

Министерство образования и науки Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия

Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КЛИНОШАРНИРНЫХ МЕХАНИЗМОВ
ПРЕССОВ ДЛЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ**

Монография

Утверждено
на заседании
ученого совета ДГМА
Протокол № ____ от _____

Краматорск

2013

УДК 621.97-231.32:621.96

ББК 34.623

Р 59

Научный редактор –

Рецензенты:

Титов В.А., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов КНТУ «КПИ»;

Огородников В.А., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой механики и сопротивления материалов ВНТУ.

Розглянуто напрямки підвищення ефективності роботи ковальсько-пресового обладнання на розділювальних операціях, де потрібна максимальна початкова робоча сила, на основі розробки й впровадження клиношарнірного механізму з увігнутих клином. Обґрунтована доцільність застосування в пресах клиношарнірного механізму з увігнутих клином, у якого графік зміни сили навантаження найбільш наближений до технологічного типового графіка зміни сили при розділенні. На основі аналізу розроблених математичних моделей клиношарнірного механізму з увігнутих клином запропонована методика розрахунків геометричних, кінематичних і силових параметрів цього механізму, вірогідність яких підтверджена експериментально. Представлено перспективні схеми обладнання з клиношарнірним механізмом з увігнутих клином.

Призначена для фахівців у галузі механіки руйнування й обробки металів тиском.

Роганов, Л. Л.

Р 59 Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением : монография / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста. – Краматорск : ДГМА, 2013. – 155 с.

ISBN _____

Рассмотрены направления повышения эффективности работы кузнечно-прессового оборудования на разделительных операциях, где требуется максимальная начальная рабочая сила, на основе разработки и внедрения клиношарнирного механизма с вогнутым клином. Обоснована целесообразность применения в прессах клиношарнирного механизма с вогнутым клином, у которого график изменения силы нагружения наиболее приближен к технологическому типовому графику изменения силы при разделении. На основе анализа разработанных математических моделей клиношарнирного механизма с вогнутым клином предложена методика расчетов геометрических, кинематических и силовых параметров этого механизма, достоверность которых подтверждена экспериментально. Представлены перспективные схемы оборудования с клиношарнирным механизмом с вогнутым клином.

Предназначена для специалистов в области механики разрушения и обработки металлов давлением.

УДК 621.97-231.32:621.96
ББК 34.623

© Л. Л. Роганов,
Н. В. Чоста, 2013
© ДГМА, 2013

ISBN _____

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
РАЗДЕЛ 1	8
Оборудование и технологии для реализации безотходных способов разделения сортового проката.....	8
1.1 Анализ силовых параметров техпроцессов и оборудования для обработки материалов давлением	8
1.2 Виды клиношарнирных механизмов для привода механических прессов	12
1.3 Анализ разделительных операций, используемых в машиностроении ...	16
1.4 Анализ рекомендаций по выбору геометрических и силовых параметров разделения сортового проката на мерные заготовки	23
<i>1.4.1 Параметры процесса холодной ломки изгибом</i>	<i>23</i>
<i>1.4.2 Параметры процесса разделения сортового проката способом отрезки сдвигом</i>	<i>26</i>
1.5 Обзор конструкций оборудования для реализации безотходных способов разделения сортового проката	29
<i>1.5.1 Оборудование, используемое для холодной ломки проката изгибом </i>	<i>29</i>
<i>1.5.2 Оборудование для отрезки проката сдвигом.....</i>	<i>33</i>
<i>1.5.3 Анализ работы оборудования для разделения сортового проката </i>	<i>35</i>
1.6 Системы смазки, применяемые в кузнечно-прессовых машинах	40
РАЗДЕЛ 2	42
Теоретические исследования кинематических и силовых параметров клиношарнирного механизма с вогнутым клином.....	42
2.1 Повышение эффективности и надежности работы оборудования при реализации разделительных процессов на основе разработки и исследования клиношарнирного механизма с вогнутым клином.....	42

2.2	Выбор методов теоретических исследований	50
2.3	Структурный анализ клиношарнирного механизма с вогнутым клином	51
2.4	Кинематический анализ клиношарнирного механизма с вогнутым клином	55
2.5	Силовой анализ клиношарнирного механизма с вогнутым клином	61
2.6	Определение коэффициента полезного действия клиношарнирных механизмов	68
2.7	Анализ влияния трения, замена трения скольжения трением качения ...	72
2.8	Исследование режимов трения на контактных поверхностях клиношарнирного механизма с вогнутым клином	76
РАЗДЕЛ 3		83
Экспериментальные исследования процессов разделения сортового проката и механизмов для их реализации		83
3.1	Выбор методов и материалов для проведения экспериментальных исследований	83
3.2	Экспериментальные исследования холодной ломки проката изгибом ...	87
3.3	Экспериментальные исследования клиношарнирного механизма с вогнутым клином при реализации отрезки проката сдвигом	99
3.3.1	<i>Исследование кинематических характеристик клиношарнирного механизма с вогнутым клином для операции отрезки сдвигом</i>	<i>99</i>
3.3.2	<i>Исследование силовых характеристик клиношарнирного механизма с вогнутым клином для операции отрезки сдвигом</i>	<i>103</i>
3.3.3	<i>Экспериментальные исследования влияния видов смазки на соотношение сил в клиношарнирном механизме с вогнутым клином</i>	<i>105</i>
3.4	Исследование влияния давления смазки, подаваемой на контактные поверхности клиношарнирного механизма с вогнутым клином, на величину коэффициента трения	107
РАЗДЕЛ 4		114
Перспективные конструктивные схемы прессов с клиношарнирным		

механизмом для разделения сортового проката. Рекомендации по применению	114
4.1 Новые конструкции машин с клиношарнирным механизмом для разделительных операций	114
4.2 Самонастраивающиеся клиновые системы в механических прессах	119
4.3 Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием методики синтеза комбинированных методов обработки	124
4.4 Рекомендации по выбору технологических параметров при отрезке проката сдвигом	134
4.4.1 <i>Влияние формы и ориентации в пространстве сечения проката на силу отрезки</i>	134
4.4.2 <i>Расчеты клиношарнирных механизмов прессов для отрезки проката больших сечений</i>	137
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	143

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование металла, экономия энергоресурсов, снижение трудоемкости и улучшение качества продукции – важные задачи, которые следует решать на всех технологических этапах металлообрабатывающего производства, включая процессы обработки материалов давлением и составляющую часть этих процессов – разделение проката на мерные заготовки. В области разделительных операций используются традиционные технологии, реализуемые на известном серийном оборудовании – прессах и ножницах, поэтому прогресс возможен при условии применения новых приемов в технологиях с использованием нестандартных механизмов в машинах.

Разделительные операции являются одними из самых распространенных в обработке материалов давлением. Они выполняются, как на специализированном кузнечно-прессовом оборудовании: ножницах, хладноломах и др., так и на универсальном: гидравлических и механических прессах, молотах, пресс-молотах, в которых, в качестве исполнительных механизмов, применяются: гидроцилиндры, кривошипно-шатунные, коленно-рычажные, винтовые механизмы, являющиеся, как правило, многосвязными и имеющие сравнительно невысокую жесткость.

Разделительные операции отличаются от других операций обработки материалов давлением тем, что для их проведения необходимо обеспечить максимальную силу разделения в начале рабочего хода. Это требует от исполнительных механизмов кузнечно-прессового оборудования учета такого характера силовой нагрузки. Кроме того, необходимо учитывать высокие требования к качеству поверхности разделения, максимальному снижению затрат энергии, повышению коэффициента полезного действия (КПД) механизмов в оборудовании для разделительных операций. Существующие традиционные исполнительные механизмы машин для разделительных операций не удовлетворяют в полной мере этим требованиям.

Более эффективными, в этом смысле, являются клиновые, в том числе, разрабатываемые в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА), клиношарнирные механизмы, имеющие большие опорные поверхности, небольшую высоту звеньев по направлению действия рабочей силы, переменность соотношения между приводной и рабочей силами.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что совершен-

ствование клиношарнирного механизма и создание на его основе нового типа кузнечно-прессового оборудования, предназначенного для повышения уровня заготовительного производства, являются задачами актуальными и имеющими важное научное и практическое значение.

Значительный вклад в создание и последующее развитие научных основ разработки оборудования и технологии для реализации безотходных способов разделения сортового проката внесли: Зимин А.И., Власов В.И., Живов Л.И., Ланской Е.Н., Овчинников А.Г., Роганов Л.Л., Мещерин В.Т., Соловцов С.С., Финкель В.М., Тимощенко В.А., Борисов В.М., Высоцкий Е.Н., а также ряд других отечественных и зарубежных ученых.

На основании проведенного литературного и патентного поисков сделан вывод о том, что новый качественный уровень развития заготовительного производства возможен при условии создания нового кузнечно-прессового оборудования с повышенными энергетическими возможностями, жесткостью и использованием нестандартных исполнительных механизмов. Разработанный клиношарнирный механизм с вогнутым клином и является таким исполнительным механизмом кузнечно-прессового оборудования.

Монография посвящена исследованию клиношарнирного механизма прессы с вогнутым клином реализуемым с помощью него безотходным способом разделения сортового проката отрезкой сдвигом и холодной ломкой изгибом.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в проведении научных исследований и участие в обсуждении научных результатов канд. техн. наук, доц. Карнауху С.Г., канд. техн. наук, доц. Владимирову Э.А. и ст. преподавателю Шоленинову В.Е.

РАЗДЕЛ 1

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ БЕЗОТХОДНЫХ СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА

1.1 Анализ силовых параметров техпроцессов и оборудования для обработки материалов давлением

Процессы обработки материалов давлением (ОМД), с учетом характера изменения сил сопротивления заготовки в процессе рабочего хода инструмента, определяют в значительной степени выбор оборудования для их реализации [1–10]. Наиболее распространенной является система деления основных технологических процессов ОМД на шесть групп, которые приведены в табл. 1.1. [1–6]. Типовые графики сил, развиваемых механизмами кузнечно-прессовых машин, представлены в табл. 1.2. Сравнивая графики сил (см. табл. 1.1, 1.2), можно сделать оценку соответствия выбора оборудования под необходимый технологический процесс.

Гидравлические прессы целесообразнее применять при выполнении операций первой и четвертой групп с большим ходом, плавными колебаниями нагрузки, большим коэффициентом заполнения графика сил. К таким операциям относятся: вытяжка листового материала, прессование, выдавливание.

Кривошипные прессы по характеру развиваемых усилий больше подходят к технологическим операциям третьей и шестой групп со сравнительно небольшим ходом и резким повышением силы к концу рабочего хода. Это операции объемной штамповки, гибки и чеканки.

Молоты целесообразнее применять в операциях с коротким рабочим ходом, резким повышением и спадом рабочего усилия, что характерно для операций пятой и шестой групп: вырубки-пробивки, прошивки, разрезки заготовок, чеканки и калибровки. Выбор прессового оборудования производят так, чтобы максимальная сила операции соответствовала номинальному усилию прессы. В механических прессах учитывается энергия маховика.

Таблица 1.1 – Типовые графики сил при ОМД

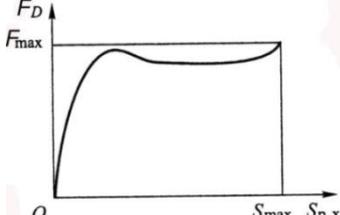
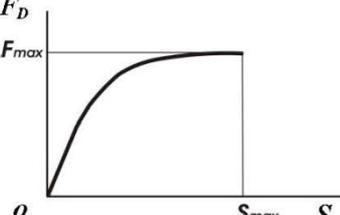
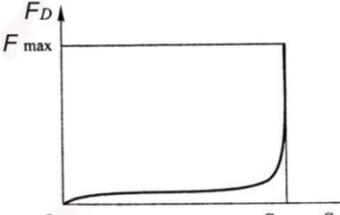
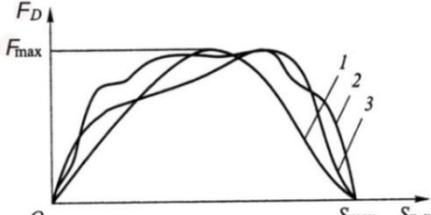
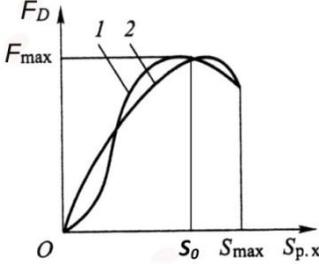
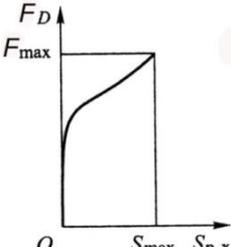
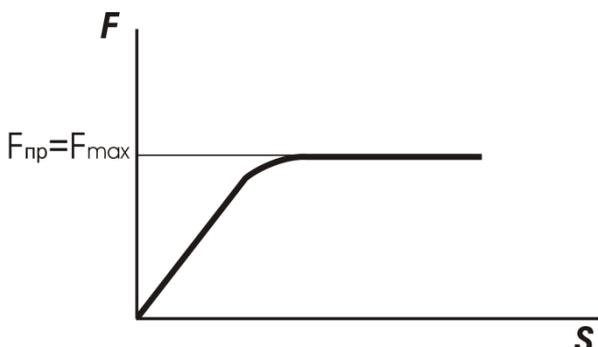
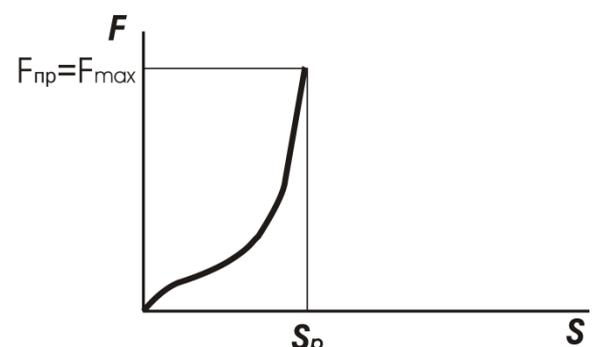
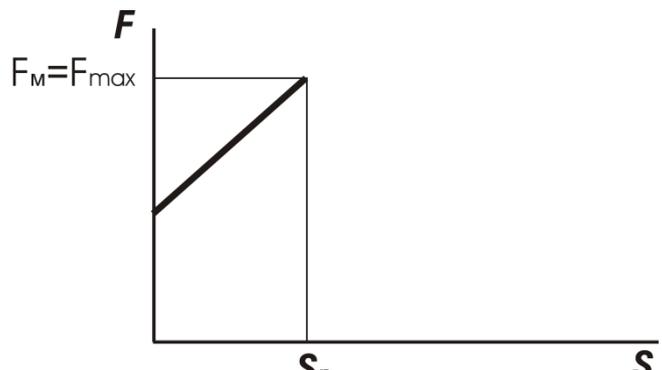
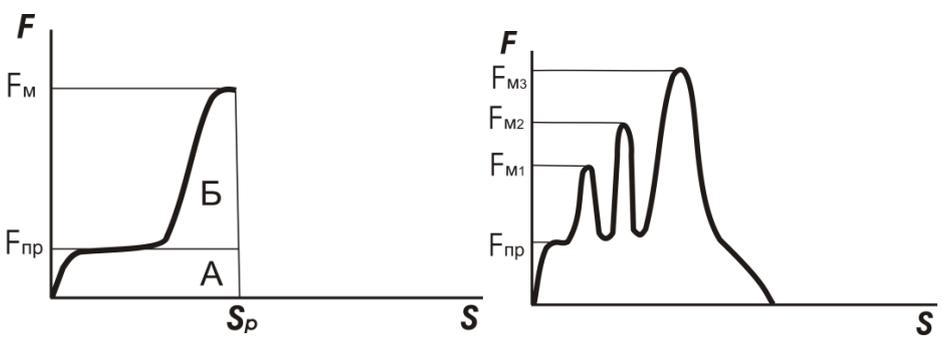
№ группы	Наименование технологической операции	Типовой график сил	Заполнение графика сил, %
1	Выдавливание, прошивка, протяжка и т.д.		70...80
2	Осадка, протяжка		60...70
3	Объемная штамповка, гибка, формовка, брикетирование и пакетирование		10...25
4	Вытяжка листа, штамповка листа эластичными средами: 1,2 – первая и вторая вытяжки; 3 – вытяжка с утонением		40...70
5	Разделительные операции: 1 – вырубка – пробивка; 2 – разрезка прутков		45...50
6	Чеканка и калибровка		35...45

Таблица 1.2 – Типовые графики сил кузнечно-прессовых машин

Вид машины	Типовой график сил
Гидравлические прессы	 <p>The graph shows force F on the vertical axis and displacement S on the horizontal axis. The force increases linearly from the origin to a point $(S_p, F_{пр}=F_{max})$, then levels off to a constant value $F_{пр}=F_{max}$.</p>
Механические кривошипные прессы	 <p>The graph shows force F on the vertical axis and displacement S on the horizontal axis. The force increases non-linearly from the origin to a point $(S_p, F_{пр}=F_{max})$, then drops sharply to zero.</p>
Молоты	 <p>The graph shows force F on the vertical axis and displacement S on the horizontal axis. The force increases linearly from a non-zero value to a point $(S_p, F_m=F_{max})$, then drops sharply to zero.</p>
Пресс-молоты	 <p>The graph shows force F on the vertical axis and displacement S on the horizontal axis. The force increases from the origin to a point (S_p, F_m), then drops sharply to zero. The force curve is labeled with F_m and $F_{пр}$. The graph is divided into two regions, A and B.</p> <p>The graph shows force F on the vertical axis and displacement S on the horizontal axis. The force increases from the origin to a point $(S_p, F_{пр})$, then drops sharply to zero. The force curve is labeled with $F_{пр}$, $F_{м1}$, $F_{м2}$, and $F_{м3}$.</p>

Молотовое оборудование выбирают по требуемой энергии деформирования и максимальной силе удара, которая зависит от жесткости соударяющейся системы молота и заготовки [1,4]. Силы, развиваемые на молотах, могут достигать очень больших значений и поэтому, с целью экономии энергии, а чаще из-за отсутствия прессов с требуемыми номинальными усилиями, техпроцессы разбивают на операции. Например, в операциях объемной штамповки набор металла в штампе ведут на сравнительно большом ходе пресса, усилие которого в 3...7 раз меньше максимальной силы окончательной штамповки. При наборе металла перемещается значительный объем материала заготовки, производится заполнение основных полостей штампа. Затем заготовка передается на молот, где производится ее ударное деформирование на малом рабочем ходе, небольшом смещенном объеме, поскольку требуется заполнение узких, сложных, малых по объему полостей штампа при значительных силах. Чем меньше величина хода деформирования, тем, при постоянной энергии, большее усилие развивает молот, и тем полнее заполняется сложный рельеф штампа.

Особое положение среди техпроцессов ОМД занимают разделительные операции (группа 5, см. табл. 1.1). Процесс отрезки начинается после прохождения инструментом пути S_0 , на котором выбирают зазоры и происходит упругая деформация инструмента и машины, когда сила достигает максимума. Далее от F_{max} идет спад силы по мере уменьшения оставшейся площади среза. Применение молотов для выполнения разделительных операций связано с высокими ударными нагрузками, вибрациями, вредным воздействием этих факторов на окружающую среду и на обслуживающий персонал. Поэтому для разделительных операций выбирают либо гидропрессы (график 1, см. табл. 1.2), либо механические (кривошипные) прессы (график 2, см. табл. 1.2). Недостатком такого выбора будет несоответствие графиков сил машины и техпроцесса, и, как следствие, перегрузка гидропрессов и механических прессов при резком сбросе технологической силы при отрезке за счет накопления упругой энергии, что приводит к динамическим явлениям в машинах.

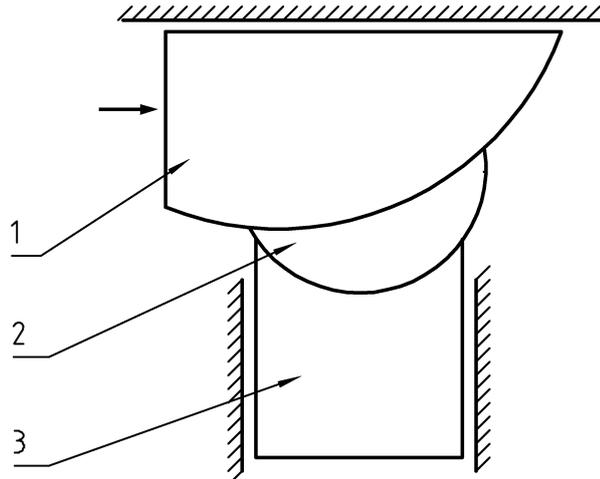
Поэтому стоит проблема выбора механизма привода машины для разделительных операций с таким видом передаточного звена, который обеспечивает изме-

нение силы деформирования на всем пути нагружения, максимально приближенное к типовому графику сил при разделительных процессах ОМД. Из всех известных исполнительных механизмов наиболее близким по технической сущности и достигаемому эффекту является клиношарнирный механизм (КШМ), созданный в Донбасской государственной машиностроительной академии и подробно исследованный в работах [11–13] для большинства операций ОМД.

1.2 Виды клиношарнирных механизмов для привода механических прессов

Для привода механических прессов различного назначения разработаны разнообразнейшие виды КШМ, позволяющие решать ряд проблем, возникающих при создании специализированных машин и механизмов, оптимизации технологических процессов ОМД [14–22]. Вопросы разработки КШМ рассмотрены в работах Харлашкина В.В. и Трофимова В.И. [12,13].

В общем случае, основными элементами КШМ являются (рис. 1.1): клин 1, шарнир 2 и ползун 3, на который устанавливается инструмент. Клин своей рабочей поверхностью воздействует на шарнир, который поворачивается в пазу ползуна, передавая силу на последний. Отличиями клиношарнирного механизма от механизмов, применяемых в традиционных машинах ОМД, являются: большая поверхность, воспринимающая технологическую силу; небольшая высота его звеньев по направлению действия рабочей силы, что приводит к уменьшению их упругой деформации и, соответственно, уменьшению величины накапливаемой энергии упругой деформации в механизме; высокая жесткость; переменность соотношения между приводной и рабочей силами; возможность обеспечения приводной силы от общепринятых механизмов; технологичность изготовления; разнообразие сочетаний сопрягаемых поверхностей – выпуклые-вогнутые, что придает им новые свойства; возможность применения различных систем смазки [12,13].



1 – клин; 2 – шарнир; 3 – ползун

Рисунок 1.1 – Схема клиношарнирного механизма с выпуклым клином [12]

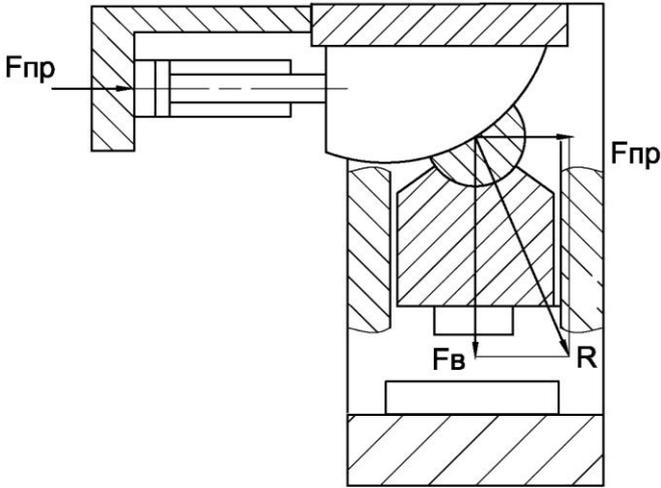
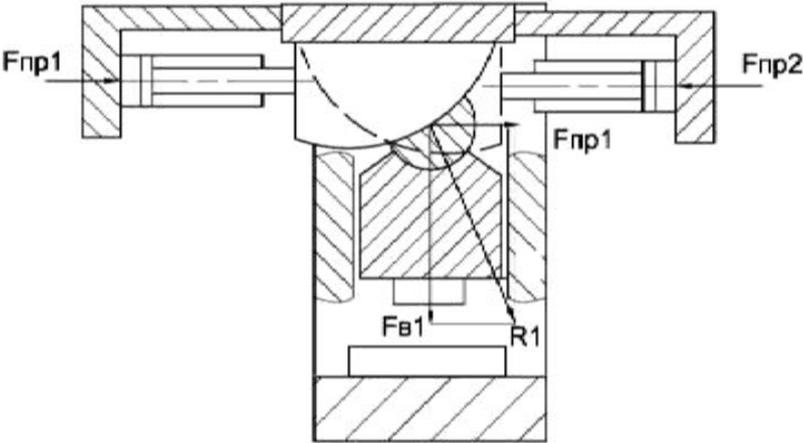
В работе Харлашкина В.В. [12] исследованы кинематические и энерго-силовые параметры КШМ с выпуклым клином при использовании различных типов привода клина. В таком КШМ угол поворота шарнира, по мере движения клина, меняется от некоторого начального значения до нуля, что позволяет трансформировать постоянную приводную силу на клине в переменную возрастающую силу на ползуне. Такой характер изменения рабочей силы наилучшим образом соответствует характеру формообразующих операций ОМД, таких как: объемная, листовая штамповка; прессование, что и определяет область применения КШМ с выпуклым клином.

Трофимов В.И. [13] предложил в винтоклиновом прессе выпуклый клин расположить под определенным углом наклона Θ к горизонту, что позволяет расширить диапазон величин ходов ползуна без увеличения размеров привода клина, снизить боковые силы на направляющие, изменить (при изменении угла Θ) закон движения ползуна.

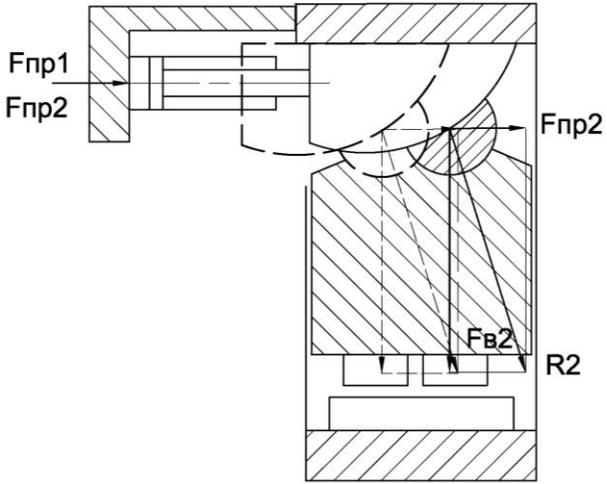
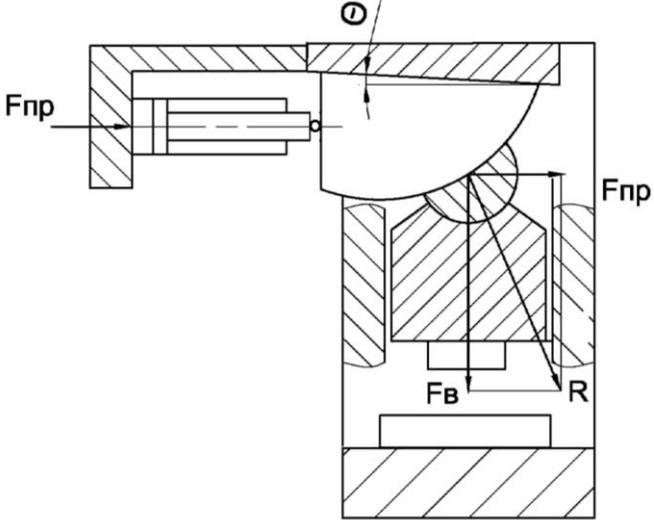
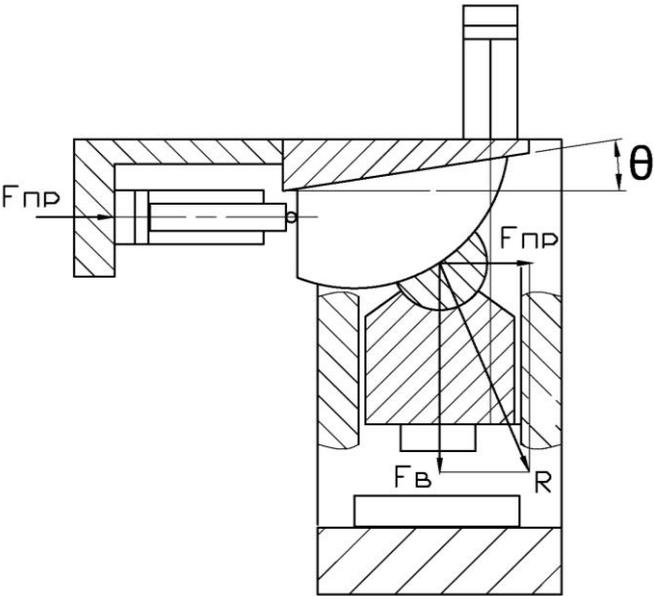
Основные схемы КШМ представлены в табл. 1.3. На схеме № 1 представлена конструкция машины с клиношарнирным механизмом с выпуклым клином для осуществления операций объемной и листовой штамповки. Данное конструктивное решение позволяет повысить точность штампованных заготовок. Конструктивная

схема № 2 позволяет осуществлять штамповку деталей без реверса привода за счет выполнения шарнира с поверхностями, контактирующими с двумя выпуклыми клиньями. Для реализации многопозиционной штамповки предложена конструкция пресса с парой клиношарнирных механизмов (схема № 3).

Таблица 1.3 – Виды клиношарнирных механизмов для привода механических прессов [11-22]

№ п/п	Схема КШМ	Область применения
1		Процессы объемной и листовой штамповки[12]
2		Штамповка без реверса привода

Продолжение таблицы 1.3

3		<p>Многопозиционная штамповка</p>
4		<p>Операции выдавливания, вытяжки[13]</p>
5		<p>Штамповка с укороченным ходом[13]</p>

Схемы №№ 4,5 отличаются тем, что обеспечивают удлиненный или укороченный ход ползуна, соответственно для операций вытяжки, выдавливания или чеканки, за счет изменения угла движения приводного выпуклого клина.

Особенностью приведенных схем конструкций машин с КШМ является то, что в качестве приводной силы $F_{пр}$ может использоваться не только сила от гидравлического, пневматического цилиндров, но и от кривошипно-шатунного, винтового, коленно-рычажного механизмов, линейного электродвигателя и т.п.

1.3 Анализ разделительных операций, используемых в машиностроении

Для получения мерных заготовок в современном заготовительном производстве используются более десяти различных способов, которые неравноценны по своим технико-экономическим показателям. Проанализируем наиболее распространенные из них. Способы деления сортового проката оценивались следующими показателями: качеством получаемых заготовок; производительностью процесса; затратами энергии на деление; расходом и дефицитностью инструмента; сложностью оснастки и ее универсальностью [23–27].

Все методы деления сортового проката делятся на три группы:

- отходные методы: резка на дисковых пилах, фрезерно-отрезных, токарных станках, приводных ножовках, резка абразивными, фрикционными инструментами и т.д.;
- отходные методы с необратимым отходом: газовая резка, резка плазмой, лазером, струей жидкости высокого давления и т.д.;
- безотходные методы: отрезка сдвигом, холодная ломка изгибом, рубка клиновыми ножами и т.д.

Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных методов деления.

Газовая резка (ацетиленовая, бензиновая и керосиновая) обеспечивает хорошее качество реза и является весьма производительной, особенно автоматизированная групповая резка с применением одновременно нескольких резаков. С повышением в металле содержания углерода и легирующих элементов газовая резка стали

затрудняется, при этом необходимо применять флюсы, а также подогревать прутки перед резкой и замедленно охлаждать заготовки после резки во избежание образования на них торцовых трещин. Отходы при газовой резке составляют 4...8 мм по длине прутка на каждую заготовку [24]. Поэтому газовую резку применяют, главным образом, для крупных профилей, в частности при свободной ковке.

Преимущества резки на дисковых пилах, ножовочной резки – в лучшем, по сравнению с другими способами, качестве получаемых торцов заготовки и точности размеров последней по длине; недостатки – в сравнительно низкой производительности, большом расходе инструмента (дисков) и дополнительном отходе металла на каждую резку 3..8 мм при дисках диаметром 300...800 мм [24]. Поэтому резку стальных прутков на дисковых пилах применяют только в тех случаях, когда требуется очень точная длина заготовки и торец, строго перпендикулярный к оси.

Электроискровая и анодно-механическая резка дают возможность получения заготовок точных размеров, имеющих малое отношение длины к диаметру при небольших отходах металла. Однако существенными их недостатками являются малая стойкость латунных электродов (дисков), значительный расход электроэнергии и относительно небольшая скорость резки, которая не превышает, например, скорости фрезерования [24].

Резки с помощью лазера и струёй жидкости высокого давления еще не получили широкого применения в промышленности. С помощью излучения лазера и тонкой струи жидкости с абразивными частицами можно выполнять отверстия в наиболее твердых и хрупких материалах. Для обработки твердых материалов также применяют резку ультразвуком. Производительность этого метода небольшая [24].

Холодную ломку изгибом на хладноломах применяют, главным образом, для получения заготовок крупных сечений. Способ холодной ломки изгибом обладает рядом преимуществ: низкая энергоемкость по сравнению со способом отрезки сдвигом, простота реализации, возможность разделения твердых и высокопрочных материалов без нагрева. Положительным следует считать то, что с увеличением сечения ломаемого проката растет его склонность к хрупкому разрушению. К недостаткам способа холодной ломки изгибом относят: дифференцирование операций – раз-

метка, нанесение концентратора напряжений, ломка; сложность управления траекторией движения магистральной трещины и, как следствие, низкое качество поверхности разделения (косина, вырывы и козырьки) [24].

Работы по изучению и совершенствованию способа холодной ломки изгибом сортового проката проведены в Алчевском горнометаллургическом, Донецком физико-техническом институтах, а также в Тамбовском институте химического машиностроения, Воронежском политехническом, Кишиневском политехническом институтах, Донбасской государственной машиностроительной академии и других под руководством Финкеля В.М., Тимощенко В.А., Борисова В.М., Высоцкого Е.Н., Гришаева В.В. и др. [24,25,29–32].

В литературе [24,33,34] приведены рекомендации к реализации процесса холодной ломки изгибом. Одним из наиболее важных направлений, способствующих развитию представления о природе разрушения, является изучение завершающего этапа нагружения — распространения разрушающей трещины. Это направление, начало которому положил Гриффитс, продолжил затем ряд исследователей, в частности, Орован и Ирвин. В нашей стране на математическом фундаменте, построенном Колосовым Г.В. и Мухелишвили Н.И., оно развивалось Христиановичем С.А., Баренблаттом Г.И., Леоновым М.Я., Черепановым Г.П., Панасюком В.В., Финкелем В.М. и многими другими [35–40].

Определенный прогресс в экспериментальной области достигнут благодаря работам Фридмана Я.Б. с сотрудниками, которые изучали взаимосвязь кинетики разрушения с условиями нагружения и запасом упругой энергии. Что же касается динамической механики разрушения, которая исследует стабильность стационарных трещин под действием динамических нагрузок и процессы распространения трещин, то здесь теоретические достижения пока недостаточно подкрепляются практическими рекомендациями. Это объясняется, прежде всего, чрезвычайной сложностью описания динамики разрушения, а также сложившейся диспропорцией между развитием теоретических и экспериментальных методов исследования распространения трещин динамической механики разрушения. Хрупкая трещина по своим потенциальным возможностям — идеальный инструмент для безотходного

разделения твердых материалов на части. При этом затраты энергии на раскрой приближаются к своему минимально возможному теоретическому уровню. Однако широкому применению метода холодной ломки изгибом препятствует отсутствие надежных и доступных способов разделения и оборудования для их реализации.

На основании вышесказанного можно сформулировать основные требования к процессу разделения [24–27]:

- низкая энергоемкость процесса за счет: минимальной пластической деформации при разрушении; динамического (импульсного) приложения нагрузки; изменения температуры (хладноломкость);
- высокое качество получаемых заготовок за счет: обеспечения управляемости траекторией трещины; исключения больших пластических деформаций при разрушении; исключения металлического контакта инструмента и заготовки; использования в качестве рабочего тела жидкости.

Авторы работы [41] предлагают усовершенствовать процесс ломки с целью улучшения качества поверхности разделения и возможностью осуществления на автоматических линиях, за счет применения схемы «прокатка-ломка». Данный способ применим только для прутков круглого сечения, так как нанесение концентратора напряжения выполняют в косо расположенных валках, что приводит к вращению исходной заготовки.

Разделение сортового проката способом отрезки сдвигом применяется в серийном и массовом производстве. Данный способ обеспечивает наиболее высокую производительность, однако при этом требует значительных удельных нагрузок для осуществления рабочего цикла, вследствие чего увеличиваются габариты и металлоемкость конструкций, а значит и стоимость оборудования и оснастки. При этом технологический процесс требует нагрева проката перед отрезкой до температуры 300...900°C, начиная от диаметра 60 мм и выше (особенно для сталей с повышенными механическими свойствами), что усложняет технологию разделения и увеличивает себестоимость получаемых заготовок. К недостаткам способа отрезки сдвигом следует отнести ограниченность разделения проката по сечениям не более 80...160 мм. Отрезка сдвигом не всегда обеспечивает требуемое качество заготовок,

особенно при раскрое высокопрочных штамповых и инструментальных сталей [23,42–46].

В последние годы проведена большая работа по изучению и совершенствованию отрезки сдвигом сортового проката на территории стран СНГ (Мосстанкине, ЭНИКМАШе, МВТУ, Харьковском авиационном, Кишиневском политехническом институтах, ДГТУ, ДонНИИчермете и т.д.) и за рубежом (Япония, Англия, Германия). В работах Мещерина В.Т., Соловцова С.С., Тимощенко В.А., Следнева В.П., Шульгина Г.М. разработаны основы теории отрезки сдвигом, определены оптимальные параметры процесса, предложены новые схемы поперечного и продольного деления сортового проката, созданы различные конструкции ножниц и штампов [23,25,47,48].

Наибольший интерес для отрезки сортового проката представляет группа способов безотходной отрезки сдвигом в штампах, осуществляемая на прессах.

Учитывая подобие механизма деформирования при отрезке на ножницах и прессах, отметим, что в случае использования универсальных кривошипных пресов для отрезки проката в штампах затраты на содержание оборудования и производственных площадей меньше, чем при использовании кривошипных ножниц [23].

Дополнительным преимуществом отрезных штампов перед сортовыми ножницами является возможность выполнения в них за один ход нескольких технологических операций. Наиболее рациональными являются штампы со следующей последовательностью технологических операций: редуцирование-отрезка; надрезка-отрезка; отрезка-калибровка и другие [23]. Данное обстоятельство определило создание нового направления в разделительных операциях в штампах, называемого – комплексные заготовительно-разделительные операции [23,49,50].

Перспективными являются штампы, выполненные по схеме закрытой отрезки с осевым подпором. Данный способ известен под названием «метод Вереша» [23]. Осевое сжатие отрезаемой части прутка может быть достигнуто приложением сжимающего давления к отрезаемой части прутка или полосы. Под действием осевой сжимающей силы прутки осаживаются и заполняют полости в ножах, создавая давление на стенки. В объеме металла, находящемся в полости ножей, создается благо-

приятное для пластической деформации напряженное состояние всестороннего неравномерного сжатия, благодаря которому отрезка происходит путем пластического сдвига без стадии хрупкого разрушения.

Применение схем открытой и неполной открытой отрезки не обеспечивает высокое качество поверхности разделения, так как в процессе отрезки отрезаемая часть и полоса поворачиваются, что приводит к образованию растягивающих напряжений в очаге деформации и искажению поверхности разделения [23,25,27]. Угол скоса торца заготовки относительно оси прутка достигает 10^0 , в связи с чем имеет место большая утяжка, а поверхность разделения получается волнистой со следами задигов и вырывов. В случае нагрева прутков из мягких материалов (стали марок: 20, Ст3, а также латунь, медь, алюминий) перед отрезкой до $450...550^{\circ}\text{C}$, ухудшается качество поверхности [23].

В работах [51,52] установлено, что повышение скорости отрезки до 20 м/с не только не улучшает качество поверхности разделения по схеме открытой отрезки, но и приводит к образованию значительных дефектов – заусенцев, утяжки, овальности на заготовках из вязких материалов (стали марок: 20, 12X18H9T), или к появлению трещин и вырывов на торцах заготовок из более твердых материалов (стали марок: 45, 40X, У8А, ХВГ, 14X17H2). При этом увеличение скорости разделения до 40 м/с и 70 м/с повышает качество отрезанных образцов по схеме открытой отрезки.

Приведенные выше аргументы показывают бесперспективность схем открытой и неполностью открытой отрезки, а также нецелесообразность их совершенствования. Наибольший интерес для отрезки сдвигом сортового проката представляют схемы неполностью закрытой отрезки с пассивным или активным поперечным зажимом. При этом пассивный поперечный зажим создается реактивными силами со стороны ножей. Активный поперечный зажим обеспечивается конструкцией штампа. Благодаря ограничению поворота в вертикальной плоскости и уменьшению растягивающих напряжений в очаге деформации, заготовки, отрезанные таким способом, характеризуются меньшими искажениями формы поперечного сечения. Это подтверждается и тем обстоятельством, что совершенствование технологии отрезки сдвигом ведется за счет ограничения подвижности отрезаемой части и полосы. Так,

согласно исследованиям [23,47], одним из условий получения плоской и перпендикулярной поверхности разделения является поддержание отрезаемой заготовки во время отрезки. В этом случае для улучшения качества поверхности разделения необходимо ограничить изгиб отрезаемой части и полосы, что автоматически приводит к схемам неполностью закрытой отрезки вне зависимости от условий создания прижима.

Рассматривая многоопорную отрезку [53], Мещерин В.Т. отмечает, что кроме повышения производительности, данный способ отрезки позволяет стабилизировать положение отрезаемой части и улучшить качество поверхности разделения. При этом он указывает на то, что не все отрезаемые заготовки находятся в одинаковых условиях и качество их поверхности разделения отличается. Это, прежде всего, связано с тем, что первая заготовка отрезается по схеме открытой отрезки и имеет возможность поворачиваться в вертикальной плоскости.

Одной из перспективных комбинированных механических схем деформации при разделении проката является схема отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах (разновидность неполностью закрытой отрезки) [54]. При отрезке эксцентричным закручиванием, отрезаемая часть осуществляет круговое движение вокруг оси, смещенной по отношению к оси разрезаемого проката на определенное расстояние – величину эксцентриситета, который не превышает величины радиуса проката. Данный способ отрезки является совмещенным процессом отрезки сдвигом и кручения, и объединяет положительные стороны обоих процессов. При этом снижаются энергосиловые затраты по сравнению с отрезкой на кривошипных ножницах с поступательным перемещением инструмента. Процесс отрезки осуществляется плавно и бесшумно. Уменьшение силы отрезки в момент разделения проката снижает последствия явления мгновенной разгрузки оборудования, которое сопровождается разрушением фундамента, разъемных соединений и т.д.

Анализ существующих схем безотходной отрезки в штампах и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации позволяет сделать следующие выводы:

- выбор способа отрезки сортового проката определяется технологией даль-

нейшей переработки отрезанной части;

- наиболее перспективным способом отрезки сортового проката является безотходная отрезка в штампах, осуществляемая на универсальном прессовом оборудовании;

- существующие классификации механических схем безотходной отрезки основаны на двух критериях: степени ограничения подвижности отрезаемой части и полосы, а также траектории относительного смещения разделяемых частей;

- наиболее перспективными схемами для отрезки открытых профилей являются схемы: неполностью закрытой отрезки с пассивным или активным поперечным зажимом, отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах, требующие дальнейшего совершенствования.

Автор работы [27] предлагает новый способ отрезки сортового проката по схеме «сдвиг-ломка», в котором нанесение концентраторов напряжения осуществляется за счет частичного сдвига заготовки на определенную величину.

Исходя из анализа различных способов и средств разделения сортового проката, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными и перспективными, с точки зрения производительности и отходности, являются отрезка сдвигом и холодная ломка изгибом.

1.4 Анализ рекомендаций по выбору геометрических и силовых параметров разделения сортового проката на мерные заготовки

1.4.1 Параметры процесса холодной ломки изгибом

В работах Финкеля В.М., Тимощенко В.А., Борисова В.М., Высоцкого Е.Н. [24–26,28] показано, что на процесс разрушения и показатели качества получаемых заготовок существенное влияние оказывают геометрические и силовые параметры схемы ломки.

К основным геометрическим параметрам относятся: диаметр (высота) сечения, форма и размеры концентратора напряжений (КН), расположение концентратора напряжений относительно точек приложения нагрузки, длина разделяемых

частей проката. Эффективность концентратора напряжений в первую очередь зависит от глубины внедрения ΔH и радиуса закругления r в вершине надреза. Под силовыми параметрами процесса холодной ломки изгибом подразумевают силу внедрения инструмента в прокат при выполнении операции нанесения концентратора напряжений и силу, затрачиваемую на холодную ломку проката. В работе Исаева А.В. [55] получена эмпирическая зависимость силы внедрения клинового ножа F в прокат от глубины КН ΔH , радиуса r , угла α_0 заточки ножа и твердости материала HB :

$$F = \Delta H^{\frac{1}{2}} \sqrt{r} (0,0004\alpha_0 + 0,013) HB. \quad (1.1)$$

Высоцкий Е.Н. [26] рассматривает внедрение плоского клина в заготовку, при этом сила внедрения определяется из выражения:

$$F = 2,3\varepsilon\sigma_B \frac{\alpha_0 \Delta H}{2} \sqrt{d\Delta H} \left(1 + \frac{\alpha_0}{2}\right), \quad (1.2)$$

где $\varepsilon = 1,5..3,0$;

σ_B – временное сопротивление разрыву;

d – диаметр проката.

Финкель В.М. в работе [24] полагает, что при статическом нагружении сила холодной ломки, для случая трехточечного изгиба, рассчитывается по формуле:

$$F_l = \frac{4W_x \sigma}{k_\sigma L_0}, \quad (1.3)$$

где W_x – осевой момент сопротивления сечения изгибу;

σ – разрушающее напряжение при изгибе;

k_σ – коэффициент концентрации напряжений;

L_0 – расстояние между опорами.

Для случая консольного нагружения сила ломки определяется из выражения [24]:

$$F_l = \frac{W_x \sigma}{k_\sigma L_0}. \quad (1.4)$$

Борисов В.М. считает, что сила статической ломки по схеме трехточечного изгиба определяется из уравнения [28]:

$$F_{л} = \frac{4W_x \sigma_B}{k_1 L_0}, \quad (1.5)$$

где $k_1 = 0,7 \dots 1,1$ – коэффициент, учитывающий характер приложения разрушающих сил (приложение их не в точках, а на контактных площадках), форму сечения проката.

Потребная сила для разделения сортового проката способом холодной ломки изгибом по схеме трехточечного изгиба, в случае импульсного приложения нагрузки, согласно Борисову В.М., определяется по формуле [28]:

$$F_{л} = k_1 \frac{4W_x \sigma_B}{L_0} \frac{1}{k_{\sigma} k_{имп}}, \quad (1.6)$$

где $k_{\sigma} = 2\sqrt{\Delta H / r}$ (рекомендуется принимать $k_{\sigma} = 2 \dots 5$);

$k_{имп} = 1,1 \dots 1,5$ – коэффициент, учитывающий импульсный характер приложения нагрузки.

Эффективным способом локализации разрушения является нанесение концентратора напряжений, позволяющее существенно снизить силу разделения и улучшить качество заготовок. Наибольшей остротой обладает трещина, она и является эффективным концентратором напряжений [24].

Эффективность концентратора напряжений, в первую очередь, зависит от его геометрии и места расположения по отношению к нагружающим силам. Изменяя технологические параметры процесса ломки, можно в значительной степени влиять на размеры очага пластической деформации.

В работе [24] глубина концентратора напряжений определяется по формуле:

$$\Delta H = k \sqrt[3]{d}, \quad (1.7)$$

где k – коэффициент, зависящий от пластичности сталей.

