекосов были выявлены следующие отклонения: отклонения диаметров валков получилось менее 0,01 мм, отклонение по торцу составило 0,02 и 0,015 мм. Полученное отклонение могло плохо сказаться на результатах эксперимента, так как способствовало перекоосу осей валков.

ВЫВОД:

Следует отметить, что при разных способах нагрузки кассеты прокатной клетки и экспериментальной установки вначале наблюдается ломаная кривая и постепенно выравнивается с увеличением нагрузки. В связи с этим можно предположить, что если бы в установке отсутствовали зазоры, перекосы, то кривые имели бы схожий характер с теоретическими кривыми.

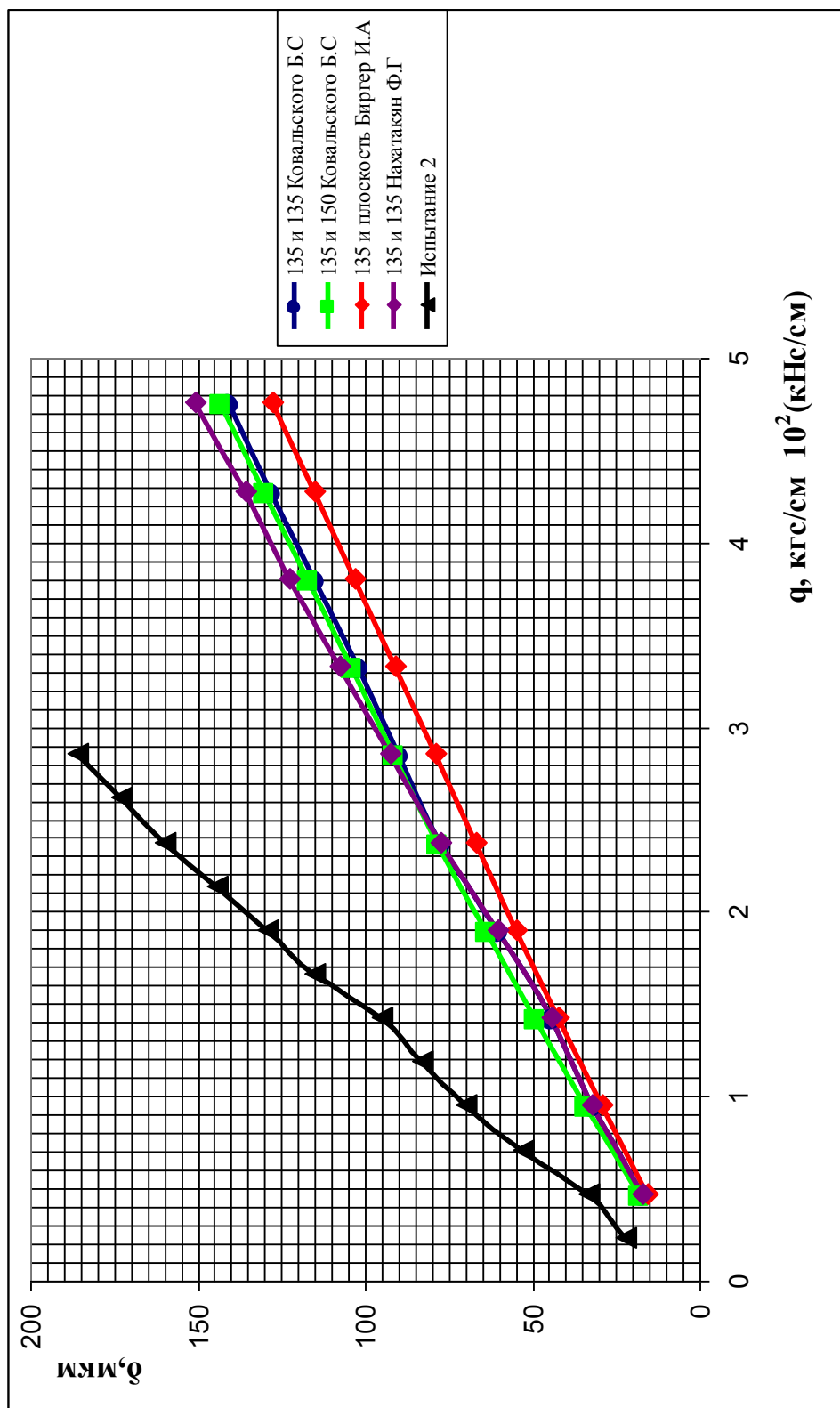


Рисунок 5.1 – зависимости расчетных данных и испытания 5

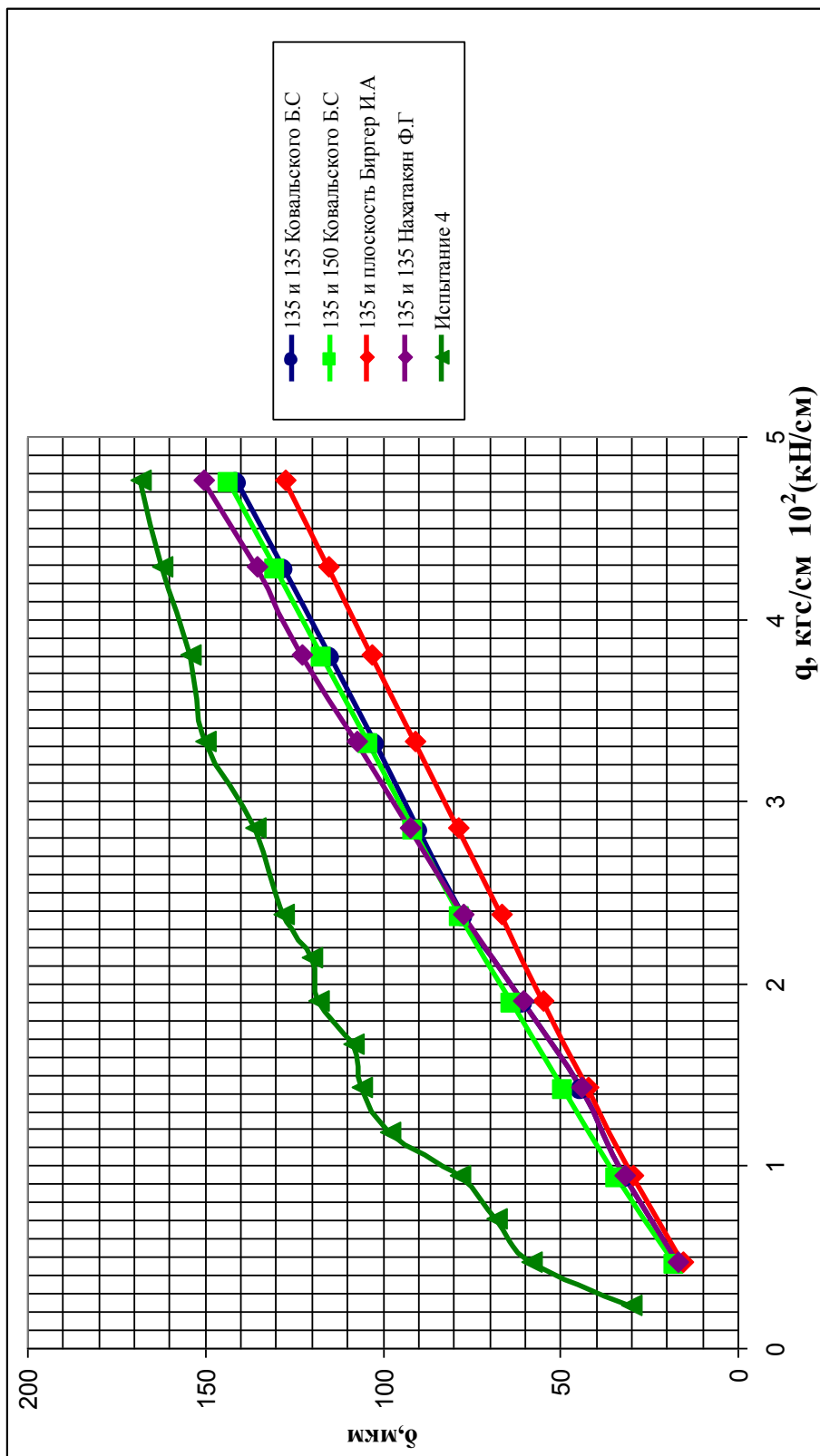


Рисунок 5.2 – Зависимости расчетных данных и испытания 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения выпускной квалификационной работы выполнен анализ патентно-информационный по точности формовки труб, проведено исследование контактной жесткости аналитическим и экспериментальным методом с помощью разработанной установки. Выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных. В результате анализа зависимостей, расчетные данные отличаются от результатов полученных экспериментальным путем при помощи разработанной установки для испытаний, обусловлено это тем, что данные полученные аналитическим путем не учитывают ряд аспектов, таких как:

- контактирующие поверхности имеют отклонения от правильной геометрической формы, т.е. нецилиндричность;
- наличием шероховатости;
- перекося осей валков;
- неравномерное распределение давления по площади;
- наличие зазоров в конструкции кассеты прокатной клетки.

Для получения более корректных данных нужно совершенствовать экспериментальную установку, методику и увеличивать объем испытаний.

После прокатки на стане 150/150 с четырехвалковым калибром [6] получен образец прямоугольной трубы рисунок 4.2. Для получения точного проката компенсировали деформацию клетки путем предварительного сжатия рабочего и опорного валка на величину деформации. По результатам измерения 5 труб было установлено, что неплоскостность на краях составила 0,005 мм и 0,01 мм в центре. Наибольший прогиб был на переднем конце трубы. Точность полученных размеров нас устраивает, так как попадаем в заданный квалитет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство профильных труб / В.Н Данченко, В.В Сергеев, Э.В Никулин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 224с.
