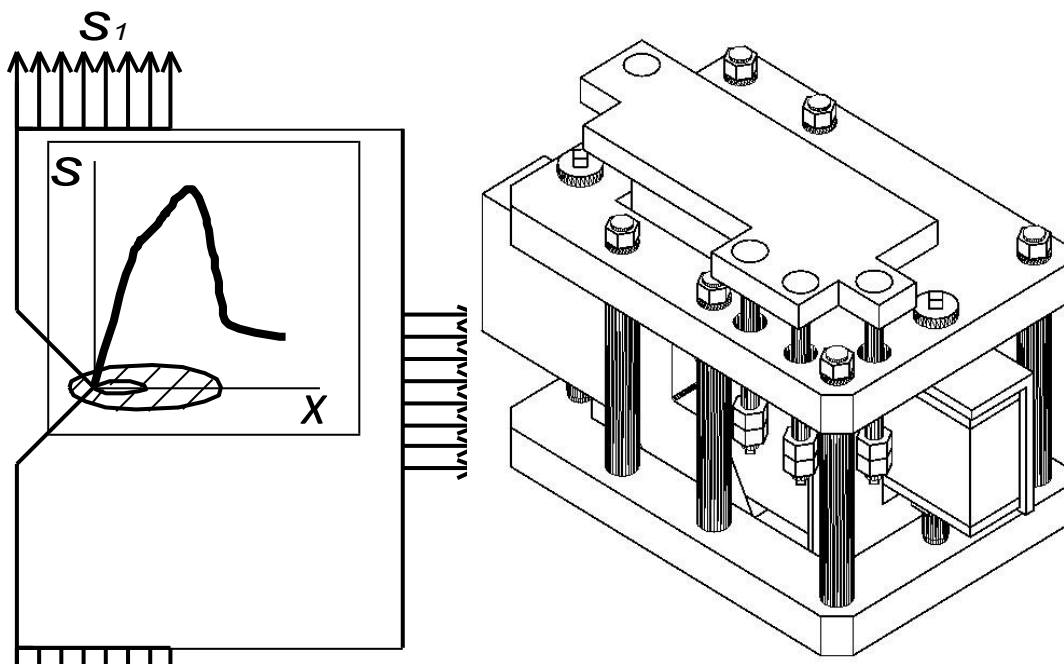


С. Г. Карнаух

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЕЗОТХОДНЫХ СПОСОБОВ
РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА И
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК
ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА**



УДК 621.967.1

ББК К62

К 24

Научный редактор Роганов Л. Л., зав. кафедрой машин и технологической обработки металлов давлением ДГМА, д-р техн. наук, профессор

Рецензенты:

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

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

Розглянуто наукові основи, сучасний стан і перспективи розвитку технології й устаткування для безвідхідного поділу сортового прокату на мірні заготовки способами холодногаламання згинанням і відрізання зсувом. Проаналізовано вплив комплексу факторів на процес поділу та геометричну точність заготовок. Дано рекомендації з вибору оптимальних схем, параметрів і умов поділу. Представлено пристрої й установки для реалізації зазначених процесів поділу прокату.

Призначена для фахівців у галузі механіки руйнування й ОМТ.

Карнаух, С. Г.

К24 Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката и оборудования для получения заготовок высокого качества : монография / С. Г. Карнаух. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 196 с.

ISBN _____

Рассмотрены современное состояние и перспективы развития технологии и оборудования для безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки способами холодной ломки изгибом и отрезки сдвигом. Проанализировано влияние комплекса факторов на процесс разделения и геометрическую точность заготовок. Даны рекомендации по выбору оптимальных схем, параметров и условий разделения. Представлены устройства и установки для реализации указанных процессов разделения проката.

Предназначена для специалистов в области механики разрушения и ОМД.

УДК 621.967.1

ББК К62

ISBN _____

© С. Г. Карнаух, 2010

© ДГМА, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Состояние предмета обсуждения	9
1.1 Краткие сведения о способах разделения сортового проката	9
1.2 Классификация безотходных способов разделения сортового проката	12
1.3 Основные аспекты физики и механики безотходного разделения сортового проката	19
1.4 Современные подходы к реализации способа холодной ломки изгибом.....	23
1.5 Обзор конструкций оборудования для реализации безотходных способов разделения сортового проката	29
1.5.1 Оборудование и оснастка для холодной ломки изгибом.....	29
1.5.2 Оборудование для реализации способа разделения сортового проката отрезкой сдвигом	37
1.5.3 Применение дифференцированного зажима проката при отрезке сдвигом	44
1.6 Анализ рекомендаций по выбору геометрических и силовых параметров безотходных способов разделения сортового проката	47
1.6.1 Параметры процесса холодной ломки изгибом	47
1.6.2 Параметры процесса разделения сортового проката способом отрезки сдвигом.....	49
1.6.3 Анализ исследований влияния скорости нагружения на качество разделяемых заготовок	52
1.6.4 Использование концентраторов напряжений для управления процессом разделения	56
2 Теоретические исследования безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки.....	59
2.1 Исследование процесса статико-динамического нагружения образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом на пресс-молотах.....	59
2.2 Теоретическое обоснование нового способа разделения сортового проката по схеме «сдвиг – ломка»	70