Ширина b и угол между стенками концентратора напряжений α_0 имеют второстепенное значение. Максимальную концентрацию пластической деформации и

снижение ударной вязкости обеспечивает надрез треугольной формы. При способе холодной ломки изгибом трещина обычно зарождается в одной точке и затем пересекает весь образец. Поэтому концентратор напряжений, нанесенный по всему периметру разрушаемого сечения, не имеет особых преимуществ перед односторонним.

1.4.2 Параметры процесса разделения сортового проката способом отрезки сдвигом

Различают геометрические и силовые параметры процесса отрезки сдвигом сортового проката. К геометрическим параметрам Соловцов С.С. в работе [23] относит: поперечный и осевой зазоры, угол наклона прутка. Под поперечным зазором понимают разность размеров отверстия ножа и сечения прутка:

$$z_n = d_n - d, \quad (1.8)$$

где d_n – диаметр отверстия ножа.

Осевой зазор между ножами является важным геометрическим параметром схемы при неполностью открытой и неполностью закрытой отрезке. От осевого зазора зависят такие показатели качества заготовок, как: угол скоса, плоскостность торцов и образование дефектов на торцах. В то же время осевой зазор влияет на силовые, энергетические характеристики и на работу отрезки. Осевой зазор назначают в зависимости от материала, высоты поперечного сечения, механической схемы отрезки и температурно-скоростных условий в пределах $(0...0,2)d$ [23].

Наклон прутка при неполностью открытой и неполностью закрытой отрезке сдвигом позволяет получить заготовки с торцами, перпендикулярными оси. Анализ работ по исследованию влияния угла наклона проката на качество получаемых заготовок показывает, что оптимальный угол наклона составляет $2...9^\circ$. На практике принимается средний угол наклона равный 4° [23], так как сложно конструктивно реализовать регулировку угла наклона, вследствие усложнения конструкции средств механизации и самого оборудования.

К силовым параметрам процесса отрезки сдвигом сортового проката относят-

ся: сила отрезки, сила поперечного зажима, сила распора ножей, сила осевого сжатия, работа деформации.

В ряде работ Смирнова-Аляева Г.А., Мещерина В.Т., Трусова В.А., Кислого П.Е., Цеманна Г.В., Сеницына В.Т., Целикова А.И. и др. [23,42–50] для определения силы отрезки предложены формулы, учитывающие те или иные параметры процесса.

Трусов В.А. приводит формулу для определения силы отрезки [42]:

$$F_p = 3,42\tau_p(0,17d^2 + 0,04\frac{d^4}{h_g^2}), \quad (1.9)$$

где τ_p – напряжение сдвига;

h_g – высота очага деформации в осевом направлении.

В работе [44] предложена формула расчета силы отрезки, которая имеет вид:

$$F_p = \sigma_B H^2 \left[\frac{0,4 \cdot \varepsilon_{pomp}}{tg\alpha_1} + 0,7 \right], \quad (1.10)$$

где ε_{pomp} – относительная глубина внедрения ножа, при которой происходит разделение;

H – высота разрезаемого металла;

α_1 – угол наклона ножа.

Силаотрезки в соответствии с рекомендациями [44]:

$$F = KL(S - h_b)\tau_c, \quad (1.11)$$

где K – коэффициент затупления режущих кромок;

L – длина разделения;

S – высота заготовки;

h_b – величина внедрения ножа (рабочий ход ножа);

τ_c – касательные напряжения сдвига.

В инженерной практике чаще применяют формулы с экспериментально установленными поправочными коэффициентами. Широкое применение получила фор-

мула для определения силы неполностью открытой и неполностью закрытой отрезки, которая приведена в работе Соловцова С.С. [23] и имеет вид:

$$F_p = 0,72 \sigma_B A, \quad (1.12)$$

где A – площадь поперечного сечения проката.

Для определения наибольшей силы отрезки сдвигом используют также эмпирическую зависимость [23]:

$$F_{p_{\max}} = \tau_{p_{\max}} A, \quad (1.13)$$

где $\tau_{p_{\max}}$ – наибольшее касательное напряжение среза, определяемое экспериментально для каждого металла.

При динамическом нагружении определяют сначала работу деформирования, а потом силу отрезки сдвигом, либо вводят поправочный коэффициент, учитывающий влияние скорости нагружения – коэффициент динамичности. Увеличение скорости деформирования приводит к тому, что работа деформирования может быть равна или меньше работы статического деформирования при разделении сдвигом холодного металла на прессах по аналогичной схеме нагружения. Это объясняется тем, что на работу деформирования при высоких скоростях нагружения, наряду с влиянием инерционных сил, оказывают влияние другие факторы, например, уменьшение объема металла, втянутого в пластическую деформацию и температурные изменения. В отличие от влияния первого, два последних фактора приводят к уменьшению работы деформирования с ростом скорости нагружения [56].

В работе [57] полная работа $A_{\text{полн}}$, затрачиваемая инструментом при разделении холодного металла по двухсрезной схеме отрезки с повышенными и высокими скоростями нагружения, определяется как сумма работы деформирования при статическом нагружении $A_{\text{ст}}$, инерционных добавок $A_{\text{ин.заг}}$, учитывающих неравномерность движения в реальных процессах и работы удара $A_{\text{дин}}$:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{ст}} + A_{\text{ин.заг}} + A_{\text{дин}}. \quad (1.14)$$

Взгляды авторов работ [28-58] Кононенко В.Г., Погодина-Алексеева Г.И., Ио-

нова И.А., Борисова В.М. и др. расходятся в оценке величины коэффициента динамичности в пределах (1...6).

1.5 Обзор конструкций оборудования для реализации безотходных способов разделения сортового проката

В соответствии с рассмотренными безотходными способами разделения сортового проката на мерные заготовки, проанализируем оборудование для их реализации в разрезе требований, предъявляемых к современному заготовительному производству, а именно: высокие производительность, коэффициент полезного действия (КПД), большая жесткость, надежность и долговечность, простота конструкции и низкая стоимость, высокая степень механизации и автоматизации, минимальные габариты и вес, минимальные эксплуатационные расходы, санитарно-гигиенические условия и простота обслуживания, экологическая чистота.

1.5.1 Оборудование, используемое для холодной ломки проката изгибом

Устройство хладноломов, выпускаемых отечественными и зарубежными заводами, отличается решением комплексной задачи холодной ломки изгибом проката в один цикл, конструктивным выполнением зоны приложения нагрузок к плоскости разделения и вспомогательных приспособлений. Существующие хладноломы состоят из: станины, опорных призм для создания в прокате изгибающего момента за счет сил со стороны привода, узла мерного дозирования длины заготовки и механизма нанесения на прокат концентратора напряжений. Главным их недостатком является дифференцирование операций “нанесение концентратора напряжений” и “ломка изгибом”, что предопределяет низкую производительность труда и невысокое качество разделяемых заготовок. Работа хладнолома сопровождается ударами прутка по рольгангу [26].

Более совершенным является устройство для холодной ломки изгибом проката по схеме трехточечного изгиба, предложенное Высоцким Е.Н. в работе [59], в котором нанесение концентратора напряжений и холодная ломка изгибом осуществляются за один цикл работы машины. Устройство (рис. 1.2) состоит из узла подачи

прутка в рабочую зону, рабочей головки, узла удаления отрезанной заготовки. Раскраиваемый прокат подают на ложемент 1. Размещенные в обоймах 2 надрезающие ролики 3 выполняют надрезы в левой и правой частях сечения проката, а в следующий момент ломающие ролики 4 изгибают надрезанный прокат по заданной схеме до разрушения. Подбором профиля роликов и последовательностью их расположения реализуется требуемая схема выполнения надреза и нагружения. Однако данная установка имеет относительно низкую стойкость роликов, вследствие больших контактных напряжений и невысокую жесткость. Перечисленные недостатки обуславливают невысокую надежность установки в целом.

Использование динамических нагрузок, позволяет уменьшить габариты и металлоемкость привода, снизить работу разрушения проката и расширить диапазон разделяемых материалов. В качестве примера рассмотрим конструкцию импульсной установки для холодной ломки изгибом сортового проката (рис. 1.3), предложенную Борисовым В.М. [28].

Установка включает в себя следующие узлы: приводной подающий рольганг 1, импульсную машину 2 и узел нанесения концентратора напряжений 3. Импульсная машина 2 состоит из импульсного цилиндра 4, в котором в качестве энергоносителя используют горючую газовую смесь и станины 5, жестко соединенной с шаботом 6 с помощью шпилек 7.

Данная конструкция машины является ненадежной с точки зрения требований техники безопасности и требует сложной регулировки энергии удара.

В этом смысле выгодно отличаются высокоскоростные молоты и пресс-молоты с гидроупругим приводом (ГУП), разрабатываемые в Донбасской государственной машиностроительной академии.

Основной особенностью гидроупругого привода является использование для разгона подвижных частей и нагружения заготовки энергии упругой деформации сжатой жидкости и упруго деформируемых деталей кузнечно-прессовой машины [11,60,61].

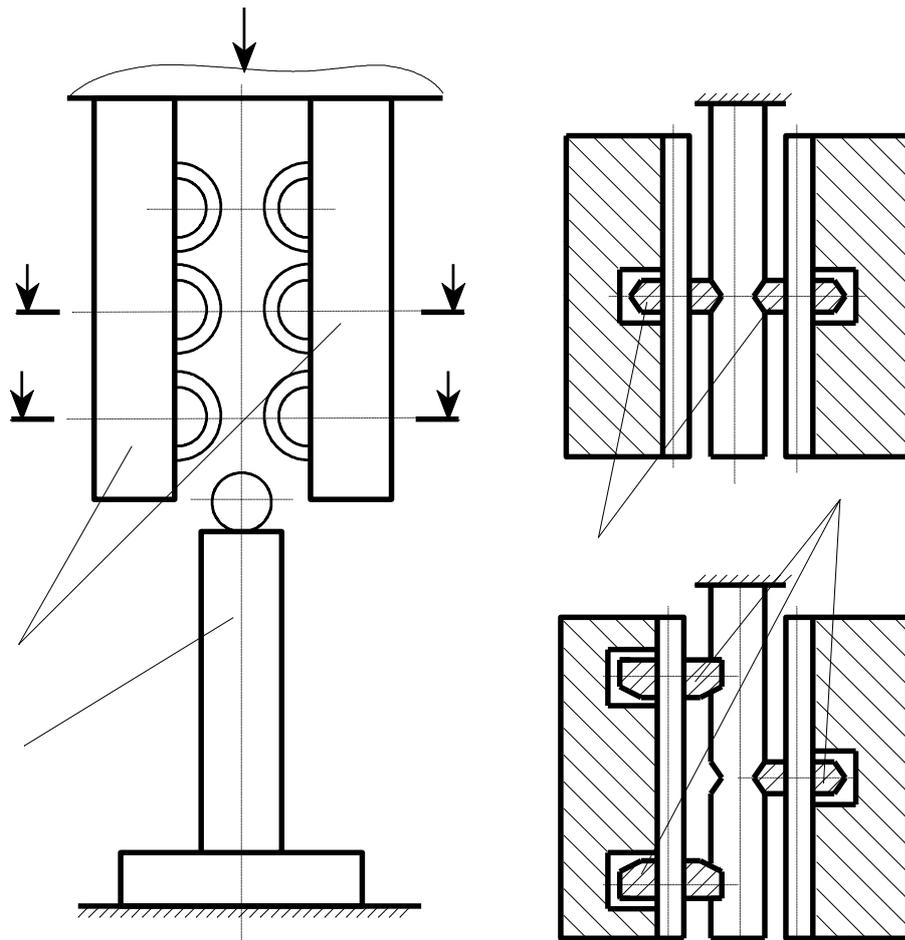


Рисунок 1.2 – Устройство для холодной ломки проката изгибом [59]

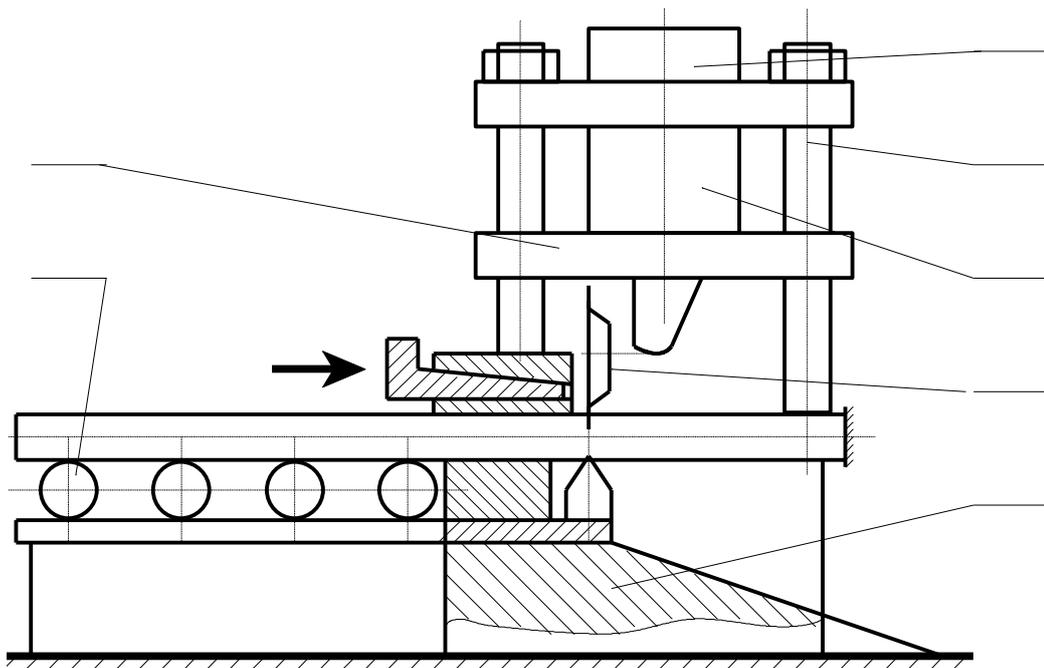


Рисунок 1.3 – Импульсная установка для холодной ломки проката изгибом [28]

На рис. 1.4 приведена принципиальная схема ГУП, который состоит из гидроцилиндра 1 и плунжера 2, между торцом 3 которого и дном 4 цилиндра 1 образована герметичная управляющая полость 5.

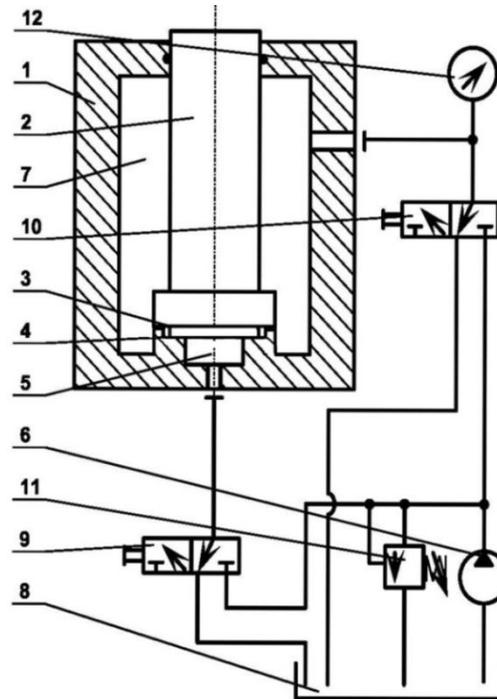


Рисунок 1.4 – Принципиальная гидравлическая схема гидроупругого привода [11]

Насосом 6 создается давление в рабочей камере 7. Управляющая полость 5 при этом соединена со сливом 8. При достижении заданной величины давления в рабочей камере 7 управляющая полость 5 путем переключения распределительного клапана 9 отсекается от слива 8 и соединяется с нагнетанием. Происходит разгерметизация управляющей полости 5. Рабочая жидкость под высоким давлением воздействует на всю площадь нижнего торца 3 плунжера 2, который двигается вверх с ускорением. Таким образом, потенциальная энергия предварительносжатой рабочей жидкости преобразуется в кинетическую энергию движения плунжера 2. Переключением распределительных клапанов 9,10 система возвращается в исходное положение. Контроль давления в приводе осуществляется с помощью предохранительного клапана 11 и манометра 12.

Такой привод позволяет обеспечить: точное дозирование энергии или силы при деформировании заготовки; создание оборудования для деформирования в широком диапазоне скоростей, энергий и сил; исключение повторного удара по заготовке за счет снижения до нуля силы, действующей на инструмент со стороны ра-

бочего цилиндра; единый тип привода молотового и прессового оборудования; экологически чистое использование энергии за счет замкнутой безвзхлопной системы питания; применение для системы питания стандартной, освоенной промышленностью гидроаппаратуры и насосов; повышение КПД за счет снижения потерь на движение жидкости по гидролиниям и через гидроаппаратуру.

1.5.2 Оборудование для отрезки проката сдвигом

Безотходная отрезка сдвигом проката осуществляется в штампах и на ножницах. Отрезка сдвигом сортового проката на ножницах является наиболее дешевой, производительной и распространенной. Разделка проката на заготовки в штампах – обходится дороже, но она точнее [23,24].

Производством оборудования для отрезки сортового проката занимаются, как на территории стран СНГ, так и за рубежом такие фирмы, как: ЭНИКМАШ, Воронежский СКБ КИМ, Донпрессмаш (Россия), Ficer (Италия), Peddinghaus, VEB SKET (Германия), Soleco (Франция), Toyota y Dasha K.K. (Япония), и др. [23,24,62,63].

Одной из наиболее распространенных групп кузнечно-прессового оборудования (КПО) является группа механических прессов, применяемых для выполнения различных формообразующих и разделительных операций [1,5,8].

В качестве главного исполнительного механизма (ГИМ) в большинстве прессов простого и многократного действия применяют четырехзвенный плоский кривошипно-ползунный механизм. Это объясняется простотой реверсирования движения рабочего звена – ползуна, технологичностью механизма, т.е. сравнительной простотой выполнения, компактностью при весьма широких пределах воспринимаемых сил, большим опытом проектирования и эксплуатации, возможностью совмещения в машине двух, а иногда и более одинаковых механизмов для разделения действующего силового потока и целым рядом других менее важных обстоятельств.

Однако необходимость выполнения некоторых распространенных операций ОМД заставляет отказаться от кривошипно-ползунного механизма в чистом виде, так как при этом не удастся обеспечить заданный закон движения.

Так, при выполнении операций, в ходе которых возникают чрезвычайно

большие сопротивления при сравнительно малом рабочем перемещении инструмента, применяют кривошипно-коленный механизм, состоящий из кривошипа шатуном, присоединенным к среднему шарниру двух звеньев, которые образуют как бы "ломающееся колено". При этом сила, действующая вдоль шатуна в несколько раз меньше силы на ползуне, что дает возможность существенно облегчить детали привода и кривошипно-шатунной группы [5].

Уменьшить силу на шатуне позволяет также использование пятизвенного кривошипно-клинового механизма, отличающегося от традиционного кривошипно-ползунного наличием дополнительного звена – клина между шатуном и ползуном. Этот механизм применяет фирма Eumiso (Германия) в главных исполнительных механизмах тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) [1,5]. В КГШП сила возрастает в самом конце рабочего хода, когда идеальное приведенное плечо невелико, поэтому в первую очередь стремятся уменьшить силу на шатуне. Анализ этих путей совершенствования исполнительных механизмов показывает, что переход к клиновому механизму является прогрессивным направлением, т.к. в нем, в отличие от всех остальных конструкций, эксцентриковый вал расположен не по линии действия технологической силы из-за наличия дополнительного звена – клина, что снижает влияние упругого прогиба вала на общую податливость конструкции. По сравнению с КГШП традиционного исполнения, использование клина позволило повысить жесткость пресса на 30...35% [1,5]. Кроме того, значительно возрос допустимый эксцентриситет приложения нагрузки, уменьшилась неплоскостность получаемых заготовок и износ штамповой оснастки, снизились нагрузки на эксцентриковый вал. Вместе с тем клиновая конструкция исполнительного механизма имеет и недостатки.

Угол между рабочими поверхностями клина у всех выпускаемых прессов постоянен и равен около 30° . Самозаклинивание клина произойдет только при $f = 0,268$, в то время как максимальный коэффициент сухого трения пары «сталь-бронза» – 0,15. В результате этого до 30% податливости всего пресса приходится на исполнительный механизм, причем с уменьшением коэффициента трения между парой «клин – направляющие», податливость пресса увеличивается. Применение

клиновой пары с углом менее 30° нецелесообразно, т.к. это приводит к увеличению хода клина. Кроме того, при постоянном угле клина соотношение сил на клине и ползуне является постоянной величиной, в то время как графики сил технологических операций обработки металлов давлением имеют характер изменения, близкий к гиперболе. Наличие перечисленных недостатков снижает технологические возможности клиновых прессов.

Использование гидравлических прессов для реализации разделения сортового проката отрезкой сдвигом в производстве ограничено вследствие их низкой производительности. Гидравлические прессы применяют тогда, когда силы, необходимые для разделения, становятся близкими или превышают верхнюю границу номинальных усилий кривошипных прессов.

На основании проведенного анализа конструкций КПО можно сделать вывод о том, что существующие машины не полностью соответствуют современным требованиям, предъявляемым к оборудованию для реализации безотходных способов разделения сортового проката.

1.5.3 Анализ работы оборудования для разделения сортового проката

Технологические процессы сдвиговой отрезки и холодной ломки проката характеризуются следующими этапами [23,24,64– 67]:

- ход приближения (до касания инструмента с заготовкой), сила привода преодолевает трение в узлах;
- относительно плавное возрастание силы сопротивления за счет выборки зазоров в силовой цепи и упругой деформации деталей, входящих в силовую цепь, включая разделяемую заготовку;
- дальнейший рост силы сопротивления за счет начала пластической деформации разделяемой заготовки на небольшой части хода разделения;
- резкое снижение силы за счет уменьшения площади сопротивления разделяемого сечения;
- дальнейшее снижение силы до нуля, поскольку происходит разрушение заготовки и её разделение.

Проанализируем величину хода рабочего органа (ползуна с инструментом) в отрезных устройствах на всех этапах сдвиговой отрезки [68].

На первом этапе, для сравнительно точного по сечению проката, ход может быть снижен до минимума (например, до $0,05 \dots 0,1$ диаметра заготовки d).

На втором этапе (выборка зазоров и упругая деформация) величина хода инструмента зависит от размеров деталей, входящих в силовую цепь, величин напряжений в них, модуля упругости материала деталей, а также количества стыков (контактная жесткость). Если принять величины напряжений в деталях силовой цепи $100 \dots 200$ МПа, длину силовой цепи – $20 \dots 30 d$, материал деталей – сталь с модулем упругости $2 \cdot 10^5$ МПа, то получим величину хода на этой фазе сдвиговой отрезки – $0,01 \dots 0,03 d$.

На третьем этапе отрезки величина хода зависит от свойств материала отрезаемой заготовки и для большинства сталей её можно принять $0,1 \dots 0,15 d$ [23,24].

На четвертом этапе отрезки величина хода также зависит от пластических свойств материала проката и её можно принять $0,1 \dots 0,2 d$.

На пятом этапе для гарантии разделения проката и возможной механизации удаления отрезанной части проката величину хода можно принять $0,50 \dots 0,75 d$. Если просуммировать величину хода на всех этапах отрезки, то ход инструмента составит $1,0 \dots 1,1 d$, при этом на возрастание силы приходится $0,10 \dots 0,15 d$, на спад силы – $0,1 \dots 0,2 d$.

Наиболее интересным для исследования является четвертый и пятый этапы, когда в момент отделения заготовки от проката происходит резкий сброс силы. Проанализируем явления, происходящие при этом.

В нагрузочной фазе технологического процесса в гидравлическом прессе происходит упругое деформирование металлических частей конструкции и рабочей жидкости, заключенной в рабочем цилиндре. Если накопленную энергию высвободить за малый промежуток времени, то равновесное состояние масс нарушается. В результате силовая рама пресса начинает перемещаться, импульсно растягивая анкерные болты. При этом возможно разрушение фундамента и просаживание пресса. Это явление является причиной ненадежной работы используемого оборудования

из-за того, что элементы конструкции: переключатели, распределители, электромагниты и т.д. динамически разгружаются. Резкий сброс силы может привести к разрушению станины прессы и выводу из строя фундамента. Рассмотренные явления сопровождаются возникновением в гидросистеме машины гидравлического удара, связанного с кавитацией [66]. В результате этих явлений мощность прессового оборудования используется не полностью.

В качестве показателя использования прессов по усилию принимали коэффициент k_y . Например, при использовании прессового оборудования усилием менее 2 МН – $k_y = 0,6...0,8$, усилием менее 4 МН – $k_y < (0,4...0,6)$, усилием более 4 МН – $k_y < 0,4$ [64-67].

Расчеты показывают значительную скорость соударения подвижных частей после разгрузки. При испытаниях на вертикальном гидравлическом прессе усилием 5 МН скорость подвижных частей составила – 5,76 м/с, а ход – 19,5 мм [66]. В технической литературе [64-67] имеются сведения о величине энергии упругой деформации станины и привода машины. Составляющая потерь упругой деформации кривошипных машин для разделительных операций (РО) достигает 25...35% от общей работы. Эксперименты, проведенные для четырехколонных гидравлических прессов, показывают, что 66% энергии расходуется на сжатие рабочей жидкости и совершение полезной работы, 15% – на растяжение колонн, 10% – на расширение рабочих цилиндров и 9% – другие неучтенные потери [66].

В процессе экспериментальных исследований на прессе П452 при разделительных операциях установлено, что при силе вырубki – 560 кН сила отрыва фундаментных болтов составила 230 кН. По данным ВНИИМЕТМАШа на гидравлическом прессе с наибольшим рабочим усилием 4 МН, время исчезновения технологической нагрузки при РО в производственных условиях было менее $4 \cdot 10^{-4}$ с [66,67].

При разработке оборудования и оснастки нужно использовать такие конструктивные схемы установок, в которых энергия упругой деформации минимальна. При этом требуется минимальная высота силовых элементов установки, минимальные напряжения в них, максимальный модуль упругости материала.

Величина упругой отдачи зависит от ряда факторов: жесткости различных

элементов и пресса в целом; силы противодействия; состояния и конструкции режущих кромок; зазоров между пуансоном и матрицей; хрупкости или пластичности вырубаемого материала; угла поворота кривошипа в момент скола и т. д. и равна $(0,1 \dots 0,7)$ от силы деформирования.

Однако наибольшая нагрузка от упругой отдачи воспринимается деталями, рассчитанными на сопротивление лишь гравитационным и инерционным силам подвижных частей ГИМ. В прессах с числом ходов $10 \dots 50$ в минуту, эти силы на два порядка меньше технологической силы, поэтому если для разделительных операций и применяют универсальные листоштамповочные прессы, то в них разрушаются такие детали, как фланцы крепления винтов регулировки закрытой высоты, сами винты, соединения крышек шатунов с шатунами, соединения подвесных букс главных валов со станинами и т. п. Иногда наблюдается отрыв и падение главных двигателей и двигателей регулировки закрытой высоты [5].

Крутильная упругая отдача разрушает шлицевые соединения, соединения призматическими шпонками и зубчатые передачи. Указанные обстоятельства заставляют производителей на разделительных операциях недогружать универсальные прессы по усилию. Экономически эффективнее использовать непосредственно предназначенные для разделительных операций машины, лучше противодействующие динамическим нагрузкам. Применение таких машин взамен универсальных листоштамповочных прессов дает возможность резко снизить уровень шума и вибрации, повысить производительность труда, уменьшить затраты на изготовление, ремонт и обслуживание оборудования, повысить качество изделий.

Таким образом, учитывая особенности разделительных операций и возможности исполнительных механизмов кривошипных прессов, можно сделать вывод о том, что в качестве ГИМ технологических машин для отрезки сдвигом и других аналогичных операций, целесообразно использовать механизмы с небольшим числом звеньев, т. к. увеличение числа звеньев ведет не только к удорожанию прессы, но и часто к ухудшению его динамических показателей. Т.е. целесообразно использовать кривошипно-ползунный, синусный, клиновой, и как развитие клинового – клиношарнирный механизм.

На основании вышесказанного можно сформулировать следующие требования к оборудованию для разделительных операций [5]:

- При разработке оборудования и оснастки нужно использовать такие конструктивные схемы установок, в которых энергия упругой деформации минимальна.

- Для обеспечения надежной работы оборудования необходимо исключить фланцевые и другие разъемные соединения, попадающие под технологическую и упругую нагрузку; неподвижные соединения с технологическими зазорами. Предпочтительно применять неразъемные детали и крепления клиновыми шпонками, цельные (без крышек) шатуны, цельные (неразъемные) станины, расклиненные в станинах букс крепления главных валов, т.е. комплекс мероприятий, направленных на создание конструкции, равнопрочной при прямом и обратном нагружениях, которой не страшна упругая отдача.

- Стремиться к уменьшению зоны активной деформации пресса в процессе технологического нагружения, т.е. расстояния от стола до главного вала, с помощью компактных исполнительных механизмов, позволяющих увеличивать жесткость и, следовательно, точность, а также динамическую устойчивость пресса, не изменяя или уменьшая его массу, например, рамного ползуна, имеющего длинные направляющие.

- Существенное уменьшение хода ползуна (радиуса кривошипа главного вала), преимущественное применение жестких валов эксцентрикового типа с целью уменьшения крутильной податливости главного вала, являющейся существенным источником упругих колебаний при срыве силы; уменьшения ускорения, а, следовательно, инерционных сил, возникающих при большом числе ходов в минуту.

- Использовать специальные исполнительные механизмы, создающие наиболее благоприятные силовой и кинематический режимы.

- Добиваться увеличения числа ходов в минуту, в ряде случаев — применение привода с плавно регулируемым числом ходов (как правило, при числе ходов более 200 в минуту) для достижения максимально возможной производительности.

Перечисленным выше требованиям в большой степени соответствует клиновой и особенно клиношарнирный механизмы.

1.6 Системы смазки, применяемые в кузнечно-прессовых машинах

Надежность и долговечность работы подвижных трущихся частей пресса во многом зависят от их смазки. Износ трущихся деталей, вызванный недостатком или отсутствием смазки, ведет к резкому увеличению зазоров в сочленениях, увеличению сопротивления движению и, в итоге, к ухудшению работы машины и снижению точности обрабатываемых деталей. Особенности работы трущихся подвижных частей пресса – большое давление в опорах главного вала и шарнирных соединениях шатуна с ползуном (80...100 МПа), наличие ударных знакопеременных нагрузок и больших плоских поверхностей трения, расположенных вертикально, что затрудняет удерживание смазки. Характерной особенностью также является большое число точек подачи смазки (>50), часто расположенных в труднодоступных для контроля местах, и неблагоприятные условия работы, особенно машин, предназначенных для штамповки с нагревом (КГШП, горизонтально-ковочные машины (ГКМ)) [1,5]. В зависимости от условий работы пар трения в кривошипных машинах применяют различные смазочные материалы, режимы и системы подачи смазки. Смазочные системы можно классифицировать по функциональным и конструктивным признакам: по виду смазочного материала – с жидким и пластичным смазочными материалами; по характеру использования смазочного материала – проточные и циркуляционные; по принципу распределения потока смазочного материала – многоотводные насосы, двухмагистральные, однамагистральные последовательные, импульсные системы и системы дроссельного дозирования; по виду привода – с ручным, механическим, пневматическим и электрическим приводами; по виду управления – с управлением по времени и производительности обслуживаемой машины [1,5].

При выборе вида смазки необходимо учитывать следующее: консистентные смазочные материалы дороже жидких; жидкая циркуляционная смазка лучше отводит теплоту, чем густая, и вязкость ее меньше, поэтому потери энергии пресса на преодоление сил трения меньше; при неравномерном поступлении густой смазки возможны случаи, когда ее оказывается недостаточно для создания устойчивой масляной пленки; жидкая смазка, в отличие от густой, легко смывает с трущихся

деталей окалину и другие инородные частицы, не засоряет трубопроводов; жидкая смазка требует применения надежных уплотнений, в особенности на оборудовании, предназначенном для штамповки с нагревом; при выходе густой смазки из зазоров трущихся пар, из этой смазки, окалины и пыли образуются наросты, что приводит к загрязнению пресса.

Режим смазки, смазочный материал и конструктивное оформление кривошипно-прессовых машин выбирают исходя из необходимости смазки всех имеющихся пар трения. В настоящее время находят применение все виды систем смазки. Анализ использования схем смазки за последние 10 лет указывает на все большее применение одномагистральных последовательных и импульсных систем. В связи с повышением уровня автоматизации кривошипно-прессовых машин все чаще применяют автоматизированные системы циркуляционной смазки с электро- и пневмоприводом. При этом системы с пластичным смазочным материалом являются, как правило, проточными, а системы жидкой смазки – обратными (циркуляционными). Циркуляционные системы жидкой смазки применяют на тяжелом оборудовании, но, учитывая тенденцию к ужесточению условий работы основных трущихся пар кривошипно-прессовых машин, росту единичной мощности машин и постоянному снижению металлоемкости, в дальнейшем им будут отдавать предпочтение.

Однако следует отметить, что создание в зоне контакта слоя смазки в целом снижает жесткость оборудования.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ КЛИНОШАРНИРНОГО МЕХАНИЗМА С ВОГНУТЫМ КЛИНОМ

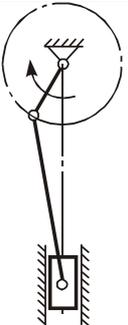
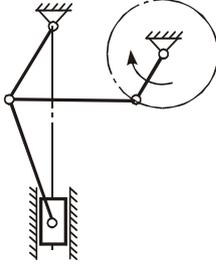
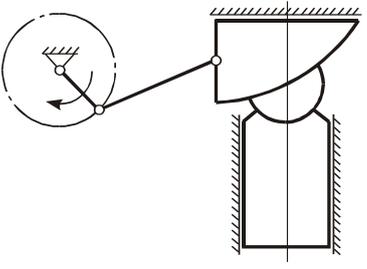
2.1 Повышение эффективности и надежности работы оборудования при реализации разделительных процессов на основе разработки и исследования клиношарнирного механизма с вогнутым клином

При всем многообразии разделительных операций общим их признаком можно считать максимальную силу в начале технологического процесса, которая по мере движения рабочего органа машины уменьшается, а в момент отделения заготовки от проката происходит её резкий сброс. В результате этого явления, мощность прессового оборудования используется не полностью. Сброс силы является причиной ненадежной работы используемого оборудования из-за того, что элементы конструкции динамически разгружаются. Мгновенная разгрузка может привести к разрушению станины и фундамента прессы.

Увеличение силы до максимального значения происходит после касания инструментом заготовки на ходе, необходимом для выборки зазоров, смятия макронеуровностей и достижения упругой деформации в системе «заготовка-инструмент-машина». При разделении сортового проката в штампах на кривошипных прессах (см. раздел 1) значительную роль играют затраты энергии, необходимые для обеспечения упругой деформации системы «машина-инструмент-заготовка». Доля упругой энергии машины здесь наибольшая и больше она во столько раз, во сколько общая высота машины больше высоты инструмента и заготовки. Это оценочный показатель, но он очень важен при сравнении технико-экономических показателей различных вариантов выполнения разделительных процессов.

Проведенный сравнительный кинематический анализ различных типов привода механических прессов: кривошипно-ползунного, кривошипно-коленного и клиношарнирного [69] (табл. 2.1, рис. 2.1) показывает следующее.

Таблица 2.1 – Исходные параметры прессов [69]

Наименование параметра	Единица измерения	Тип пресса		
		Кривошипно-ползунный	Кривошипно-коленный	Клиношарнирный
Схема механизма	—			
Ход ползуна	мм	170,0	170,0	170,0
Радиус кривошипа	мм	85,0	128,5	205,0
Длина шатуна	мм	664,0	1002,0	1604,0
Коэффициент шатуна λ	—	0,128	0,128	0,128
Количество поверхностей трения	—	4,0	6,0	7,0
Частота вращения кривошипного вала	мин ⁻¹	32,0	32,0	32,0
Жесткость C (по силовой линии)	$\frac{H}{мм}$	$C_1 = 1$	$C_2 \cong (0,6...0,7)C_1$	$C_3 \cong (1,2...1,3)C_1$

Для кривошипно-ползунного механизма график пути ползуна $S = f(\alpha)$ представляет собой синусоидальную кривую с максимальным отклонением, равным полной длине хода ползуна. Функция скорости выражается несимметричным синусоидальным графиком, экстремальные значения которого достигаются при углах поворота ведущего кривошипа в момент изменения знака ускорения при переходе его значения через нуль. Такой закон движения технически легко обеспечить, поэтому он и реализован в механизмах, к которым не предъявляют особых кинематических требований (например, в ГИМ большинства КГШП, ГКМ, листоштамповочных прессов общего назначения и т.д.).

Закон движения характерный для кривошипно-коленного механизма отличается от предыдущего закона существенным замедлением перемещения ползуна в конце рабочего хода и выстоем ползуна в положении, соответствующем окончанию прямого хода и началу возвратного хода. Продолжительность выстоя зависит от схемы механизма, относительных размеров звеньев и соответствует в среднем $\alpha = 30^\circ$. Такой закон движения позволяет уменьшить крутящий момент на главном валу за счет увеличения цикловой протяженности нагружения, причем существенно "растягивается" по углу поворота лишь малый участок перемещения ползуна. Поэтому описываемый закон и реализован в исполнительных механизмах, когда сила деформирования резко возрастает на малом участке в конце рабочего хода.

Пресс с клиношарнирным механизмом по своим кинематическим характеристикам близок к традиционному кривошипно-коленному. Отличие заключается в меньшем значении абсолютной величины скорости ползуна клиношарнирного механизма при его положениях, близких к крайним рабочим, что приводит к снижению динамических нагрузок в исполнительном механизме и в прессе в целом.

Главным преимуществом прессов с клиновым и клиношарнирным механизмами является их повышенная жесткость по сравнению с обычными механизмами приводов прессов. Это связано с тем, что наиболее податливые детали – шатун, главный вал вынесены с линии действия главной силы прессы. Высота прессы по этой линии уменьшается, соответственно жесткость увеличивается. Если учесть, что жесткость $C = F/\Delta h = E A/l$ (где F – усилие прессы; Δh – деформация деталей прессы;

E – модуль Юнга; A – площадь поперечного сечения детали; l – длина детали), то анализ конструкций прессов по табл. 2.1 показывает, что в случае принятия для кривошипно-ползунного пресса $A_1 = 1; l = 1$, для кривошипно-коленного пресса эти параметры достигнут значений $A_2 \cong 0,8A_1; l_2 \cong l_1$, а для клиношарнирного $A_3 \cong A_1; l_3 \cong 0,8 \cdot l_1$. Полученные в результате этого приближенные значения C_1, C_2, C_3 приведены в табл. 2.1.

На основании анализа проведенных расчетов установлено, что жесткость прессы наибольшая при использовании клиношарнирного привода. Остальные параметры отличаются незначительно.

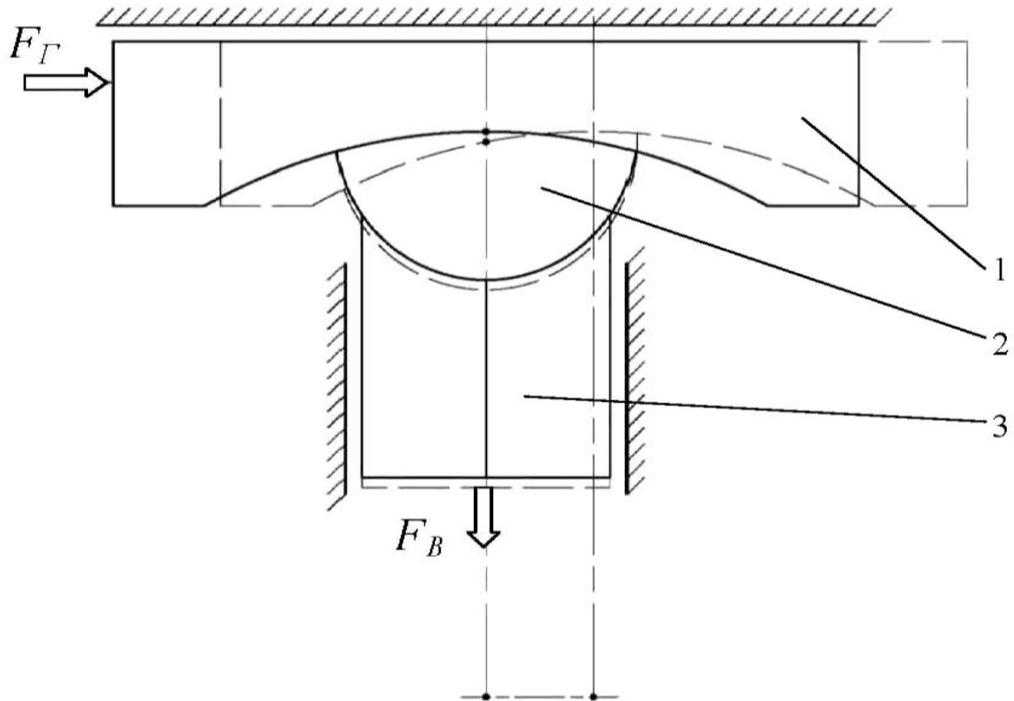
Однако существующие клиношарнирные механизмы не могут обеспечить силовой режим нагружения, характерный для разделительных процессов, требующих обеспечения максимальной технологической силы в начале рабочего хода.

Поиск нестандартного исполнительного механизма, удовлетворяющего требованиям реализации разделительных процессов, позволил разработать новый клиношарнирный механизм с вогнутым клином (КШМ с ВК), в котором движение начинается с положения вогнутого клина 1 при угле поворота шарнира 2 равном нулю ($\varphi = 0^\circ$), когда сила на ползуне максимальная (рис. 2.2).

Анализ показал, что значительная доля хода вогнутого клина идет на выборку зазоров и создание упругой деформации в системе "машина-инструмент". Поэтому была предложена схема комбинированного КШМ с обычным клином малого угла клиновидности, который обеспечивает ход приближения, выборку зазоров и далее надрез заготовки, а затем приводится в действие механизм с вогнутым клином из положения $\varphi = 0^\circ$ [70]. Кроме этого, обычный клин может обеспечить прижим заготовки. Схема механизма приведена на рис. 2.3.

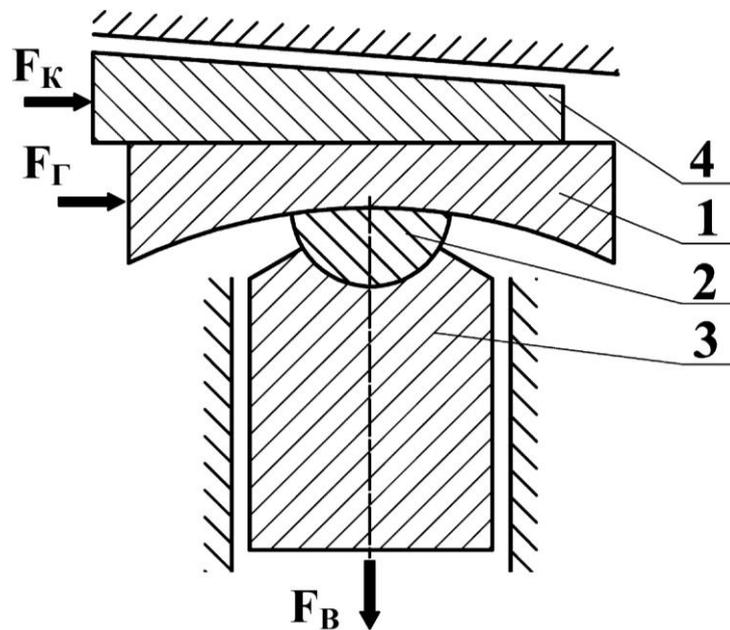
Такая схема КШМ, как наиболее рациональная для разделительных операций и исследована в данной работе.

Выполнен сравнительный анализ параметров различного кузнечно-прессового оборудования при отрезке сдвигом проката одинакового сечения (рис. 2.4).



1 – клин переменной клиновидности; 2 – шарнир; 3 – ползун

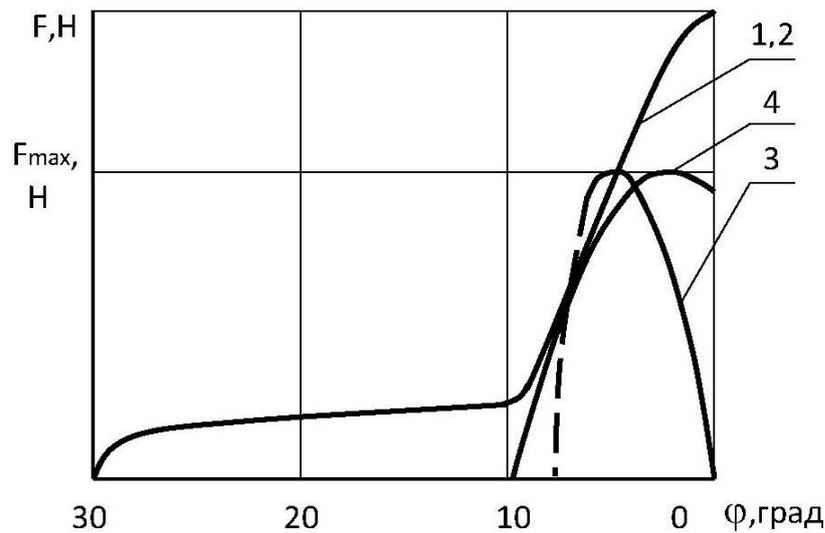
Рисунок 2.2 – Схема КШМ с вогнутым клином [71,72]



1 – клин переменной клиновидности; 2 – шарнир; 3 – ползун;

4 – клин постоянной клиновидности

Рисунок 2.3 – Схема механизма для разделительных операций [73]



1, 2 – кривошипный и клиношарнирный прессы с выпуклым клином;

3 – клиношарнирный пресс с вогнутым клином;

4 – типовой график сил при отрезке сдвигом

Рисунок 2.4 – Типовые графики усилий кузнечно-прессовых машин

Установлено, что ход отрезки начинается в прессах 1,2 при недоходе эксцентрикового вала на $5...15^\circ$ до крайнего нижнего положения (когда теоретически сила на ползуне максимальная). В прессе 3 ход отрезки начинается с $\varphi = 0^\circ$, когда сила имеет максимальное значение. Если высоту пресса 1 принять за 1, то высота пресса 2 будет равна 0,8, а пресса 3 – примерно 0,6. Поскольку в прессах 1,2 касание заготовки при отрезке происходит при определенной скорости ползуна, это обуславливает их высокую динамику, при этом в прессе 3 скорость в самом начале отрезки равна нулю. Таким образом, применение в прессах клиношарнирного механизма с вогнутым клином обеспечивает меньшую упругую деформацию и динамику пресса, повышение коэффициента полезного действия. При этом пресс 3 проще выводится из заклинивания за счет перемещения дополнительного клина малого угла клиновидности.

Следует отметить, что предложенный КШМ с вогнутым клином позволяет использовать в качестве привода не только рассмотренный кривошипный механизм, но и механизмы поступательного движения, которые проще в реализации.

Необходимо учитывать, что в клиношарнирном механизме количество поверхностей трения больше, чем в кривошипно-ползунном или клиновом механиз-

мах, поэтому исследование КШМ будет неполным без изучения вопроса трения и подачи смазки на контактные поверхности механизма.

Анализ систем смазки в механических прессах показывает, что смазка шарниров прессов отличается от смазки направляющих возвратно-поступательного движения. Шарниры обычно имеют круглое сечение, замкнутое по периметру, вследствие чего наносить и удерживать смазку на их контактных поверхностях проще, чем на направляющих, имеющих плоские поверхности. Поэтому круговые поверхности шарниров чаще смазывают жидкой смазкой, поверхности же, состоящие из сочетания плоскостей, чаще смазывают консистентной смазкой. Клиношарнирные механизмы по удобству смазки можно разместить между цилиндрическими замкнутыми и плоскими, свободными по периметру поверхностями.