2. Непрерывные калибровочные станы. Соколовский В.И., Паршин В.С., Баранов Г.Л. - М.: Металлургия, 1984, 96с.
3. Патент US2002/019314A1, США, кл. В21С 1/30 Модульное волочильное оборудование и волочение / Герман-Йозеф Клинген, Норберт Зелликенз, Карл-Хайнц Хауслер, заявл. 9.05.2002, опубл. 19.12.2002.
4. Патент CN2899993Y, Китай, кл. В21С 1/22 (В21С 1/16) Двойная каретка для оправочного волочения профильных труб / Го Иянгинг, Го Гуанжун, Чжан Нин, Пан Мин. заявл 14.04.2006. опубл. 16.05.2007.
5. Патент JP2002-301513А, Япония, кл. В21С 1/16 (В21С 1/22, В21С 1/28) Устройство для волочения, Фудзиока Сениоши. заявл. 02.04.2001. опубл. 15.10.2002.
6. Описание изобретения к авторскому свидетельству №194037, прокатная клеть В21В31/10 / В. Н. Выдрин, В. Г. Дукмасов, О. И Тищенко, В.С Нагорнов.
7. Гуляев Г.И. Прессование стальных труб и профилей / Г.И. Гуляев [и др.] М.: Металлургия, 1973. 192 с
8. Точность труб. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. «Металлургия», 1975. 240 с.
9. Hertz H. Uber die Veruchtung fester elastischen Korper // Gesamelte Werke. Bd. 1. Leipzig, 1895. С. 155 – 174.
10. Машины и агрегаты металлургических заводов. В трёх томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А. И. Целиков, П. И. Полухин и др. – М.: «Металлургия», 1988, - 680 с.

11. Биргер И. А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с: ил.
12. Нахатакян Ф. Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте: диссертация, доктора технических наук: 01.02.06 / Нахатакян Ф. Г.; [Место защиты: Институт машиноведения им.А.А.Благонравова РАН - Учреждение Российской академии наук]. — Москва, 2014 – 213с.
13. Теоретический анализ и математическое моделирование процессов прокатки с целью повышения качества продукции / В.А Выдрин. — М.: Металлургия, 2000, 37с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 – результаты расчетов по формуле Ковальского Б.С

b(см)	P(H)	δ(мкм)
0.0455	10000	18.026
0.0644	20000	34.010
0.0789	30000	49.230
0.0911	40000	63.901
0.101	50000	78.398

Исходные данные к (таблице 1): $R_1 = 7,5$ см; $R_2 = 6,75$ см; $L = 2,1$ см;

$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{см}^2}$; Схема контакта на рисунке 2.4.