2.3 Исследование процесса разделения сортового проката на гидравлическом прессе при мгновенном исчезновении технологической нагрузки.....	73
2.3.1 Расчет напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при нанесении концентратора напряжений путем внедрения жесткого двухстороннего клинового инструмента в прокат	76
2.3.2 Исследование энергосиловых параметров процесса нанесения концентратора напряжений за счет частичного сдвига части проката относительно профиля при реализации способа «сдвиг – ломка»	86
2.4 Методика расчета параметров гидравлического пресса и оснастки с использованием эффекта утилизации энергии упругой деформации станины и привода	89
2.5 Математическое моделирование процесса разделения сортового проката по схеме отрезки эксцентричным закручиванием.....	91
3 Экспериментальные исследования безотходных способов разделения сортового проката	97
3.1 Применение критериев разрушения при выборе способа разделения сортового проката	97
3.2 Результаты измерения максимальной скорости подвижных частей высокоскоростных машин	107
3.3 Исследование силовых параметров процесса внедрения жесткого клинового инструмента в прокат	113
3.4 Экспериментальные исследования холодной ломки сортового проката изгибом	117
3.4.1 Исследование влияния скорости деформирования на энергосиловые характеристики процесса трехточечной холодной ломки изгибом и геометрическую точность получаемых заготовок при статическом и динамическом нагружении	117
3.4.2 Экспериментальные исследования разделения образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении	127

3.5 Проведение экспериментов с использованием новых схем разделения	131
3.5.1 Экспериментальные исследования разделения образцов по схеме ломки с перераспределением напряжений по сечению заготовки	131
3.5 Экспериментальные исследования процесса разделения образцов по схеме «сдвиг-ломка»	134
4 Прикладной аспект процессов безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки	140
4.1 Разработка штампов для отрезки сортового проката с дифференцированным зажимом	140
4.1.1 Силовой расчет базовой конструкции штампа	145
4.1.2 Внедрение результатов исследований в производство	148
4.1.3 Рекомендации по проектированию штампов с дифференцированным зажимом проката	150
4.1.4 Разработка системы автоматизированного проектирования штампов с дифференцированным зажимом проката.....	151
4.2 Перспективы развития процесса разделения проката на мерные заготовки	155
5 Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием комбинированных методов обработки.....	174
Перечень ссылок.....	183

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития машиностроения проблема экономического использования энергоресурсов и металла при его переработке предъявляет все возрастающие требования к технологии и оборудованию для разделения исходных материалов на заготовки.

Уровень качества отрезанных заготовок диктуется технологией последующей обработки, обеспечивающей, в свою очередь, соответствующее качество детали при возможно низкой ее себестоимости. Причем для большинства технологических процессов обработки металлов давлением нет необходимости добиваться одинаковых наименьших отклонений геометрической формы и размеров, а также шероховатости от некоторой условной заготовки, принимаемой за эталонную. Главное – обеспечить соответствие формы и размеров заготовки требованиям её формоизменения при последующей обработке, а также условиям эксплуатации детали. При этом выбор способа разделения должен обеспечивать минимальную себестоимость получаемых заготовок. Это требует развития всего многообразия известных и создания новых эффективных разделительных процессов и оборудования для их реализации.

На каждом машиностроительном предприятии операция разделения сортового проката является типичной и массовой. Учитывая, что в Украине ежегодно производят десятки миллионов заготовок из проката, становится очевидной актуальность работ, направленных на совершенствование существующих и разработку новых технологий производства заготовок.

Из всех способов разделения сортового проката на мерные заготовки, применяемых в современных заготовительных производствах, наиболее производительными и экономичными являются безотходные способы разделения сортового проката: отрезка сдвигом и холодная ломка изгибом, которые реализуются в штампах, а также на типовых и специализированных машинах. Более широкому внедрению этих способов в производство во многом препятствует конструктивная сложность, высокая металлоемкость существующего оборудования, несоответствие характера изменения силы при реализации процессов разделения проката характеру изменения силы на ползуне исполнительного механизма большинства кузнечно-прессовых машин, а также значительная энергоемкость процесса. Кроме того, безотходными способами разделения не всегда удается получать заготовки требуемого качества.