Для разделительных операций отрезки проката имеет значение ориентация сечения проката относительно направления движения ножей. Этот фактор важен для величины силы отрезки в начале операции. Например, квадратное сечение проката можно располагать стороной сечения перпендикулярно направлению движения ножей. В этом случае в начале операции отрезки сила будет максимальной. Если расположить заготовку стороной квадрата под 45° к направлению движения ножей, то в начале операции отрезки сила будет значительно меньшей. Фактор ориентации сечения заготовки относительно направления движения ножей имеет особое значение для фасонных сечений. При этом следует учитывать возможное искажение сечения при отрезке.

Существенным фактором, влияющим на начальную силу в процессе разделительной операции, является форма ножей. Для уменьшения силы при разделении плоских заготовок широко применяют наклонные ножи. В этом случае в очаге деформации оказывается часть сечения заготовки меньшая его полного сечения и максимальная сила отрезки машины соответственно уменьшается. Однако наклонные ножи, как правило, деформируют поперечный профиль заготовки, вследствие чего применяются, в основном, для разрезки листового материала. Поэтому большинство разделительных процессов методами сдвига и ломки характеризуются воздействием инструмента сразу на всё сечение разделяемого материала. От оборудо-

вания требуется максимальная сила сразу после соприкосновения инструмента и заготовки с выборкой зазоров в деталях машины, входящих в ее силовую цепь и упругой деформации в деталях машины и инструмента.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований клино-шарнирного механизма с вогнутым клином, который наиболее полно из всех известных ГИМ удовлетворяет требованиям, предъявляемым к оборудованию для разделительных операций, в сочетании с дополнительным клином постоянной клиновидности, который обеспечивает ход приближения и выборку зазоров.

2.2 Выбор методов теоретических исследований

Для снижения трудоемкости и больших сроков реализации научных исследований целесообразно применять теоретические методы анализа, которые основаны на разработке и численной реализации математических моделей, в достаточной степени полно отражающих реальные физические процессы.

Исследование КШМ с ВК было проведено на основе теоретико-экспериментальных методов исследования с последующим описанием количественных и качественных результатов. В основу теоретических исследований были положены аналитические и графоаналитические методы теории механизмов и машин, методы математического моделирования, в том числе с использованием вычислительной техники, а также методы статистического анализа. Главными направлениями теоретических исследований КШМ с вогнутым клином являются структурный, кинематический и динамический анализы механизма с учетом его специфики.

Графоаналитические методы исследования кинематических и силовых параметров плоских механизмов, к которым относится КШМ с ВК, обладают достаточной для обычных практических расчетов точностью и применимы к механизмам любой сложности. Принципиально любая задача, решенная графически, может быть решена и аналитически, но в большинстве случаев аналитические уравнения полу-

чаются столь сложными, что практическое применение их весьма затруднительно. Однако для исследования простых механизмов аналитический путь вполне пригоден. Кроме того, аналитические формулы позволяют выяснить влияние отдельных параметров на характер движения КШМ, установить вид кривых, описываемых отдельными точками механизма и подобрать размеры механизма по заданным условиям. С целью подтверждения достоверности полученных результатов, все расчеты выполнены с использованием аналитического и графоаналитического методов.

Расчеты проведены по структурным группам Ассура, которые являются геометрически и статически определимыми системами, с определением передаточных функций всех элементов КШМ с ВК: линейных и угловых координат звеньев, а также их первых и вторых производных по обобщенной координате [74]. Динамический расчет КШМ с ВК проведен с использованием уравнений равновесия группы Ассура. Для решения полученных нелинейных, вследствие необходимости учета трения, систем уравнений равновесия, использован метод Ньютона [75].

Полученные математические модели были использованы при решении задач автоматизированного проектирования оборудования с КШМ с ВК [76].

2.3 Структурный анализ клиношарнирного механизма с вогнутым клином

Клиношарнирный механизм (рис. 2.5,а) состоит из клина 1, шарнира 2 и ползуна 3. Клин 1 имеет две рабочие поверхности, одна из которых выполнена плоской и опирается на упорную деталь – верхнюю поперечину пресса. Вторая рабочая поверхность клина выполнена по радиусу цилиндрической и сопрягается с выпуклой цилиндрической поверхностью шарнира 2. Шарнир 2 имеет вторую рабочую поверхность, которая также выполнена по радиусу и сопрягается с цилиндрической поверхностью ползуна 3 [71].

Клиношарнирный механизм работает следующим образом. К входному звену – клину 1 прикладывается приводная (горизонтальная) сила F_T , в результате дей-

ствия которой клин 1 поступательно перемещается в направляющих и своей вогнутой поверхностью радиуса R оказывает давление на соответствующую выпуклую поверхность шарнира 2. В результате шарнир 2 совершает плоское движение, действуя своей выпуклой поверхностью радиуса r на сопрягаемую вогнутую поверхность ползуна 3. При этом, если клин 1, а, следовательно, и точка А – центр окружности радиуса R , переместятся на величину хода привода клина h_{Γ} , то точка В шарнира 2 переместится на величину $h_{\text{в}}$. Так как точка В является общим центром окружности радиуса r , по которой сопрягаются поверхности шарнира и ползуна, то величина $h_{\text{в}}$ представляет собой ход выходного звена – ползуна 3, который совершает поступательное движение вдоль направляющих.

Анализируя клиношарнирный механизм, можно прийти к выводу, что характер движения его звеньев аналогичен характеру движения звеньев двухползунного рычажного механизма, а, следовательно, структурные схемы этих механизмов идентичны (рис. 2.5,б).

Однако имеются и принципиальные отличия этих механизмов. Клиношарнирный механизм имеет короткие звенья, а поэтому – большую жесткость, его шарниры отличаются большими опорными площадями, способными передавать большие силы. Эти отличия обеспечивают преимущества клиношарнирного механизма перед рычажными механизмами при применении их в кузнечно-прессовом оборудовании.

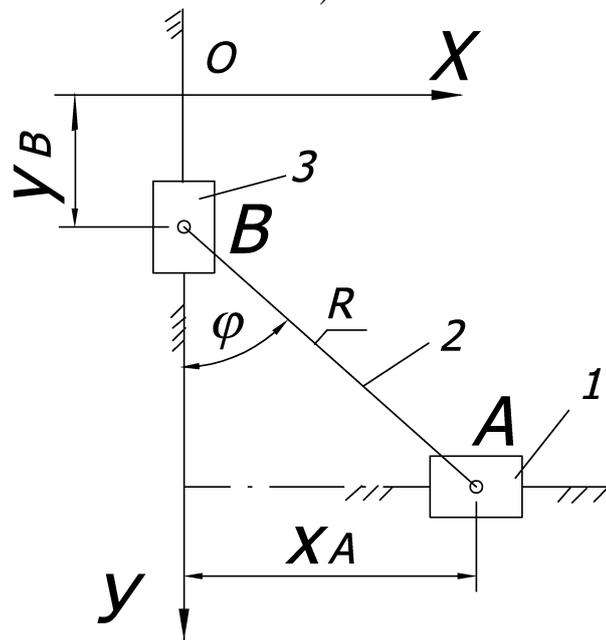
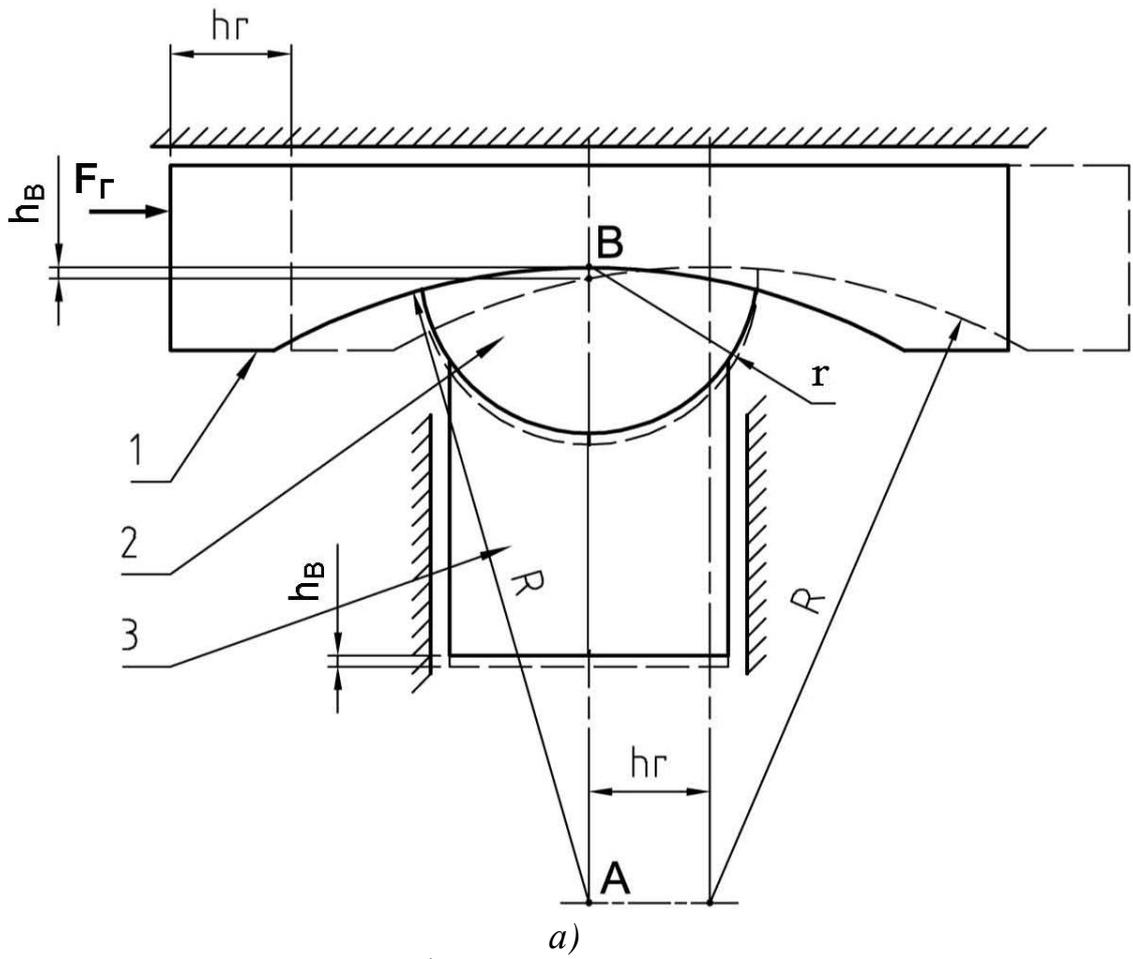
Клиношарнирный механизм включает три подвижных звена и четыре кинематические пары пятого класса (две вращательные и две поступательные). Так как механизм плоский, то его подвижность определяется по формуле Чебышева:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1, \quad (2.1)$$

где n – число подвижных звеньев механизма,

p_5 – число кинематических пар 5 класса,

p_4 – число кинематических пар 4 класса.



а) – принципиальная схема;
 б) – структурная схема

Рисунок 2.5 – Схемы КШМ с ВК [71]

Следовательно, для получения определенности движения всех звеньев механизма необходимо задать одно независимое движение входному звену (клину 1). Расчленим механизм на первичный механизм и структурную группу Ассура (рис. 2.6). Формула его строения имеет вид: $I(0,1) \rightarrow II(2,3)_{2,2}$. Следовательно, клиношарнирный механизм – механизм II класса.

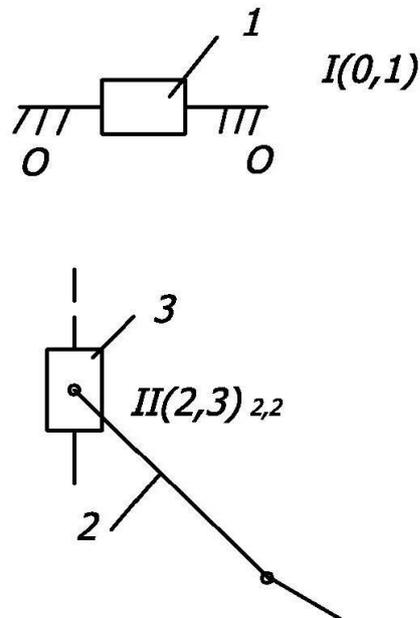


Рисунок 2.6– Структурный анализ КШМ с ВК [71]

Определим основные соотношения между геометрическими параметрами клиношарнирного механизма. Для этого рассмотрим механизм в произвольном положении (рис. 2.5,б). Начало координат поместим в исходное положение точки В (когда точки А и В расположены на одной вертикали). Пусть клин 1 переместится на величину хода X_A ($X_A = h_\Gamma$). При этом звено АВ отклоняется от вертикали на угол φ , который представляет собой переменный угол шарнира 2. Тогда перемещение ползуна 3:

$$Y_B = R - R \cdot \cos \varphi = R(1 - \cos \varphi); Y_B = h_B. \quad (2.2)$$

Можно также получить соотношение, устанавливающее связь между h_Γ и h_B :

$$h_B = R - \sqrt{R^2 - h_\Gamma^2}. \quad (2.3)$$

Зависимость между ходом клина h_Γ и углом φ имеет вид:

$$\varphi = \arcsin \frac{h_\Gamma}{R}. \quad (2.4)$$

Кривые зависимости перемещения ползуна 3 (h_B) и угла поворота шарнира 2 (φ) от перемещения входного звена – клина 1 (h_T) для различных значений радиуса вогнутой поверхности клина (R) представлены на рис. 2.7. Использование полученных графиков позволяет с меньшими трудозатратами подобрать рациональные геометрические параметры элементов КШМ с ВК для обеспечения заданных технологических параметров процесса разделения.

2.4 Кинематический анализ клиношарнирного механизма с вогнутым клином

Выполним кинематический анализ клиношарнирного механизма с использованием аналитического метода. Определим зависимость между скоростями и ускорениями входного (клина 1) и выходного (ползуна 3) звеньев. Для этого, продифференцировав по времени формулу (2.2), находим скорость ползуна 3:

$$V_B = \frac{dY_B}{dt} = R \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} = R \sin \varphi \cdot \omega_2. \quad (2.5)$$

Для определения угловой скорости шарнира 2 продифференцируем формулу (2.4), приведя ее к виду $\sin \varphi = X_A/R$, и тогда получим:

$$\cos \varphi \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_A}{R}, \quad (2.6)$$

откуда

$$\omega_2 = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_A}{R \cos \varphi}. \quad (2.7)$$

Подставляя это значение в формулу скорости ползуна, получаем:

$$V_B = R \sin \varphi \frac{V_A}{R \cos \varphi} = V_A \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.8)$$

Дифференцируя формулу (2.8) по времени, находим ускорение ползуна:

$$a_B = \frac{dV_B}{dt} = a_A \operatorname{tg} \varphi + V_A \frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{d\varphi}{dt} = a_A \operatorname{tg} \varphi + \frac{V_A^2}{\cos^3 \varphi \cdot R}. \quad (2.9)$$

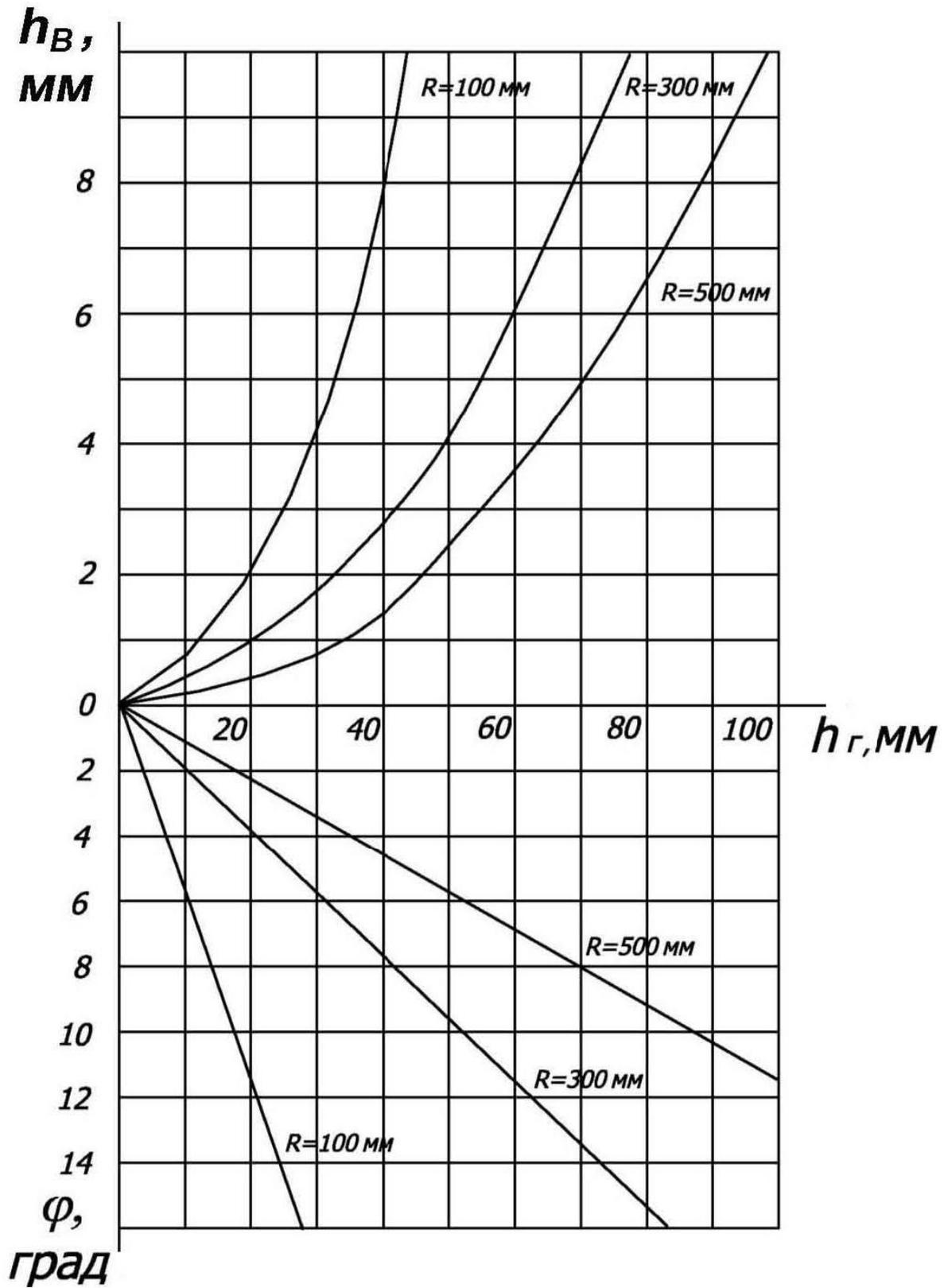


Рисунок 2.7 –Графики зависимостей $h_B = f(h_r)$, $\varphi = f(h_r)$ [71]

Произведем кинематическое исследование клиношарнирного механизма графоаналитическим методом, проверяя тем самым результаты, полученные при использовании аналитического метода. Для этого построим план скоростей механизма в рассматриваемом положении (рис. 2.8,а). Скорость клина, а следовательно, и точки А, направлена горизонтально и определяется применяемым приводом клина. Для определения скорости точки В, а следовательно, и скорости ползуна, решим графически векторное уравнение:

$$\underline{\underline{V_B}} = \underline{\underline{V_A}} + \underline{\underline{V_{BA}}} . \quad (2.10)$$

Из плана скоростей находим, что

$$V_B = V_A \operatorname{tg} \varphi . \quad (2.11)$$

Полученная формула полностью совпадает с ранее полученным результатом (см. формулу 2.8).

Относительная скорость

$$V_{BA} = \frac{V_A}{\cos \varphi} . \quad (2.12)$$

Тогда угловая скорость шарнира 2:

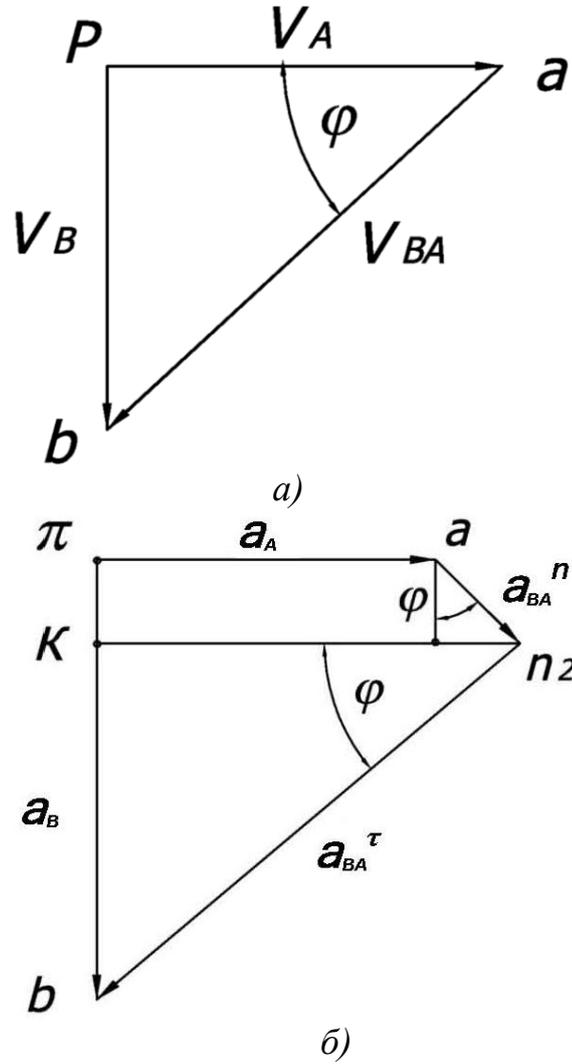
$$\omega_2 = \frac{V_{BA}}{R} = \frac{V_A}{R \cos \varphi} . \quad (2.13)$$

Формулы (2.7) и (2.13) совпадают.

Построим план ускорений клиношарнирного механизма (рис. 2.8,б), считая, что ускорение клина, а следовательно и точки А, известно и по величине, и по направлению. Запишем и решим графически векторное уравнение для определения ускорения ползуна

$$\underline{\underline{a_B}} = \underline{\underline{a_A}} + \underline{\underline{a_{BA}^n}} + \underline{\underline{a_{BA}^\tau}} , \quad (2.14)$$

$$\text{где } a_{BA}^n = \omega_2^2 R = \frac{V_A^2}{R \cos^2 \varphi} .$$



a – план скоростей;

б – план ускорений

Рисунок 2.8 – Кинематический анализ КШМ с ВК графоаналитическим методом [71]

Проведя через точку n_2 вспомогательную горизонталь n_2k , получим:

$$a_B = \pi b = \pi k + kb, \quad (2.15)$$

где $\pi k = a_{BA}^n \cos \varphi = \frac{V_A^2}{R \cos \varphi}$,

$$kb = kn_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi = (a_A + a_{BA}^n \sin \varphi) \operatorname{tg} \varphi = \left(a_A + \frac{V_A^2}{R \cos^2 \varphi} \sin \varphi \right) \operatorname{tg} \varphi = \left(a_A + \frac{V_A^2}{R \cos \varphi} \operatorname{tg} \varphi \right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.16)$$

Следовательно, ускорение ползуна 3

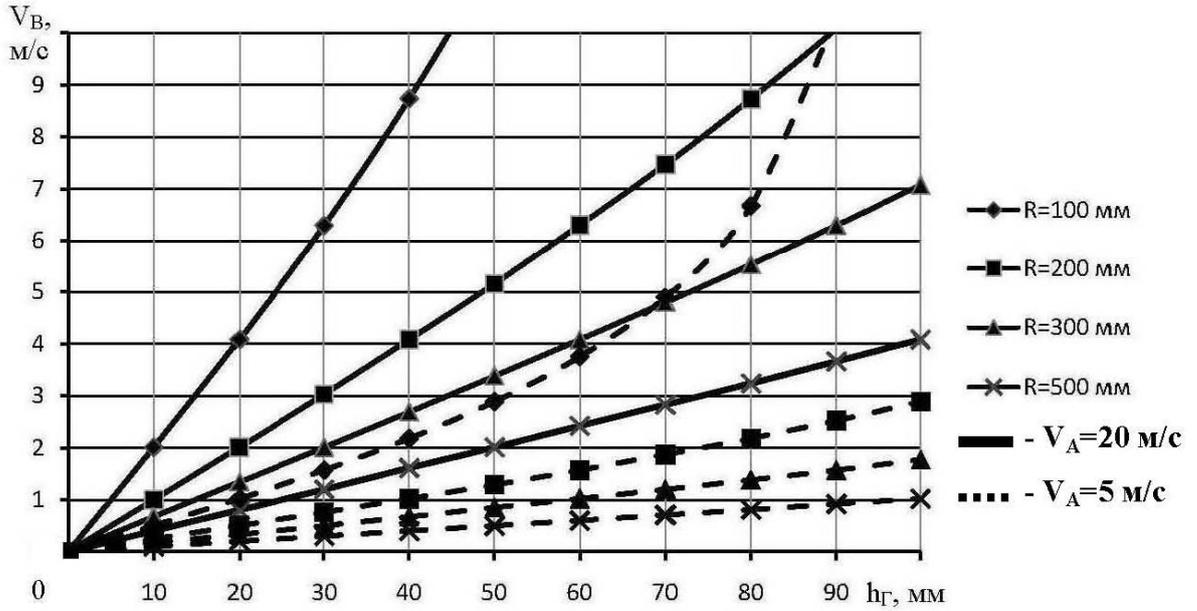
$$a_B = \frac{V_A^2}{R \cos \varphi} + a_A \operatorname{tg} \varphi + \frac{V_A^2}{R \cos \varphi} \operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{V_A^2}{R \cos \varphi} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) + a_A \operatorname{tg} \varphi = \frac{V_A^2}{R \cos^3 \varphi} + a_A \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.17)$$

Формулы (2.9) и (2.17) совпадают и, следовательно, кинематические расчеты клиношарнирного механизма выполнены верно.

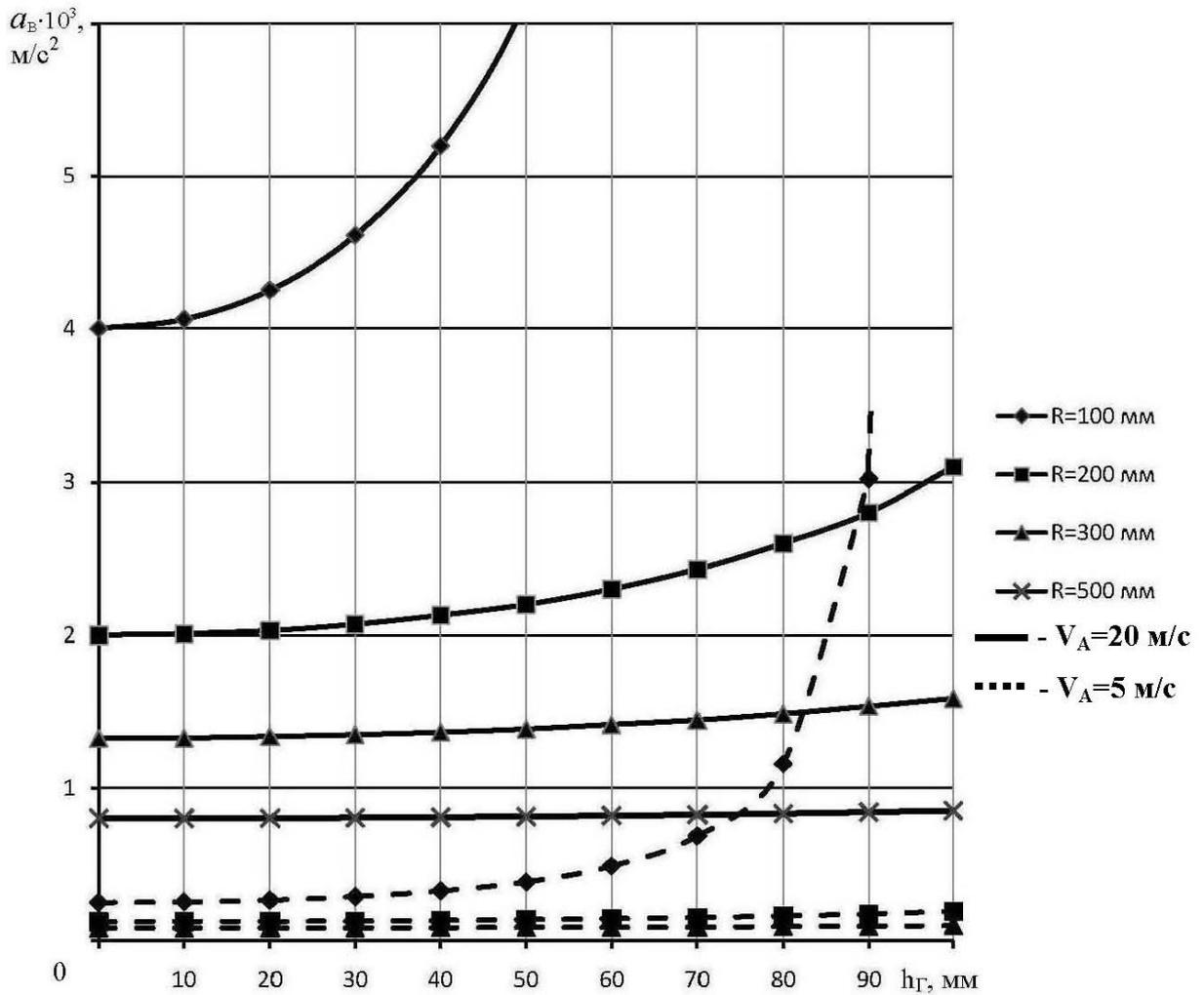
Рассмотрим характер изменения кривых скорости и ускорения ползуна в зависимости от перемещения клина для различных значений радиуса клина R (рис. 2.9). При построении кинематических кривых было принято допущение, что скорость перемещения клина является величиной постоянной на всем его пути и движение клина осуществляется от гидроупругого привода, обеспечивающего скорость клина до 20 м/с . Однако для гидроупругого привода, в реальных машинах, трудно обеспечить постоянство скорости привода, а, следовательно, и характер реальных кинематических кривых будет несколько иным. Поэтому для обеспечения постоянства скорости перемещения клина можно использовать электровинтовой привод, гидравлический регулируемый привод и т.п.

Однако при этом уровень значений скоростей клина будет значительно ниже 20 м/с (примерно $1 \dots 5 \text{ м/с}$). Для примера на графиках показаны значения скоростей и ускорений ползуна при постоянных скоростях клина 20 м/с ; 5 м/с (см. рис. 2.9).

Применение гидроупругого привода, как показывает анализ графика скорости, позволит ползуну достичь значений скоростей, наиболее приемлемых для осуществления разделительных операций (до 10 м/с). Анализ полученных кривых показывает, что при увеличении хода клина, скорость ползуна возрастает практически линейно, причем с уменьшением радиуса клина этот рост происходит более интенсивно. Также более интенсивно происходит и рост ускорений, а, следовательно, и динамических нагрузок на ползун. Так, если для КШМ с радиусом клина $R = 500 \text{ мм}$, ускорение ползуна в процессе движения практически остается неизменным, то для КШМ с $R = 100 \text{ мм}$ изменение ускорения на том же перемещении клина – более существенно (см. рис. 2.9). Таким образом, для разделительных операций в качестве привода КШМ с ВК целесообразнее применять гидроупругий привод, а радиус клина принимать минимально возможным.



a)



б)

а – диаграмма скоростей ползуна;

б – диаграмма ускорений ползуна

Рисунок 2.9 – Кинематические диаграммы КШМ с ВК [71,77]

2.5 Силовой анализ клиношарнирного механизма с вогнутым клином

Силовой анализ клиношарнирного механизма проведем с помощью построения кругов трения аналогично методике при определении кинестатических характеристик для кривошипных прессов [3,5], приняв при этом следующие допущения:

- сила уравнивателя обеспечивает отсутствие раскрытия стыков в шарнирах и сочленениях клина с верхней плитой;
- весом и силами инерции звеньев механизма пренебрегаем, т. к. они сравнительно малы и их учет незначительно влияет на конечный результат;
- коэффициенты трения в шарнирах равны между собой, как и коэффициенты трения в направляющих клина и ползуна.

Схема сил, действующих в реальном клиношарнирном механизме, представлена на рис. 2.10,а [78,79]. Трение в поступательных кинематических парах учитывается тем, что сила нормального давления отклоняется от нормали к поверхности на угол трения ρ ($\operatorname{tg}\rho = f$). Рассмотрим результирующую силу по шарниру $\overline{F_{AB}} = \overline{F_{23}}$.

Сила $\overline{F_{AB}}$ направлена по касательной к кругам трения, расположенным в центрах цилиндрических поверхностей клина и шарнира. Общий угол наклона силы $\overline{F_{AB}}$ к вертикали составляет $(\varphi + \psi)$. Угол ψ учитывает потери на трение между сопрягаемыми парами клин-шарнир и шарнир-ползун. Выражение для определения величины этого угла найдено из прямоугольного треугольника ABC:

$$\sin \psi = f \frac{R+r}{R}. \quad (2.18)$$

Рассмотрим равновесие ползуна 3. На него действуют силы $\overline{F_{03}}$ и $\overline{F_{23}}$ со стороны отброшенных звеньев и сила полезного сопротивления $\overline{F_B}$. Уравнение равновесия звена 3 имеет вид:

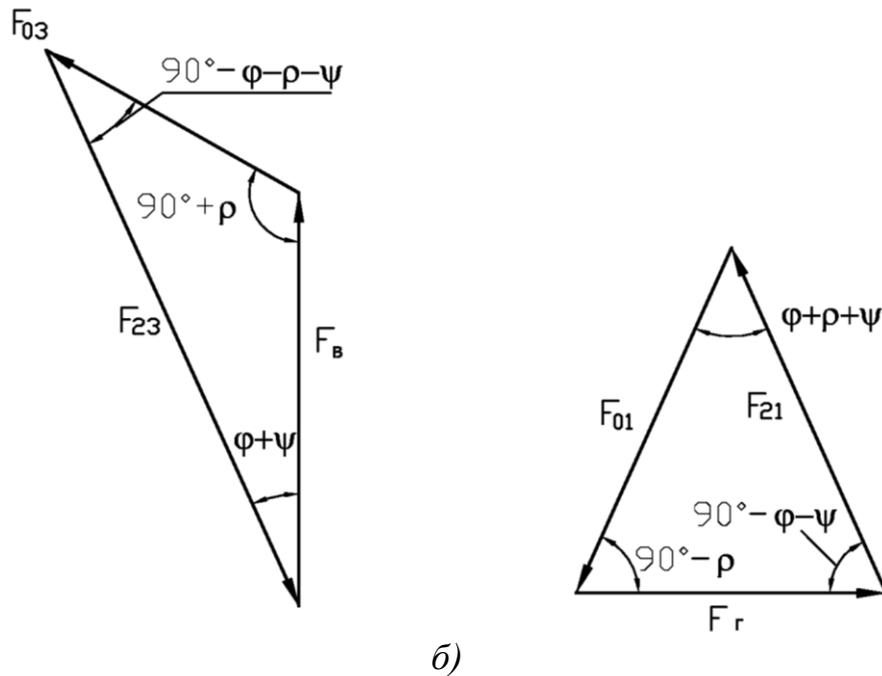
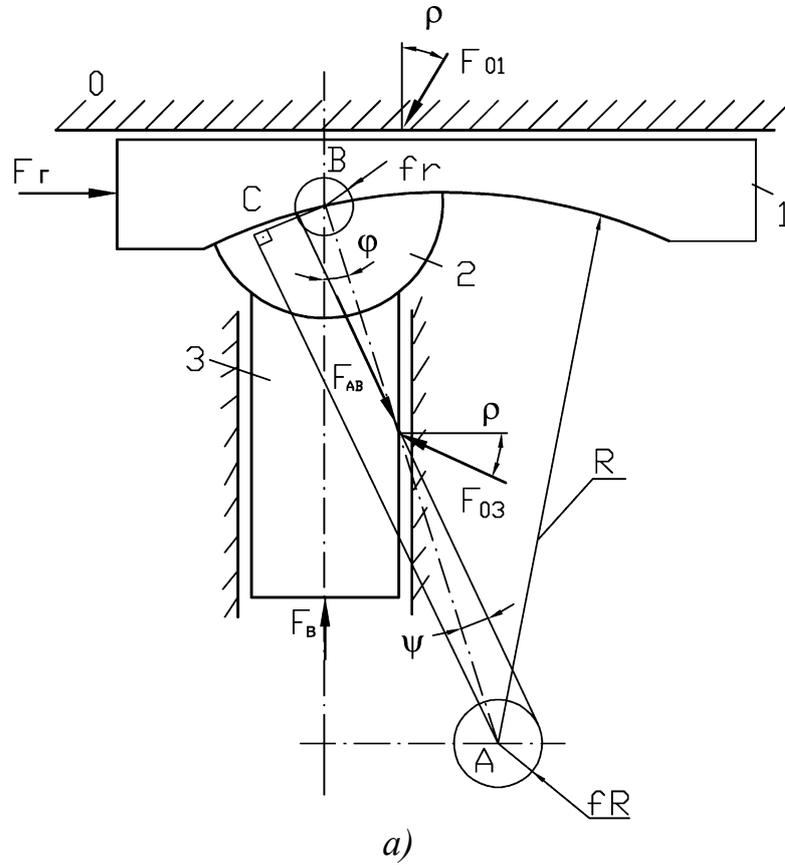
$$\overline{F_B} + \overline{F_{03}} + \overline{F_{23}} = 0, \quad (2.19)$$

где $\overline{F_{23}} = \overline{F_{AB}}$.

Построив замкнутый силовой треугольник для этих сил (рис. 2.10,б), запи-

шем, согласно теореме синусов, соотношение между ними:

$$\frac{F_B}{\sin(90^\circ - \varphi - \rho - \psi)} = \frac{F_{23}}{\sin(90^\circ + \rho)}. \quad (2.20)$$



a – расчетная схема;

б – планы сил

Рисунок 2.10 – Силовой анализ КШМ с ВК [71,79]

Рассмотрим равновесие звена 2, учитывая, что $\overline{F_{32}} = -\overline{F_{23}}$:

$$\overline{F_{32}} + \overline{F_{12}} = 0, \text{ откуда } \overline{F_{12}} = -\overline{F_{32}}. \quad (2.21)$$

Уравнение равновесия звена 1 с учетом того, что $\overline{F_{21}} = -\overline{F_{12}}$, имеет вид:

$$\overline{F_{21}} + \overline{F_{01}} + \overline{F_{\Gamma}} = 0. \quad (2.22)$$

Это уравнение также решается построением плана сил (см. рис. 2.10,б). Используя теорему синусов, получим:

$$\frac{F_{\Gamma}}{\sin(\varphi + \rho + \psi)} = \frac{F_{21}}{\sin(90^{\circ} - \rho)}. \quad (2.23)$$

Из рассмотренных уравнений равновесия звеньев клиношарнирного механизма можно сделать вывод, что силы $\overline{F_{23}}; \overline{F_{32}}; \overline{F_{12}}; \overline{F_{21}}$ одинаковы по модулю. Следовательно, для того, чтобы найти соотношение между движущей силой $\overline{F_{\Gamma}}$ и силой полезного сопротивления $\overline{F_{\text{B}}}$, необходимо выразить из уравнений (2.20), (2.23) силы F_{23} и F_{21} , и полученные выражения приравнять. Тогда получим:

$$\frac{F_{\Gamma} \sin(90^{\circ} - \rho)}{\sin(\varphi + \rho + \psi)} = \frac{F_{\text{B}} \sin(90^{\circ} + \rho)}{\sin(90^{\circ} - \varphi - \rho - \psi)}. \quad (2.24)$$

Используя тригонометрические зависимости:

$$\frac{F_{\Gamma} \cos \rho}{\sin(\varphi + \rho + \psi)} = \frac{F_{\text{B}} \cos \rho}{\cos(\varphi + \rho + \psi)}. \quad (2.25)$$

Следовательно, искомое соотношение:

$$F_{\text{B}} = \frac{F_{\Gamma}}{\text{tg}(\varphi + \rho + \psi)} = \frac{F_{\Gamma}}{\text{tg}(\varphi + \text{arctgf} + \text{arcsin}(f \frac{R+r}{R}))}. \quad (2.26)$$

Рассмотрим аналитический силовой расчет клиношарнирного механизма с вогнутым клином, основанный на составлении уравнений равновесия (рис. 2.11) [79].

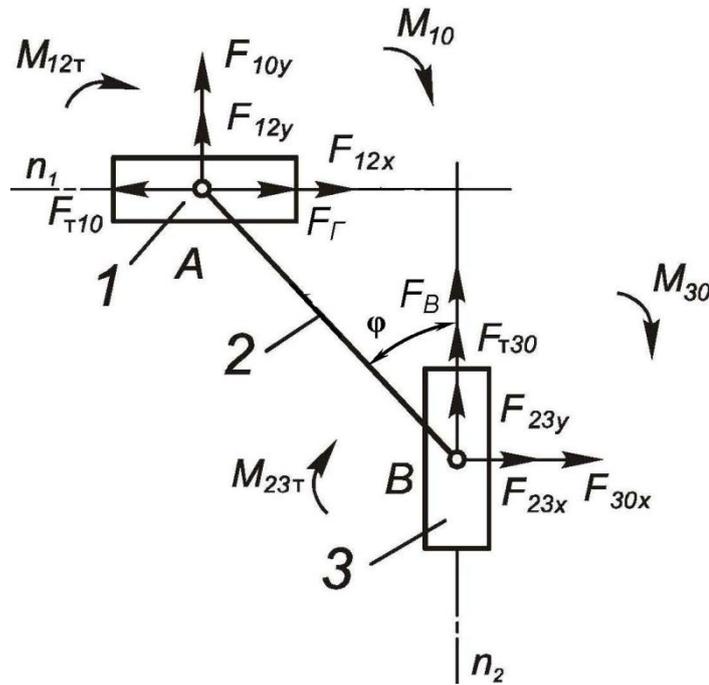


Рисунок 2.11 – Расчетная схема нагружения КШМ с ВК[79]

Для расчета аналитическим методом представим клиношарнирный механизм в виде рычажного двухползунного механизма (см. рис. 2.11). Силовой расчет начинаем с рассмотрения структурной группы 1-2.

Ниже приведена система уравнений равновесия, включающая силы трения в поступательной паре и моменты трения во вращательной:

$$\sum M_A(\vec{F}_i)_2 = 0: \quad M_{21T} + M_{23T} + F_{23x}(y_A - y_B) - F_{23y}(x_A - x_B) = 0; \quad (2.27)$$

$$\sum (F_{ix})_1 = 0: \quad F_{12x} + F_{Г} + F_{Т10} = 0; \quad \sum (F_{iy})_1 = 0: \quad F_{12y} + F_{10y} = 0; \quad (2.28)$$

$$\sum (F_{ix})_2 = 0: \quad -F_{12x} + F_{23x} = 0; \quad \sum (F_{iy})_2 = 0: \quad -F_{12y} + F_{23y} = 0; \quad (2.29)$$

$$\sum M_A(\vec{F}_i)_1 = 0: \quad M_{10} + M_{12T} = 0, \quad (2.30)$$

где $F_{12x}, F_{12y}, F_{23x}, F_{23y}$ – реакции в шарнирах;

F_{10y} – реакция в поступательной паре;

$F_{Т10}$ – сила трения в поступательной паре;

$F_{Г}$ – сила, приложенная к клину;

$M_{12T} = -M_{21T}, M_{23T} = -M_{32T}$ – моменты трения во вращательных парах, которые

могут быть представлены в виде следующих зависимостей:

$$M_{23T} = -\sqrt{F_{23x}^2 + F_{23y}^2} \cdot f_B r_B \cdot \text{Sign}(\varphi_2'); \quad (2.31)$$

$$M_{12T} = -\sqrt{F_{12x}^2 + F_{12y}^2} \cdot f_A r_A \cdot \text{Sign}(\varphi_2'); \quad (2.32)$$

$$F_{T10} = -|F_{10y} f_{n1}| \cdot \text{Sign}(x_1'), \quad (2.33)$$

где r_A, r_B – радиусы шарниров;

f_A, f_B, f_{n1} – коэффициенты трения;

φ_2', x_1' – передаточные функции первого порядка.

В результате решения системы уравнений (2.27– 2.30) с учетом (2.31 – 2.33) могут быть определены реакции в кинематических парах, силы и моменты трения. Для решения нелинейных систем уравнений (2.27– 2.33) использован метод Ньютона [80]. Зная реакции F_{23x} и F_{23y} определяли силу полезного сопротивления F_B , из условия равновесия звена 3:

$$\sum (F_{ix})_3 = 0: F_{30x} - F_{23x} = 0; \quad \sum (F_{iy})_3 = 0: F_{T30} - F_{23y} + F_B = 0; \quad (2.34)$$

$$\sum M_B(\vec{F}_i)_3 = 0: \quad M_{32T} + M_{30} = 0, \quad (2.35)$$

где F_B – сила полезного сопротивления;

F_{T30} – сила трения в поступательной паре, которая может быть представлена в виде следующей зависимости:

$$F_{T30} = -|F_{30x} f_{n2}| \cdot \text{Sign}(y_3'), \quad (2.36)$$

где f_{n2} – коэффициент трения в поступательной паре;

y_3' – передаточная функция первого порядка.

На рис. 2.12 представлены графики изменения силы F_B в зависимости от угла поворота шатуна φ для разных значений коэффициентов трения f , рассчитанные двумя методами. Параметры механизма: радиус клина $R = 300\text{мм}$; радиус шарнира $r = 45\text{мм}$; сила на клине $F_r = 49\text{кН}$; угол φ изменяется от 0 до 15° .

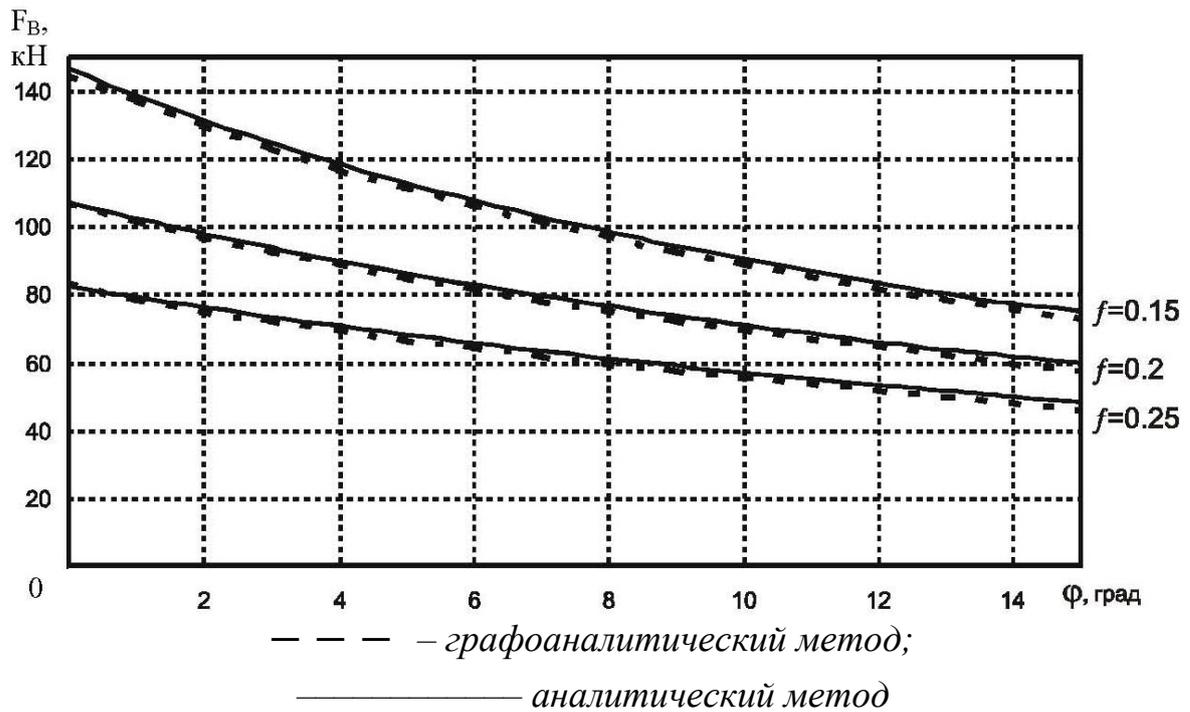


Рисунок 2.12 – График изменения силы полезного сопротивления от угла поворота шарнира [79]

Анализ полученных данных показал, что расхождения между результатами, полученными двумя методами, составляет не более 2,5%, что говорит о возможности их применения. Графоаналитический метод более прост и нагляден в использовании, однако он используется только для шатунных механизмов, тогда как второй, является более универсальным.