Таблица А2 - результаты расчетов по формуле Ковальского Б.С

b(см)	P(H)	δ(мкм)
0.0431	10000	16.98
0.061	20000	32.02
0.0747	30000	44.03
0.0862	40000	60.228
0.0964	50000	77.381

Исходные данные к (таблице 3): $R_1 = 6,75$ см; $R_2 = 6,75$ см; $L = 2,1$ см;

$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{см}^2}$; Схема контакта на рисунке 2.4.

Таблица А3 - результаты расчетов по формулам Биргера И.А, для случая контакта цилиндра с полупространством

b(см)	P(H)	δ(мкм)
0,0844	10000	15,661
0,1071	15000	22,655
0,125	20000	29,330
0,1398	25000	35,857
0,1531	30000	42,289
0,1654	35000	48,505
0,1768	40000	54,661
0,1876	45000	60,732
0,1977	50000	66,720

Исходные данные к (таблице 4): $R_1 = 6,75$ см; $L = 2,1$;

$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$; Схема контакта на рисунке 2.5.

Таблица А4 – результаты расчетов по Нахатакяну Ф.Г.

$P, \text{кН}$	$b, \text{см}$	$\delta, \text{мкм}$
1	0,202	3,563
2	0,0267	6,832
3	0,0341	9,966
4	0,0403	13,0389
5	0,0451	16,0180
10	0,0639	30,0454
15	0,0785	43,2340
20	0,0906	56,0112
25	0,1014	68,4425
30	0,1110	80,6222
35	0,1201	92,4112
40	0,1265	104,1801
45	0,1347	115,6697
50	0,1426	129,974

Исходные данные к (таблице 5): $R_1 = 6,75 \text{ см}$; $R_2 = 6,75 \text{ см}$;

$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$; Схема контакта на рисунке 2.4.

Таблица А5 – результаты экспериментальных данных

Нагрузка	Нагрузка	Показание на индикаторе, мкм				
		Испытание 1 (винтовой пресс)	Испытание 2 (гидравлический домкрат)	Испытание 3 (винтовой пресс, торец)	Испытание 4 (винтовой пресс)	Испытание 5 (винтовой пресс)
0	0	0	0	0	0	0
0,238	0,5		22	42	0	30
0,476	1	21	33	76	26	58
0,714	1,5	39	53	104	52	68
0,952	2	57	70	138	58	78
1,19	2,5	81	83	154	72	98
1,428	3	109	95	175	92	106
1,666	3,5	165	115	204	100	108
1,904	4	195	129	230	110	118
2,142	4,5	219	144	254	118	120
2,38	5	237	160	279	124	128
2,619	5,5	258	173	301		
2,857	6		186	313	142	136
3,333	7		214		160	150
3,809	8				170	154
4,285	9				184	162
4,761	10				204	168
7,12	15				218	
9,523	20				274	