Исходя из вышеизложенного, работа, посвященная изучению безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки, разработке и созданию новых схем разделения, а также новых конструкций оборудования и оснастки с улучшенными технико-экономическими показателями, является актуальной. Несмотря на большое количество применяемых методов и средств раскроя, очевидна диспропорция между уровнем основного металлообрабатывающего оборудования и оборудования заготовительного производства.

На протяжении десятков лет большая работа по изучению и совершенствованию способа отрезки сдвигом сортового проката проводилась в СССР: в Мосстанкине, ЭНИКмаше, МВТУ, Харьковском авиационном, Кишиневском политехническом институтах и др. и за рубежом: Япония, Англия, Германия. В работах Мещерина В. Т., Соловцова С. С., Тимощенко В. А. и других ученых разработаны основы теории отрезки сдвигом, определены оптимальные параметры процесса, предложены новые схемы поперечного и продольного разделения сортового проката, созданы различные конструкции ножниц и штампов.

Работы по изучению и совершенствованию способа холодной ломки изгибом сортового проката проведены в Воронежском политехническом, Кишиневском политехническом, Коммунарском горнометаллургическом, Донецком физико-техническом институтах, а также в Тамбовском институте химического машиностроения под руководством Финкеля В. М., Тимощенко В. А., Борисова В. М., Высоцкого Е. Н. и др.

Однако в настоящее время на Украине вопросами безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки системно практически никто не занимается.

Широкому применению методов обработки металлов, в которых трещина является режущим инструментом, препятствует в значительной мере нестабильный характер ее распространения, т. е. склонность к непостоянству скорости и направления роста. Отсутствие надежной и доступной инженерам информации о причинах нестабильности и возможных методах борьбы с ней способствовало убеждению, что закритическое разрушение – процесс неуправляемый и поэтому не может быть применен для точной, качественной резки металла.

Разработка и применение эффективных методов управления разрушением позволяют значительно улучшить известные способы ломки проката на заготовки и создать принципиально новые методы, пригодные

для получения заготовок под механическую обработку. В их основе лежит понимание причин, приводящих к нежелательным отклонениям трассы трещины от заданной траектории, что позволяет предложить действенные способы улучшения качества образующейся поверхности.

Некоторые из предложенных методов могут быть реализованы на существующем кузнечно-прессовом оборудовании, в конструкцию которого внесены незначительные изменения. Осуществление других методов, в силу новизны заложенных в них принципов, требует специального оборудования.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д-ру техн. наук, проф. Роганову Л. Л. и д-ру техн. наук, проф. Тарасову А. Ф. за помощь в проведении научных исследований и участие в обсуждении научных результатов. В проведении многолетних исследований также участвовали ст. преподаватель Винников М. А. и инженер Бегунов А. А., которым автор глубоко признателен.

1 СОСТОЯНИЕ ПРЕДМЕТА ОБСУЖДЕНИЯ

1.1 Краткие сведения о способах разделения сортового проката

Стальной сортовой прокат обычной точности (13...15-й квалитеты) получают горячей прокаткой из блюмов на сортовых станах. Для повышения точности его подвергают последующей холодной прокатке (прутки повышенной точности) или калибровке (прутки высокой точности) (9...12-й квалитеты).

Для получения мерных заготовок из сортового проката в современных заготовительных производствах используются более десяти различных способов, которые неравноценны по своим технико-экономическим показателям. Проанализируем наиболее распространенные из них. Способы разделения сортового проката оценивались следующими показателями: качеством получаемых заготовок, производительностью процесса, затратами энергии на разделение, расходом и дефицитностью инструмента, сложностью оснастки и ее универсальностью [1].

Все известные способы разделения сортового проката [2–6] можно разделить на три группы:

- отходные способы: резка на дисковых пилах, фрезерно-отрезных станках, токарных станках, приводных ножовках и т. д.;
- отходные способы с необратимыми отходом: резка абразивными, фрикционными инструментами, газовой резкой, плазмой, лазером и т. д.;
- безотходные способы: отрезка сдвигом, холодная ломка изгибом, рубка клиновыми ножами и т. д.

Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных способов разделения.

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. Поэтому газовую резку применяют главным образом для крупных профилей, в частности при свободной ковке.

На заготовительных участках мелкосерийного и индивидуального производства для разделения проката больших сечений применяют кислородную резку. Существенным недостатком этого метода являются потери расплавленного металла, прикалка и большие неровности поверхности реза.

Резка на фрезерно-отрезных станках широко распространена в отечественной промышленности благодаря своей универсальности, точности, простоте автоматизации цикла и сравнительно высокой производительности. Недостатком способа является расход металла в стружку.

В последние годы в промышленности все шире используют ленточно-отрезные и ленточно-пильные станки для резки проката диаметром до 250 мм. Производительность разрезки ленточными пилами выше в 5...6 раз, чем на отрезных ножовочных станках, и в 1,5...2 раза, чем на фрезерно-отрезных.