Результаты расчетов геометрических и силовых характеристик КШМ с ВК могут представлены в виде номограмм. На рис. 2.13 приведена номограмма для определения рациональных параметров исследуемого механизма при $f = 0,1$. С помощью этой номограммы можно по известным значениям рабочей силы на ползуне F_B , хода ползуна h_B и требуемого выигрыша в силе F_B/F_T , определить угол поворота шарнира φ , а также параметры приводного клина: радиус R и ход h_T . Можно также решить и обратную задачу: по известным значениям геометрических параметров приводного клина R и h_T , определить угол поворота шарнира φ , рабочий ход ползуна h_B и соотношение сил F_B/F_T , а затем, зная или задавая определенное значение приводной силы F_T , определить соответствующую рабочую силу на ползуне F_B .

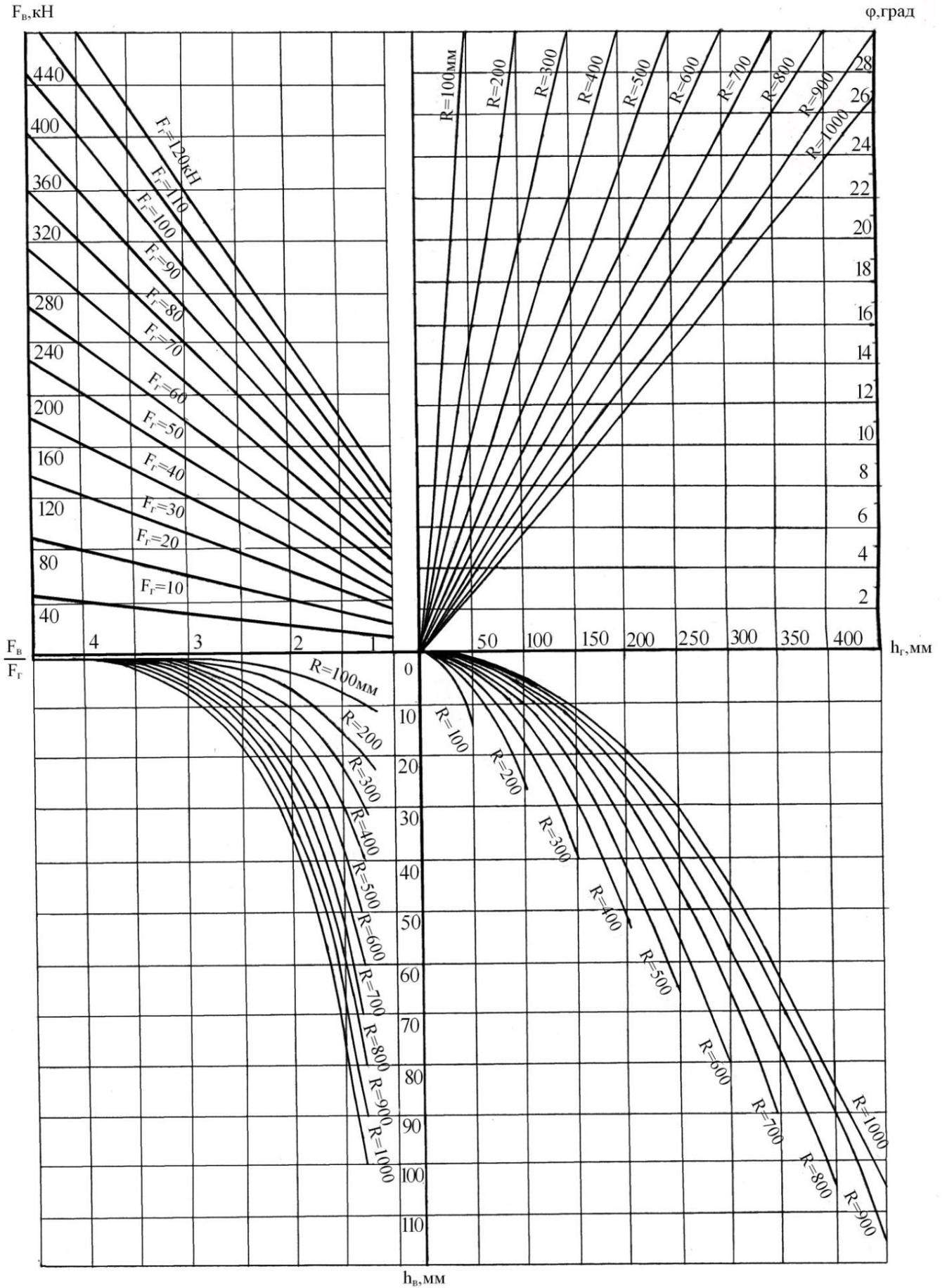


Рисунок 2.13 – Номограмма для определения рациональных параметров КШМ с ВК

Например, при известных: силе отрезки сдвигом $F_B = 160 \text{ кН}$ (заготовка диаметром $d = 30 \text{ мм}$ из стали 45) и рекомендуемом ходе отрезки, при котором происходит отделение заготовки ($h_B = 3,3 \text{ мм}$), желаемом соотношении $F_B/F_T = 2,5$, имеем: $F_T = 64 \text{ кН}$, $R = 200 \text{ мм}$, $h_T = 36 \text{ мм}$, $\varphi = 10,4^\circ$.

Таким образом, использование номограммы (см. рис. 2.13) позволит подбирать рациональные значения силы разделения, проектировать и максимально использовать оборудование с КШМ для разделительных операций ОМД.

2.6 Определение коэффициента полезного действия клиношарнирных механизмов

Одним из важнейших путей повышения экономичности КПО является системная оценка машин по различным показателям. Так, критерием, наиболее полно отражающим энергетическую эффективность машины, является механический коэффициент полезного действия.

КПД показывает, какая доля механической энергии, подведенной к машине, полезно расходуется на совершение той технологической работы, для которой машина создана.

На основании результатов силового анализа [79], можно получить формулу для определения КПД клиношарнирного механизма в виде [81]:

$$\eta = \operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg}(\varphi + \rho + \psi), \quad (2.37)$$

где φ – угол поворота шарнира (угол между направлением перемещения ползуна и линией, соединяющей центры кривизны цилиндрических поверхностей шарнира и клина);

$\rho = \operatorname{arctg} f$ – угол трения в направляющих ползуна и клина;

$\psi = \arcsin [f(1 + r/R)]$ – угол, учитывающий потери на трение в цилиндрических поверхностях клина и шарнира;

f – коэффициент трения в кинематических парах;

R – радиус цилиндрической поверхности клин-шарнир;

r – радиус цилиндрической поверхности шарнир-ползун.

Полученная зависимость позволяет сделать вывод о том, что на КПД клиношарнирного механизма существенное влияние оказывают условия трения на рабочих поверхностях, имеющих, по сравнению с размерами самого механизма, достаточно большие площади, и габаритные размеры клиношарнирного механизма. Проанализируем количественное и качественное влияние этих факторов.

На рис. 2.14,а представлены графики зависимости КПД клиношарнирного механизма от угла поворота шарнира при различных значениях k ($k = r/R$ – коэффициент, характеризующий соотношение основных размеров клиношарнирного механизма). Коэффициент трения принят $f = 0,1$, согласно рекомендациям [82]. Значения k рассматривались в пределах от 0,1 до 1,0, которые являются рациональными с точки зрения конструкции клиношарнирного механизма.

Анализ полученных зависимостей показал, что с уменьшением коэффициента k , КПД механизма возрастает.

Причем в процессе работы, при увеличении угла φ , влияние k на КПД становится всё более ощутимым. Так, при изменении k от 0,1 до 1,0, в начале рабочего хода когда $\varphi = 4^\circ$, КПД возрастает на 6,4%, а при $\varphi = 20^\circ$ – на 10,3%. Следовательно, наиболее рациональными с точки зрения КПД, являются клиношарнирные механизмы, у которых коэффициент k будет находиться в пределах от 0,1 до 0,3. Хотя необходимо отметить, что размеры клиношарнирного механизма не оказывают значительного влияния на КПД механизма. Так, при уменьшении k в 10 раз, КПД увеличивается всего лишь на 10,3%.

Рассмотрим влияние условий трения. Для этого проанализируем графики зависимости КПД от φ , построенные для различных значений коэффициента трения f (рис. 2.14,б). Соотношение размеров клиношарнирного механизма принято $k = 0,2$ – в рекомендуемых пределах. Как видно из рисунка, КПД клиношарнирного механизма существенно зависит от значения f при одинаковых углах поворота шарнира φ . Так при уменьшении f с 0,2 до 0,1 коэффициент полезного действия увеличивается на 11% в начале рабочего хода ($\varphi = 4^\circ$), и на 21% при $\varphi = 20^\circ$, а при уменьшении f с 0,1 до 0,01 – на 52,6% и 36,6% соответственно.

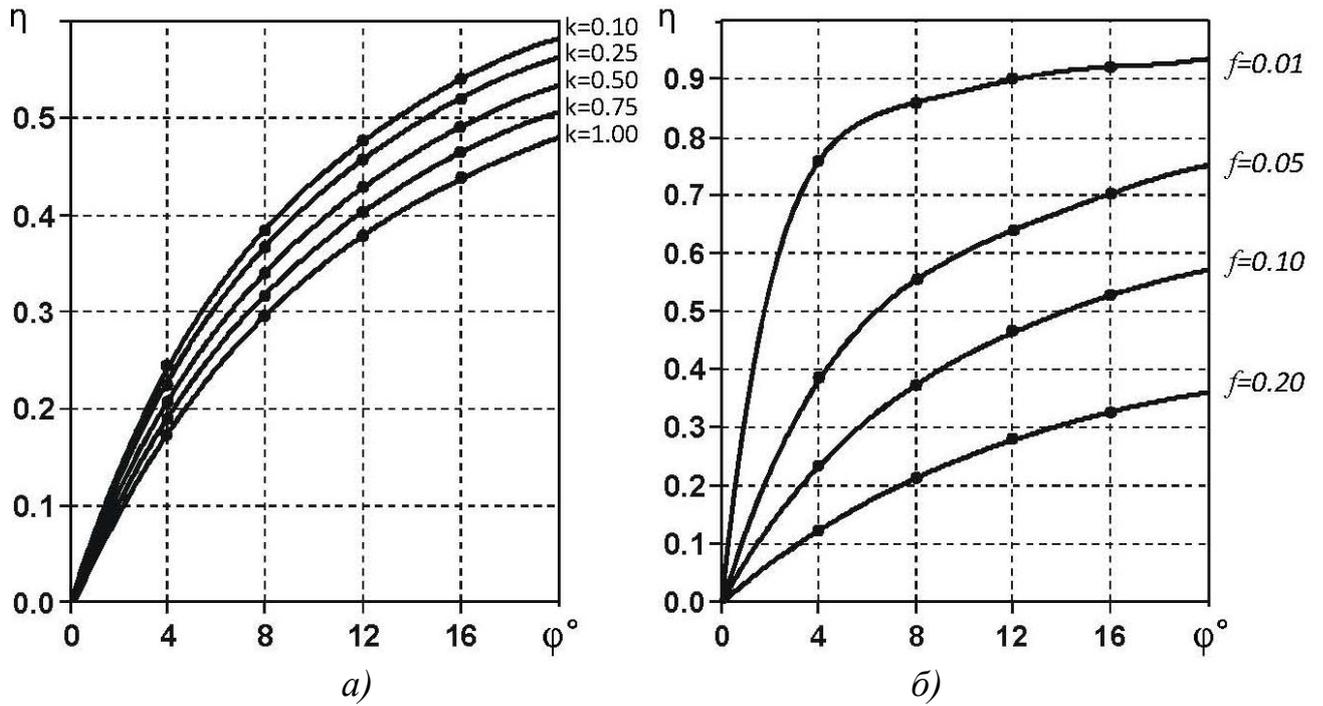


Рисунок 2.14 – Графики зависимости КПД клиношарнирного механизма от угла поворота шарнира [81]

Наглядно зависимость КПД клиношарнирного механизма от условий трения и смазки можно показать также в виде зависимости, представленной на рис. 2.15 при $k=0,2$; $\varphi=12^\circ$: I – трение без смазочного материала $\eta=(5..25)\%$; II – граничная смазка $\eta=(35..55)\%$; III – гидродинамическая и гидростатическая смазка $\eta=(80..95)\%$; IV – трение качения $\eta=(97..99)\%$.

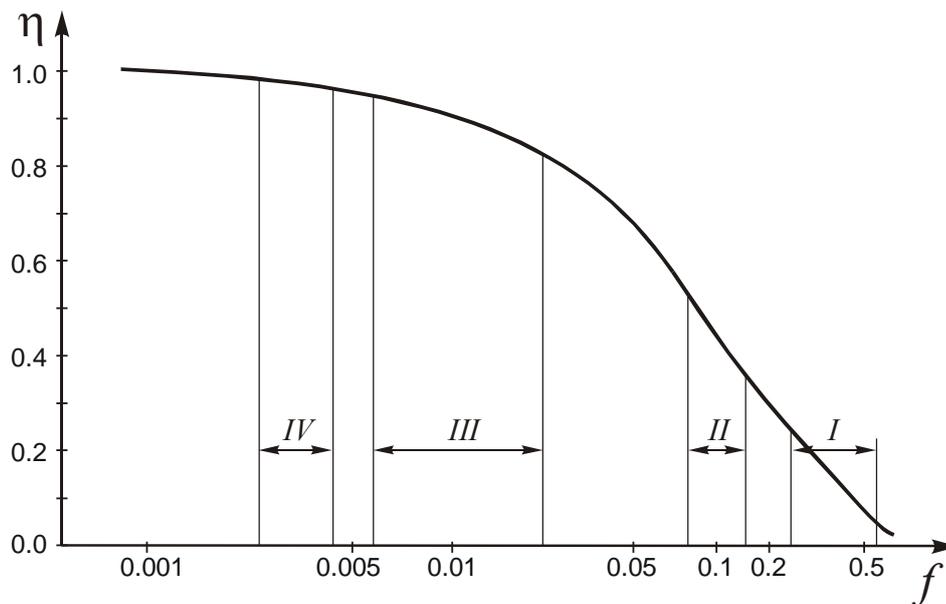


Рисунок 2.15 – График зависимости КПД клиношарнирного механизма от коэффициента трения f [81]

Анализ графика показывает, что высокие значения КПД клиношарнирного механизма можно получить только при замене трения скольжения трением качения [83] или в условиях жидкостного трения, когда между рабочими поверхностями клина, шарнира и ползуна создается масляный слой, давление в котором поддерживается на требуемом уровне. Подобные условия можно создать, закачивая между рабочими уплотненными поверхностями клиношарнирного механизма смазку под давлением большим, чем давление, возникающее от рабочей силы. Хотя при этом несколько снижается жесткость механизма.

При этом важно, чтобы количество смазки, поступающей от насоса (или гидроцилиндра подачи смазки) было не меньше количества смазки, вытекающей по периметру рабочих поверхностей клиношарнирного механизма.

Расход смазки для подачи в рабочие поверхности клиношарнирного механизма можно определить по зависимости Прандтля – Пуазейля [84] для расхода через кольцевые щели, в которой длину щели заменяем на длину периметра рабочей поверхности, через которую вытекает смазка из шарнира. Необходимый расход смазки $Q_{см}$ для создания жидкостного трения в рабочей поверхности клиношарнирного механизма можно определить по зависимости:

$$Q_{см} = \frac{4(B + L)\Delta h^3 p_{см}}{12\mu B}, \quad (2.38)$$

где B и L – соответственно ширина и длина периметра рабочей поверхности клиношарнирного механизма; Δh – величина зазора между рабочими поверхностями клиношарнирного механизма (выбирается в зависимости от высоты микронеровностей поверхности); $p_{см}$ – давление смазки; μ – динамическая вязкость смазки.

В формуле (2.38) длина наименьшего пути, который проходит смазка до ближайшего края рабочей поверхности клиношарнирного механизма, выбрана равной $0,5B$, при условии подачи смазки в центр рабочей поверхности. Давление смазки следует выбирать с учетом эпюры распределения этого давления на поверхности клиношарнирного механизма. В первом приближении можно принять линейное распределение эпюры давления смазки на рабочей поверхности. Тогда $p_{см} = 2p_p$, где

p_p – давление в рабочей поверхности клиношарнирного механизма, определяемое по зависимости: $p_p = \frac{F_p}{BL}$, где F_p – максимальная сила клиношарнирного механизма.

С учетом изложенного, расход смазки для обеспечения режима жидкостного трения в клиношарнирном механизме можно определить:

$$Q_{см} = \frac{8(B+L)\Delta h^3 F_p}{12\mu B^2 L}. \quad (2.39)$$

Таким образом, расход смазки зависит, прежде всего, от зазора в трущихся парах КШМ с ВК. Поэтому он должен быть минимальным за счет высокой точности изготовления и минимальной шероховатости поверхности.

2.7 Анализ влияния трения, замена трения скольжения трением качения

Для типового клиношарнирного механизма характерно наличие четырех поверхностей трения («клин – направляющие», «клин – шарнир», «шарнир – ползун», «ползун – направляющие»), имеющих, по сравнению с габаритными размерами самого механизма, достаточно большие площади. Это приводит к тому, что условия трения оказывают существенное влияние на соотношение между приводной силой на клине и рабочей силой на ползуне, а, следовательно, и на коэффициент полезного действия клиношарнирного механизма.

Силовой анализ клиношарнирного механизма показал, что по сравнению с “идеальным” механизмом, в котором отсутствуют силы трения, у реального клиношарнирного механизма, работающего в условиях трения скольжения (коэффициент трения $f = 0,1$), выигрыш в силе уменьшается в 4...7 раз в начале хода клина и в 2...2,5 раза – в конце [98]. Ухудшение условий трения, т.е. увеличение коэффициента f , ведет к еще более значительным потерям в силовом соотношении, а, следовательно, и к снижению КПД механизма. Так при увеличении f с 0,1 до 0,2 коэффициент полезного действия клиношарнирного механизма уменьшается на 10...20 % (рис. 2.16).

Таким образом, существенно расширить возможности клиношарнирного ме-

ханизма, повысить его КПД можно за счет снижения потерь на трение в кинематических парах. Для этого существуют конструктивные способы (использование различных накладок и вставок, замена трения скольжения трением качения, биметаллизация); технологические (химико-термическая обработка рабочих поверхностей деталей, наплавка, металлизация напылением, графитирование, покрытие дисульфидом молибдена) и эксплуатационные (подбор рационального смазочного материала, способа его подвода и распределения по сопрягаемым поверхностям трения).

Анализ существующих способов снижения трения и ряд проведенных опытов позволяют предположить, что эффективным для данной конструкции клиношарнирного механизма может служить замена трения скольжения трением качения. Рассмотрим возможность такой замены на поверхностях клин-шарнир, шарнир-ползун, т.к. условия трения именно на них оказывают наибольшее влияние на соотношение сил клиношарнирного механизма.

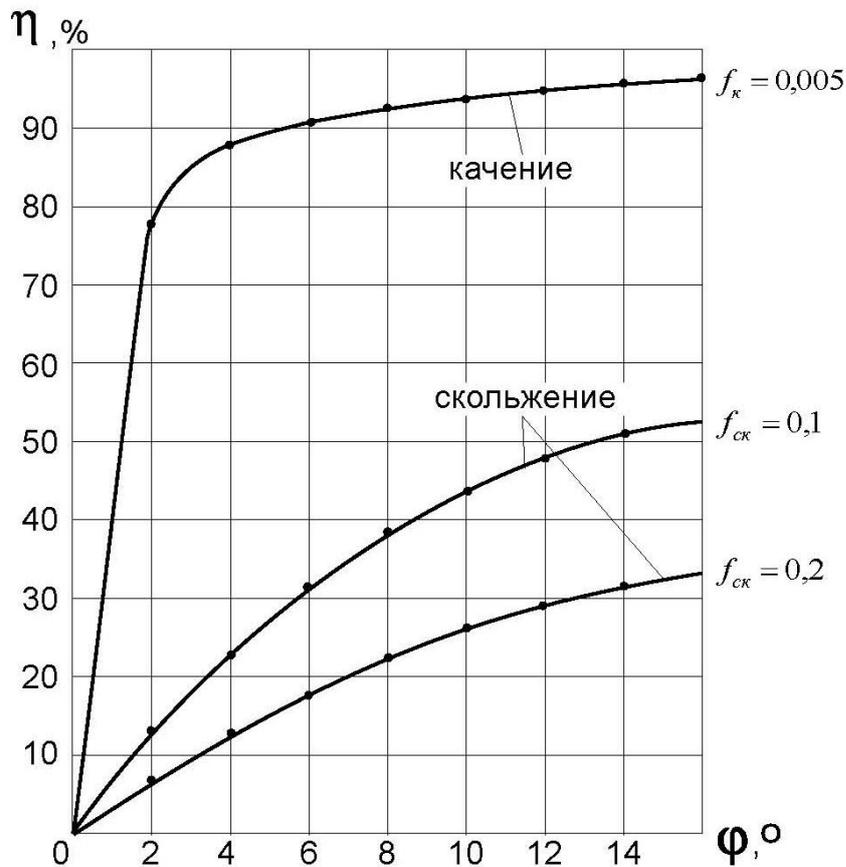


Рисунок 2.16 –Графики зависимости КПД клиношарнирного механизма η от угла поворота шарнира φ [83]

Возможны две схемы построения поверхностей качения, когда длина направляющих одного узла больше, чем другого (рис. 2.17):

- Длина сепаратора больше длины короткого узла и последний опирается на тела качения по всей своей длине (рис. 2.17,а). Достоинством такой схемы является постоянство расположения опорной поверхности более короткого узла, недостатком – трудность осуществления хорошей защиты тел качения из-за выступающей части сепаратора.

- Для тел качения имеются каналы возврата в одной из деталей и, таким образом, тела качения перемещаются по замкнутой траектории (рис. 2.17,б). Длина хода узла не ограничена, но конструктивно эта схема несколько сложнее из-за наличия каналов возврата.

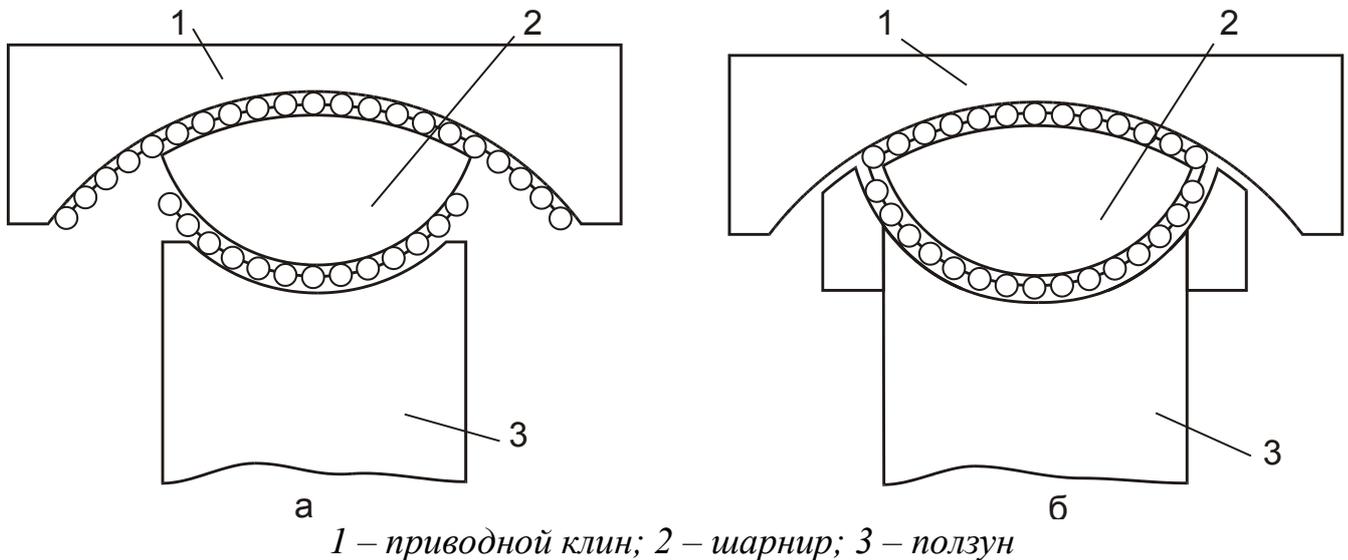


Рисунок 2.17 – Схемы выполнения поверхностей качения КШМ с ВК [83]

В качестве тел качения могут быть использованы шарики или ролики. Рассмотрим возможность использования роликовых поверхностей качения. Их расчет производится на прочность поверхностных слоев (по контактным напряжениям). Предельные нагрузки определяются из условия отсутствия пластических деформаций на площадках контакта. При этом несущая способность соединения ролика с плоскостью может быть рассчитана на основе формулы Герца [85]:

$$F = 2,77(l d / E) (\sigma_{max} / \sigma'_0)^2, \quad (2.40)$$

где F – сила нагружения ролика;

l – длина ролика;

d – диаметр ролика;

E – модуль нормальной упругости материала ролика и плоскости;

σ_{\max} – максимальное напряжение сжатия;

σ'_0 – безразмерная величина.

При выполнении расчетов было принято: $\sigma'_0 = 1$, т.к. ролик опирается на плоскость; $\sigma_{\max} = 1500 \text{ МПа}$ [85]; $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Расчеты показали, что несущая способность роликовых поверхностей качения на 15...20 % меньше, чем поверхностей скольжения (при $[\sigma]_{\text{СМ}} = 35 \text{ МПа}$ для бронзового вкладыша). Следовательно, для обеспечения силовых режимов, используемых в клиношарнирных механизмах необходимо на 15...20 % увеличить площади поверхностей трения, что ведет, в свою очередь, к увеличению габаритных размеров механизма.

Использование же в качестве тел качения шариков является нецелесообразным, т.к. несущая способность таких поверхностей качения значительно ниже, чем роликовых (при $\sigma_{\max} = 1500 \text{ МПа}$ и равных размерах сопрягаемых поверхностей – в 20...30 раз [85]).

Следовательно, замена трения скольжения трением качения в клиношарнирном механизме практически осуществима. И хотя она приводит к некоторому увеличению размеров поверхностей трения (на 15...20%), определяющим позитивным фактором является уменьшение коэффициента трения качения, по сравнению с коэффициентом трения скольжения, в 20 раз.

Из анализа графиков (см. рис. 2.16) можно сделать вывод о том, что замена трения скольжения трением качения ведет к увеличению выигрыша в силе, а, следовательно, и к повышению КПД клиношарнирного механизма на 60...65% – в начале хода клина, и на 45...50% – в конце. Однако данное решение сложно реализовать конструктивно, кроме того, использование тел качения приводит к снижению жесткости КШМ с ВК.

2.8 Исследование режимов трения на контактных поверхностях клино-шарнирного механизма с вогнутым клином

Выше было показано, что одним из факторов, обеспечивающих выигрыш в силе рассматриваемого клиношарнирного механизма, является снижение коэффициентов трения на сопрягаемых поверхностях.

Основным направлением снижения трения в КШМ с ВК является создание жидкостного трения на контактных поверхностях, когда процесс трения переносится в слой жидкого смазочного материала, обладающего малым сопротивлением сдвигу и предохраняющего поверхности деталей от повреждений [84].

Однако в процессе работы клиношарнирного механизма смазывающая жидкость, которая находится между сопрягаемыми поверхностями, воспринимает технологическую нагрузку и под её действием выжимается из зазоров между деталями в зоне контакта. В результате вершины микронеровностей в зонах, где вытеснена жидкость, будут контактировать через граничную пленку смазки, т.е. в некоторых местах возможно создание режима граничного или сухого трения, толщина слоя смазки при этом [85,86]

$$h_{\min} \leq R_{z_1} + R_{z_2}, \quad (2.41)$$

где R_{z_1}, R_{z_2} – высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей.

С увеличением удельного давления значение h_{\min} уменьшается.

Для устойчивой работы механизма в режиме жидкостного трения с учетом погрешностей изготовления и сборки, а также упругих деформаций узла должно выполняться условие [85]:

$$h_{\min} = S(R_{z_1} + R_{z_2}), \quad (2.42)$$

где S – условный коэффициент безопасности, $S > 1$.

Таким образом, для уменьшения трения необходимы следующие условия: между скользящими поверхностями должен быть зазор; масло соответствующей вязкости должно непрерывно заполнять зазор; скорость относительного движения

поверхностей должна быть достаточной для того, чтобы в масляном слое создалось давление, способное уравновесить внешнюю нагрузку.

Величина зазора между сопрягаемыми поверхностями должна быть оптимальной, с точки зрения обеспечения достаточной толщины слоя смазки и жесткости механизма, а, следовательно, качества выполнения технологического процесса.

В подвижных соединениях клиношарнирного механизма целесообразно применять посадку $H7/g6$. Максимальная величина суммы зазора при этом может колебаться в пределах от 0,02 до 0,5 мм.

Как видно из формулы (2.26), на процесс работы клиношарнирного механизма влияют:

- трение в поступательных кинематических парах, которое обуславливает отклонение силы нормального давления на угол трения ρ ;
- трение цилиндрических поверхностей клина, шарнира и ползуна, в результате которого сила нормального давления отклоняется на угол ψ .

Исследуем методы снижения углов трения. Выжимание жидкости из зазоров в зоне контакта клина, шарнира, ползуна и направляющих происходит во все стороны подвижных соединений, имеющих обычно в плане прямоугольную форму [82].

Обозначим размеры клина в плане $2B$ и L (рис. 2.18). В реальных конструкциях клиношарнирного механизма сторона $2B$ обычно в несколько раз больше, чем L , движение происходит вдоль стороны $2B$, по которой могут быть расположены уплотнение или направляющая, ограничивающие вытеснение жидкости.

Рассмотрим процесс выжимания жидкости из зазора δ между двумя прямоугольными пластинами, одна из которых имеет размеры сторон $2B$ и L , а другая – неограниченные по сравнению с первой размеры (см. рис. 2.18).

Для упрощения расчетов приняты допущения: движение первой пластины вдоль оси OZ принимаем равномерным; возвратно-поступательное движение пластины не приводит к образованию гидравлического клина; влиянием упругой деформации сжатой жидкости на общее изменение слоя жидкости пренебрегаем, так как оно очень мало (около 1 %); влияние упругой деформации пластин на податливость жидкости не учитываем, так как оно составляет менее 0,1 % от величины за-

зора; поверхности пластин считаем абсолютно гладкими, без микронеровностей; предполагаем, что пластины параллельны.

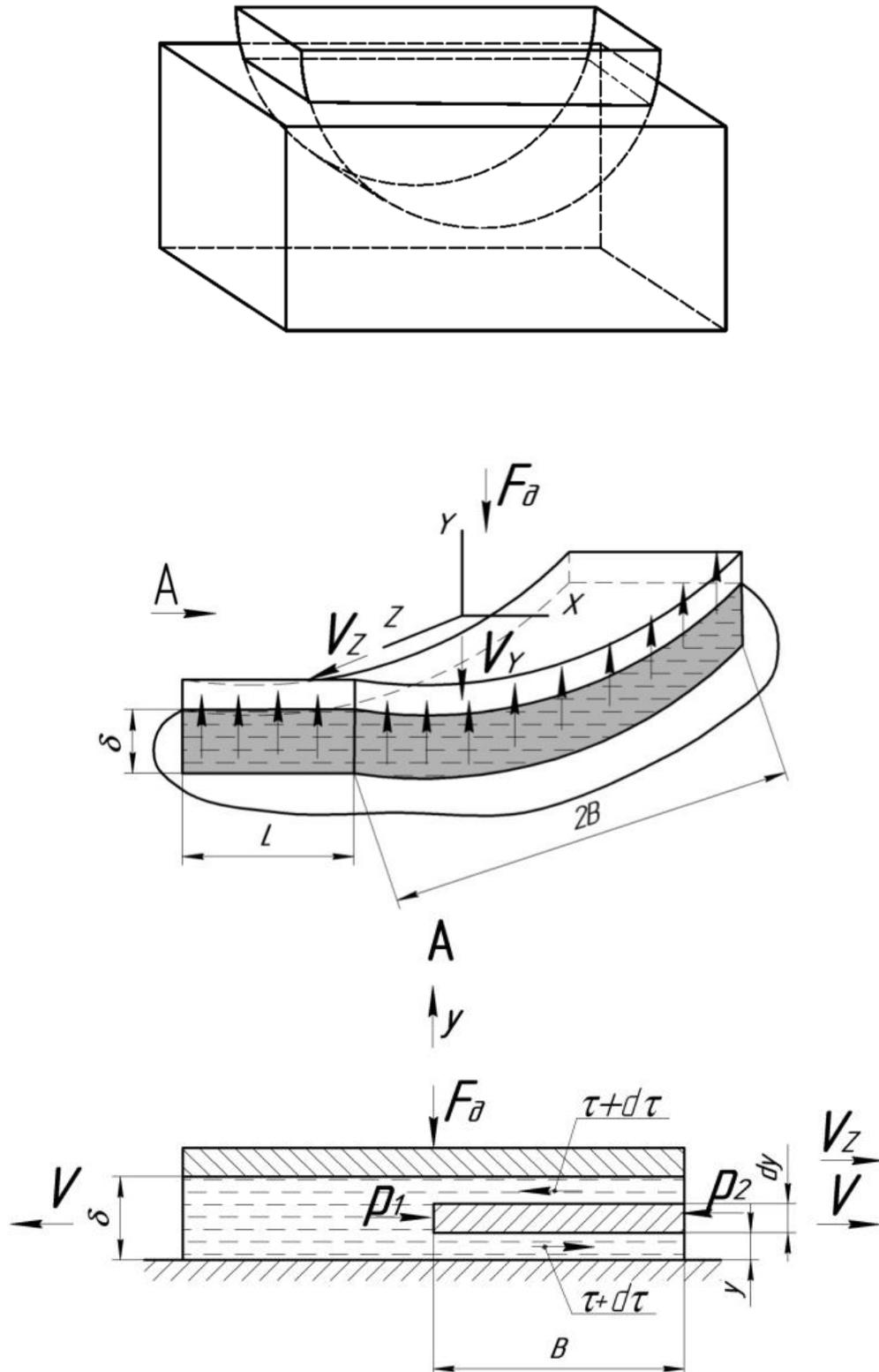


Рисунок 2.18 – Расчетная схема для определения величины зазора между сопрягаемыми поверхностями КШМ с ВК [87]

На верхнюю пластину действует постоянная сила F_0 . Ввиду малости зазора δ , величина которого определяется посадкой в сочленяющихся поверхностях звеньев клиношарнирного механизма, режим движения жидкости считаем ламинарным.

Тогда касательные напряжения между соседними слоями жидкости подчиняются закону Ньютона

$$\tau = \pm \mu \frac{dV}{dy}, \quad (2.43)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости;

$\frac{dV}{dy}$ – градиент скорости вдоль нормали к оси потока.

Составим уравнение равновесия сил, действующих на элементарный слой жидкости шириной L , длиной B и толщиной dy (см. рис. 2.18)

$$(p_1 - p_2)L dy - d\tau BL = 0, \quad (2.44)$$

где p_1 и p_2 – давление, действующее на слой жидкости внутри и снаружи пластины.

Тогда из выражения (2.44)

$$d\tau = (p_1 - p_2)/B \cdot dy. \quad (2.45)$$

Проинтегрируем это выражение

$$\tau = \int \frac{p_1 - p_2}{B} dy = \frac{p_1 - p_2}{B} y + C_1. \quad (2.46)$$

С учетом уравнения (2.43) найдем

$$dV = -\frac{p_1 - p_2}{\mu B} y dy - \frac{C_1}{\mu} dy.$$

Проинтегрируем данное выражение

$$V = -\int \frac{p_1 - p_2}{\mu B} y dy - \int \frac{C_1}{\mu} dy = -\frac{p_1 - p_2}{2\mu B} y^2 - \frac{C_1}{\mu} y + C_2. \quad (2.47)$$

Определим постоянные интегрирования из граничных условий:

при $y = \delta$; $V = V_z$; при $y = 0$; $V = 0$.

Тогда $C_2 = 0$,

$$V_z = -\frac{p_1 - p_2}{2\mu B} \delta^2 - C_1 \frac{\delta}{\mu},$$

откуда

$$\frac{C_1}{\mu} = -\frac{p_1 - p_2}{2\mu B} \delta - \frac{V_z}{\delta}. \quad (2.48)$$

Получим выражение для скорости выдавливания жидкости через зазор

$$V = \frac{p_1 - p_2}{2\mu B} (y\delta - y^2) \pm \frac{y}{\delta} V_z. \quad (2.49)$$

Знак "плюс" относится к части слоя жидкости по положительному направлению оси z , а знак "минус" – к части слоя жидкости по отрицательному направлению оси z . Таким образом, получен закон распределения скорости в щели. Элементарный расход через слой жидкости

$$dQ = VLdy$$

или с учетом уравнения (2.49)

$$dQ = \left[\frac{p_1 - p_2}{2\mu B} (y\delta - y^2) \pm \frac{y}{\delta} V_z \right] Ldy. \quad (2.50)$$

Проинтегрируем это выражение

$$Q = \int_0^\delta \left[\frac{p_1 - p_2}{2\mu B} (y\delta - y^2) \pm \frac{y}{\delta} V_z \right] Ldy = \left(-\frac{p_1 - p_2}{4\mu B} \delta^3 \pm \frac{V_z \delta}{2} \right) L. \quad (2.51)$$

Установим закон распределения давления.

Пусть в некоторый момент времени размер зазора равен y . Выделим для этого момента времени в зазоре элементарную площадку dz . Тогда на основании уравнения (2.51) при $p_2 = 0$ можно записать

$$\frac{dp_1}{dz} = -4\mu \frac{Q}{Ly^3} \pm 2\mu \frac{V_z}{y^2}. \quad (2.52)$$

В случае опускания пластины с постоянной скоростью $V_y = const$ расход жид-

кости может быть представлен, как $Q = zLV_y$. Интегрируя с учетом этого выражение (2.52), получим

$$p = -4\mu \int \frac{zLV_y}{Ly^3} dz \pm 2\mu \int \frac{V_z}{y^2} dz = -2 \frac{\mu V_y}{y^3} z^2 \pm \frac{2\mu V_z}{y^2} z + C. \quad (2.53)$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий: $p = 0$ при $z = B$

$$C = \frac{2\mu V_y}{y^3} B^2 \mp \frac{2\mu V_z}{y^2} B,$$

$$p = \frac{2\mu V_y}{y^3} (B^2 - z^2) \mp \frac{2\mu V_z}{y^2} (B - z) = \frac{2\mu}{y^2} \left[\frac{V_y}{y} (B^2 - z^2) \mp V_z (B - z) \right].$$

Элементарная сила может быть записана как

$$dF_\delta = pLdz = \frac{2\mu L}{y^2} \left[\frac{V_y}{y} (B^2 - z^2) \mp V_z (B - z) \right] dz. \quad (2.54)$$

Интегрируя это выражение от $-B$ до B , найдем искомую силу

$$F_\delta = \frac{2\mu L}{y^2} \int_{-B}^B \left[\frac{V_y}{y} (B^2 - z^2) \mp V_z (B - z) \right] dz = \frac{2\mu L}{y^2} \left[\frac{V_y}{y} \frac{4B^3}{3} \mp V_z 2B^2 \right] = \frac{8\mu L V_y}{3} \left(\frac{B}{y} \right)^3 \mp 4\mu L V_z \left(\frac{B}{y} \right)^2.$$

Окончательно запишем (при $V_z = 0$)

$$F_\delta = \frac{8}{3} \mu L V_y \left(\frac{B}{y} \right)^3. \quad (2.55)$$

Полагая в этом выражении силу F_δ постоянной, а скорость $V_y = -dy/dt$ и учитывая, что при $t = 0, y = \delta$, получим после интегрирования уравнение изменения зазора между контактными поверхностями КШМ с ВК:

$$y = \delta / \sqrt{\frac{3F_\delta t}{4\mu LB^3} + \frac{1}{\delta^2}}. \quad (2.56)$$

Полученное уравнение справедливо для технологических процессов, протекающих при постоянной нагрузке, например, прессования ($F_\delta = const$). Однако в реальных условиях при использовании клиношарнирного механизма для разделительных процессов график нагрузки представляет собой сложную кривую. В этом слу-

чае для нахождения изменения зазора воспользуемся выражением

$$y(t) = 1 / \sqrt{\frac{3 \left(\sum_{k=1}^n \int_{t_{k-1}}^{t_k} F_o(t_k) dt_k \right) t_k}{4 \mu(t) LB^3} + \frac{1}{\delta_{k-1}^2}}. \quad (2.57)$$

и методами численного интегрирования.

Как следует из зависимости (2.57), величина изменения зазора между пластинами при прочих равных условиях зависит от времени действия нагрузки и давления на сопрягаемых поверхностях. Анализ этого выражения позволяет определить оптимальную величину зазора при условии максимальной жесткости смазочного слоя и исключения соприкосновения пластин между собой в процессе нагружения (режим жидкостного трения). Как показывает анализ выражения (2.57), интенсивность выжимания смазки резко снижается с уменьшением времени действия нагрузки, то есть для повышения жесткости смазочного слоя механизма необходимо повышать его быстроходность.

Применение высокоскоростного типа привода клина позволяет значительно уменьшить время нагружения КШМ. При скорости перемещения клина 5...10 м/с время рабочего хода колеблется в пределах 0,05...0,10 с, что практически сведет к нулю объем жидкости, выдавленной из зазора. В то же время необходимо уменьшать величину зазора между сопрягаемыми деталями механизма, так как в этом случае объем выдавливаемой жидкости из зазоров уменьшается.

При решении поставленной задачи было сделано допущение, что сопрягаемые поверхности являются идеально гладкими. В реальных конструкциях клиношарнирных механизмов сопрягаемые поверхности трущихся деталей обрабатываются шлифованием ($Ra = 0,8 \text{ мкм}$). В этом случае при зазоре между пластинами порядка 0,05 мм сопрягаемые поверхности звеньев механизма в отдельных местах будут касаться между собой микровыступами, режим трения станет полужидкостным, что приведет к повышению коэффициента трения и снижению КПД механизма. Поэтому зазор между сопрягаемыми деталями привода должен выбираться оптимальным для обеспечения условий жидкостного трения.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА И МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

3.1 Выбор методов и материалов для проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования были проведены с целью уточнения исходных данных для численной реализации математических моделей и оценки степени их достоверности. Помимо указанного выше, результаты экспериментальных исследований были использованы для оценки эффективности предложенных технических решений и разработанных на их основе практических рекомендаций.

Экспериментальные исследования должны подтвердить основные теоретические положения по применению механизмов с вогнутым клином для реализации безотходных способов разделения сортового проката.

Согласно поставленным целям исследований разработана методика измерения энергосиловых параметров, основанная на методе тензометрии. В качестве датчиков применялись фольговые тензорезисторы ФКТК 10-200С-I, включенные по полумостовой и мостовой схеме. В качестве месдоз использовались детали оснастки, тарировка которых производилась на гидравлическом прессе при статическом нагружении в рабочем диапазоне до 10 кН.

В качестве усиливающей и регистрирующей аппаратуры использовались: "Топаз-3-01", осциллограф Н-115. Питание на датчики и прибор «Топаз-3-01» подавалось соответственно от аккумуляторов и источника питания «Агат». Перемещение рабочих органов фиксировалось реостатным ходографом. Также для проведения экспериментов использовалось универсальное устройство многоканального сбора информации на базе шины USB (Rev 1.1) – модуль E-440, для ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации на ПЭВМ. Модуль E-440 обладает следующими функциональными характеристиками:

- современный цифровой сигнальный процессор ADSP – 2185M фирмы Analog Devices, Inc. с тактовой частотой работы 48 МГц;

- 16 дифференциальных каналов или 32 канала с общей землей для аналогового ввода с возможностью автоматической корректировки нуля;
- максимальная частота работы 14^{mu} битного АЦП – 400 кГц,

что позволяет использовать данное устройство для исследования многих процессов и ударных в частности. Особенно ценным является возможность одновременной записи сразу нескольких каналов (использовалось до 3 каналов). Регистрация и обработка результатов измерений производилась с помощью разработанного программного обеспечения.

Измерение геометрических параметров, характеризующих геометрическую точность отрезанных образцов, производили методом прямого измерения с использованием универсального измерительного инструмента. Качество поверхности излома и геометрическую точность заготовок исследовали методом макроструктурного анализа с измерением абсолютных и относительных величин искажений геометрической формы.

Качество получаемых заготовок оценивали по высоте шероховатости (вырывов и сколов) торцов δ_i , которую измеряли с помощью индикаторной головки. Для сравнения качества получаемых заготовок образцы отдельно нагружали статической и динамической силами до разрушения. Обработку результатов экспериментальных исследований осуществляли на основе соответствующих методов теории вероятности и математической статистики [88,89].

Опыты проводили на образцах из сталей с разными механическими свойствами, поскольку именно характеристики материала, как правило, являются определяющим фактором при выборе способа разделения. Причем, принятие решения о способе разделения, которое основано на учете только механических свойств материала, зачастую не позволяет получить хороший результат. В работах [90,91,92] предложены и рассмотрены комплексные критерии разрушения сталей и сплавов цветных металлов: показатель вязкости металла, критерий зарождения трещины, критерий распространения трещины, критерий хрупкости и критерий «масштаб».

Анализ результатов расчетов показывает, что наиболее приемлемым критерием для выбора способа разделения является критерий «масштаб» M (величина без-

размерная, которая учитывает взаимосвязь размеров заготовки, образца и чувствительности сталей к разрушению (по характеристикам упругости)). Согласно этому критерию к материалам, находящимся в хрупком состоянии следует отнести стали и сплавы цветных металлов, для которых критерий M находится в диапазоне $M = 0..600$. Например, дюралюминий Д16, стали марок: ШХ15, 40Х, 65Г, 60С2А, У8А. Аналогично к материалам, находящимся в пластичном состоянии следует отнести стали и сплавы цветных металлов, для которых M находится в диапазоне $M = 1500..3000$. Например, стали марок: Ст3, 3Х13, 10,20 и латунь ЛС59-1. Проведенные экспериментальные исследования [91] подтверждают способность данных критериев характеризовать чувствительность металлов к разделению. Остальные стали и сплавы цветных металлов можно отнести к вязкоупругим материалам. Хотя при разных температурно-скоростных условиях для этих материалов может реализоваться как хрупкое, так и вязкое разрушение. Например, сталь марки ШХ15 при разных режимах термической обработки может быть отнесена как к упругим материалам (закалка 860°C , масло, температура отпуска 550°C), так и к вязкоупругим (отжиг 800°C , печь до 730°C , затем до 650°C со скоростью $(10..20)$ град/час, воздух).

Использование всего комплекса критериев дает более объективную картину о докритическом и закритическом росте магистральной трещины, а также – предполагаемой геометрической точности получаемых заготовок. Однако мера этой способности – информативность комплексных критериев, неясна.

Для этого в работе [92] определена информативная система критериев, позволяющая достоверно классифицировать материалы по их чувствительности к разрушению. Решена таксономическая задача нахождения в многомерном пространстве признаков (критериев) множества минимальной мощности, обеспечивающего классификацию объектов с заданной достоверностью [93].