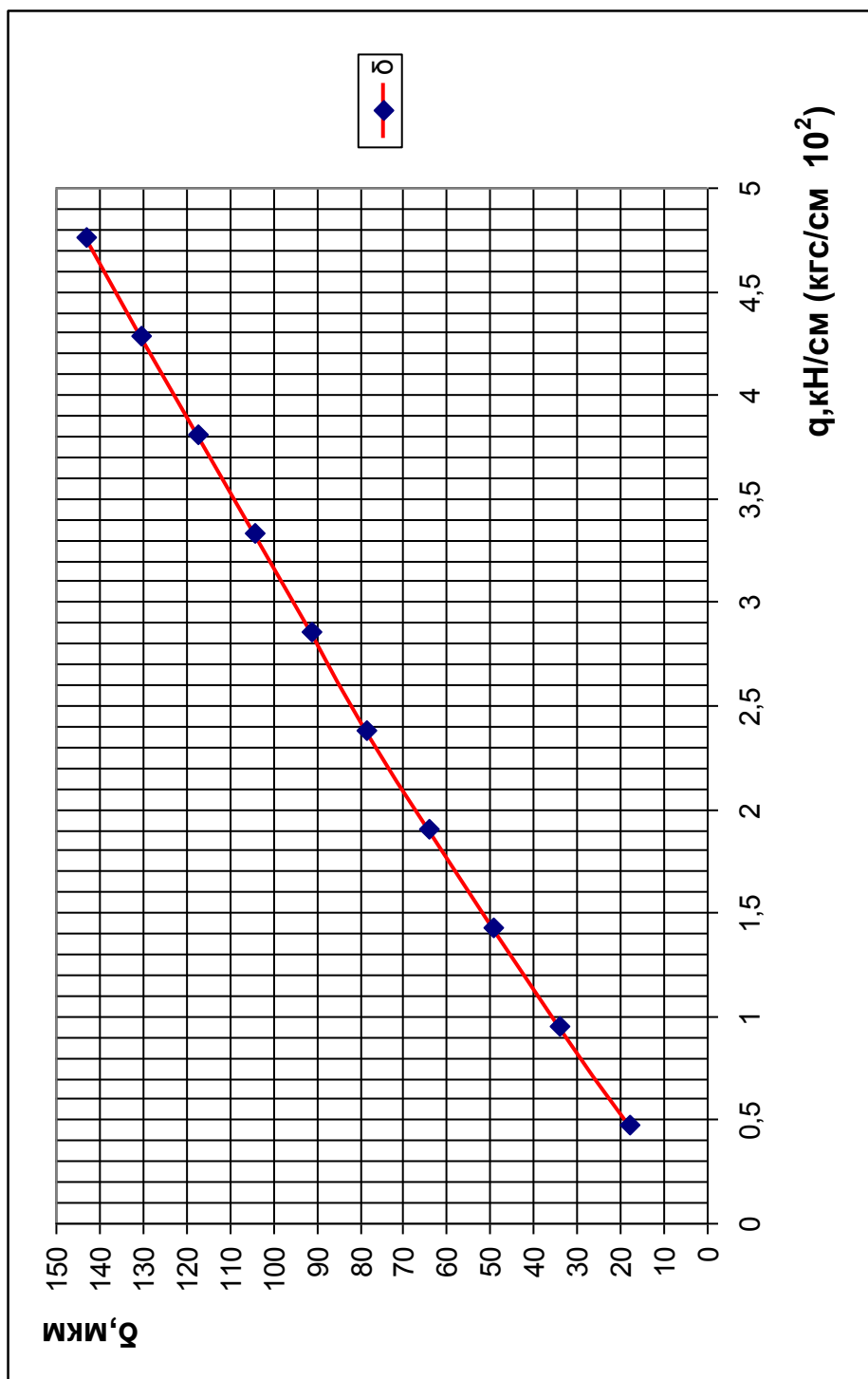


Рисунок А1 – График результата к таблице 1 по формуле Ковальского Б.С

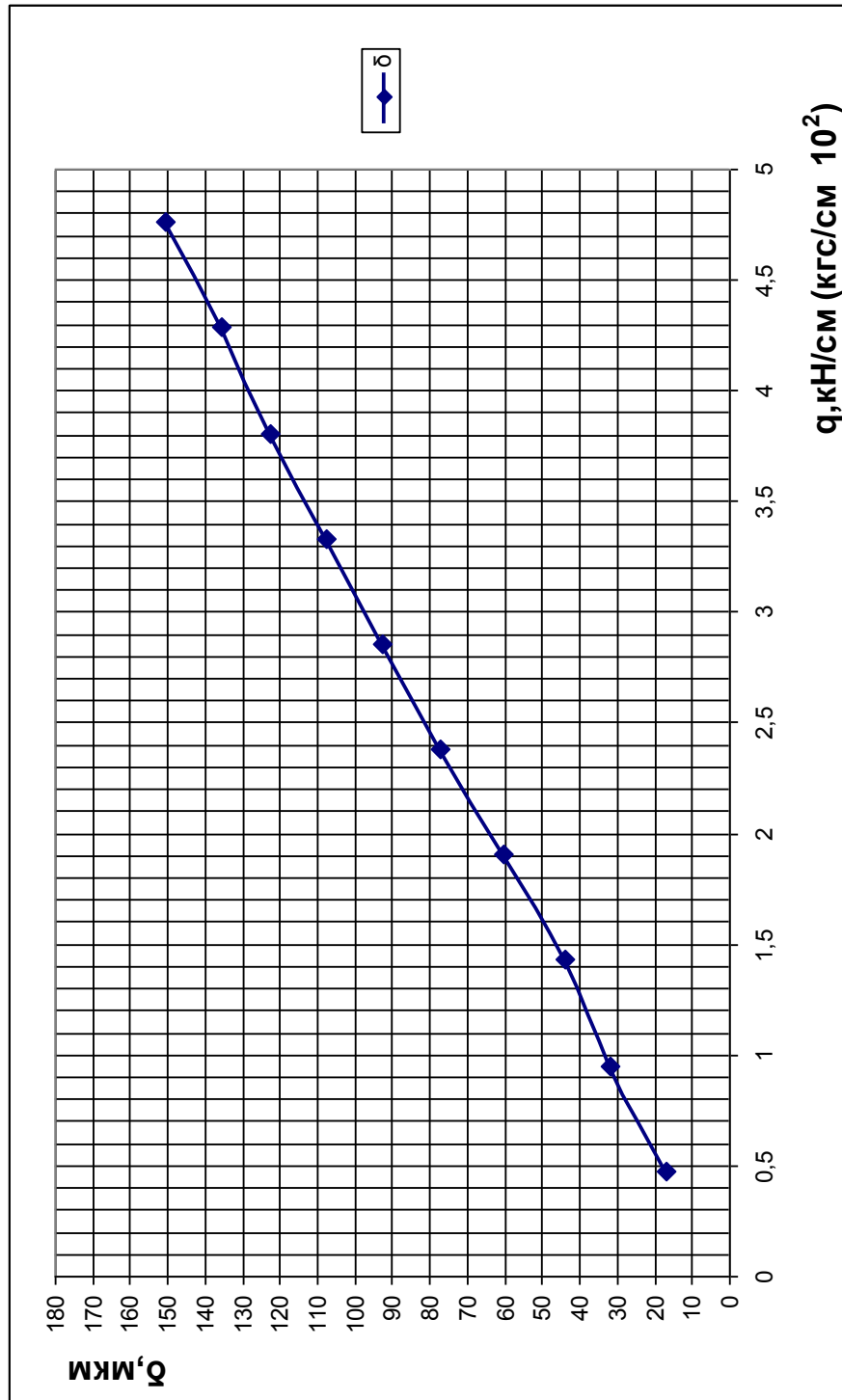


Рисунок А2 – График результата к таблице 2 по формуле Ковальского Б.С

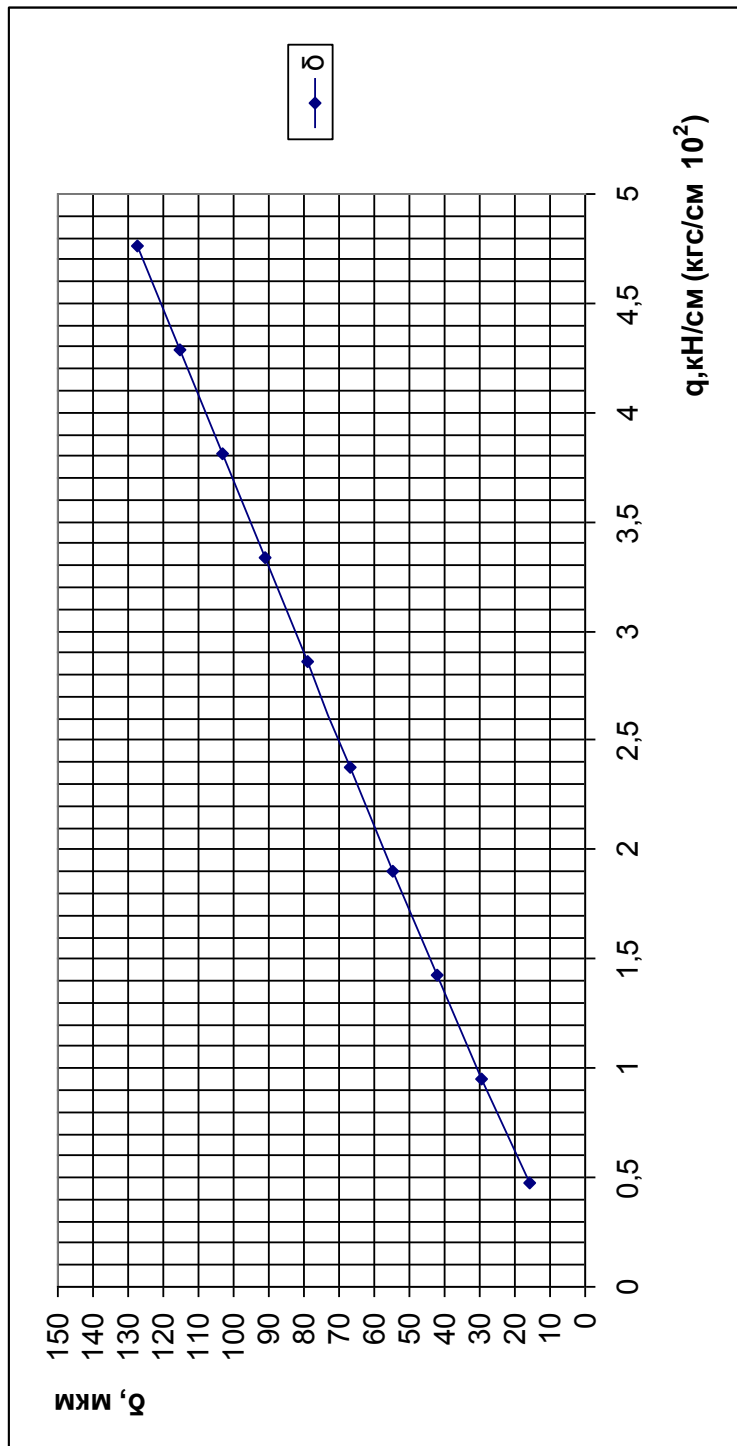


Рисунок А3 – График результата к таблице 3 по формуле Биргера И.А

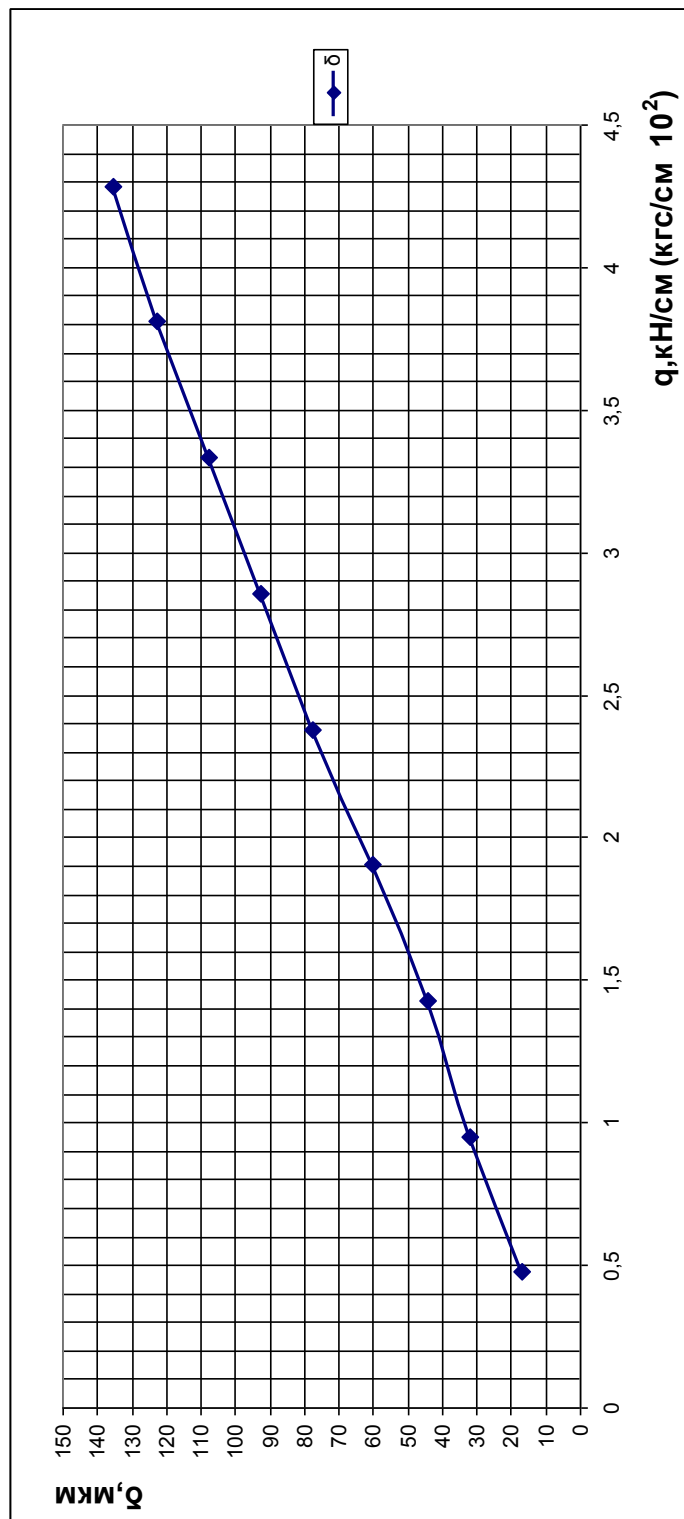