В кластер материалов, находящихся в пластичном состоянии, были объединены стали марок: Ст3, 10 (горячекатаная), 20 (горячекатаная) и латунь ЛС59-1. В кластер материалов, находящихся в упругопластическом состоянии, были объединены стали марок: 10 (калиброванная нагартованная), 20 (калиброванная нагартован-

ная), 30 (горячекатаная), 40 (горячекатаная), 45 (горячекатаная), 45 (калиброванная нагартованная), 3Х13, У8А. В кластер материалов, находящихся в хрупком состоянии, были объединены стали марок: 45, 40Х, 65Г, 60С2, 30ХГСА, ШХ15 (закалка 860⁰С, масло, температура отпуска 550⁰С), ШХ15 (отжиг 800⁰С, воздух)[91,92].

На основании вышеизложенного можно сделать такие выводы:

- Наиболее информативным среди традиционных критериев является предел текучести, среди комплексных – «масштаб».
- Среди традиционных критериев механических свойств не обнаружено множество, позволяющее с заданной достоверностью классифицировать материалы по их чувствительности к разделению.
- Комплексные критерии: критерий распространения трещин и критерий хрупкости являются базовыми информативными признаками, и при добавлении к ним любого из оставшихся комплексных критериев (критерий зарождения трещин или «масштаб»), они образуют наиболее информативные множества минимальной мощности, обеспечивающие с заданной достоверностью классификацию материалов по их чувствительности к разделению.

В экспериментах использовались цилиндрические образцы из проката диаметром: 10; 12; 16, 20 мм и длиной 150 мм. В качестве материалов, находящихся в пластическом состоянии использовалась сталь Ст3, в упругопластическом – стали марок: 20, 45, 40Х, в хрупком – стали марок: 60С2, ШХ15. На образцы для испытаний по схемам холодной ломки изгибом предварительно с помощью токарного резца наносили одинаковые концентраторы напряжений в форме кольцевой канавки треугольного профиля $\alpha = 60^{\circ}$ глубиной $\Delta H = 1,3 \text{ мм}$ и радиусом при вершине $r = 0,15 \text{ мм}$. Механические свойства исследуемых материалов образцов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Механические свойства материалов образцов [94]

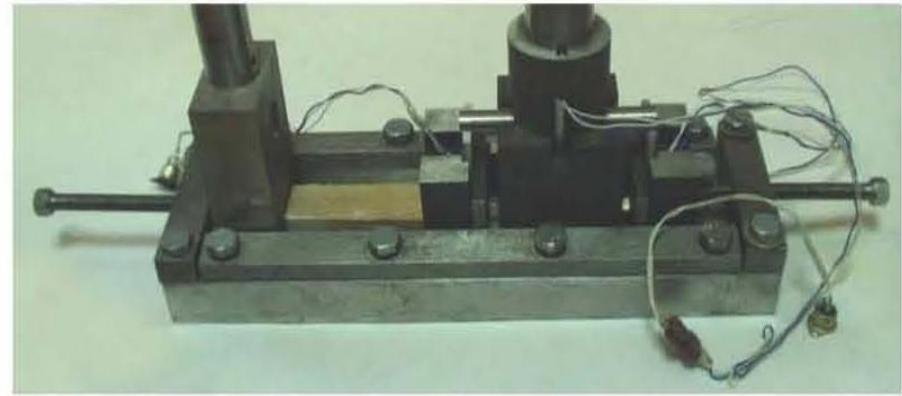
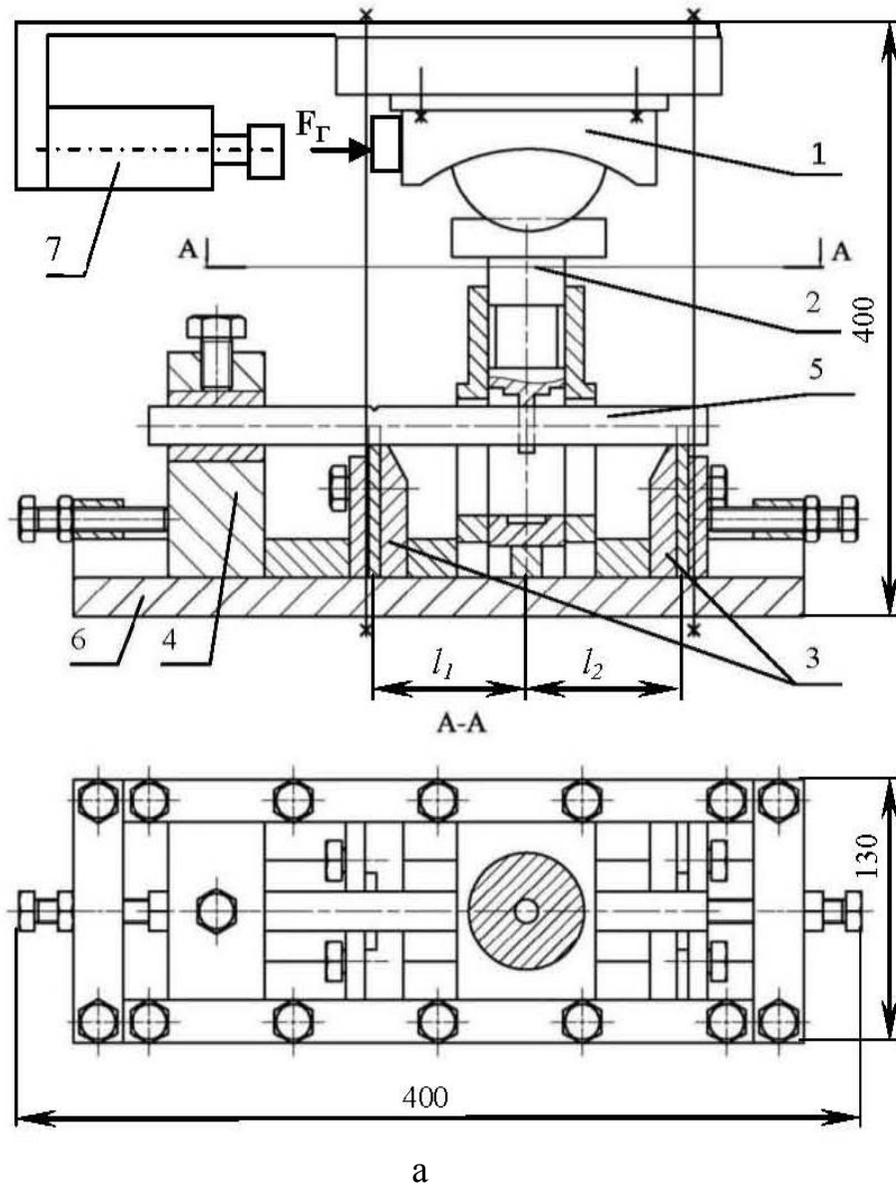
№ п/п	Марка стали	Предел текучести, $\sigma_T, \text{МПа}$	Предел прочности, $\sigma_B, \text{МПа}$	Относительное удлинение, $\delta, \%$	Относительное сужение, $\psi, \%$	Твердость, НВ
1	Ст3	240	433	32	62	131
2	20 (горячекатаная)	245	412	25	55	156
3	45 (горячекатаная)	353	598	16	40	241
4	40Х	695	879	16	56	255
5	60С2	545	962	17	42	207
6	ШХ15 (закалка 860° С, масло, температура отпуска 550° С)	900	1080	8	36	360

3.2 Экспериментальные исследования холодной ломки проката изгибом

Проведены технологические эксперименты по разделению цилиндрических образцов способом холодной ломки изгибом по схеме трехточечной ломки изгибом при статическом и динамическом нагружениях.

В эксперименте использовались цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 150 мм, выполненные из материалов, находящихся в разных состояниях: в пластическом – сталь Ст3, в упругопластическом – стали марок 20, 45, 40Х, в хрупком – стали марок 60С2, ШХ15. На образцы предварительно с помощью токарного резца наносили одинаковые концентраторы напряжений в форме кольцевой канавки треугольного профиля ($\alpha = 60^\circ$) глубиной $\Delta H = 3 \text{ мм}$ и радиусом при вершине $r \cong 0,15 \text{ мм}$. Плечо приложения нагрузки $l_1 = l_2 = 50 \text{ мм}$.

Для проведения экспериментальных исследований по разделению цилиндрических образцов по схеме трехточечной ломки изгибом при статическом и динамическом нагружениях использована установка для холодной ломки сортового проката и труб (рис. 3.1) на мерные заготовки [95], снабженная КШМ с ВК с приводом от гидроимпульсного цилиндра.



б

Рисунок 3.1 – Конструктивная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки для разделения образцов холодной ломкой изгибом [95]

Установка состоит из станины 6, в направляющих которой находятся: механизм зажима проката 4, механизм ломателя 2, и механизм опор 3, установленных с возможностью возвратно-поступательного движения, ограниченного упорами и накладками, которые крепятся к станине 6 болтами и шайбами. Положение механизмов зажима, ломателя и опор выставляется с помощью болтов, вкрученных в упоры, гаек и проставок. Механизм зажима 4 проката 5 состоит из станины, в отверстии которой размещается прокат 5 между зажимными полувтулками, которые, в свою очередь, зажимаются с помощью болта, вкрученного в станину.

Механизм ломателя 2 состоит из корпуса и собственно ломателя, установленного с возможностью возвратно-поступательного движения относительно направляющих под действием клиношарнирного механизма 1 с приводом от гидроимпульсного цилиндра 7. Механизм опоры 3 состоит из корпуса и опорной пластины, которая удерживается накладкой с помощью болтов и шайб.

Результаты наблюдений и измерений представлены в табл. 3.2 [95,96].

Таблица 3.2– Результаты наблюдений и измерений [95]

Вид нагрузки	Марка стали	Описание заготовок
Статическое нагружение	60С2	Угол изгиба до разрушения составил $\sim 10^\circ$. Участки заготовок, примыкающие к концентратору напряжений, пластически деформированы. Имеется небольшой рыв в зоне напряжений сжатия со стороны ломателя. Поверхность матовая. Качество торца удовлетворительное (рис. 3.2,а)
	45	Участки заготовок, примыкающих к КН, пластически деформированы. Поверхность скола вначале матовая (в зоне растяжения в начале движения трещины), остальная – перьевая, полосчатая, шероховатая с фракцией 0,3...0,4 мм. Качество заготовок удовлетворительное (рис. 3.2,б)
	40Х	Поверхность разрушения сильно шероховатая, имеются вырывы, борозды. Однако траектория трещины прямолинейная. Качество заготовок удовлетворительное (рис. 3.2,в)
	Ст3	Образец не разрушился, так как не хватило хода инструмента до полного разрушения, но трещина пересекла сечение проката примерно на 30%. Угол изгиба до разрушения составил $25...30^\circ$. Участки, примыкающие к КН, сильно изогнуты. Видимая часть поверхности скола "матовая", что соответствует началу старта трещины в области растягивающих напряжений

Продолжение таблицы 3.2

Вид нагрузки	Марка стали	Описание заготовок
Динамическое (ударное) нагружение	60С2	Разрушение хрупкое, поверхность разрушения матовая, имеется небольшой вырыв со стороны зоны щих напряжений, траектория трещины прямолинейная, области образца вблизи КН практически не деформированы. Качество заготовок высокое (рис. 3.3,а)
	45	Разрушение хрупкое, поверхность разрушения тая, шероховатая с фракцией 0,2...0,3 мм, траектория трещины прямолинейная. Участки заготовок, кающие к КН практически не изогнуты. Качество заготовок удовлетворительное (рис. 3.3,б)
	40Х	Разрушение вязкоупругое, поверхность разрушения полочатая, крупнозернистая с вырывами (фракция 0,6...0,8 мм), области вблизи КН деформированы слабо. Качество заготовок удовлетворительное (рис. 3.3,в)
	Ст3	Образец не разрушился, так как не хватило хода инструмента до полного разрушения. При этом угол изгиба составил примерно 30°. Участки, примыкающие к КН, сильно изогнуты

Типовые графики изменения энергосиловых параметров процесса трехточечной холодной ломки изгибом образцов из разных материалов при статическом и динамическом нагружениях представлены на рис. 3.2 – 3.13 [95].

Особый интерес представляют экспериментальные данные снятые одновременно по трем каналам: ломатель, опора 1, опора 2, представленные на рис. 3.12, 3.13 [95].

Результаты обработки экспериментов представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Силовые параметры процесса холодной ломки проката изгибом [95]

Марка стали	Максимальная сила ломки $F_d, кН$	
	Статика	Динамика
ШХ15	3,3	2,6
45	3,8	9,0
40Х	4,5	6,0
20	4,2	8,0

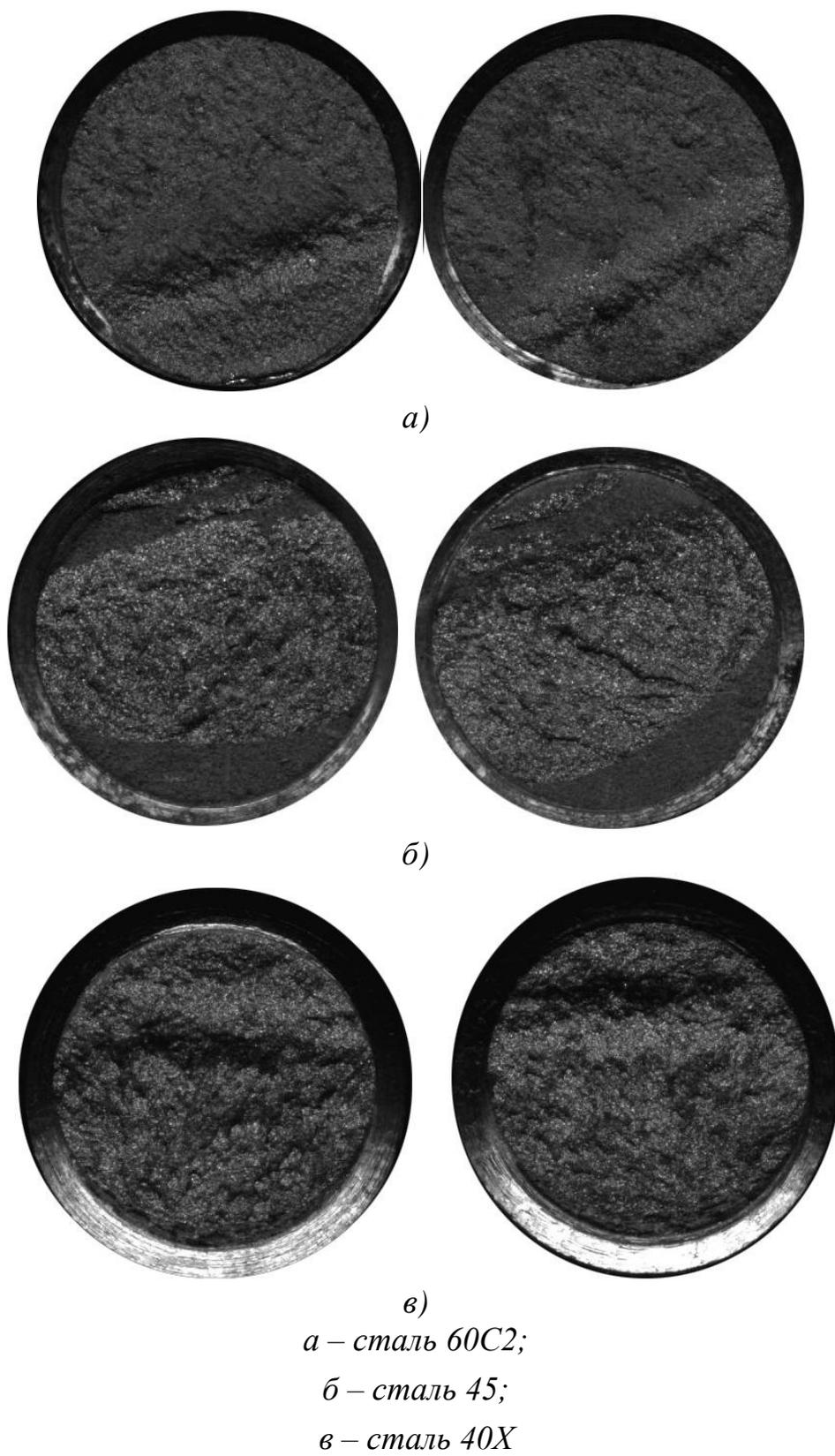
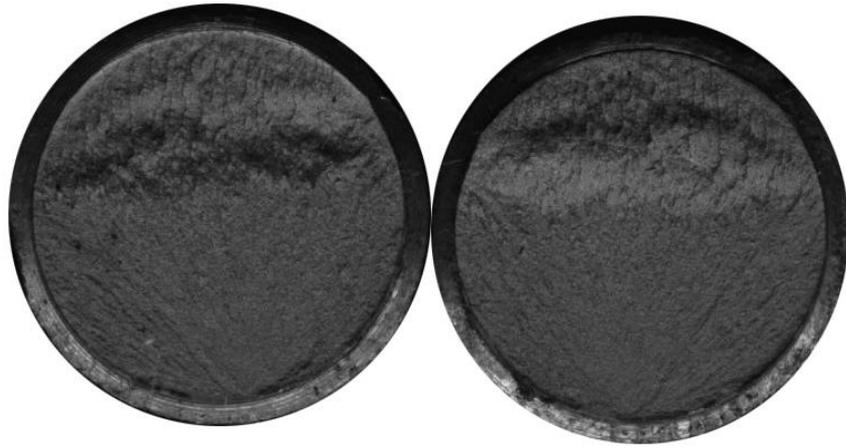
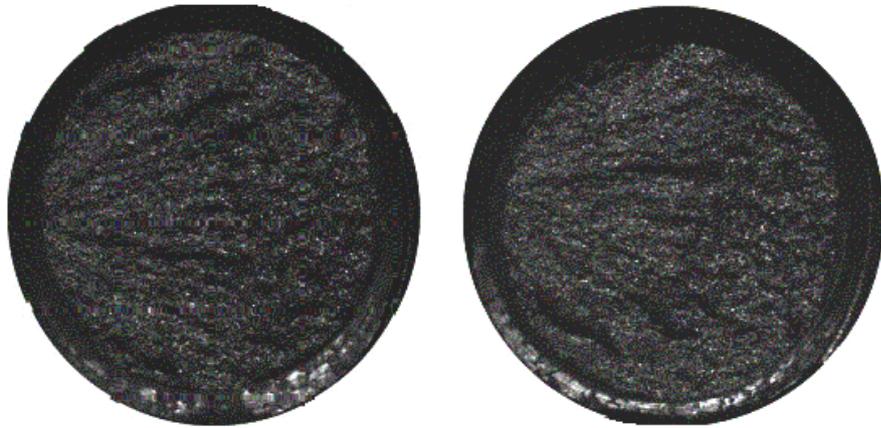


Рисунок 3.2 – Фотографии заготовок из различных марок сталей, разделенных при статическом нагружении[95]



a)



б)



в)

a – сталь 60С2;

б – сталь 45;

в – сталь 40Х

Рисунок 3.3 – Фотографии заготовок из различных марок сталей, разделенных при динамическом нагружении[95]

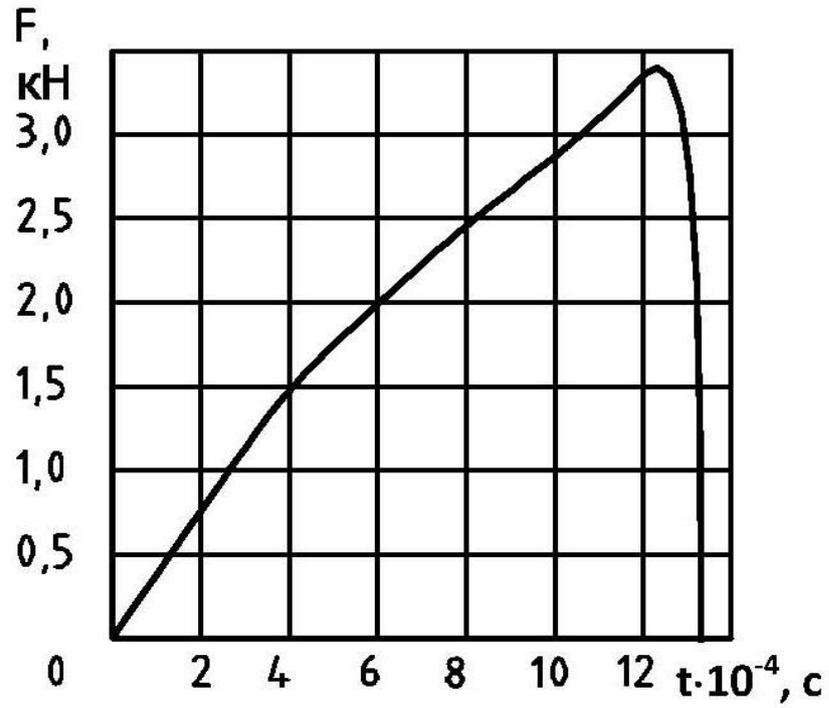


Рисунок 3.4 – Зависимость статической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки ШХ15[95]

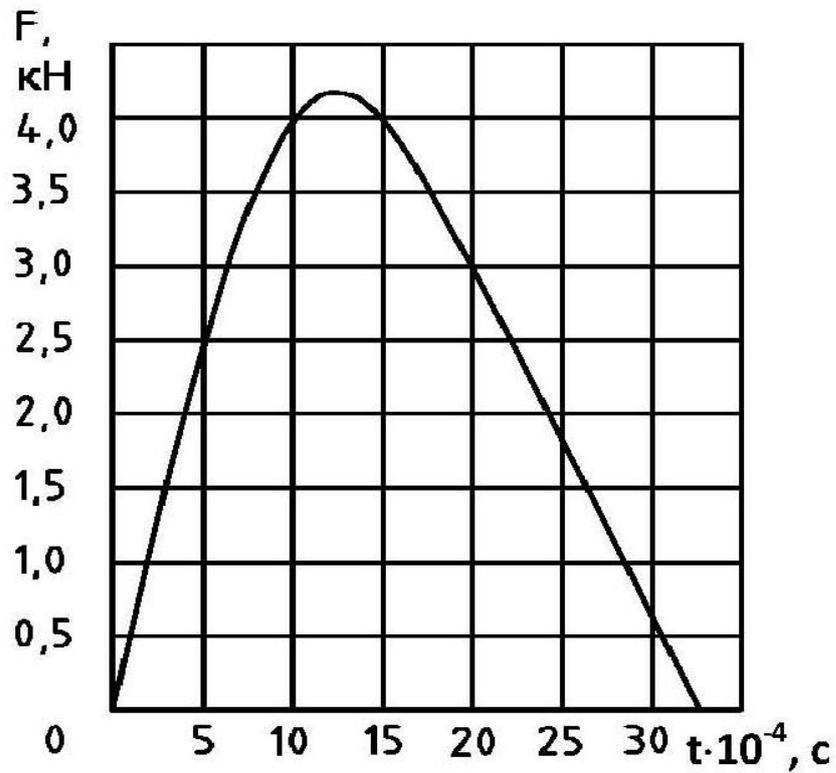


Рисунок 3.5 – Зависимость статической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки 20[95]

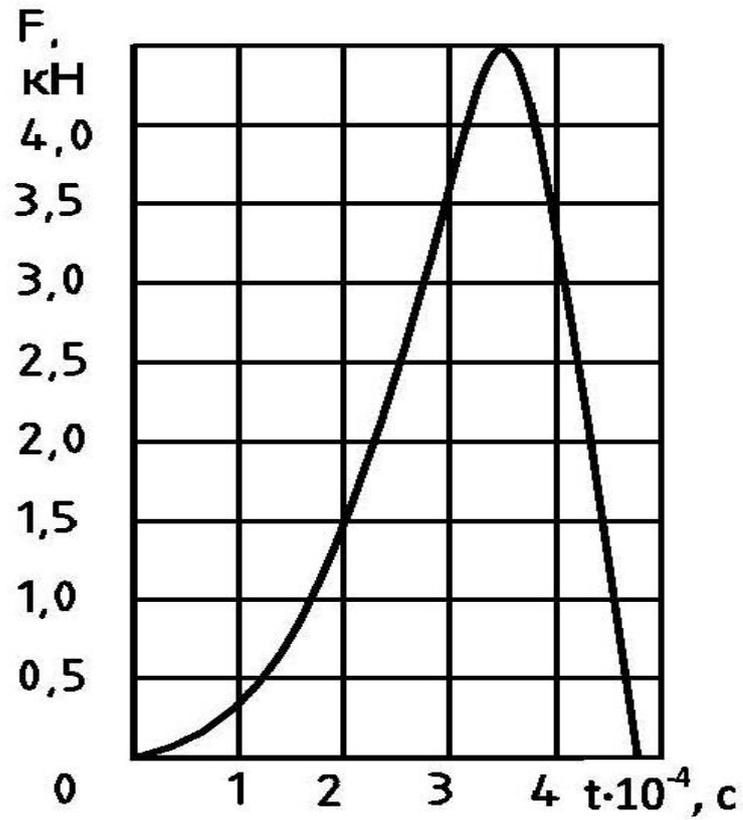


Рисунок 3.6 – Зависимость статической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки 40X[95]

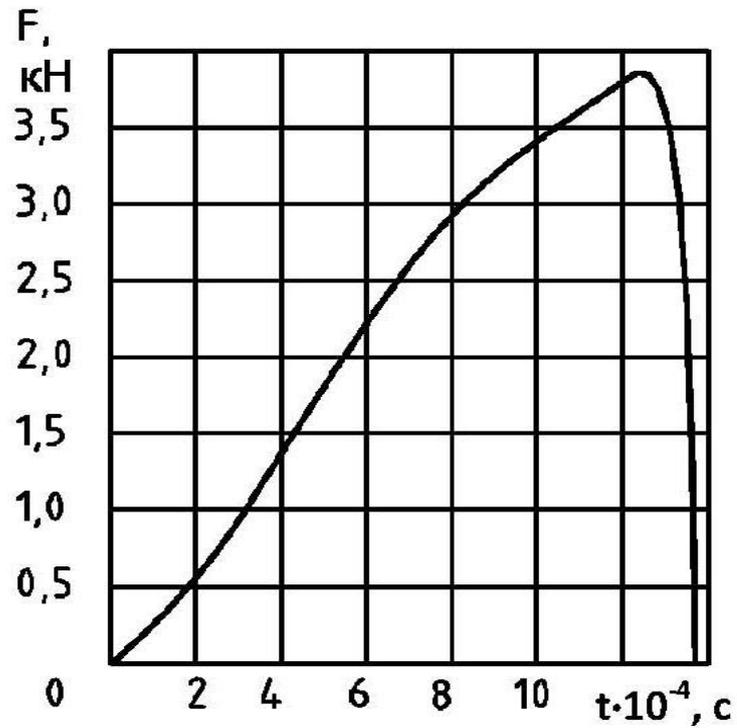


Рисунок 3.7 – Зависимость статической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки 45[95]

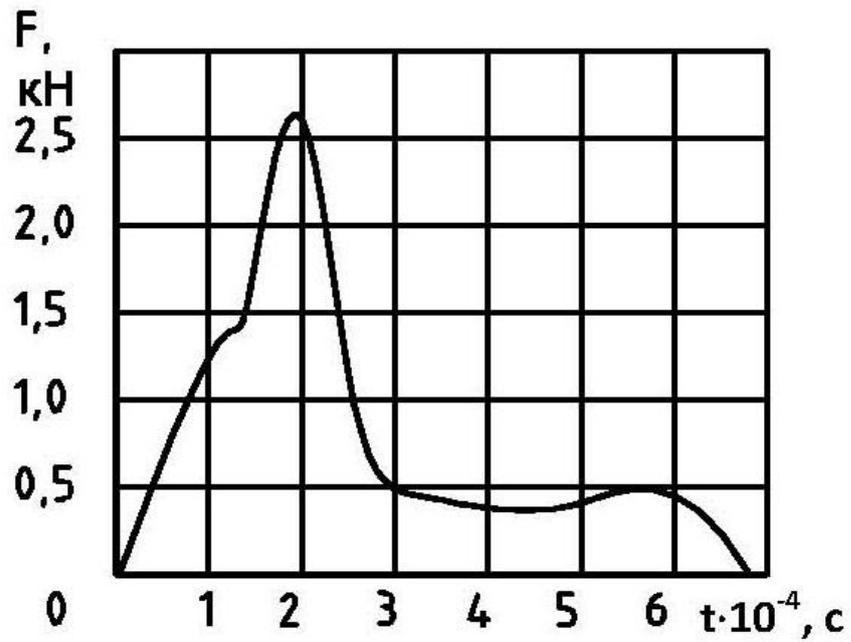


Рисунок 3.8 – Зависимость динамической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки ШХ15[95]

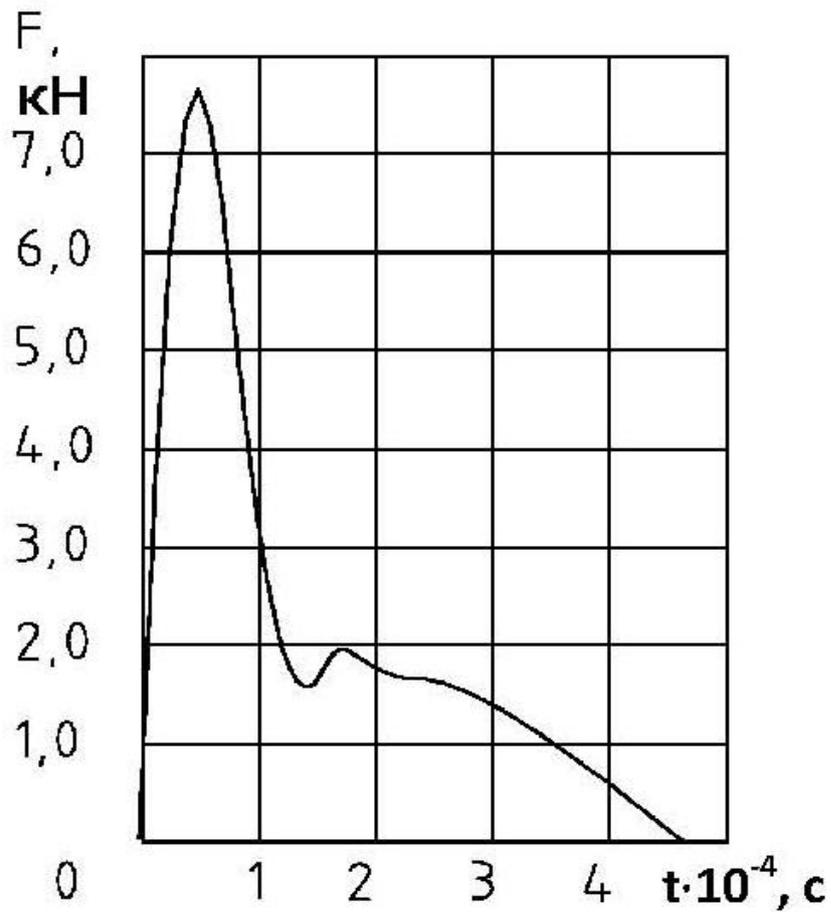


Рисунок 3.9 – Зависимость динамической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки 20[95]

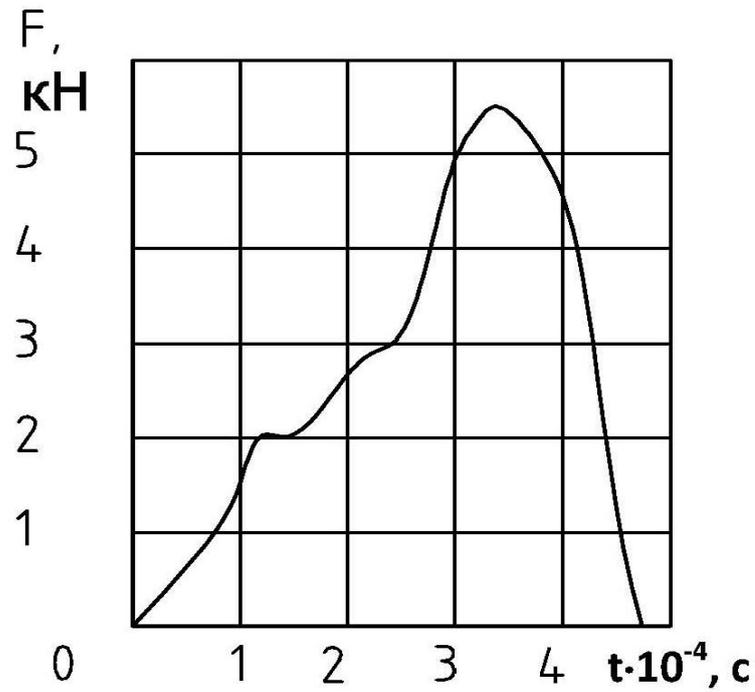


Рисунок 3.10 – Зависимость динамической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки 40X[95]

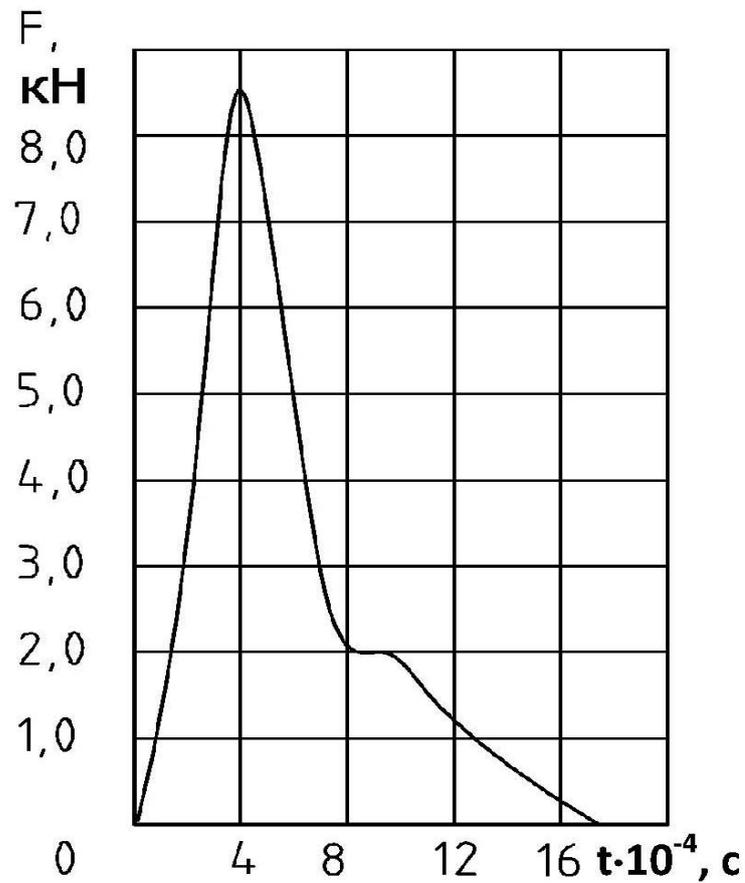
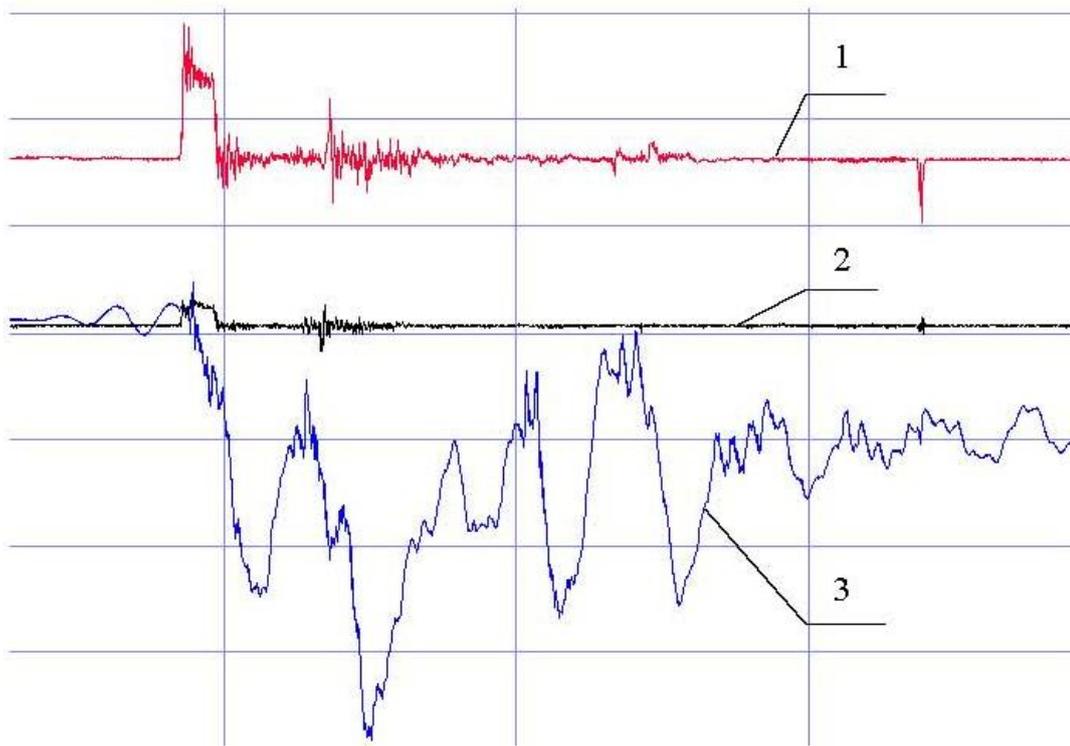


Рисунок 3.11 – Зависимость динамической силы на ломателе от времени для образцов из стали марки 45[95]



1 – опора 1; 2 – опора 2; 3 – ломатель

Рисунок 3.12 – Типовая осциллограмма зависимости сил на ломателе и опорах от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для стали марки 60С2[95] (ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с.)

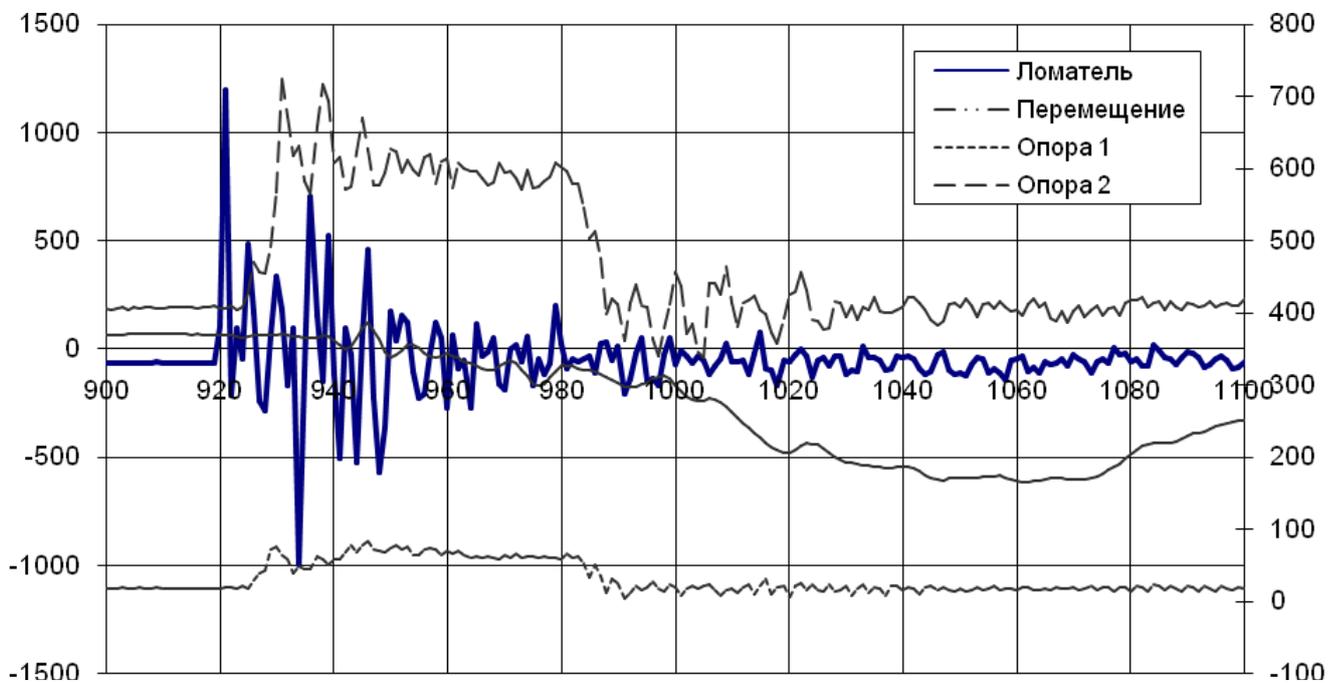


Рисунок 3.13 – Обработанные данные зависимости сил на ломателе, опорах и перемещения от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для стали марки 60С2[95] (ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с.)

На основании анализа результатов экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Геометрическая точность заготовок из разных марок сталей практически одинаковая при статическом и динамическом нагружениях. Это в какой-то мере противоречит выводам, сделанным в работах [56–58].

- Установлено, что скорость нагружения увеличивает прочностные характеристики материалов заготовок с учетом структуры, состава, технологии получения образцов и параметров концентраторов напряжений. Как видно из данных табл. 3.3 сила трехточечной холодной ломки изгибом образцов из разных марок сталей возрастает в случае перехода от статического нагружения к повышенным скоростям деформирования ($V \cong 15 \text{ м/с}$). Это соответствует многочисленным экспериментальным данным и свидетельствует о чувствительности материалов к скорости нагружения [56–58,97]. Исключением является сталь марки ШХ15, для которой динамическое значение силы ломки оказалось ниже статического. Полученный результат можно объяснить высокой хрупкостью стали, и тем, что для неё глубина нанесенного КН оказалась завышенной.

- Коэффициент динамичности нагружения $k_{\partial} = F_{\partial} / F_{\text{ст}}$ для разных марок сталей составил соответственно: ШХ15 – 0,75...0,80; 45 – 2,30...2,40; 40Х – 1,30...1,35; 20 – 1,90...1,95.

3.3 Экспериментальные исследования клиношарнирного механизма с вогнутым клином при реализации отрезки проката сдвигом

3.3.1 Исследование кинематических характеристик клиношарнирного механизма с вогнутым клином для операции отрезки сдвигом

Для проверки математических моделей клиношарнирного механизма с вогнутым клином была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 3.14, 3.15 [98]. Установка состоит из нижней плиты 1 и верхней плиты 2, соединенных шпильками 3, стянутыми гайками 4. На шпильки 3 установлена промежуточная плита 5 с закрепленным ползуном 6, в пазу которого размещен шарнир 7 с радиусом r , опертый на вогнутый клин 8, имеющий поверхность с радиусом R . На плите 2 закреплена болтами 9 траверса 10, к которой прикреплен приводной гидроцилиндр 11, шток 12 которого упирается в клин 8. На плиту 1 установлен втулочный нож 13, прикрепленный к плите подпружиненными болтами 14.

Верхний полувтулочный нож 15 закреплен болтами 16 к промежуточной плите 5. В пазу ползуна 6 установлен клин 17, который опирается на плиту 5. Винт 18 упирается в плиту 5 и может смещать клин 17. Втулочный нож 13 имеет упор 19, прикрепленный к плите 1, и размещает в себе заготовку 20. Между плитами 1 и 5 установлены пружины 21.

Установка работает следующим образом. Заготовка 20 устанавливается во втулочный нож 13 и ее консольный конец упирается в упор 19. Винтом 18 перемещается клин 17 и полувтулочный нож 15 упирается в заготовку 20, выбирая зазоры и упруго деформируя плиту 5, ползун 6, шарнир 7, клин 8, плиту 2, шпильки 3 и плиту 1 с ножом 13. Эти детали составляют силовую цепь установки. Подается давление в приводной цилиндр 11, шток 12 начинает смещать клин 8 в пазу плиты 2. За счет поворота шарнира 7 сила от клина 8 передается на шарнир 7, ползун 6, клин 17, плиту 5, нож 15, на консольный конец заготовки 20, который от нее отделяется по мере смещения клина 8. После разделения заготовки 20 шток 12 возвращает в исходное положение клин 8.

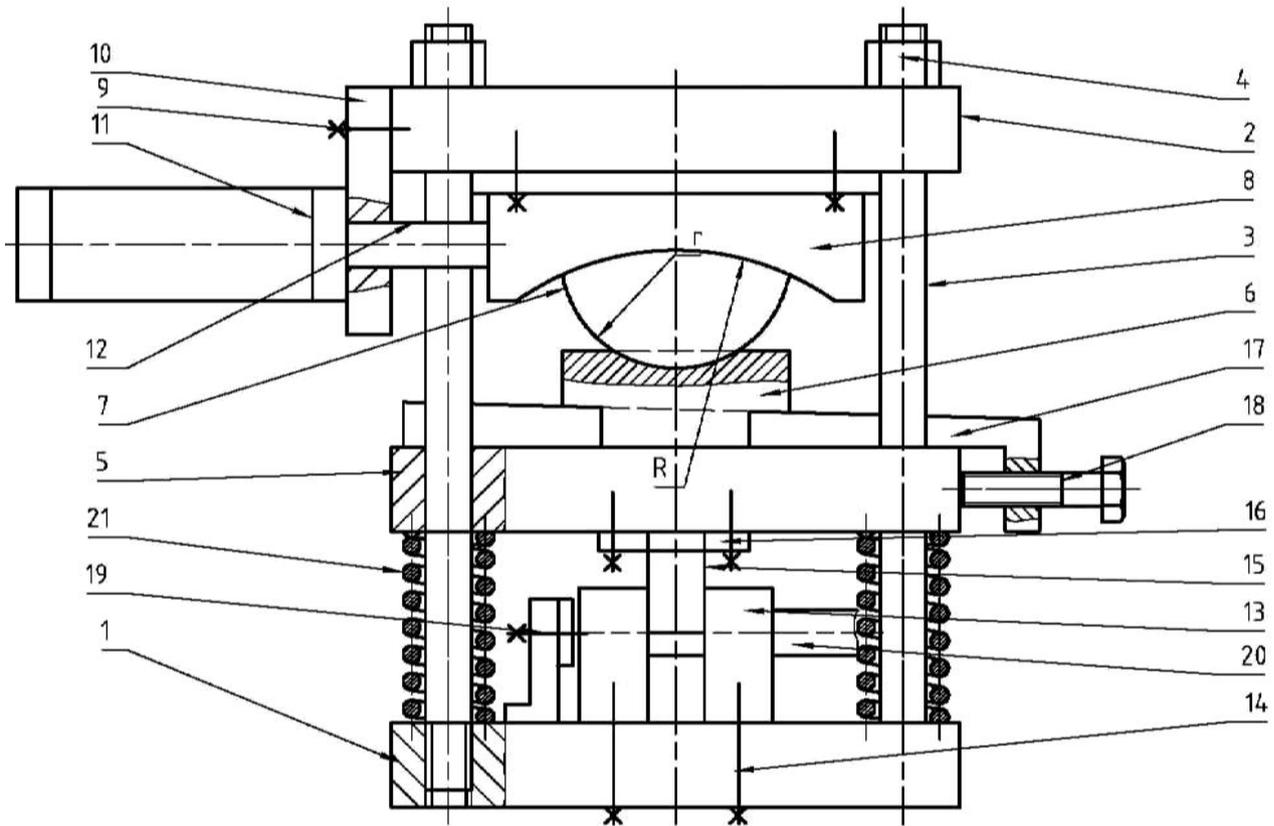


Рисунок 3.14 – Схема экспериментальной установки КИМ с ВК [98,86]



а)



б)



в)



г)

а – установка в сборе; б – шарнир и ползун; в – узел отрезки;

г – приводной клин в направляющих

Рисунок 3.15 – Фотографии экспериментальной установки КИМ с ВК [98,86]

Детали поз. 7,6,5,15 возвращаются в исходное положение пружинами 21. Клин 17 также смещается в исходное положение винтом 18. Установка готова к новому циклу.