Рисунок А4 – График результата к таблице 4 по формуле Нахатакян Ф.Г

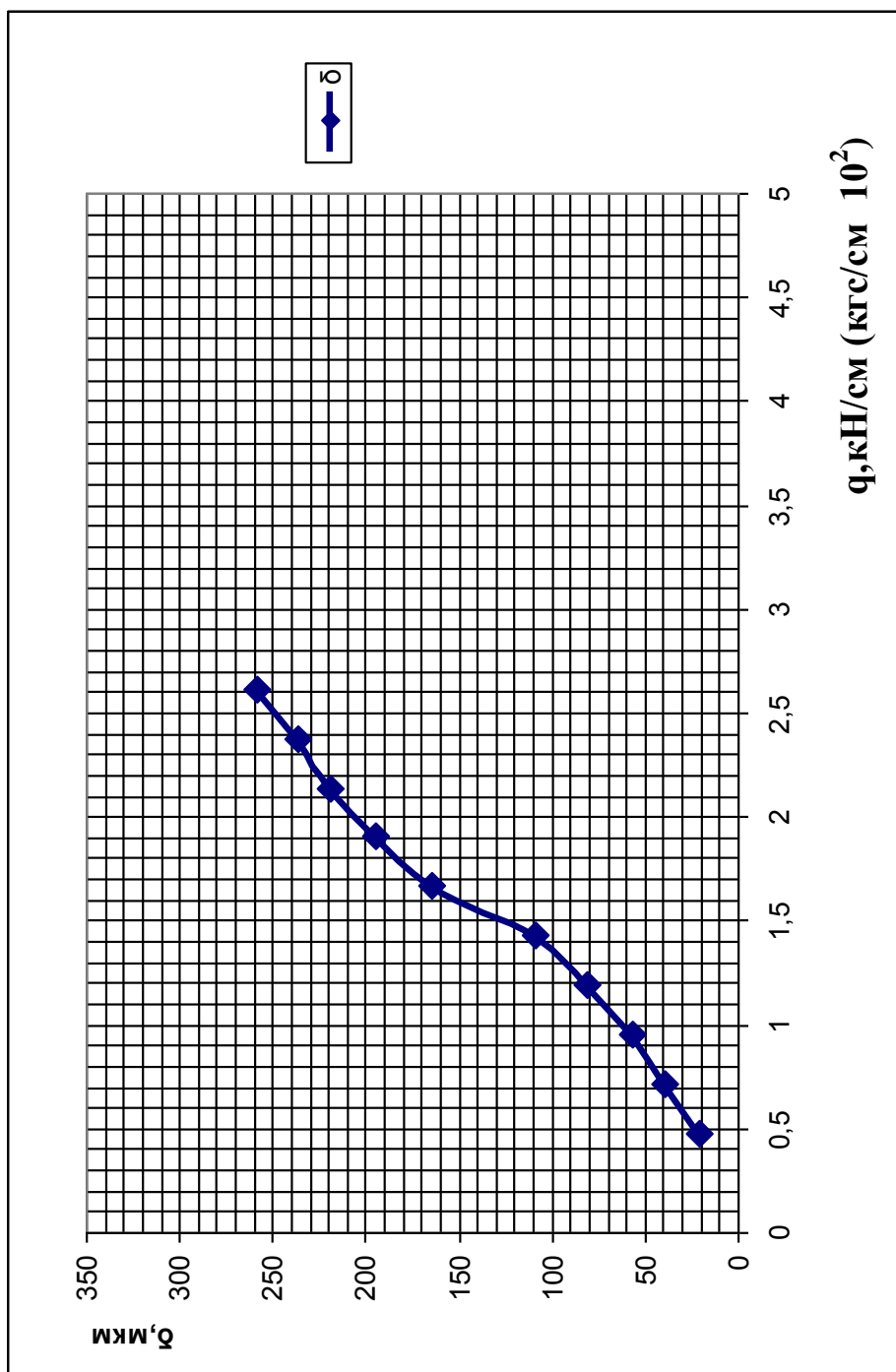


Рисунок А5 – Результат нагрузки кассеты прокатной клетки 150/150 испытание 1(винтовой пресс)