Заменяя ножи 13 и 15 другим инструментом, можно на этой установке испытывать и другие процессы ОМД (осадку, прессование, вытяжку, высадку, сдвиговую отрезку листа и т.п.). Цилиндр 11 может быть заменен высокоскоростным гидроупругим цилиндром, что позволит предварительно разгонять шток 12, обеспечивая ударное смещение клина 8 и деформирование заготовки 20 с повышенной скоростью.

При проведении экспериментов зависимость между горизонтальным h_G и вертикальным h_B ходами определялась по соотношению (2.3). Радиус клина экспериментальной установки $R = 300\text{мм}$. Замеры горизонтального и вертикального ходов проводились с использованием штангенциркуля с ценой деления 0,01мм. Проведено 10 опытов, выводились средние арифметические значения, результаты замеров величин h_B в зависимости от величин h_G заносились в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерений величин h_G и h_B

h_G , мм	Расчетное значение h_B , мм	Измеренное значение h_B , мм
10	0,167	0,17
30	1,504	1,51
40	2,679	2,68
60	6,061	5,90
80	10,863	10,87
100	17,157	17,08
120	25,045	25,05

Такие же замеры были выполнены при установке в штамп прутков разного диаметра. Соотношение размеров h_G и h_B изменилось на величину упругой деформации основных деталей установки, которые участвуют в силовом нагружении. Так, например, при отрезке прутка диаметром 10мм из стали марки Ст3 величина хода клина составила $h_G = 70\text{мм}$, а величина блестящего пояска – в среднем 2,5 мм (на ос-

новании 10 опытов). Учитывая, что расчетная величина хода ножа $h_B = 8,3 \text{ мм}$, величина упругой деформации составит в среднем $8,3 - 2,5 = 5,8 \text{ мм}$. При этом не учитывалась контактная жесткость, возможные перекосы прутка, его деформация в опорах, кромочный эффект и т.п. Поэтому данный расчет носит оценочный характер.

Если принять установку абсолютно жесткой, то для реза $h_B = 2,5 \text{ мм}$, величина горизонтального хода составит:

$$h_r = \sqrt{R^2 - (R - h_B)^2} = \sqrt{300^2 - (300 - 2,5)^2} = 38,65 \text{ мм}.$$

Угол φ (2.4) для этого случая определится:

$$\varphi = \arcsin \frac{h_r}{R} = \arcsin \frac{38,65}{300} \cong 7,35^\circ.$$

Величина упругой деформации экспериментальной установки практически в два раза увеличивает горизонтальный ход вогнутого клина (70 мм и 38,65 мм) при работе по отрезке прутка $d = 10 \text{ мм}$, что увеличивает потери энергии на отрезку заготовок и динамические нагрузки на машину. Эти расчеты позволяют сделать вывод о том, что жесткость машин с КШМ для разделительных операций должна быть достаточно высокой, то есть деформация должна быть минимальной.

Как известно, упругая деформация машины (пресса, молота) зависит от силы, действующей в машине, ее длины вдоль линии действия силы, величины напряжений в деталях, воспринимающих силу, и модуля упругости материала деталей машины. Для разделительных машин величина силы определена ее назначением и ограничена стандартами. Напряжения в деталях машин принимают на основе сложившихся традиций и рекомендаций, и они не должны превышать допустимых значений. Модуль упругости материала деталей, воспринимающих силу (обычно это сталь) – величина постоянная ($E \cong 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$). Поэтому конструктор для уменьшения упругой деформации машины может оперировать только длиной деталей, составляющих силовую часть машины. Если сравнивать КШМ с вогнутым клином с другими механизмами привода машин ОМД, то он отличается наиболее короткой длиной таких деталей (см. рис. 3.14, 3.15). Поэтому можно сделать вывод о том, что с точки зрения упругой деформации, КШМ с вогнутым клином наиболее целесообразен для применения в машинах разделительных операций ОМД. Причем, наибо-

лее податливые узлы привода (кривошипно-ползунный механизм, гидроцилиндры, коленно-рычажный, винтовой механизмы) вынесены за пределы главной силовой оси машины.

Были проведены эксперименты по отрезке прутка $d = 10\text{мм}$, при которых упругую деформацию, перед началом движения вогнутого клина, выбирали перемещением клина 17 постоянной клиновидности (см. рис. 3.14, 3.15). Перемещение выполнялось винтом 18. Угол клина 17 составлял примерно 6° и смещать его приходилось на $80\dots 100\text{мм}$. Величина горизонтального хода h_r сократилась до $50\dots 60\text{мм}$. Таким образом, дополнительный клин повышает эффективность использования энергии примерно на $40\dots 50\%$, хотя для его привода также требуется энергия. Угол дополнительного клина целесообразно выбирать минимальным, примерно $3\dots 6^\circ$, что меньше угла, при котором происходит самоторможение (для стали без смазки около 7°).

3.3.2 Исследование силовых характеристик клиношарнирного механизма с вогнутым клином для операции отрезки сдвигом

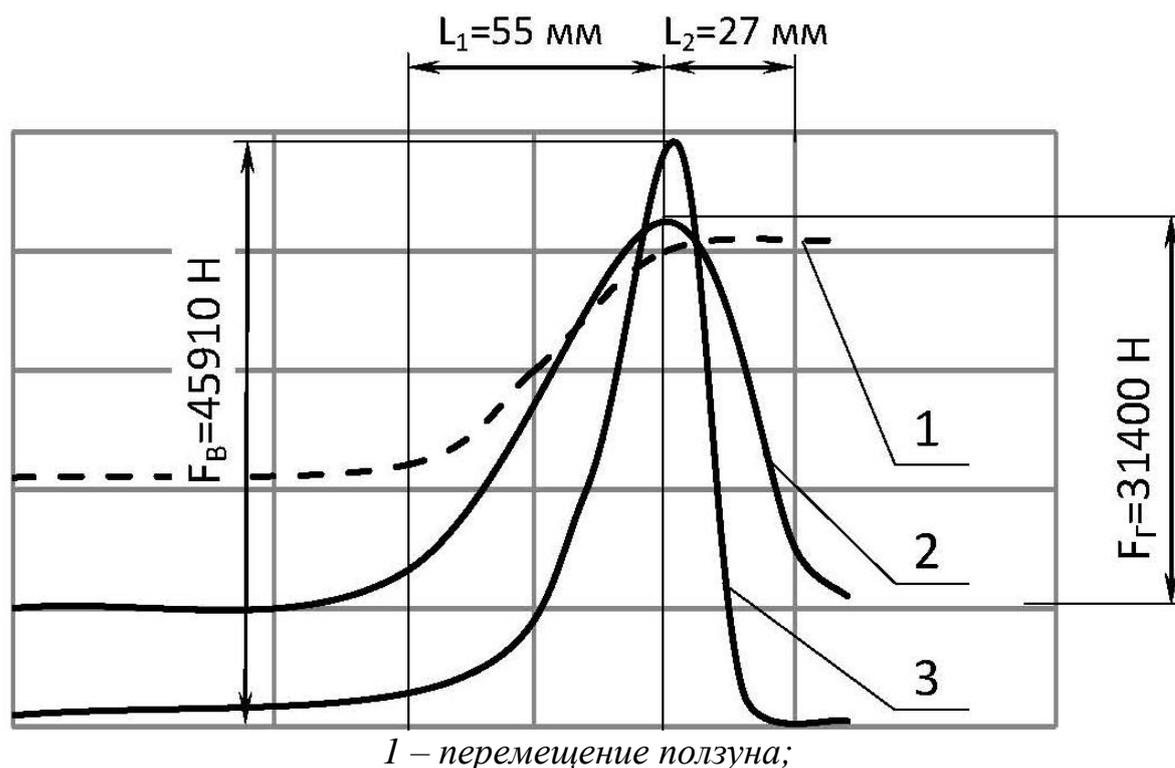
Проверке подвергались зависимости между приводной (горизонтальной) F_r и полезной (вертикальной) F_b силами с учетом сил трения, возникающих в контактирующих и передающих силы поверхностях. Связь между этими силами выражается зависимостью (2.26). Принято допущение, что коэффициенты трения на всех силовых поверхностях КШМ с вогнутым клином одинаковые. График изменения вертикальной силы (при постоянной F_r) от угла поворота шарнира показан на рис. 2.12.

Сила полезного сопротивления F_b создавалась отрезкой прутков диаметром $d = 10; 12; 16; 20\text{ мм}$ из стали марок Ст3, 45 (см. табл. 3.1). С целью минимизации таких факторов, как перекосы штампа, заготовки, ножей, отрезка проводилась по симметричной, двухсрезной схеме (см. рис. 3.14, 3.15).

Горизонтальная сила на экспериментальной установке (см. рис. 3.14) фиксировалась с помощью образцового манометра, установленного на подводе к поршневой полости цилиндра 11. Вертикальную силу измеряли с использованием метода тензометрирования с наклейкой датчиков на верхнем полувтулочном ноже 15. Ис-

пользовались фольговые тензорезисторы ФКТК 10 – 200 С – 1. База датчиков 10мм, сопротивление 200Ом. Датчики наклеивали по стандартной технологии [99]. Сигнал от датчиков усиливали прибором «Топаз–3–01» и подавали на шлейф осциллографа Н-115. Использовали гальванометры магнитоэлектрической системы типа МО14. На прибор «Топаз-3-01» напряжение подводилось от источника питания «Агат». Тарировку тензорезисторов для измерения силы проводили на испытательной машине МС-500. Перемещение рабочих органов фиксировалось реостатным ходографом. В качестве нагрузителей использовались прутки диаметром 10 мм и 12мм из стали марок Ст3, 45.

На рис. 3.16 показана типовая осциллограмма записи силы отрезки для прутков диаметром 10мм из стали Ст3.



- 1 – перемещение ползуна;
 2 – сила F_r , развиваемая цилиндром;
 3 – сила вертикальная F_b (сила отрезки)

Рисунок 3.16 – Типовая осциллограмма параметров отрезки прутка на экспериментальной установке КШМ с ВК

На осциллограмме видно, что ход горизонтального перемещения клина (L_1) происходит после выборки части упругой деформации с помощью клина, имеющего постоянный угол клиновидности. После начала движения клина с вогнутой поверхностью, процесс упругой деформации продолжается и идет совместно с процессом внедрения ножа в заготовку, происходит резкое повышение силы до максимальной величины отрезки, а затем резкий сброс силы (скол заготовки). Движение клина продолжается (L_2) за счет разгрузки установки от упругой деформации. Для прутка диаметром 10 мм из стали Ст3 $F_T = 31400 \text{ Н}$, $F_B = 45910 \text{ Н}$, $L_1 = 55 \text{ мм}$, $L_2 = 27 \text{ мм}$. Эксперимент в целом подтверждает теоретические зависимости между F_T и F_B . Важное влияние оказывают два фактора: упругая деформация силовой системы установки и трение на рабочих поверхностях, которое зависит, прежде всего, от смазки.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты экспериментов по определению вертикальной силы КШМ с ВК

№ опыта	Сила на клине $F_T, \text{Н}$	Сила отрезки $F_B, \text{Н}$ прутка $\varnothing 10 \text{ мм}$ из Ст3		Погрешность, %	$F_{BЭ}/F_T$
		теоретическая	экспериментальная		
1	31400	48946	45910	6,2	1,46
2	32610		46400	5,2	1,42
3	31350		43860	10,4	1,40
4	31450		44640	8,8	1,42
5	32500		43660	10,8	1,34
6	31800		41500	15,2	1,31
7	32100		43370	11,4	1,35
8	31680		42530	13,1	1,34
9	32450		45570	6,9	1,41
10	31910		41360	15,5	1,30

3.3.3 Экспериментальные исследования влияния видов смазки на соотношение сил в клиношарнирном механизме с вогнутым клином

На экспериментальной установке (см. рис. 3.14) исследовались различные виды смазки и их влияние на силовые параметры КШМ с ВК.

Исследовались следующие виды смазки, которая наносилась на поверхности

клина 8 и шарнира 7 (см. рис. 3.14), а также на направляющие плиты 5:

- без смазки;
- с жидкой смазкой (масло «Индустриальное 20»);
- смазка с дисульфидом молибдена MoS_2 (до 40% MoS_2 в масле);
- смазка в виде слоев полиэтиленовой пленки (рис. 3.17).

Исследования проводились при отрезке по двухсрезной схеме прутков диаметром 10 мм 12мм из стали Ст3.

Результаты испытаний видов смазки приведены в табл. 3.6. По результатам испытаний видов смазки можно сделать вывод, что жидкая смазка и смазка с MoS_2 дают близкие результаты, но наносить жидкую смазку значительно проще, чем смазку с MoS_2 . Наибольший эффект дает разделение поверхностей металла слоями полиэтиленовой пленки. Пленка сохраняет целостность после 10 опытов.

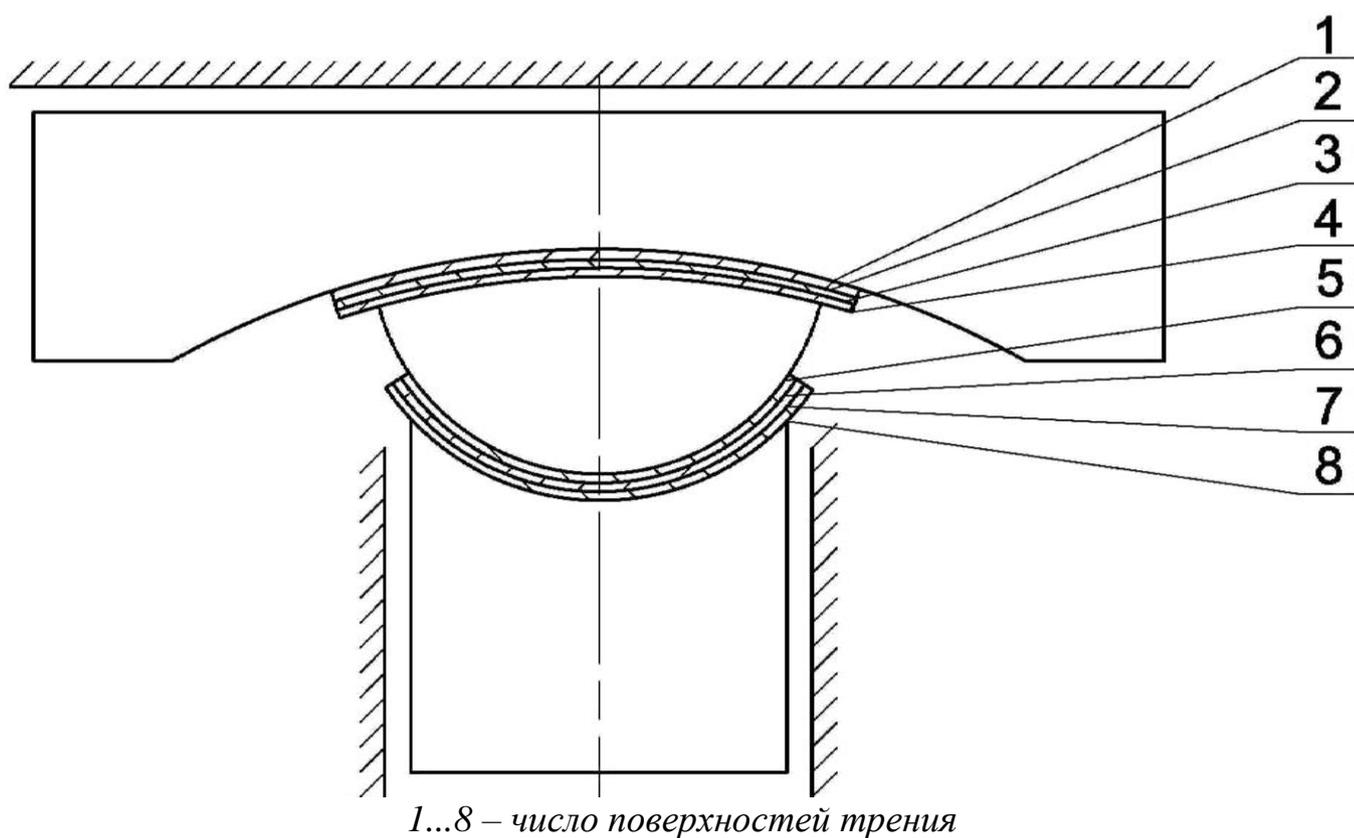


Рисунок 3.17 – Схема нанесения 3-х слоев полиэтиленовой пленки на криволинейные поверхности КШМ с ВК

Таблица 3.6 – Результаты испытаний видов смазки

№ п/п	Тип смазки	Давление в гидроцилиндре, МПа		Сила гидроцилиндра F_G , кН		Сила отрезки, F_B , кН		Отношение $\frac{F_B}{F_G}$	
		Ø10	Ø12	Ø10	Ø12	Ø10	Ø12	Ø10	Ø12
1	Без смазки	22,0	–	43,17	–	46,340	–	1,07	–
2	С жидкой смазкой	19,0	25,0	37,29	49,10	46,350	66,740	1,24	1,36
		15,0	24,0	31,40	47,10	46,345	66,735	1,66	1,42
		15,5	20,0	30,42	39,25	46,330	66,738	1,71	1,70
3	Смазка с MoS_2		20,0		39,2		66,741		1,91
		16,0	21,0	31,38	41,2	46,44	66,739	1,48	1,82
			22,0		43,2		66,737		1,73
4	С полиэтиленовой пленкой $\delta = 0,1$ мм по 3 слоя	12,0	–	23,55	–	46,343	–	1,96	–

Была проведена отрезка по двухсрезной схеме прутка диаметром 16 мм из стали Ст3, при этом давление в гидроцилиндре – 25 МПа; $F_G = 49,063$ кН; $F_B = 120$ кН; $F_B/F_G = 2,42$. Пленка при этом сохранила целостность, сдвига слоев пленки относительно друг друга не наблюдалось. Однако применение полиэтиленовой пленки в качестве смазывающего материала затруднено из-за условий ее подачи в зону трения и замены. Но в экспериментальных условиях она может применяться, особенно с нанесением ее между слоями жидкой густой смазки или MoS_2 .

3.4 Исследование влияния давления смазки, подаваемой на контактные поверхности клиношарнирного механизма с вогнутым клином, на величину коэффициента трения

Значительной проблемой является удержание смазки на опорных поверхностях шарнира, поскольку они имеют свободные периферийные поверхности. Ранее рассматривался вопрос удержания смазки (см. раздел 2.8). Установлено, что если

подавать достаточное количество смазки, то она сохраняет слой, разделяющий металлические поверхности, в случае, если время их нагружения ограничено (около 0,1 с). Для этого привод вогнутого клина в КШМ должен быть высокоскоростным (от гидроупругого цилиндра). При обычных же видах привода желательно уплотнить трущиеся силовые поверхности по периметру.

Рассматривались два возможных варианта размещения резинового кольца по периметру опорных поверхностей шарнира (рис. 3.18, 3.19).

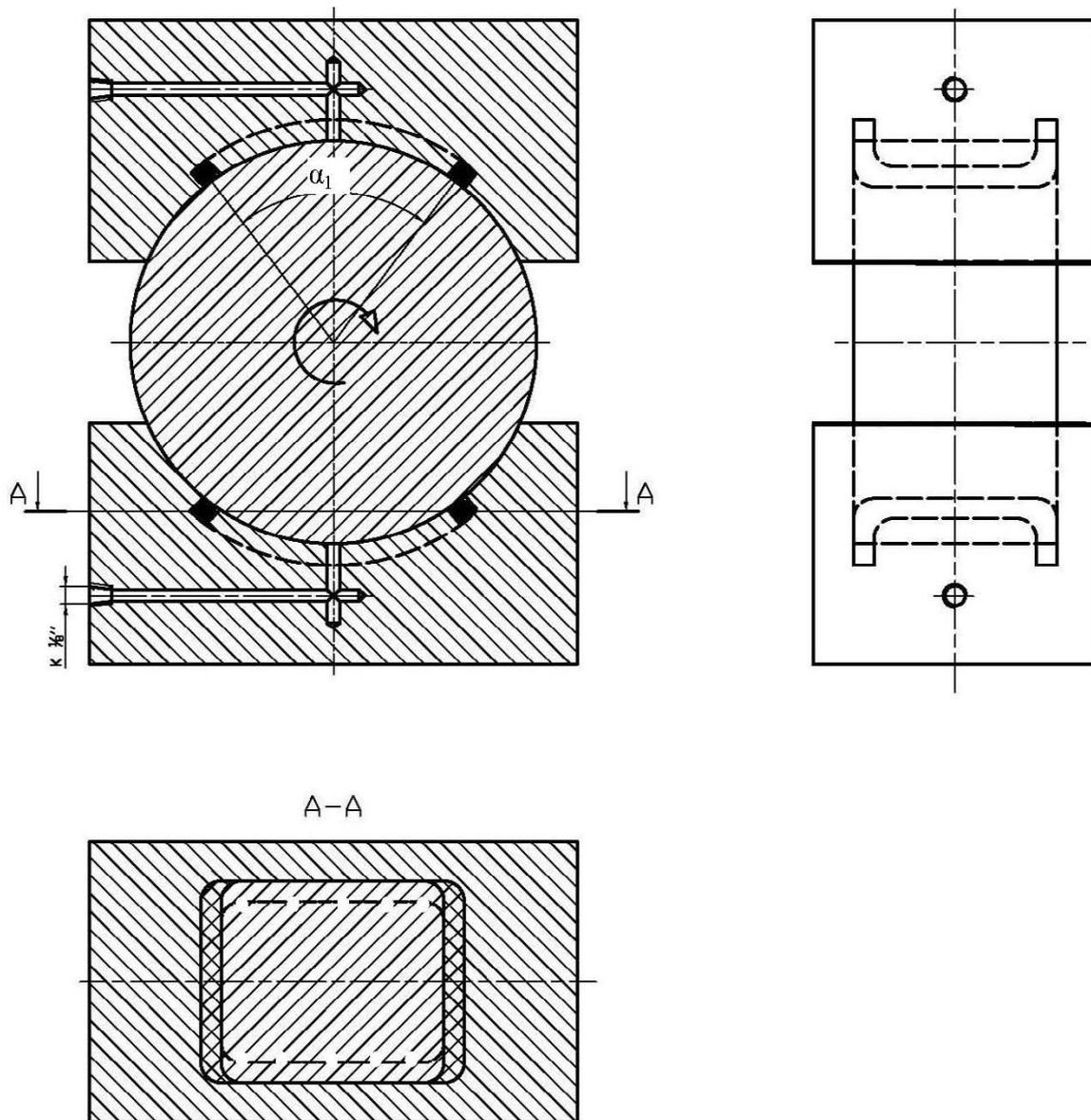


Рисунок 3.18 – Схема размещения уплотнения по опорным поверхностям шарнира КШМ с ВК [100]

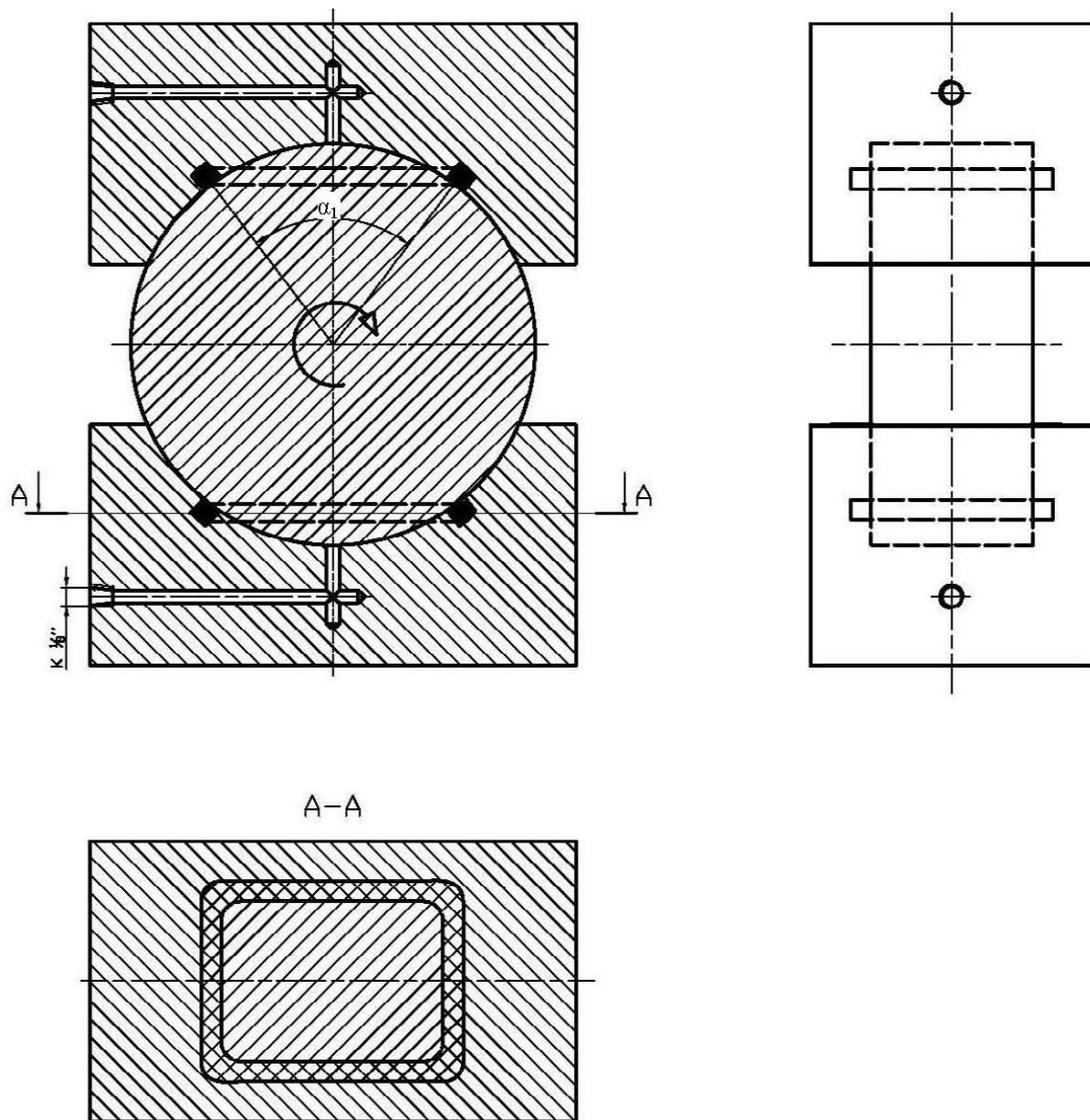


Рисунок 3.19 – Схема размещения уплотнения по опорным поверхностям шарнира КШМ с ВК

По варианту, изображенному на рис. 3.18, кольцо расположено в прямоугольной канавке по дуге шарнира. По варианту на рис. 3.19 – кольцо расположено в канавке, выполненной в горизонтальной плоскости опоры. Изготовление канавок по двум вариантам представляет определенные сложности (фрезерование пальцевой фрезой на фрезерном станке с ЧПУ или с копиром).

Выбор был сделан в пользу варианта, представленного на рис. 3.18, как более технологичного. Площадь опорной поверхности (проекция) составила 1000 мм^2 ,

длина периметра фигуры кольца равна длине периметра круглого кольца диаметром $3,6 \text{ мм}$. Было выбрано *Кольцо 046-052-36 ГОСТ 9833-73* [101] и под него выполнена соответствующая канавка.

Исследования проводились на установке, конструктивная схема и общий вид которой приведены на рис. 3.20, 3.21, по методике [102].

Установка состоит из цилиндрического шарнира 1 и рычага 2 с грузом 3. Рычаг 2 закреплен на оси шарнира диаметром $d_{ш}$. Шарнир размещен на цилиндрических опорах 4 и 5, в которых выполнены прямоугольные в сечении канавки с уплотнениями 6, 7 и каналы подвода смазки 8, 9, соединенные трубами 10 с ручным насосом 11. Трубы снабжены манометром 12. Под опорой 5 установлен поддон 13 для сбора утечек. Над опорой 4 установлен силоизмеритель 14 с индикатором 15. Вся установка смонтирована на столе испытательной машины ИМ-50. По индикатору 15 устанавливалась вертикальная сила F_B , грузом 3 и рычагом 2 на шарнир воздействовал крутящий момент $T_1 = G \cdot l_1$, который был равен моменту трения $T_{mp} = F_{mp} \cdot d_{ш}$. При превышении $T_1 \geq T_{mp}$, рычаг 2 повернет шарнир 1.

Индикатор 15 позволял также определить изменение толщины слоя смазки в поверхностях опор 4 и 5 под действием вертикальной силы F_B и давления смазки.

Выполнялось по 5 испытаний на каждом уровне вертикальной силы F_B , соответственно: 5, 10, 15 и 20 кН. Смазка подавалась от ручного насоса давлением: 8, 16 и 20 МПа.

Фиксировалось начало поворота шарнира 1 и связанного с ним рычага 2 длиной $0,3 \text{ м}$ (min) и $0,6 \text{ м}$ (max) с грузом $G = 10 \text{ кг}$ или $F_M = 100 \text{ Н}$. Утечки собирались в поддон 13, давление смазки фиксировалось манометром 12. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.7.

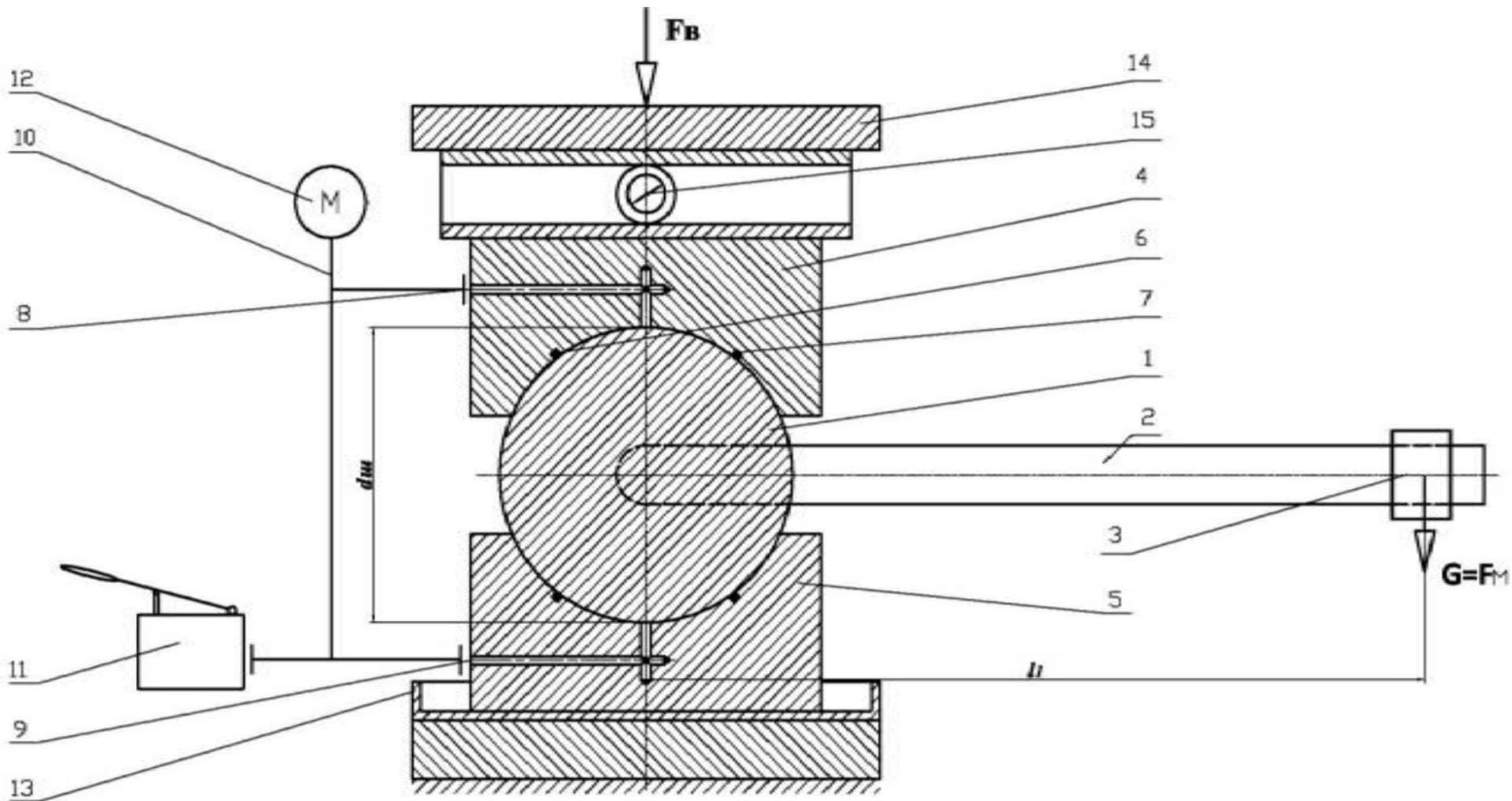


Рисунок 3.20 – Конструктивная схема экспериментальной установки для исследования влияния величины давления на контактных поверхностях КШМ с ВК на коэффициент трения

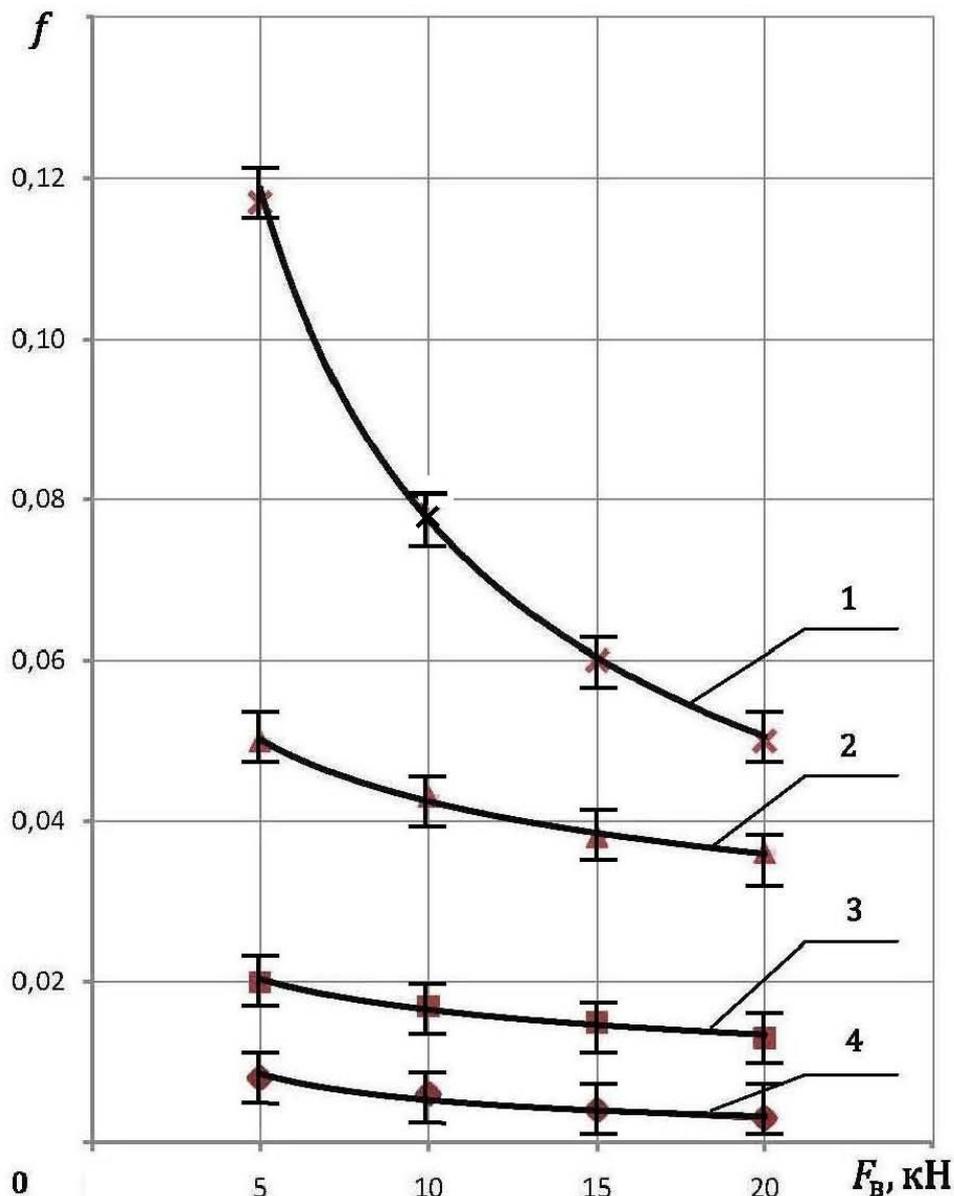


Рисунок 3.21 – Общий вид экспериментальной установки для исследования влияния величины давления на контактных поверхностях КШМ с ВК на коэффициент трения

Таблица 3.7 – Коэффициенты трения в шарнире при различных значениях вертикальной силы и давления смазки

Давление смазки $p_{см}$, МПа	F_B , кН	$F_{тр}$, Н	f
Без смазки	5	550	0,11
	10	800	0,08
	15	900	0,06
	20	1000	0,05
8	5	240	0,048
	10	440	0,044
	15	600	0,040
	20	720	0,036
16	5	100	0,020
	10	180	0,018
	15	225	0,015
	20	200	0,010
20	5	40	0,008
	10	60	0,006
	15	60	0,004
	20	60	0,003

Зависимость коэффициента трения от величины вертикальной силы и давления смазки приведена на рис. 3.22.



1 – без смазки; 2 – $p_{см} = 8 \text{ МПа}$; 3 – $p_{см} = 16 \text{ МПа}$; 4 – $p_{см} = 20 \text{ МПа}$

Рисунок 3.22 – Зависимость коэффициента трения от величины вертикальной силы и давления смазки

Анализ графиков показывает, что:

- с ростом давления смазки, подаваемой на контактные поверхности, интенсивность снижения коэффициента трения, при увеличении величины вертикальной силы, уменьшается;
- коэффициент трения в шарнирах без подачи смазки при увеличении нормальной силы в 4 раза – уменьшается в 2 раза, а при увеличении давления смазки – уменьшается до 10 раз.

РАЗДЕЛ 4

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ПРЕССОВ С КЛИНОШАРНИРНЫМ МЕХАНИЗМОМ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ

4.1 Новые конструкции машин с клиношарнирным механизмом для разделительных операций

Анализ разработанных схем клиношарнирных механизмов позволяет систематизировать их конструкции (рис. 4.1) [73] и предложить новые схемы клиношарнирных механизмов (рис. 4.2–4.4) [73,68].

На схемах показана силовая рама 1 со штампом 2, куда введен прокат 3, подвижный нож 4 закреплен в ползуне 5 с шарниром 6, контактирующим с рабочим клином 7 вогнутой поверхностью (рис. 4.2,а), выпуклой поверхностью (рис. 4.2,б; 4.2,в; 4.3,а; 4.3,б) и прямолинейной поверхностью (рис. 4.4,а и 4.4,б).

Устройство снабжается вспомогательным клином 8 (см. рис. 4.2,а; 4.2,б; 4.2,в; 4.3,а; 4.3,б), привод вспомогательного и рабочего клина выполняется либо гидроцилиндрами 9 и 10, либо кривошипным механизмом (на схемах не показан). Рабочий клин 7 с прямолинейной поверхностью (см. рис. 4.4,а и 4.4,б) может изменять угол клина гидроцилиндром 11 (см. рис. 4.4,б) и гидроцилиндром 12 с коленно-рычажным механизмом 13 (см. рис. 4.4,а).

На некоторых схемах показаны удерживающие упругие элементы 14 (см. рис. 4.2,б) и гидроцилиндры 15 (см. рис. 4.3,а; 4.3,б), снабженные аппаратурой управления 16 и 17, которая обеспечивает торможение рабочего клина 7 при движении вспомогательного клина 8 и определенное соотношение сил.

Из всех представленных конструктивных схем наиболее целесообразна схема (см. рис. 4.2,в), в которой гидроцилиндры неподвижны и разнесены. Отличие этой схемы от других состоит в том, что прокат на ходе приближения, выборки зазоров и упругой деформации будет двигаться вместе со штампом 2, однако величина этого хода составляет 0,06...0,13 диаметра проката, что вполне допустимо (применяется, например, подпружиненный подающий рольганг).

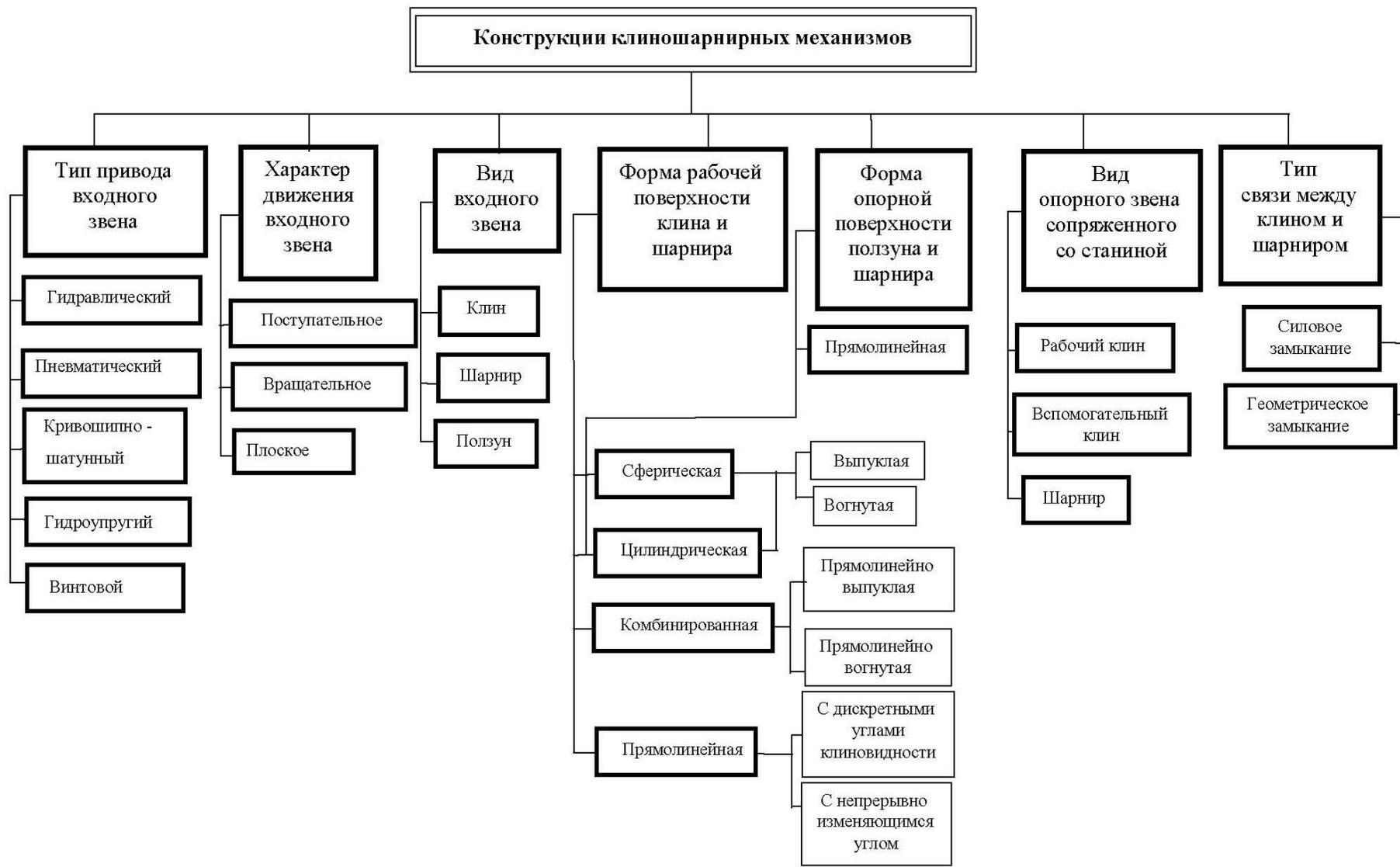


Рисунок 4.1 – Классификация конструкций клиношарнирных механизмов [73]

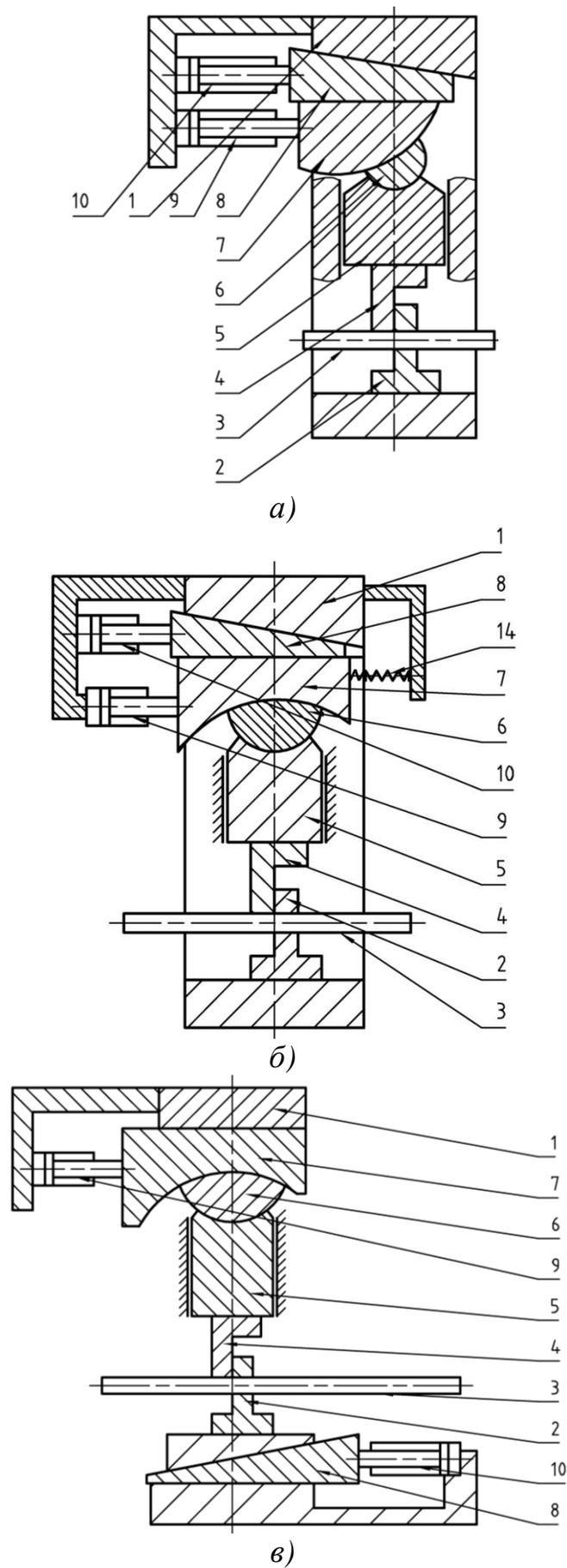


Рисунок 4.2 – Конструктивные схемы оборудования и оснастки с КШМ [68]