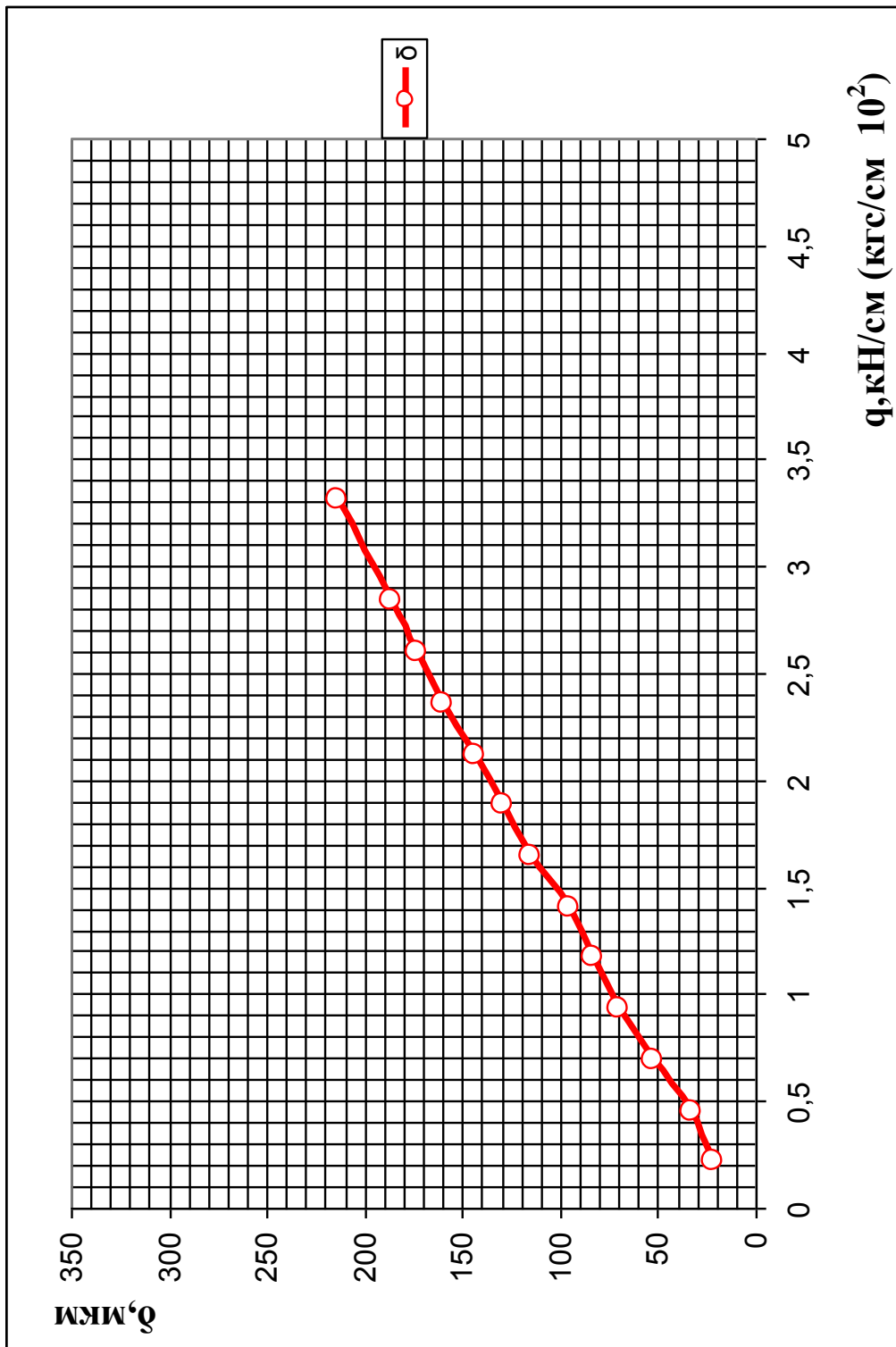


Рисунок А6 – Результат нагрузки кассеты прокатной клетки 150/150 испытание 2(гидравлический домкрат)

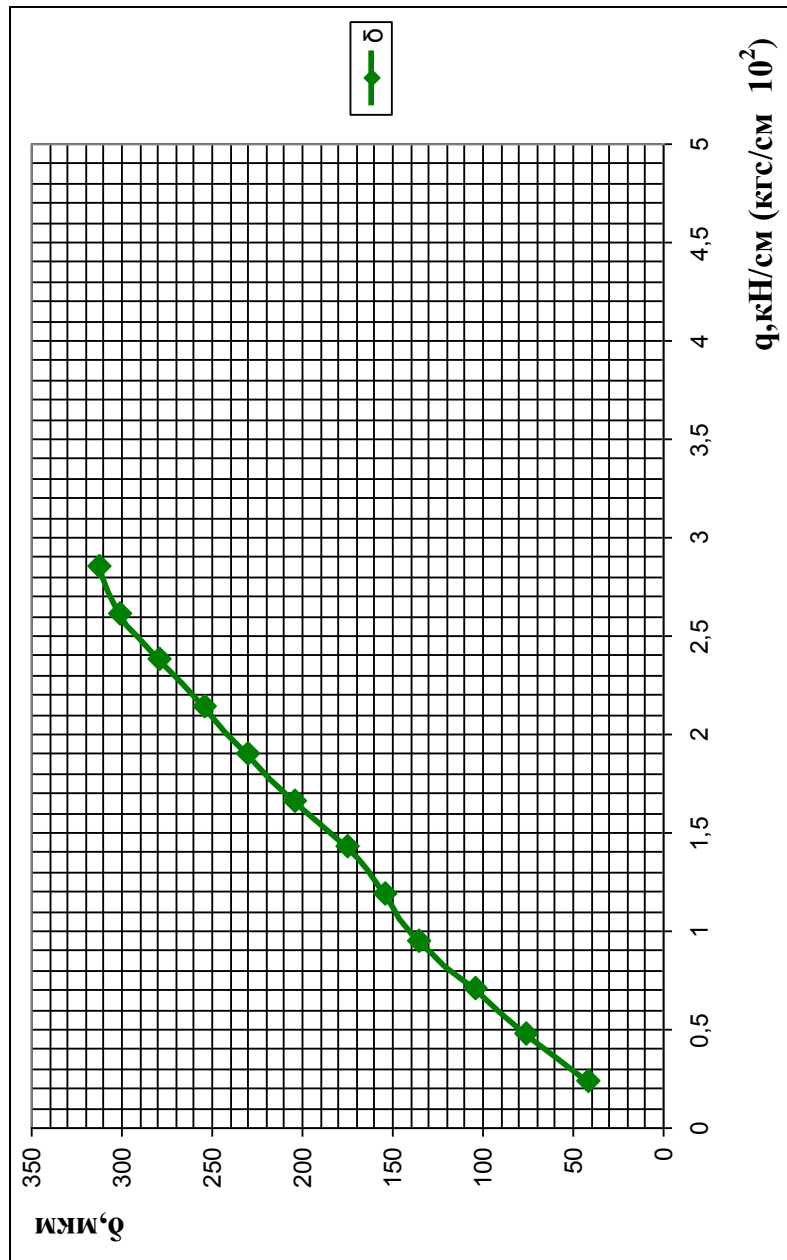


Рисунок А7 – Результат нагрузки кассеты прокатной клетки 150/150 испытание 4 (винтовой пресс по торцу)