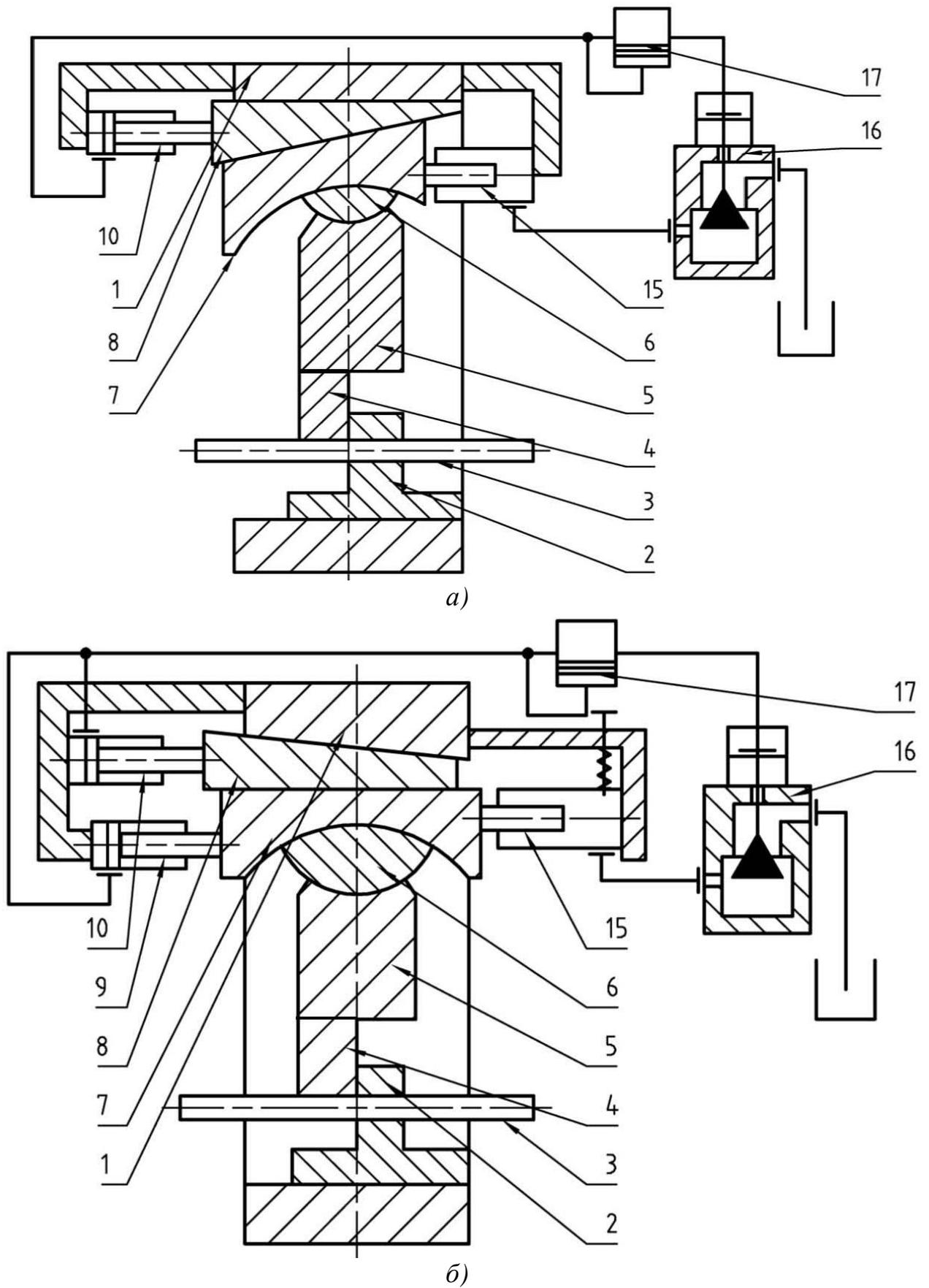
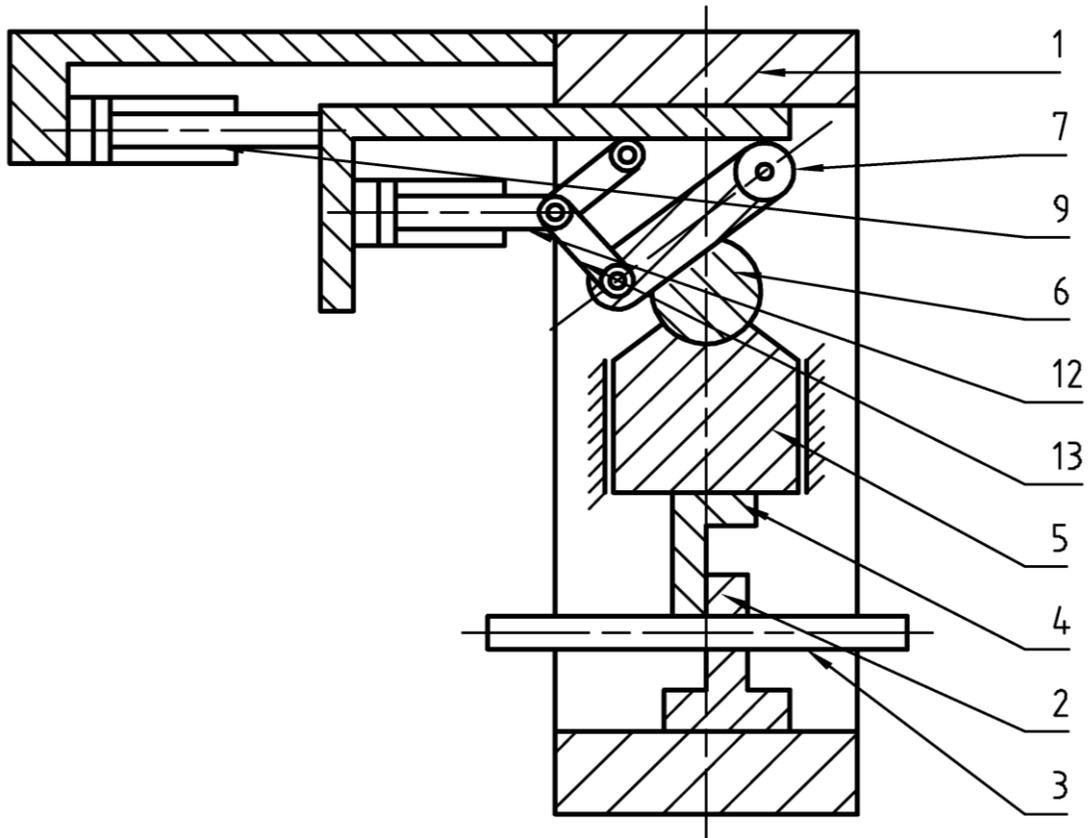
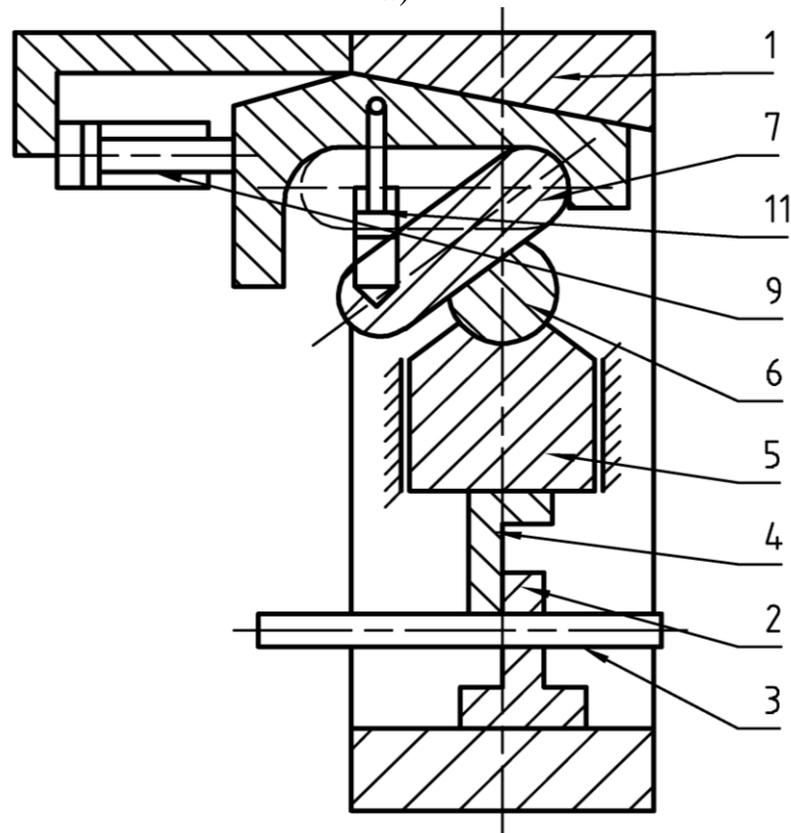


Рисунок 4.3 – Конструктивные схемы оборудования и оснастки с КШМ [68]



a)



б)

Рисунок 4.4 – Конструктивные схемы оборудования и оснастки с КШМ [68]

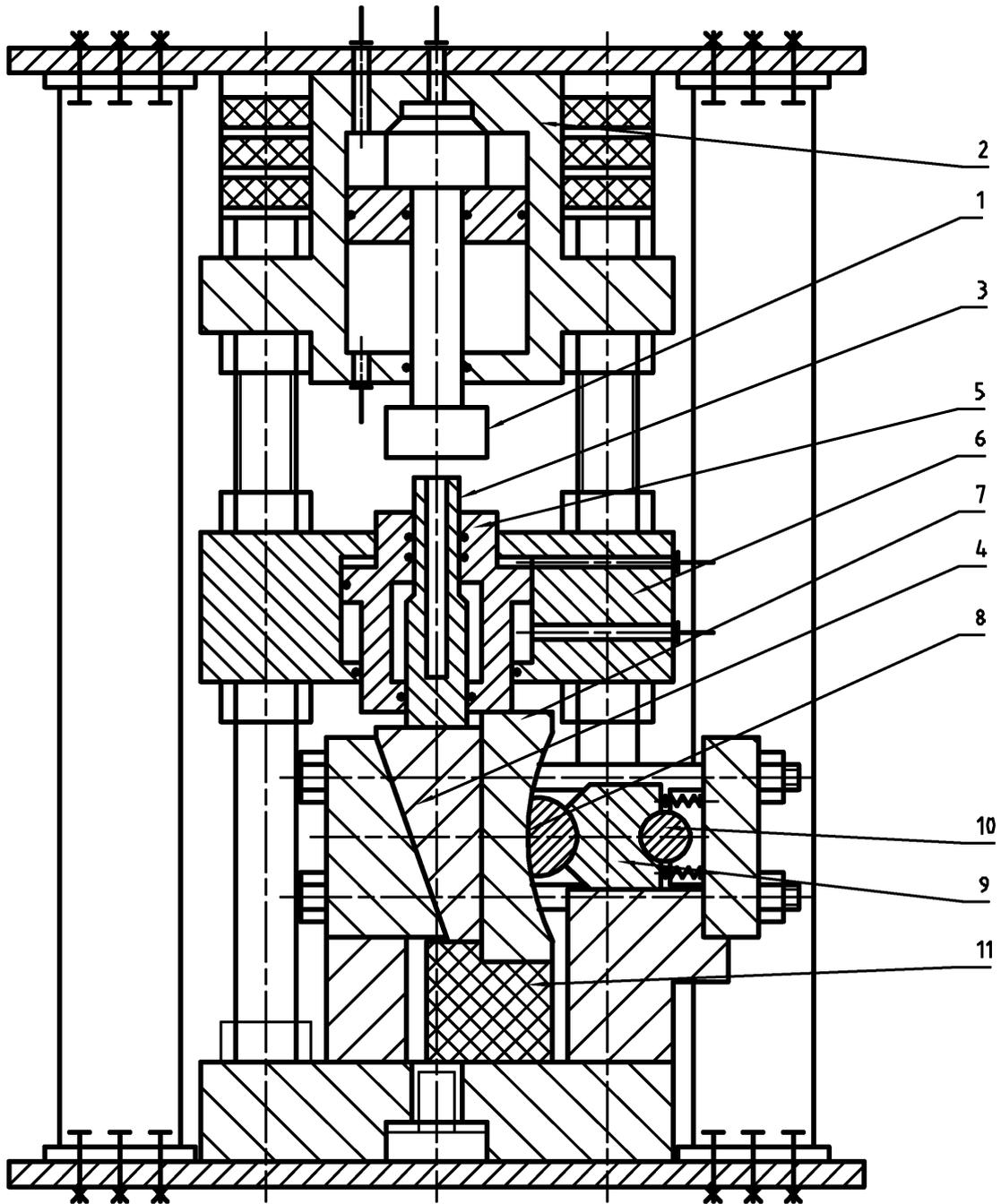
Рассмотренные схемы машин для разделения проката имеют механический (клиношарнирный) привод ползуна, на котором закреплен инструмент. Привод рабочего клина выполнен с помощью гидроцилиндров. Может быть применен также кривошипно-шатунный, коленно-рычажный, винтовой и др. механизмы, а также высокоскоростной гидроупругий привод, что позволит повысить скорость инструмента в процессе разделения заготовки, обеспечивая более высокое качество поверхности среза[11].

Для повышения качества разделяемых заготовок, как было показано в разделе 1, целесообразно отрезку сдвигом проводить при повышенных скоростях деформирования. С этой целью предложена конструкция установки для разделения сортового проката с КШМ с ВК с гидроупругим приводом (рис. 4.5).

Установка работает следующим образом. Шток 1 гидроупругого цилиндра 2 установки, разгоняясь под действием энергии упругой деформации жидкости, ударяет по промежуточному пуансону 3, который, в свою очередь, перемещает клин 4. А плунжер 5 гидроцилиндра 6, под действием давления жидкости перемещает вогнутый клин 7. При этом клин 4 предварительно выбирает зазоры в механической системе «вогнутый клин – шарнир – ползун – заготовка», а вогнутый клин 7, взаимодействуя с шарниром 8, перемещает отрезной нож 9, осуществляя отрезку заготовки 10. Для возврата системы в исходное положение служит буфер 11.

4.2 Самонастраивающиеся клиновые системы в механических прессах

Анализ существующих конструкций клиношарнирных механизмов показал, что его кинематические и энергосиловые параметры в большой степени зависят от угла наклона направления перемещения клина к горизонтали [13]. Если принять, что коэффициенты трения в шарнирах, направляющих ползуна и клина равны между собой, а также, что весом и силами инерции звеньев можно пренебречь, то зависимость между горизонтальной силой на клине F_r и силой на ползуне F_b примет вид:



*Рисунок 4.5 – Установка для разделения сортового проката с КШМ с ВК
с гидроупругим приводом*

$$F_B = F_T \frac{\cos(\alpha - \theta + \rho + \psi)}{\cos\theta \sin(\alpha + \rho + \psi)}, \quad (4.1)$$

где α – угол, определяющий положение клина и ползуна;

θ – угол между направлением перемещения клина и горизонталью;

$\rho = \arctg f$ – угол трения в направляющих ползуна и клина;

$\psi = \arctg(f(R+r)/R)$ – суммарный угол трения в цилиндрических поверхностях клина и шарнира;

f – коэффициент трения в кинематических парах;

R – радиус цилиндрической поверхности клин-шарнир;

r – радиус цилиндрической поверхности шарнир-ползун.

На основании приведенной зависимости построены графики изменения силы на ползуне, отнесенной к силе на клине, в функции перемещения ползуна h_B (рис. 4.6).

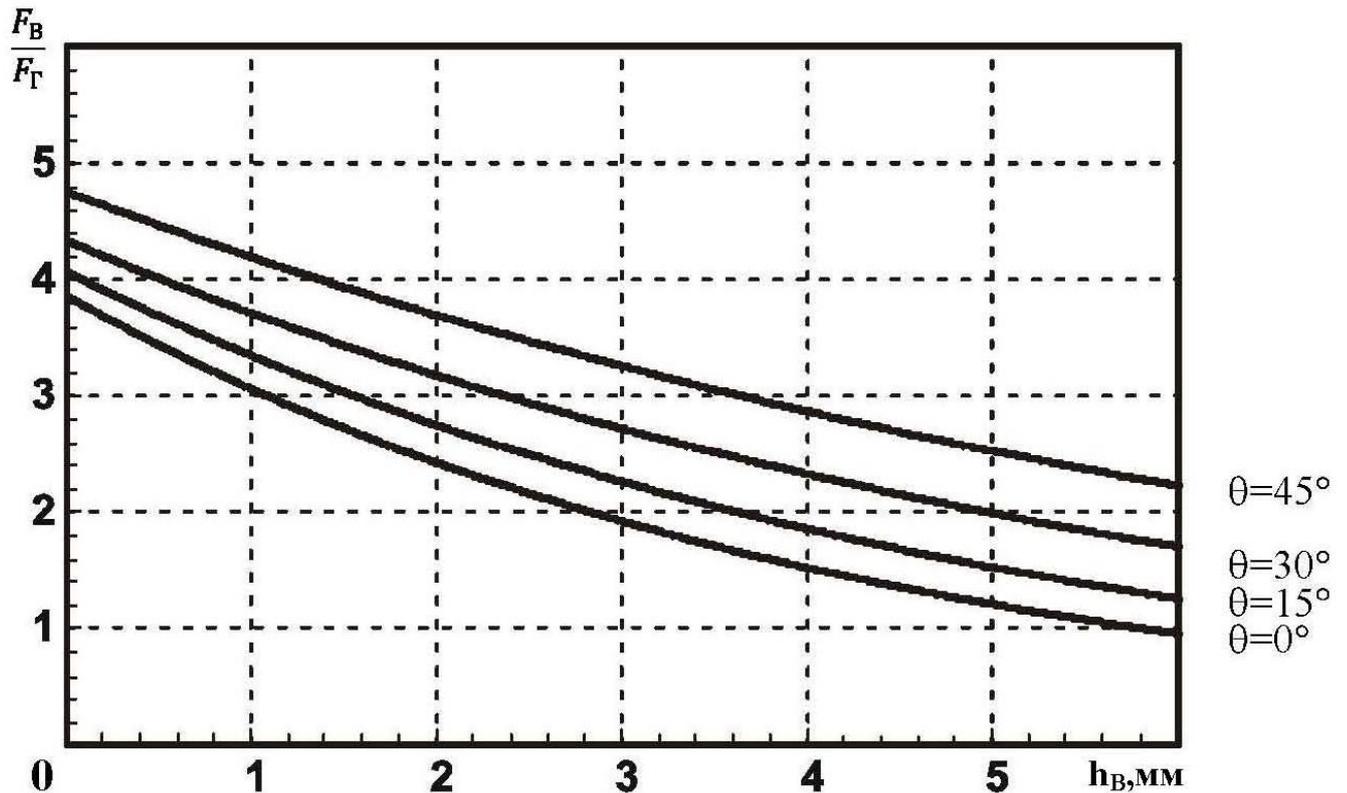


Рисунок 4.6 – График изменения отношения сил F_B/F_T в зависимости от перемещения ползуна h_B [103]

Для связи угла α с ходом ползуна h_B использовалось выражение:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{h_B}{R} \cos\theta\right). \quad (4.2)$$

Расчеты велись для клиношарнирного механизма со следующими геометрическими параметрами: $R = 80 \text{ мм}$; $r = 20 \text{ мм}$. Коэффициент трения принят $f = 0,1$, согласно рекомендациям [82]. Проанализируем результаты построения графика, изображенного на рис. 4.6 [103]. Как видно из рисунка, соотношение сил существенно зависит от угла θ при одинаковом h_B . Причем с удалением ползуна от крайнего нижнего положения влияние угла θ на соотношение сил всё более возрастает. Так, при изменении угла θ от 0° до 45° , в крайнем нижнем положении ползуна ($h_B = 0$) отношение F_B/F_T увеличивается на 1, а при $h_B = 6 \text{ мм}$ – на 1,21.

Кроме того, с увеличением угла θ растет интенсивность изменения F_B/F_T . Так, при увеличении θ от 0° до 15° , соотношение сил увеличивается в среднем на 0,28; от 15° до 30° – на 0,37; от 30° до 45° – на 0,47. Следовательно, изменяя в клиношарнирном механизме углы α и θ , можно добиться различного характера изменения соотношения исполнительной и приводной сил, что позволит для различных операций ОМД подобрать конструкцию и режим работы клиношарнирного механизма наиболее соответствующие графикам технологических сил.

В связи с этим и с целью дальнейшего усовершенствования клиношарнирного механизма предложена конструкция пресса с клиношарниром «подстраиваемым» под силу сопротивления заготовки (рис. 4.7). Принцип работы такого пресса следующий. С помощью гидроцилиндра 1 приводится в движение клин 2 при неподвижной направляющей 3, которая удерживается гидроцилиндром 4. Движение от клина 2 через шарнир 5 передается на ползун 6, который совершает рабочий ход, воздействуя на заготовку. В процессе движения происходит уменьшение угла α , и при постоянной приводной силе на клине F_T это ведет к увеличению силы на ползуне F_B .

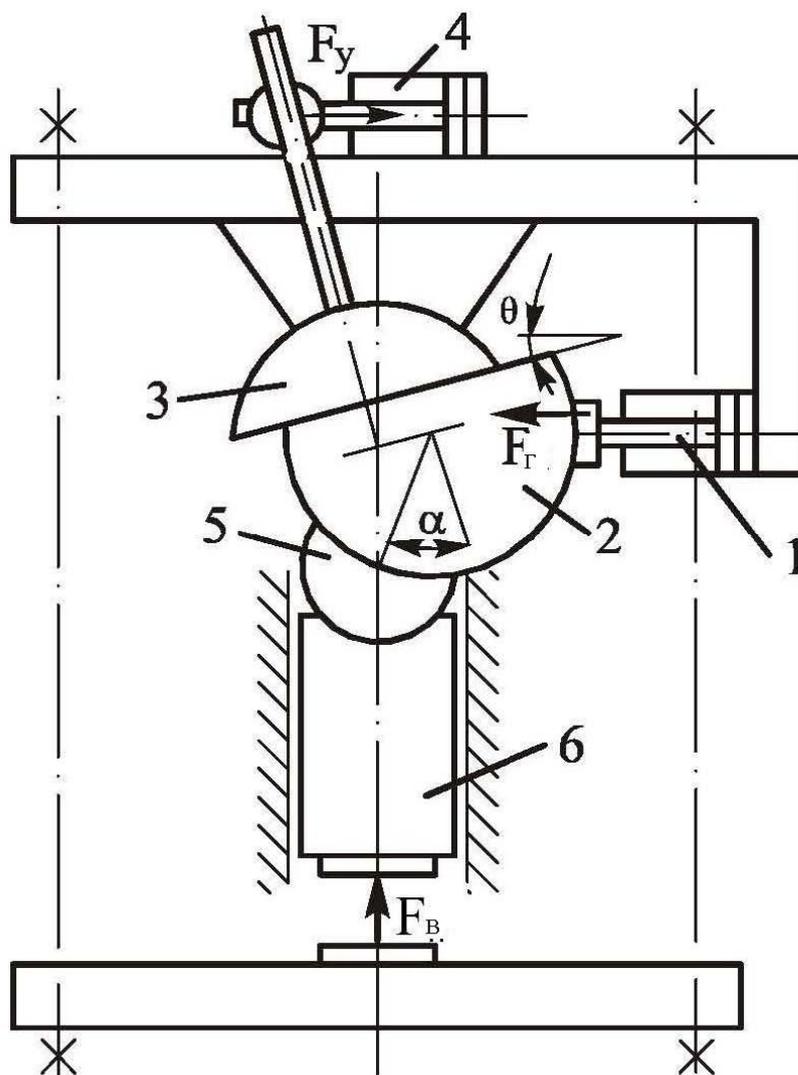


Рисунок 4.7 – Принципиальная схема прессы с самоустанавливающимся КШМ [103]

По мере возрастания сил сопротивления деформированию F_B , увеличивается их составляющая F_y , действующая на цилиндр 4, шток которого вдвигается в цилиндр и поворачивает шарнир 3, уменьшая угол θ , что позволит преодолеть возрастающую силу F_T , вплоть до установки $\theta = 0^\circ$. Сила F_T от цилиндра 1 будет изменять угол α , также в пределах доводя его до 0. Эти два процесса могут происходить одновременно, но итог будет суммарным: углы θ и α становятся равными нулю при нижнем фиксированном положении ползуна 6. При этом сила F_B максимальна и ограничена углами трения в шарнирах.

Цилиндр 4 может быть выполнен как пассивным (автоматически сбрасывает жидкость на слив при превышении силы F_y), при этом система самонастраивается

на преодоление силы F_B , так и активным (своим движением изменяет угол θ в требуемом направлении). В последнем случае можно менять силу F_r по ходу h_B ползуна, что возможно только на гидравлических прессах. Разработанные самонастраивающиеся клиновые системы в механических прессах позволяют расширить их технологические возможности за счет изменения углов клиньев по ходу ползуна в зависимости от преодолеваемой силы деформирования. Значительную роль приобретают силы трения в клиновых шарнирах, которые нужно снизить до минимума, например, подачей в зону трения масла под давлением большим, чем давление между трущимися парами.

4.3 Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием методики синтеза комбинированных методов обработки

Одним из направлений дальнейшего развития существующих и создания новых способов обработки материалов является объединение одного или нескольких методов обработки в рамках единого пространственно-временного воздействия на объект с целью получения его заданных свойств [104,105]. Это инициировало разработку целой группы комбинированных методов обработки, внедрение которых позволило не только повысить эффективность существующих технологий, но и решить ряд новых технологических задач [106–109]. Анализируя известные работы по комбинированным методам обработки, можно выделить два направления развития этой области технологических знаний. Первое из них основывается на сочетании различных физических и химических процессов из некоторого базового набора равнозначных единичных процессов, с последующей оценкой полученного комбинированного воздействия [110,111]. Второе направление предполагает привлечение различных процессов для интенсификации некоторого выбранного основного метода обработки [112,113].

Промышленное применение комбинированных методов сдерживается практическим отсутствием технологического оборудования. Можно выделить два ос-

новых пути при анализе возможности разработки такого оборудования. Первый из них связан с модернизацией существующего оборудования, а второй с разработкой специального оборудования. Опыт показывает, что модернизация позволяет быстрее и с меньшими затратами внедрить комбинированные технологии, но при этом не всегда удастся в полной мере реализовать их достоинства и преимущества.

Рассмотрим подробнее задачу синтеза комбинированных новых способов разделения сортового проката и оборудования с использованием средств комбинаторики. В соответствии с определением метода обработки, приведенным в [104], структура комбинированного метода обработки (КМО) представляется в виде

$$KMO = \langle P, C, O \rangle, \quad (4.3)$$

где P – множество элементов – процессов физической, химической или иной природы; C – множество свойств этих процессов; O – множество отношений между ними.

Следовательно, каждому комбинированному методу обработки ставится в соответствие некоторый набор единичных идентифицируемых процессов, протекание каждого из которых сопровождается заданным воздействием на объект обработки в результате реализации некоторого физико – химико – технического эффекта

$$KMO \Leftrightarrow \langle P_1, P_2, \dots, P_n \rangle, n \in N. \quad (4.4)$$

Если мощность множества P известна и равна N , то общее количество возможных комбинаций по $2, 3, \dots, N$ парциальных процессов подсчитывается как сумма соответствующих сочетаний элементов данного множества [114]. Далеко не все элементы сформированного таким образом множества возможных КМО могут быть практически реализованы или использованы.

В соответствии с методикой синтеза комбинированных методов обработки, изложенной в работе [104], в табл. 4.1 представлены основные признаки и варианты реализации безотходных способов разделения сортового проката [115].

На основе анализа табл. 4.1 предложена конструкция устройства для реализации схемы отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах (рис. 4.8, 4.9) [116, 117].

Таблица 4.1 – Признаки и варианты реализации безотходных способов
разделения сортового проката [115]

Признак	Варианты реализации	Комбинации
Базовый набор единичных про- цессов	нанесение КН	нанесение концентратора напряжений; разделе- ние сортового проката на мерные заготовки; стабилизация траектории трещины
	разделение	
	стабилизация траектории трещины	
Воздействия	механические	механические – термические – электромагнит- ные; механические – термические – химические; механические – электромагнитные – химиче- ские; термические – электромагнитные – хими- ческие
	термические	
	электромагнитные	
	химические	
Способ подвода	параллельный	параллельный; последовательный
	последовательный	
Вид деформации	растяжение	растяжение – сжатие – изгиб; растяжение – сжа- тие – сдвиг; растяжение – сжатие – кручение; растяжение – сжатие – гидростатическое обжа- тие; растяжение – сжатие – гидродинамическое обжатие; растяжение – изгиб – сдвиг; растяже- ние – изгиб – кручение; растяжение – изгиб – гидростатическое обжатие; растяжение – изгиб – гидродинамическое обжатие; растяжение – сдвиг – кручение; растяжение – сдвиг – гидро- статическое обжатие; растяжение – сдвиг – гид- родинамическое обжатие; растяжение – круче- ние – гидростатическое обжатие; растяжение – кручение – гидродинамическое обжатие; сжатие – изгиб – сдвиг; сжатие – изгиб – кручение; сжа- тие – изгиб – гидростатическое обжатие; сжатие – изгиб – гидродинамическое обжатие; сжатие – сдвиг – кручение; сжатие – сдвиг – гидростати- ческое обжатие; сжатие – сдвиг – гидродинами- ческое обжатие – гидродинамическое обжатие; изгиб – сдвиг – кручение; изгиб – сдвиг – гидро- статическое обжатие; изгиб – сдвиг – гидроди- намическое обжатие; изгиб – кручение – гидро- статическое обжатие; изгиб – кручение – гидро- динамическое обжатие – гидродинамическое обжатие; сдвиг – кручение – гидростатическое обжатие; сдвиг – кручение – гидродинамическое обжатие; сдвиг – гидростатическое обжатие – гидродина- мическое обжатие; кручение – гидростатическое обжатие – гидродинамическое обжатие
	сжатие	
	изгиб	
	сдвиг	
	кручение	
	гидростатическое обжа- тие	
	гидродинамическое об- жатие	

Продолжение таблицы 4.1

Признак	Варианты реализации	Комбинации
Вид нагружения	статическое	статическое – динамическое (ударное); статическое – импульсное; статическое – циклическое; динамическое (ударное) – импульсное; динамическое (ударное) – циклическое; импульсное – циклическое
	динамическое (ударное)	
	импульсное	
	циклическое	
Способ и интенсивность передачи силы от инструмента к заготовке	механический контакт	механический контакт; через промежуточную среду; бесконтактный
	через промежуточную среду	
	бесконтактный	
Степень ограничения течения металла	с пассивным поперечным зажимом	с пассивным поперечным зажимом; с активным поперечным зажимом; с продольным сжатием; всестороннее сжатие
	с активным поперечным зажимом	
	с продольным сжатием	
	всестороннее сжатие	
По числу одновременно разделяемых заготовок	одна	одна; две; множественное разделение
	две	
	множественное разделение	

Устройство состоит из корпуса, содержащего плиты: верхнюю 2, нижнюю 3, переднюю 4, заднюю 5, поперечную левую 6 и поперечную правую 7, скрепленные с помощью болтов и штифтов. Приводом устройства служит клиношарнирный механизм, состоящий из клина 1 с вогнутым профилем, установленного с возможностью возвратно-поступательного движения, шарнира 8, который, с одной стороны, контактирует по криволинейной поверхности радиуса R с клином 1, а с другой стороны – по криволинейной поверхности радиуса r с ползуном 9, который установлен с возможностью возвратно-поступательного движения. Шарнир 8 установлен с возможностью качательного движения в ползуне 9 относительно оси штифта. В ползуне выполнено отверстие прямоугольной формы, в котором размещается камень 10 с возможностью возвратно-поступательного движения. В отверстии камня 10 и подшипниках скольжения 19 плит передней 4 и задней 5 установлены ножи втулочные 18, выполненные цельными в виде двух эксцентричных цилиндров, оси вращения которых смещены друг относительно друга на величину эксцентриситета e и которые имеют возможность вращательного движения в противоположные стороны.

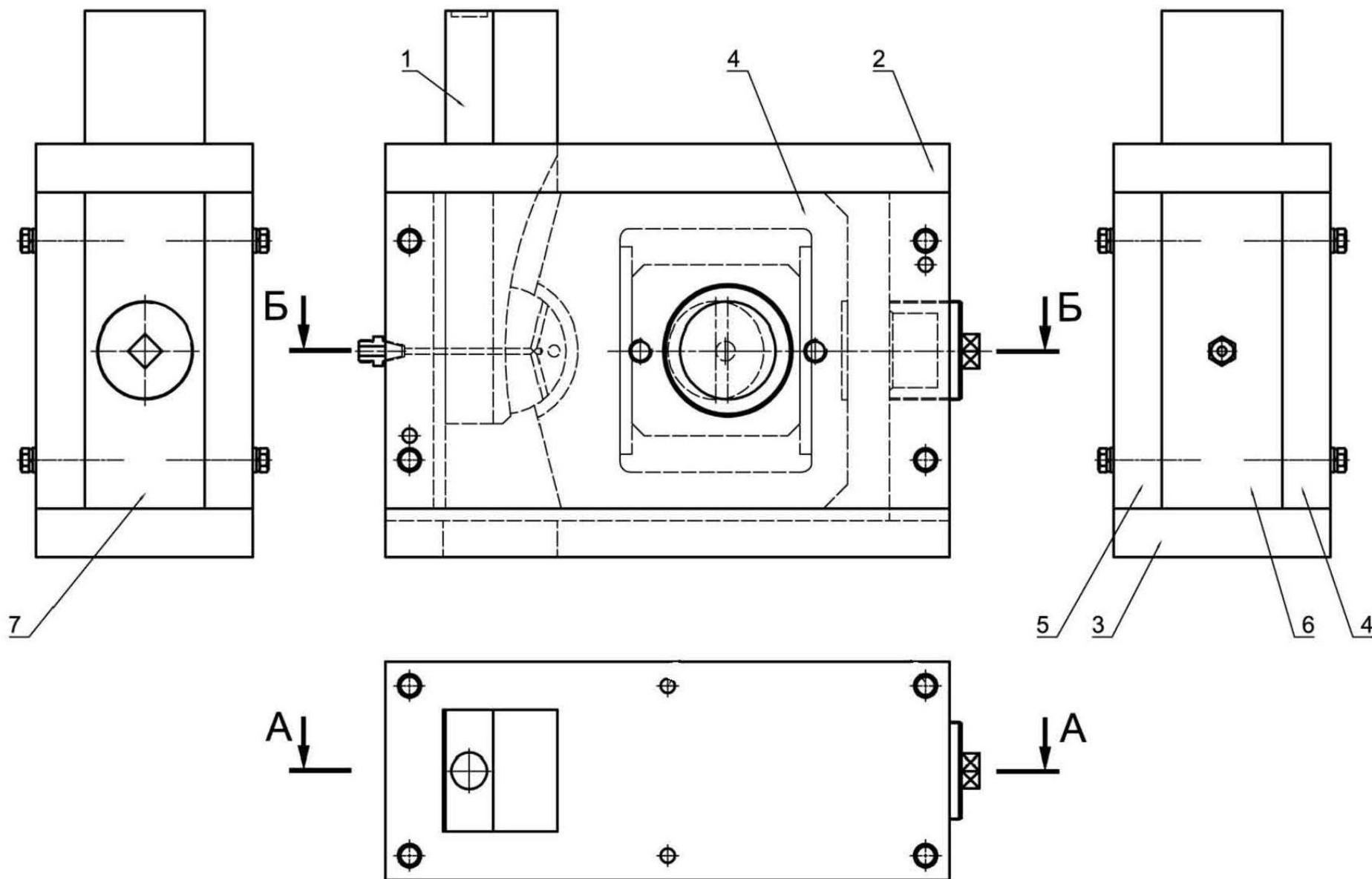
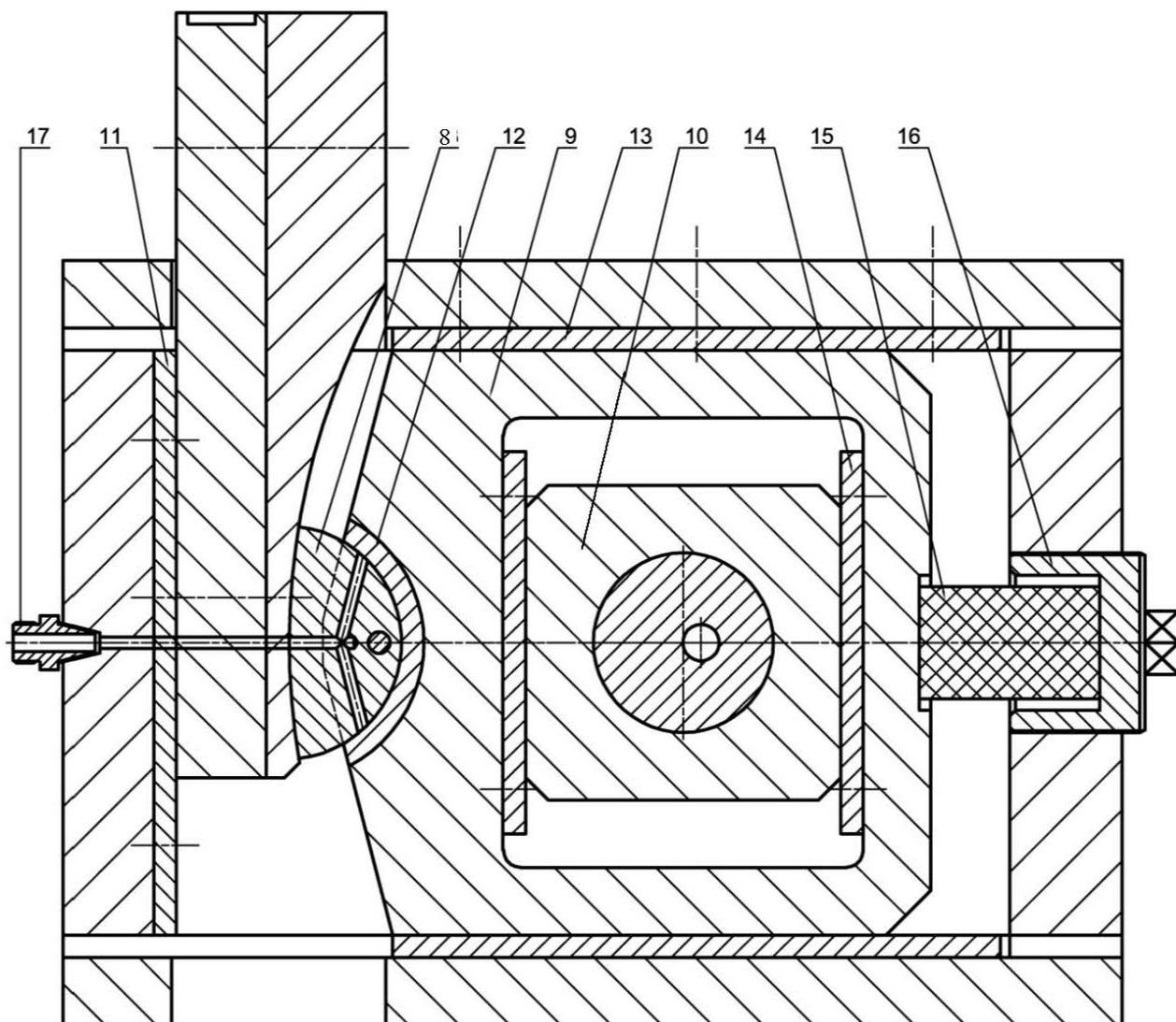


Рисунок 4.8 – Устройство для разделения сортового проката и труб отрезкой сдвигом [116,117]

A-A



Б-Б

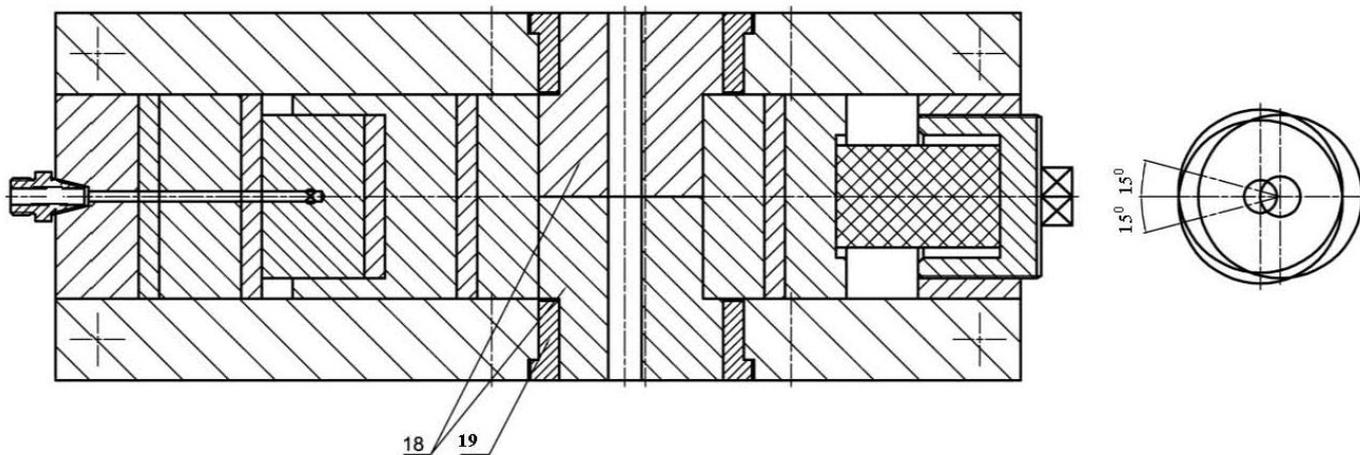


Рисунок 4.9 – Устройство для разделения сортового проката и труб отрезкой сдвигом [116,117]

Установка работает следующим образом. В исходном положении прокат (труба) располагается в отверстиях втулочных ножей 18 (не показано), которые выставлены так, что смещены от вертикального положения на угол 15° в разные стороны (чтобы вывести систему из равновесия – из крайнего верхнего положения). Под действием силы прессы, клин 1 (см. рис. 4.8, 4.9) перемещается вниз, взаимодействуя по криволинейной поверхности с шарниром 8. Последний поворачивается вокруг своей оси на угол φ , в результате чего плоское движение шарнира 8 преобразуется в поступательное движение ползуна 9, который перемещается вправо. При этом перемещается вниз и камень 10, а ножи 18 вращаются в разные стороны (по часовой стрелке и против), поворачиваясь на угол 165° (до крайнего нижнего положения) и осуществляя отрезку проката (трубы) по дуге. После совершения рабочего хода ползун 9 возвращается в исходное состояние под действием силы буфера 15.

В предложенной конструкции устройства использован компактный клино-шарнирный механизм в сочетании с рамным ползуном. Развитые площади опор деталей механизма снижают удельные силы в опорах и способствуют гашению колебаний, что в сочетании с малой деформационной зоной приводит к высокой динамической устойчивости и отсутствию раскачивания на фундаменте.

Рассмотрим аналитический кинематический расчет предложенной конструкции устройства для отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах [118].

На рис. 4.10 изображена структурная схема рычажного механизма эквивалентная рассматриваемому механизму. В качестве начального звена принимаем ползун 1, который совместно со стойкой образует исходный механизм I-го класса. В качестве обобщённой – принимаем линейную координату, определяющую положение ползуна на направляющей.

Из рис. 4.10 видно, что механизм образован в результате присоединения к исходному механизму сначала двухзвенной группы Ассур 2-го вида, образованной звеньями 2 и 3, а затем группы Ассур 2-го вида, образованной звеньями 4, 5. Таким образом, формула строения этого механизма имеет вид: $I(0-1) \rightarrow II(2,3)_{2,2} \rightarrow II(4,5)_{2,2}$.

Задачей кинематического анализа является определение передаточных функ-

ций элементов механизма – звеньев и характерных точек, нулевого, первого и второго порядков.

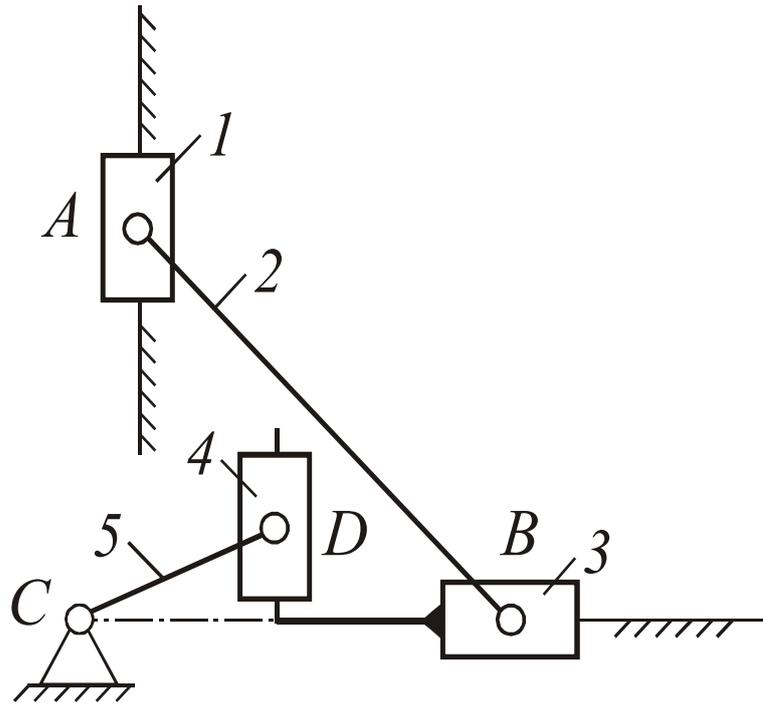


Рисунок 4.10 – Структурная схема рычажного механизма

Если обобщённую координату обозначить через X_1 , то передаточные функции точки A ползуна могут быть представлены в виде:

$$\text{ПФ0} - Y_A = f(X_1);$$

$$\text{ПФ1} - dX_A/dX_1 = Y'_A = f'(X_1);$$

$$\text{ПФ2} - d^2Y_A/dX_1^2 = Y''_A = f''(X_1).$$

Решая систему уравнений:

$$\begin{cases} (X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 = L_{AB}^2; \\ Y_B = Y_N; \end{cases} \quad (4.5)$$

определяем координаты точки B – X_B, Y_B .

Передаточные функции первого порядка можно определить, дифференцируя по обобщенной координате выражения (4.5) и решая полученную систему уравнений, получим:

$$X'_B = \frac{X'_A(X_B - X_A) + Y'_A(Y_B - Y_A)}{(X_B - X_A)}, \quad Y'_B = \frac{Y'_A(Y_B - Y_A) + X'_A(X_B - X_A) - X'_B(X_B - X_A)}{Y_B - Y_A}. \quad (4.6)$$

Тогда
$$\varphi'_{AB} = \frac{Y'_B - Y'_A}{L_{AB} \cos \varphi_{AB}}$$

или
$$\varphi'_{AB} = \frac{X'_A - X'_B}{L_{AB} \sin \varphi_{AB}}. \quad (4.7)$$

Для определения передаточных функций второго порядка дифференцируем выражения (4.6), (4.7):

$$X''_B = \frac{X''_A(X_B - X_A) + X'_A(X'_B - X'_A) + Y''_A(Y_B - Y_A) + Y'_A(Y'_B - Y'_A) - X'_B(X'_B - X'_A)}{(X_B - X_A)}; \quad (4.8)$$

$$Y''_B = \frac{Y''_A(Y_B - Y_A) - (Y'_B - Y'_A)^2 - (X'_B - X'_A)^2 - (X_B - X_A)(X'_B - X'_A)}{Y_B - Y_A}; \quad (4.9)$$

$$\varphi''_{AB} = \frac{(Y''_B - Y''_A)L_{AB} \cos \varphi_{AB} - (Y'_B - Y'_A)L_{AB} \sin \varphi_{AB} \varphi'_{AB}}{(L_{AB} \cos \varphi_{AB})^2}. \quad (4.10)$$

Также могут быть определены передаточные функции звеньев 4 и 5.

Для анализа передаточных функций была составлена программа, позволяющая моделировать движение устройства.

Анализ проведенных расчетов позволил сделать следующие выводы:

- Предложенная конструкция устройства для реализации схемы отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах [116,117] работоспособна.
- Важным параметром, влияющим на траекторию движения ножей с целью получения заготовок высокого качества при минимальной энергоемкости процесса отрезки, является угол наклона клина.

На рис. 4.11 представлены графики зависимости угла поворота выходного звена φ_{CD} от перемещения клина 1 при различных углах его наклона: 0° ; 5° ; 10° , из которых видно, что незначительное изменение угла наклона клина приводит к значительному изменению угла поворота звена 5. На рис. 4.12 – зависимость аналога угловой скорости выходного звена от обобщенной координаты при различных углах наклона клина 1. На рис. 4.13 изображены траектории движения втулочных ножей при разных углах наклона клина. Более предпочтительным, с точки зрения качества получаемых заготовок, является вариант с углом наклона 5° .

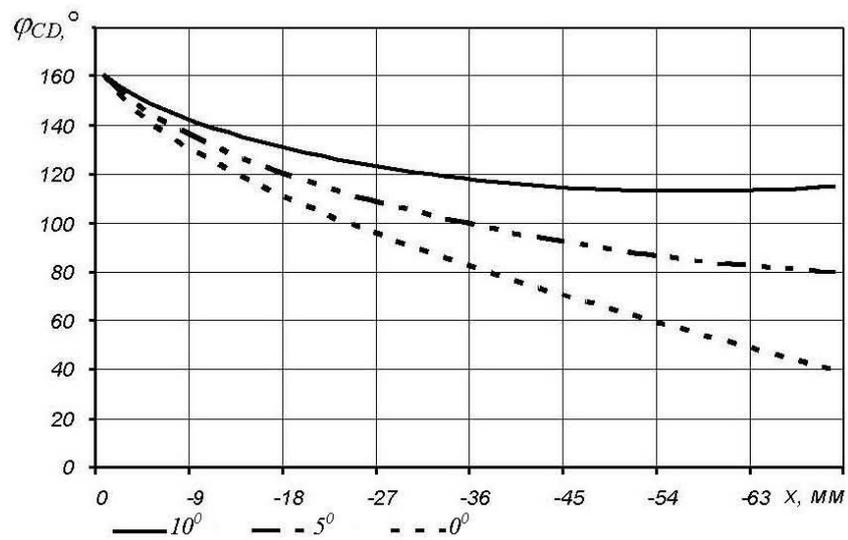


Рисунок 4.11 –Графики зависимости угла поворота втулочного ножа от обобщенной координаты

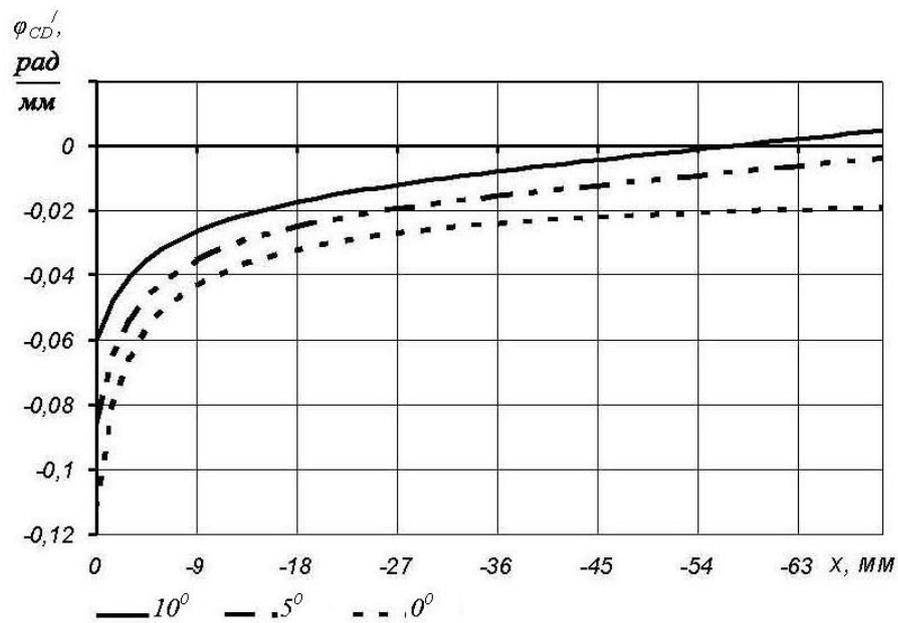


Рисунок 4.12 –Графики зависимости аналога скорости втулочного ножа от обобщенной координаты

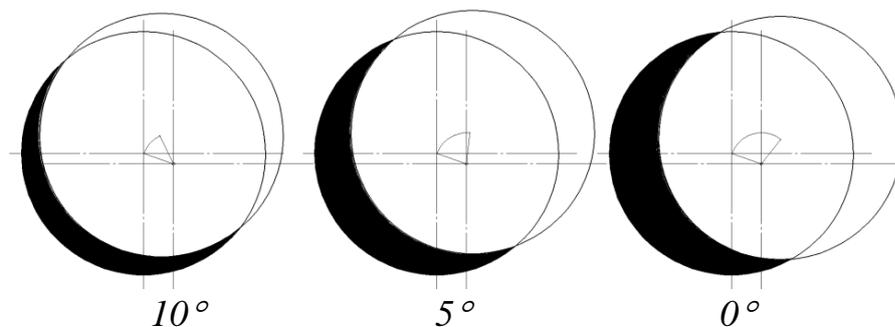


Рисунок 4.13 –Траектории движения втулочных ножей при разных углах наклона клина

4.4 Рекомендации по выбору технологических параметров при отрезке проката сдвигом

4.4.1 Влияние формы и ориентации в пространстве сечения проката на силуотрезки

Определим площадь A для различных форм поперечного сечения заготовки: прямоугольника, квадрата, круга, а также квадрата, поставленного на ребро.

В общем случае величина рабочего хода ножа связана с толщиной заготовки соотношением

$$h_b = C S,$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Тогда для прямоугольного сечения со сторонами L и S (рис. 4.14,а) формула (1.11) примет вид:

$$F = KLS(1 - C)\tau_c. \quad (4.11)$$

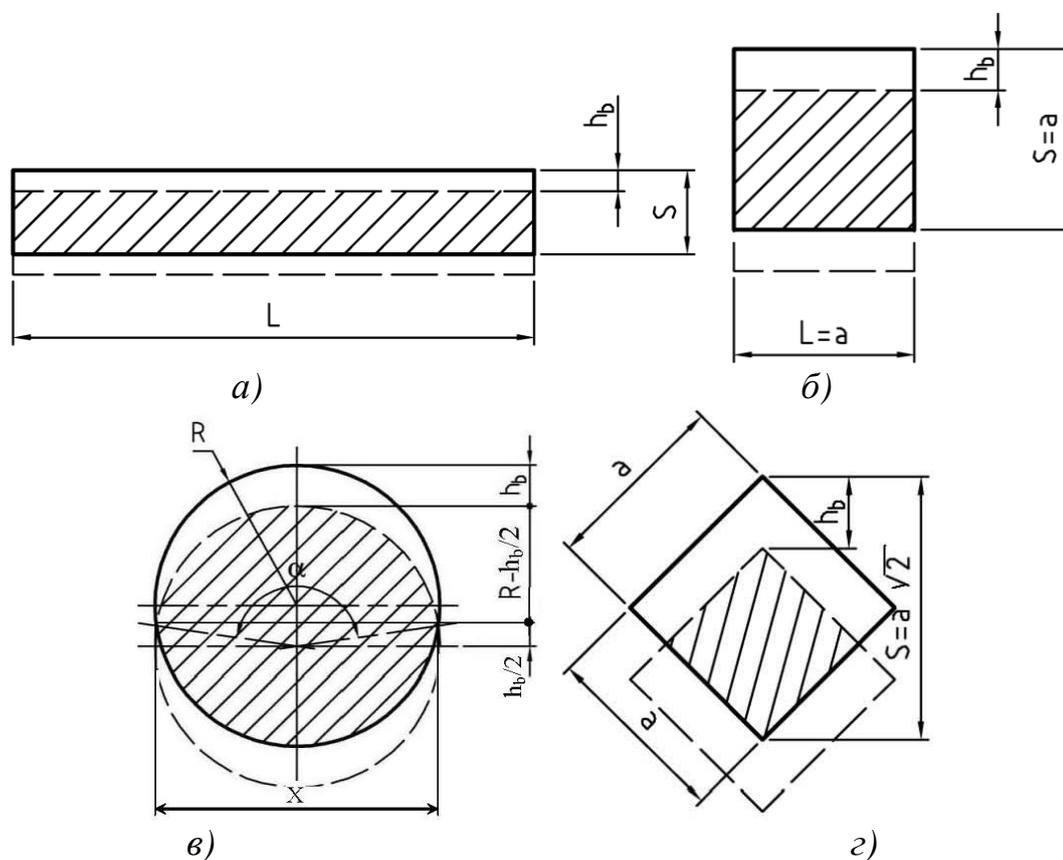


Рисунок 4.14 – Сечения сортового проката [119]

Для квадрата со стороной a (см. рис. 4.14,б)

$$F = Ka^2(1 - C)\tau_c. \quad (4.12)$$

Для квадрата, поставленного на ребро (см. рис. 4.14,г)

$$A = \left(a - \frac{h_b}{\sqrt{2}}\right)^2.$$

Если $S = a\sqrt{2}$, то $h_b = CS = Ca\sqrt{2}$.

Тогда

$$A = (a - Ca)^2 = a^2(1 - C)^2$$

и

$$F = Ka^2(1 - C)^2\tau_c. \quad (4.13)$$

Для круга радиусом R площадь A равна удвоенной площади сегмента с центральным углом $\alpha = 2\arccos\frac{h_b}{2R}$, высотой $h = R - \frac{h_b}{2}$, длиной $X = 2\sqrt{R^2 - (0,5h_b)^2}$ (см. рис. 4.14,в)

$$A = 2 \cdot \frac{l}{2} [Rl - X(R - h)],$$

где l – длина дуги, ограниченной центральным углом α , определяемая как

$$l = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ}.$$

Тогда

$$A = \frac{\pi}{90^\circ} R^2 \arccos \frac{h_b}{2R} - h_b \sqrt{R^2 - \frac{h_b^2}{4}},$$

$$F = K \left[\frac{\pi}{90^\circ} R^2 \arccos \frac{h_b}{2R} - h_b \sqrt{R^2 - \frac{h_b^2}{4}} \right] \tau_c. \quad (4.14)$$

При $h_b = CS = 2CR$

$$A = R^2 \left[\frac{\pi}{90^\circ} \arccos C - 2C\sqrt{1 - C^2} \right], \quad (4.15)$$

$$F = KR^2 \left[\frac{\pi}{90^0} \arccos C - 2C\sqrt{1-C^2} \right] \tau_c. \quad (4.16)$$

Если площадь круга равна площади квадрата, то $a^2 = \pi R^2$. Откуда

$$R = \frac{a}{\sqrt{\pi}}.$$

Тогда

$$A = \frac{a^2}{90^0} \arccos \frac{h_b \sqrt{\pi}}{2a} - h_b \sqrt{\frac{a^2}{\pi} - \frac{h_b^2}{4}}. \quad (4.17)$$

Сравнение формул (4.11), (4.12), (4.13), (4.16) показывает, что силаотрезки зависит не только от площади и формы поперечного сечения прутка, но и от ориентации его в пространстве: для квадрата, поставленного на ребро, силаотрезки меньше, чем для квадрата, поставленного на грань в $(1-C)$ раз. Сравним величину площади A для квадрата со стороной a и круга радиуса R , имеющих равные площади.

Пусть $a = 100 \text{ мм}$, $C = 0,2$. Тогда для квадрата, поставленного на грань

$$A = a^2(1-C) = 0,1^2(1-0,2) = 0,008 \text{ м}^2,$$

для квадрата, поставленного на ребро

$$A = a^2(1-C)^2 = 0,1^2(1-0,2)^2 = 0,0064 \text{ м}^2.$$

Радиус круга, площадь которого равна площади квадрата со стороной $a = 100 \text{ мм}$

$$R = \frac{a}{\sqrt{\pi}} = \frac{0,1}{\sqrt{\pi}} = 0,056 \text{ м}.$$

Тогда по формуле (4.15)

$$A = 0,056^2 \left[\frac{\pi}{90^0} \arccos 0,2 - 2 \cdot 0,2 \sqrt{1-0,2^2} \right] = 0,0075 \text{ м}^2.$$

Если площадь прямоугольного сечения равна площади квадрата со стороной a и высота $S = 0,01 \text{ м}$, то

$$L = \frac{a^2}{S} = \frac{0,1^2}{0,01} = 1 м$$

и

$$A = LS(1 - C) = 1 \cdot 0,01(1 - 0,2) = 0,008 м^2 .$$

Таким образом, при одинаковой площади поперечного сечения проката наименьшую площадь поперечного сечения в момент скола и, следовательно, силу отрезки при прочих равных параметрах имеет квадрат, поставленный на ребро. Не значительно больше площадь A у круга. Искомые площади A для квадрата, поставленного на грань и листа прямоугольной формы одинаковы.

4.4.2 Расчеты клиношарнирных механизмов прессов для отрезки проката больших сечений

Для каждого из приведенных случаев определим силу отрезки, приняв в качестве материала заготовок сталь марки 45. Экспериментально установлено, что для прутков из стали марки 45: $h_b = 0,1 \cdot S$, то есть $C = 0,1$ [23].

Для пластической деформации касательные напряжения сдвига $\tau_c = 0,58 \cdot \sigma_T$. Поправочный коэффициент, учитывающий увеличение силы отрезки от затупления кромок ножа $K = 1,2$.

Результаты расчета площади поперечного сечения заготовки A_0 , площади в момент скола A и силы отрезки F для различных форм поперечного сечения проката приведены в табл. 4.2.

Произведем расчет параметров клиношарнирного механизма. При заданном ходе ползуна h_B , который принимается равным величине внедрения ножа h_b , максимальный выигрыш в силе достигается при наибольшем радиусе клина, который соответствует принятой величине хода ползуна. Для всех рассматриваемых случаев принимаем величину выигрыша в силе постоянной

$$F_{\hat{A}}/F_{\bar{A}} = 2,8. \quad (4.18)$$

Таблица 4.2 – Результаты расчета параметров клиношарнирного механизма

Параметры	$A_0, \text{мм}^2$	$A, \text{мм}^2$	$h_B, \text{мм}$	$F, \text{кН}$	$F_T, \text{кН}$	$R, \text{мм}$	$h_T, \text{мм}$	φ^0
Прямоугольник $L \times S = 1000 \times 10$	10000	9000	1,0	2255	805	97	14	$8^0 18'$
Прямоугольник $L \times S = 2000 \times 5$	10000	9000	0,5	2255	805	49	7	$8^0 12'$
Квадрат, постав- ленный на грань $a = 100 \text{мм}$	10000	9000	10,0	2255	805	970	139	$8^0 14'$
Квадрат, постав- ленный на ребро $a = 100 \text{мм}$	10000	8100	14,1	2030	725	1368	196	$8^0 14'$
Круг $R = 56 \text{мм}$	10000	8732	5,6	2189	781	543	78	$8^0 16'$

Из формулы (2.26) определим радиус клина:

$$R = h_B / \left(1 - \cos \left[\arctg \frac{F_T}{F_B} - \rho - \psi \right] \right). \quad (4.19)$$

Если принять, что $\rho \cong \psi$, то при коэффициенте трения $f = 0,1$
 $\rho = \psi = \arctg 0,1 = 5^0 43'$

Из формулы (2.3) определим величину горизонтального хода клина, обеспечивающего заданное перемещение h_B при известном радиусе R

$$h_T = \sqrt{R^2 - (R - h_B)^2}. \quad (4.20)$$

По формуле (2.4) рассчитаем величину угла поворота шарнира φ . Результаты расчета сведены в табл. 4.2.

Разработаны программные средства по автоматизированному проектированию геометрических и силовых параметров клиношарнирного механизма с вогнутым клином для отрезки сортового проката больших сечений различной формы. Укрупненная блок-схема алгоритма решения этой задачи представлена на рис. 4.15.

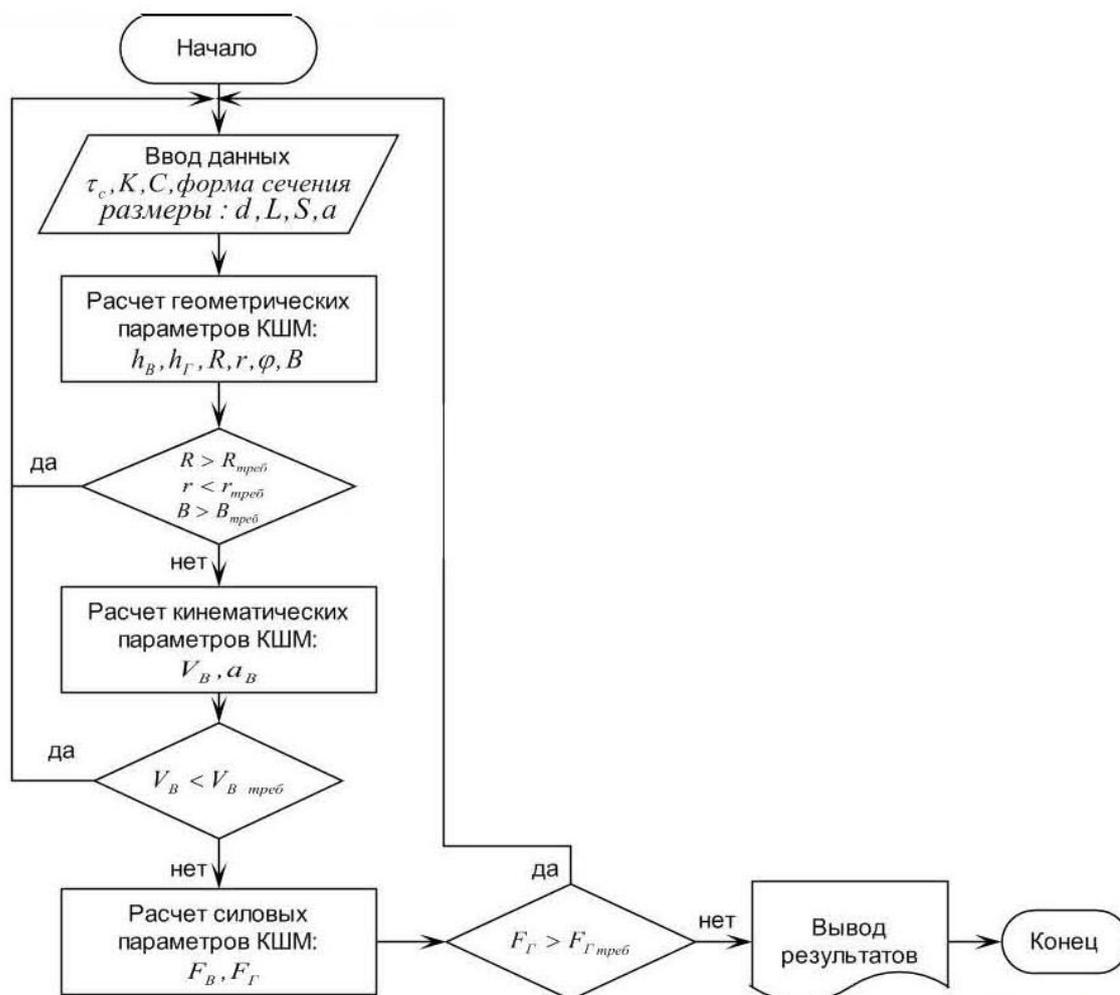


Рисунок 4.15 – Укрупненная блок-схема алгоритма по автоматизированному проектированию геометрических и силовых параметров КШМ с ВК для отрезки сортового проката больших сечений

С использованием системы автоматизированного проектирования разработан специализированный пресс с клиношарнирным механизмом с вогнутым клином для реализации разделительных процессов усилием 4 МН (рис. 4.16). Пресс состоит из: станины, выполненной в виде верхней 1, нижней 2 и боковых 3 поперечин, которые собираются с помощью колонн 4 и шпилек 5; клиношарнирного механизма с вогнутым клином, включающего в себя клин вогнутый 6 с приводом от гидроцилиндра 7, взаимодействующего с шарниром 8, который установлен с возможностью поворота и, в свою очередь, контактирует с соответствующей поверхностью ползуна 9, на котором закреплен инструмент 12 для отрезки сортового проката 13. Пресс дополнительно оснащен клином 10 с постоянным углом клиновидности 7° с приводом от гидроцилиндра 11 [120].

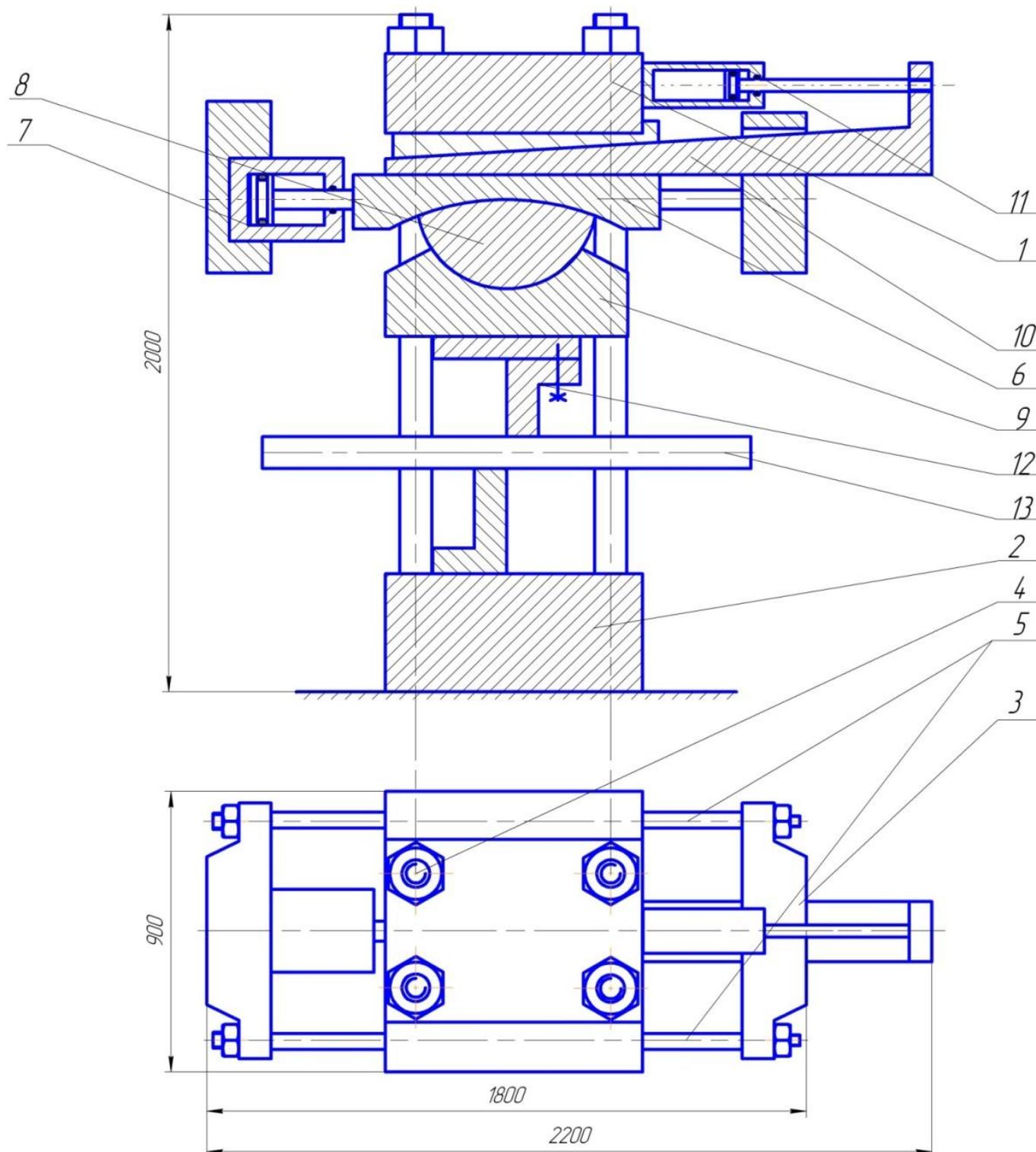


Рисунок 4.16 – Конструктивная схема прессы с клиношарнирным механизмом с вогнутым клином для разделения сортового проката ($d = 100$ мм) отрезкой сдвигом усилием 4 МН [121]

Разделение сортового проката отрезкой сдвигом происходит следующим образом. Под действием силы привода от гидроцилиндра 11 клин 10 перемещается горизонтально, производя ход приближения, выборку зазоров, упругую деформацию системы "пресс-инструмент-заготовка". Далее под действием силы привода от гидроцилиндра 7 клин вогнутый 6 перемещается горизонтально, воздействуя на шарнир 8, который поворачивается относительно своей оси с $\varphi_{нач} = 0^\circ$ до $\varphi_{кон}$ и осуществляет отрезку сдвигом заготовки 13, за счет вертикального перемещения ползуна 9 с инструментом 12.

Предлагаемый пресс с клиношарнирным механизмом с вогнутым клином принципиально не имеет ограничений по диаметру разделяемых заготовок, поскольку клиношарнирный механизм обеспечивает значительный выигрыш в усилии и переменность соотношения между приводной и технологической силами. Кроме того, пресс имеет большую закрытую высоту штампового пространства для расширения его технологических возможностей – реализации более совершенных схем отрезки с использованием штамповой оснастки.

Сравнительный анализ паспортных данных типовых сортовых ножниц и расчетных технико-экономических показателей типового ряда специализированных прессов предложенной конструкции с клиношарнирным механизмом с вогнутым клином для разделительных операций, полученных с использованием разработанной системы автоматизированного проектирования, представлен в табл. 4.3, 4.4.

В результате повышения жесткости предложенного клиношарнирного пресса с вогнутым клином в 1,2...1,3 раза уменьшается упругая деформация его деталей и привода при реализации разделительных процессов, а значит – повышается надежность работы оборудования [122].

При этом повышается коэффициент использования оборудования по усилию от 0,3... 0,4 (из-за упругой мгновенной разгрузки пресса) до 0,7...0,8.

Повышается КПД нового пресса вследствие того, что уменьшается величина работы, расходуемой на разделение, а именно – величина работы упругой деформации машины – примерно на 60%.

Таблица 4.3 – Расчетные параметры ряда прессов и паспортные данные сортовых ножниц

Модель	Номинальная сила, кН	Наибольшие размеры диаметра прутка разрезаемого проката, мм	Габаритные размеры, длина x ширина x высота, мм	Масса, т	Жесткость С, кН/м
Сортовые кривошипные ножницы для точной резки					
Н1830Б	1,00	56	1900x8300x3100	13,60	1,7
Н1834А	2,50	85	3650x6890x3550	29,00	2,7
Н1836	4,00	110	4250x7100x4000	40,50	3,4
Н1838	6,30	140	4685x8580x5250	75,00	4,3
Н1840	10,00	170	5440x8610x5860	105,86	5,4
Ножницы сортовые кривошипные закрытые					
Н1534	2,50	100	3050x7000x3000	12,38	2,7
Н1538	6,30	140	4020x7100x4950	39,40	4,3
Н1540	10,00	200	6040x8355x6720	68,00	5,4

Таблица 4.4 – Расчетные параметры ряда прессов с КШМ с ВК конструкции ДГМА

Модель	Номинальная сила, кН	Наибольшие размеры диаметра прутка разрезаемого проката, мм	Габаритные размеры, длина x ширина x высота, мм	Масса, т	Жесткость С, кН/м
КШМ63	0,63	45	1500x800x1600	1,35	1,7
КШМ100	1,00	56	1550x800x1700	2,25	2,2
КШМ125	1,25	65	1600x800x1800	2,95	2,5
КШМ250	2,50	85	1700x900x1900	5,50	3,5
КШМ400	4,00	100	2200x900x2000	6,70	4,4
КШМ630	6,30	140	2000x1200x2200	12,00	5,5
КШМ1000	10,00	200	3500x1800x3000	24,00	7,0

В целом снижается себестоимость нового пресса по сравнению с традиционными прессами для разделительных операций, в том числе и потому, что детали клиношарнирного механизма более технологичные, по сравнению с кривошипно-шатунным механизмом.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для вузов / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников, Е. Н. Складчиков; под ред. Л. И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 560 с.
2. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
3. Ланской Е. Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов / Е. Н. Ланской, А. Н. Банкетов. – М.: Машиностроение, 1966. – 380 с.
4. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для машиностроительных вузов / А. Н. Банкетов, Ю. А. Бочаров, Н. С. Добринский и др.; под ред. А. Н. Банкетова, Е. Н. Ланского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с.
5. Кривошипные кузнечно-прессовые машины / В. И. Власов, А. Я. Борзыкин, И. К. Букин-Батырев и др.; под ред. В. И. Власова. – М.: Машиностроение, 1982. – 424 с.
6. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование. Прессы / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1981. – 376 с.
7. Зимин А. И. «Периодическая система» энерготипов кузнечно-прессовых машин / А. И. Зимин // Машины и технология обработки давлением: сб. научн. тр. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 5–23.
8. Банкетов А. Н. Классификация кузнечных машин и промышленная терминология / А. Н. Банкетов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 28-31.
9. Бочаров Ю. А. Структурно-морфологическая классификация кузнечно-штамповочных машин и установок / Ю. А. Бочаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 11. – С. 30–34.
10. Бочаров Ю. А. Перспективы создания мощного кузнечно-прессового оборудования / Ю. А. Бочаров, А. В. Сазонов, А. С. Ежов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 4. – С. 28–30.

11. Роганов Л. Л. Теоретические основы разработки и внедрения эффективных кузнечно-прессовых машин на базе гидроупругого привода: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.05 / Роганов Л. Л. – Краматорск, 1988. – 506 с.

12. Харлашкин В. В. Разработка и внедрение механических прессов с клиношарнирным приводом ползуна для точной штамповки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Харлашкин В. В. – Краматорск, 1986. – 188 с.

13. Трофимов В. И. Разработка винтоклинового пресса на основе клиношарнирного механизма для точной штамповки низких заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Трофимов В. И. – Краматорск, 1990. – 231 с.

14. А.с. 816780 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л. Л.Роганов, В. В. Харлашкин (СССР). – № 2380053/25–27; заявл. 26.08.76; опубл. 30.03.81, Бюл. №12.

15. А.с. 1152797 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л. Л.Роганов, В. В. Харлашкин, В. С. Новиков, В. П. Босов, С. С. Калинин (СССР). – № 3653653/25–27; заявл. 21.10.83; опубл. 30.04.85, Бюл. №16.

16. А.с. 1152798 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л.Л.Роганов, В. В. Харлашкин, А. В. Исаев, В. П. Босов, С. С. Калинин, В. С. Новиков (СССР). – № 3654035/25–27; заявл. 21.10.83; опубл. 30.04.85, Бюл. №16.

17. А.с. 1202897 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиношарнирный пресс / Л. Л. Роганов, В. В. Харлашкин, В. П. Босов, С. С. Калинин, В. С. Новиков (СССР). – № 3714659/25–27; заявл. 26.03.84; опубл. 07.01.86, Бюл. №1.

18. А.с. 1214477 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л.Л.Роганов, В. В.Харлашкин, В.И. Трофимов (СССР). – № 3807038/25–27; заявл. 31.10.84; опубл. 28.02.86, Бюл. №8.

19. А.с. 1229076 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л.Л.Роганов, В. В.Харлашкин, В.И. Трофимов (СССР). – № 3764462/25–27; заявл. 04.07.84; опубл. 07.05.86, Бюл. №17.

20. А.с. 1263540 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л.Л.Роганов, В. В.Харлашкин, В.И. Трофимов, В.П.Босов, С.С.Калинин, В.С.Новиков (СССР). –

№ 3889366/25–27; заявл. 30.04.85; опубл. 15.10.86, Бюл. №38.

21. А.с. 1270024 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л.Л.Роганов, В. В.Харлашкин, В.И. Трофимов (СССР). – № 3908187/25–27; заявл. 05.06.85; опубл. 15.11.86, Бюл. №42.

22. А.с. 1318423 СССР, МКИ В 30 В 1/40. Клиновой пресс / Л.Л.Роганов, В. В.Харлашкин, В.И. Трофимов (СССР). – № 4004593/31–27; заявл. 10.01.86; опубл. 23.06.87, Бюл. №23.

23. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

24. Финкель В.М. Холодная ломка проката / В.М.Финкель, Ю.И.Головин, Г. Б.Родюков. – М.: Metallurgy, 1982. – 192 с.

25. Тимощенко В.А. Обобщение и разработка разделительных процессов обработки металлов давлением: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.05 / Тимощенко В. А. – Кишинев, 1987. – 512 с.

26. Высоцкий Е.Н. Исследование и разработка процесса ломки проката: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Высоцкий Е.Н. – Донецк, 1982. – 212 с. (ДСП).

27. Карнаух С.Г. Совершенствование безотходных энергосберегающих способов разделения сортового металлопроката и оборудования для получения заготовок высокого качества: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Карнаух С.Г. – Краматорск, 1999. – 221 с.

28. Разработка, исследование, изготовление и внедрение установки ударно-импульсного действия для резки проката: отчет о НИР / Коммунарский горно-металлургический институт ; рук. Борисов В.М. – Коммунарск, 1976. – 106 с. – № ГР 75022110. – Инв. № В815178.

29. Гришаев В.В. Траектория краевой трещины при изгибе стержня / В. В. Гришаев, Е.Н. Высоцкий // Проблемы прочности. – 1989. – № 6. – С. 52–56.

30. Гришаев В.В. Исследование скорости роста трещины в изогнутом стержне / В.В. Гришаев, Е.Н. Высоцкий // Проблемы прочности. – 1991. – №7. – С. 44–47.

31. Роганов Л. Л. Перспективные направления развития технологии и оборуду-

дования для разделения сортового проката на мерные заготовки / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 201–205.

32. Карнаух С. Г. Расчеты напряжений в зоне развития разрушающей трещины при холодной ломке изгибом / С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 327–331.

33. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1977. – 360 с.

34. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

35. Финкель В.М. Портрет трещины / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1981. – 160 с.

36. Шевандин Е.М. Хладноломкость и предельная пластичность металлов в судостроении / Е.М. Шевандин, И.А. Разов. – Л.: Судостроение, 1965. – 336 с.

37. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1. Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

38. Полухин П.И. Физические основы пластической деформации: учеб. пособие для вузов / П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.

39. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

40. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении / Г.В. Степанов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 228 с.

41. Многоручьева прокатка – разделение / В.М. Клименко, С.П. Ефименко, В.Ф. Губайдулин, Г.М. Шульгин. – М.: Металлургия, 1987. – 167 с.

42. Трусов В.А. Исследование основных технологических параметров резки круглого проката на заготовки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05 / Трусов В.А. – М., 1963. – 186 с.
43. Круглова Е.Д. Исследование разделения сортового проката на заготовки неполной закрытой резкой с пассивным поперечным прижимом: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.05 / Е.Д. Круглова. – М., 1973. – 16 с.
44. Носаль В. В. Исследование резания металлов на ножницах с наклонными ножами / В. В. Носаль // Исследование металлургических машин. – М. : Машгиз, 1949. – С. 37–43.
45. Веселовский С.Н. Разрезка материалов / С.Н. Веселовский. – М.: Машиностроение, 1973. – 360 с.
46. Кубрин И.Г. Резание металлов на станках и пилах / И.Г.Кубрин. – М.: Высшая школа, 1966. – 161 с.
47. Мещерин В.Т. Исследование механики процесса резки круглого проката / В.Т.Мещерин, В.А.Трусов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1963. – № 5. – С. 16–19.
48. Соловцов С.С. Производство точных заготовок отрезкой и вырубкой / С.С. Соловцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2005. – № 9. – С.22–24.
49. Соловцов С.С. Совершенствование производства заготовок из сортового проката в штампах / С.С. Соловцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 4. – С. 18–22.
50. Соловцов С.С. Эффективный технологический процесс изготовления заготовок из алюминиевого проката / С.С. Соловцов, Н.Л. Лисунец, А.М. Атанасов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – № 5. – С. 5–12.
51. Кононенко В. Г. Высокоскоростное деформирование и разрушение металлов / В. Г. Кононенко. – Харьков : Вища школа, 1980. – 231 с.
52. Кононенко В.Г. Технологические особенности высокоскоростной резки сортового проката сдвигом / В.Г. Кононенко, И.Ю. Валеня // Высокоскоростная об-

работка материалов давлением: сб. научн. тр. – Харьков, 1982. – Вып. 8. – С. 3-16.

53. Мещерин В.Т. Геометрическая точность заготовок при многоопорной отрезке в штампе / В.Т. Мещерин, В.А. Самсонов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 9. – С. 9–13.

54. А.с. 1465195 СССР, МКИ В 23 D 23/00. Устройство для резки проката / З. Д. Ломсадзе, А.А. Костава, Д.М. Сулухия и др. (СССР). – № 4279681/37–27; заявл. 08.07.87.

55. Исаев А.В. Разработка процесса сдвиговой отрезки проката в ножах с режущими элементами: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Исаев А.В. – Краматорск, 1989. – 293 с. (ДСП).

56. Погодин-Алексеев Г.И. Динамическая прочность и хрупкость металлов / Г. И. Погодин-Алексеев. – М.: Машиностроение, 1966. – 244 с.

57. Исследование процесса, технологии и создание опытно – промышленного молота для импульсной объемной штамповки: отчет о НИР / ХАИ. – Харьков, 1977. – 25 с. – № ГР 73014042. – Инв. № Б 657037.

58. Ионов В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Ионов, В. В. Селиванов. – М: Машиностроение, 1987. – 272 с.

59. А.с. 1030111 СССР, МКИ В 23 D 27/00. Устройство для разделения проката / Е.Н. Высоцкий, В.И. Косяк (СССР). – № 3332354/25–27; заявл. 22.06.81; опубл. 23.07.83, Бюл.№ 27.

60. Роганов Л.Л. Импульсные машины ударного действия с гидропружинным приводом / Л.Л. Роганов, Л.Н. Соколов, А.Ф. Тарасов // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Харьков: Вища школа, 1982. – Вып. 18. – С. 79–83.

61. Тарасов А.Ф. Совершенствование технологических процессов штамповки на основе статико-динамического деформирования и разработка специализированных пресс-молотов: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.05 / Тарасов А.Ф. – Краматорск, 1996. – 491 с.

62. Федина Т.С. Разделение труб на заготовки / Т.С. Федина // Сборник аналитических материалов. – ЦНИИНТИКПК, 1989. – № 2. – 11 с.

63. О точности заготовок из сортового проката, получаемых резкой на современном кузнечно-прессовом оборудовании / П.Е. Кислый, В.Ф. Коваленко, В. Ф. Чижик-Полейко и др. // Исследование и освоение новых технологических процессов объемной и листовой штамповки. – Воронеж: ЭНИКМАШ, 1980. – С.101-116.

64. Процессы, происходящие в гидравлических прессах при мгновенном исчезновении технологической нагрузки / Ю.В. Беляев, Н.Н. Киселев, Ф.И. Когановский и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1969. – № 10. – С. 12–14.

65. К динамике разделения проката на мерные заготовки на гидравлическом прессе при мгновенном исчезновении технологической нагрузки / С.Г. Карнаух, Л. Л. Роганов, А.Ф. Тарасов и др. // Импульсная обработка металлов давлением. – Харьков, 1997. – С. 123–133.

66. Живов Л.И. К вопросу о динамике вырубного гидравлического пресса / Л. И. Живов // Известия вузов. – 1973. – № 6. – С. 21–25.

67. Синицкий В.М. Исследование динамики быстроходных гидравлических прессов / В.М. Синицкий // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 8. – С. 22–25.

68. Роганов Л.Л. Перспективные конструктивные схемы машин для разделения проката с клиношарнирным механизмом / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ - Слов'янськ: ДДМА, 2000. – С. 437–439.

69. Роганов М.Л. Сравнительная оценка кинематических и силовых параметров механизмов привода механических прессов / М.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ - Слов'янськ: ДДМА, 2004. – С. 38–41.

70. Пат. 54739 А Україна, МКИ В 30 В 1/40. Клиновий прес / Роганов Л. Л., Чоста Н. В. – № 2002031979; заявл. 12.03.02; опубл. 17.03.03, Бюл. №3.

71. Роганов Л.Л. Теоретический анализ возможностей клиношарнирного механизма с вогнутым клином / Л.Л. Роганов, Е.А. Корнева, Н.В. Чоста // Сб. научн.

статей. – Краматорск: ДГМА, 1996. – Вып. 3. – С. 122–131.

72. Чоста Н. В. Клиношарнирный механизм с вогнутым клином / Н. В. Чоста, С. Г. Карнаух // Проблемы техники, технологии и экономики машиностроительного производства : тез. докл. межвуз. научн. – техн. конф. молодых ученых и специалистов. – Краматорск : ДГМА, 1996. – С. 35–36.

73. Чоста Н.В. Механические системы с переменной клиновидностью / Н. В. Чоста // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 393–395.

74. Владимиров Э.А. Комплексный расчет исполнительного механизма прессы с группами Ассура произвольной структуры / Э.А.Владимиров, В.Е.Шоленинов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – С. 316-321.

75. Турчак Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак. – М.: Физмат, 2002. – 300 с.

76 Чоста Н. В. Разработка универсальной методики кинематического расчета клиношарнирных механизмов / Н. В. Чоста, В. Е. Шоленинов // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2(27). – С. 195-200.

77 Роганов Л. Л. Исследование кинематических характеристик клиношарнирного механизма с вогнутым клином на разделительных операциях / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста, Д. С. Карнаух // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 347–353.

78 Роганов Л. Л. Развитие механических прессов с клиношарнирным механизмом для разделительных операций / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста, Т. В. Кириенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – № 1. – С. 118–121.

79. Владимиров Э.А. Анализ методов силового расчета клиношарнирных механизмов / Э.А. Владимиров, В.Е. Шоленинов, Н.В. Чоста // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: зб. наук.

пр. – Краматорськ: ДДМА, 2000. – С. 424–426.

80. Применение математических методов и ЭВМ. Вычислительные методы проектирования оптимальных конструкций: учеб. пособие для вузов / А.Н. Останин, В.А. Гугля, Н.Н. Гурский и др.; под общ. ред. А.Н.Останина. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 279 с.

81. Роганов Л.Л. Определение КПД клиношарнирных механизмов / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 487-489.

82. Расчет опорных подшипников скольжения: справочник / Е.Н. Кватницкий, Н.Ф. Киркач, Ю.Д. Полтавский, А.Ф. Савин. – М.: Машиностроение, 1979. – 70 с.

83. Чоста Н.В. Повышение КПД клиношарнирных механизмов прессов / Н. В. Чоста // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2000. – С. 474-476.

84. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика /Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

85. Орлов П.Н. Основы конструирования: справочно-методическое пособие / П.Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.

86. Чоста Н.В. Методы исследования клиношарнирных механизмов для разделительных процессов ОМД / Н.В. Чоста, М.Л. Роганов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 111–113.

87 Роганов Л. Л. Исследование возможности обеспечения режима жидкостного трения на контактных поверхностях клиношарнирного механизма с вогнутым клином / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста, Д. С. Карнаух // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1(18). – С. 262–267.

88. Айвазян С.А. Статистическое моделирование зависимостей /С. А. Айва-

зьян. – М.: Металлургия, 1968. – 227 с.

89. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 8-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2002. – 479 с.

90. Скуднов В.А. Влияние температуры термической обработки на синергетические критерии разрушения сталей / В.А. Скуднов // Технология машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 6–7.

91. Карнаух С.Г. Применение критериев разрушения материалов при выборе способа разделения сортового проката / С.Г. Карнаух, М.А. Винников // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ - Слов'янськ: ДДМА, 2003. – С. 329–337.

92. Винников М.А. Выбор информативной системы критериев разделения материалов / М.А. Винников, С.Г. Карнаух // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 391–397.

93. Классификация и кластер; под. ред. Дж. Вэн Райэин. – М.: Мир, 1980. – 390 с.

94. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. ;под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.

95. Экспериментальные исследования процесса трехточечной ломки проката изгибом при статическом и динамическом нагружении / С.Г. Карнаух, А. А.Бегунов, С.К. Добряк, М.А. Винников, Н. В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 334–341.

96. Карнаух С.Г. Силовые характеристики безотходных процессов разделения сортового проката на мерные заготовки / С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – С. 247–252.

97 Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и

распространения трещин в образцах Шарпи из углеродистых сталей / В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака и др. // Проблемы прочности. – 2006.– №5. – С. 120–127.

98. Чоста Н.В. Влияние условий трения на силовые параметры клиношарнирного механизма / Н.В. Чоста // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 1999. – С. 266–268.

99. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. – К.: Наукова думка, 1981. – 584 с.

100. Роганов Л. Л. Исследование трения на контактных поверхностях клиношарнирного механизма / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1(26). – С. 199-202.

101. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т.3 / В. И. Анурьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 864 с.

102. Роганов М.Л. Расширение технических возможностей кривошипных прессов введением в их конструкцию дополнительных механизмов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Роганов М.Л. – К., 2004. – 198 с.

103. Роганов Л.Л. Самонастраивающиеся клиновые системы в механических прессах / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2001. – С. 23–25.

104. Саушкин Б.П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве / Б.П. Саушкин // Металлообработка. – 2003. – С. 8–17.

105. Саушкин Б.П. Основы технологии / Б.П. Саушкин, И.А. Айзельман. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1998. – 180 с.

106. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.

107. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин и др.; под ред. В.П. Смоленцева. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1996.

– 168 с.

108. Мордехай В.М. Технологические основы разработки комбинированных электрофизических и электрохимических методов обработки / В.М. Мордехай // Вестник машиностроения. – 1993. – № 4. – С. 38–42.

109. Иванов Н.И. Термодинамические принципы интенсификации процессов размерного формообразования-разрушения / Н.И. Иванов // Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: сб. научн. тр. – Тула: Изд-во ТГУ, 1994. – С. 23–29.

110. Волков Ю.С. Особенности нетрадиционных процессов размерной обработки / Ю.С. Волков // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: сб. научн. тр.; под ред. В.П. Смоленцева. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1996. – С. 9–14.

111. Усов С.В. Особенности построения комбинированных электротехнологических методов, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик деталей машин / С.В. Усов // Электрохимическая размерная обработка деталей машин: сб. трудов ВНТК. – Тула: Изд-во ТГУ, 1986. – С. 110–119.

112. Любимов В.В. Термодинамические аспекты интенсификации процессов механо-электро-физикохимической размерной обработки / В.В. Любимов, Н. И. Иванов, М.М. Чибисов // Современная электротехнология в машиностроении : сб. трудов ВНТК. – Тула: Изд-во ТГУ, 1997. – С. 320–323.

113. Иванов Н.И. Методологические принципы разработки исследования интенсифицированных методов механо-электро-физикохимической размерной обработки: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук / Н.И. Иванов. – Тула, 1996. – 43 с.

114. Волков Ю.С. Введение в теорию размерного формообразования электрофизикохимическими методами / Ю.С. Волков, А.Л. Лившиц. – К.: Вища школа, 1978. – 120 с.

115. Карнаух С.Г. Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием методики синтеза комбиниро-

ванных методов обработки / С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – № 1(3). – С. 105–111.

116. Патент на корисну модель № 23759 Україна, МПК (2006) В 23D 31/00, В23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки відрізкою зсувом / Карнаух С.Г., Чоста Н.В. – Заявл. 25.12.06; опубл. 11.06.07, Бюл. № 8.

117. Патент на корисну модель № 24635 Україна, МПК (2006) В 23D 31/00, В23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки відрізанням зсувом / Карнаух С.Г., Чоста Н.В. – Заявл. 12.02.07; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.

118 Исследование механизмов с переменной клиновидностью для технологических процессов обработки металлов давлением с максимальным начальным усилием / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста, В. Е. Шоленинов // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1(19). – С. 342-347.

119 Роганов Л. Л. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2(23). – С. 137-141.

120 Роганов Л. Л. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2(21). – С. 333-338.

121 Роганов Л. Л. Разработка нового типа кузнечно-прессового оборудования для разделительных операций / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста // Металлообработка. – Санкт-Петербург : Политехника, 2010. – № 6(60). – С. 28–34.

122 Чоста Н. В. Пути повышения жесткости кузнечно-штамповочного оборудования с клиношарнирным исполнительным механизмом / Н. В. Чоста, В. Е. Шоленинов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 30. – С. 191–197.

Наукове видання

Роганов Лев Леонідович

Чоста Наталія Вікторівна

**УДОСКОНАЛЕННЯ КЛИНОШАРНІРНИХ МЕХАНІЗМІВ
ПРЕСІВ ДЛЯ РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ
ОБРОБКИ ТИСКОМ**

Монографія

(Російською мовою)

Редактор

Комп'ютерна верстка