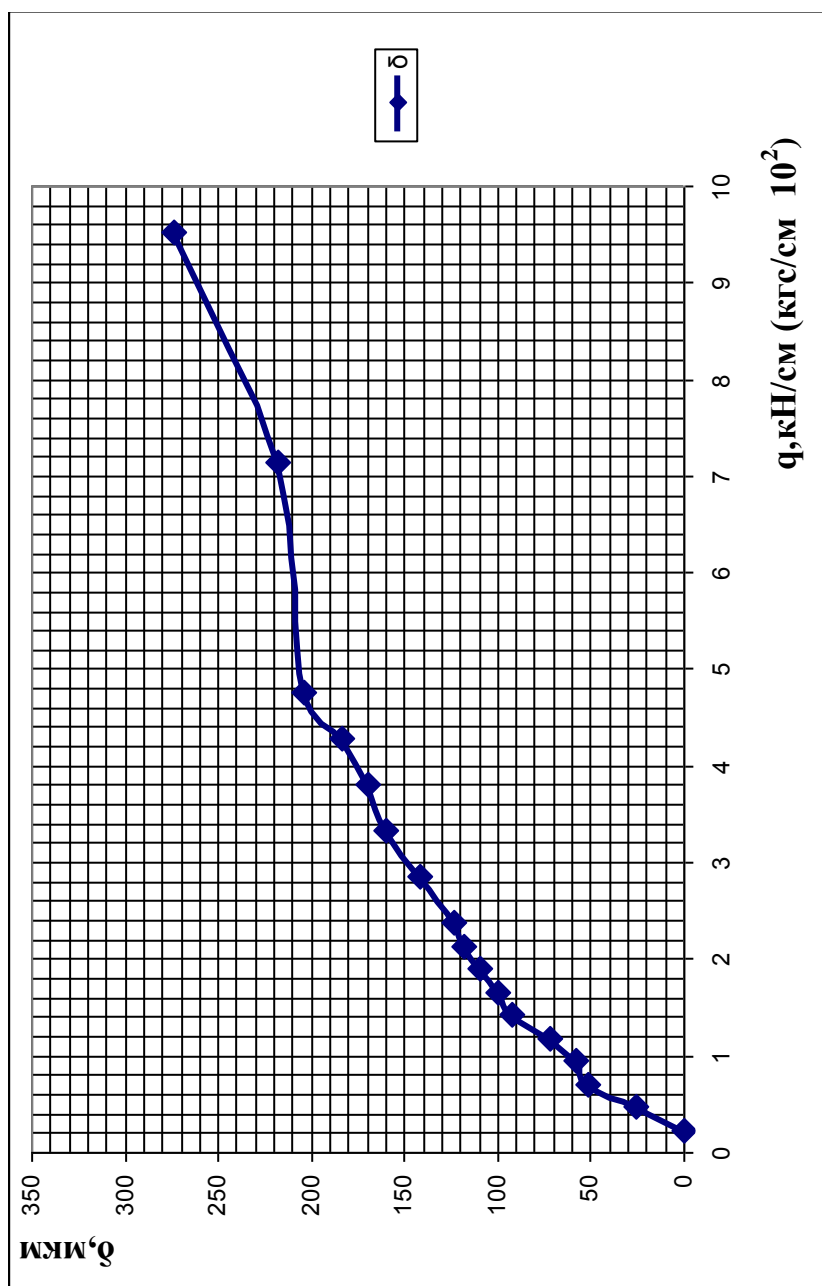


Рисунок А8 – Результат нагрузки испытания 4 (экспериментальная установка)

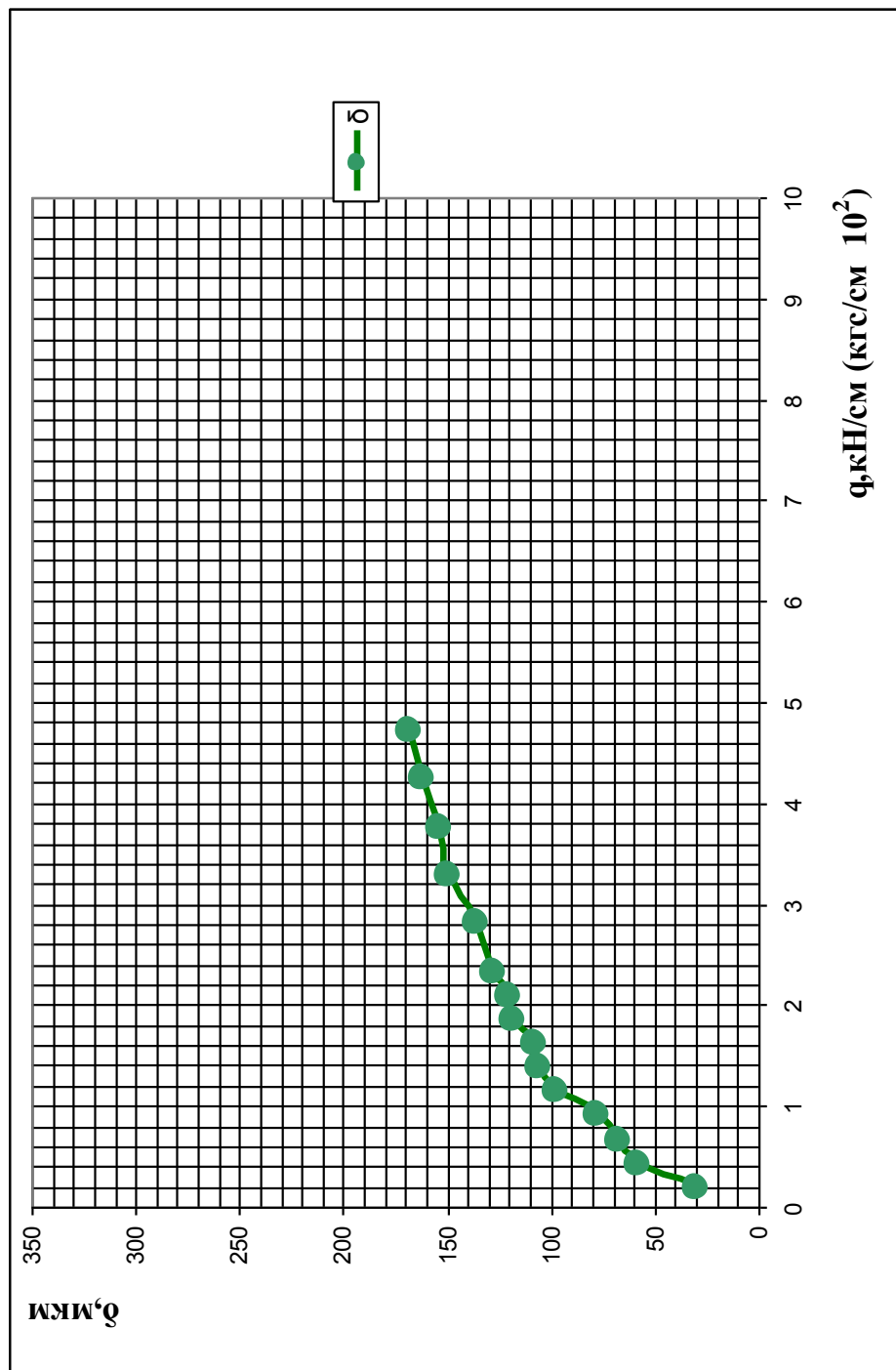


Рисунок А9 – Результат нагрузки испытания 5(экспериментальная устоновка)