К преимуществам работы на токарно-отрезных станках следует отнести высокую точность и чистоту поверхности раздела, универсальность и дешевизну, легкость и простоту в обслуживании; к недостаткам — сравнительно широкий пропил, а следовательно, повышенный расход металла в стружку, возможность «недореза» и необходимость его последующего удаления, а также невысокую стойкость резцов.

Резка на дисковых пилах обеспечивает лучшее, по сравнению с другими способами, качество получаемых торцов заготовки. Недостатком способа является сравнительно низкая производительность, большой расход инструмента (дисков) и дополнительные отходы металла на каждый рез — 3...8 мм при дисках диаметром 300...800 мм. Поэтому резку стальных прутков на дисковых пилах применяют только в тех случаях, когда требуется очень точная длина заготовки и торец, строго перпендикулярный оси.

Резка ножовочными полотнами характеризуется малой шириной реза (2,5...3 мм), простотой обслуживания станков и небольшими затратами на осуществление самого процесса. Однако для станков характерна низкая стойкость полотен, а их производительность ниже, чем у фрезерно-отрезных и ленточных инструментов.

За сравнительно короткий срок резание абразивными и алмазными кругами получило широкое распространение в отечественной и зарубежной промышленности. К достоинствам метода надо отнести его высокую производительность. Однако увеличение расхода инструмента при резании абразивными кругами и высокая стоимость алмазных кругов, снижение диаметра раскраиваемого проката (до 60 мм) и запыленность заготовительных участков наряду с частыми поломками кругов и прокаливанием поверхности среза снижают преимущества метода и сдерживают его еще более широкое внедрение.

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.

В литературе сообщалось, что для резки металла используют лазеры и электроннолучевую обработку. Однако резка с помощью лазеров еще не получила широкого применения в промышленности. С помощью излучения лазера можно выполнять отверстия в наиболее твердых и хрупких материалах. Для обработки твердых материалов применяют резку ультразвуком. Производительность этих методов небольшая, они еще не вышли из стадии опытно-экспериментальных исследований и требуют усовершенствования.

Холодную ломку изгибом на хладноломах применяют главным образом для получения заготовок крупных сечений. К преимуществам этого процесса можно отнести высокую производительность, а также получение относительно коротких заготовок ($L \leq 0,8d$, где L – длина заготовки, d – диаметр заготовки) и одновременный контроль качества металла заготовки по виду излома. Недостатки: дополнительные затраты времени на предварительную разметку и операцию надрезки – нанесение концентратора напряжений, низкое качество поверхности разделения (косина, вырывы, козырьки) [7].

Отрезка сдвигом осуществляется на ножницах и в штампах, устанавливаемых на кривошипных прессах [8]. Наиболее дешевой, производительной и распространенной является резка на кривошипных ножницах. Резка в штампах обходится дороже, но она точнее. Повышенное (в 3...5 раз) число ходов прессов, по сравнению с ножницами, сопровождается соответствующим увеличением скорости резки, что приводит к уменьшению глубины пластического внедрения и увеличению зоны скола. Профиль среза становится ровней, чем при резке на ножницах, а усилие резки несколько увеличивается. Отрезка сдвигом является наиболее эффективным и перспективным способом получения мерных заготовок с точки зрения производительности и отходности. Так, например, объем работы 7–8 пил по разрезке прутка можно выполнить в одном отрезном штампе. Замена резки прутков на металлорежущих станках разрезкой в штампах обеспечивает экономию 5...40 % металла в зависимости от длины заготовки. При замене вырубки коротких заготовок из листового металла отрезкой от прутка в штампе можно сэкономить 20...55 % металла.

Исходя из анализа различных способов и средств разделения сортового проката, наиболее эффективными и перспективными с точки зрения производительности и отходности являются отрезка сдвигом и холодная ломка изгибом. В дальнейшем для этих способов будем применять название «безотходные способы» разделения.

Авторы работы [9] 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 напряжений выполняют в косорасположенных валках, что приводит к вращению исходной заготовки.

1.2 Классификация безотходных способов разделения сортового проката

Технология безотходного разделения сортового проката простой формы (круг, квадрат, шестигранник) в штампах методами холодной ломки изгибом и отрезки сдвигом достаточно хорошо изучены и классифицированы [4;5;7;8]. Анализ научно-технической литературы показывает, что в основу известных классификаций положены два критерия: степень ограничения подвижности отрезаемой части и исходной заготовки (полосы), а также траектория относительного смещения отрезаемой части.

Так, Соловцов С. С., обобщая все свои ранние работы и работы других авторов, выполнил классификацию схем отрезки по способу ограничения подвижности отрезаемой части [8].

Группа авторов под руководством Тимощенко В. А. в работе [10] также использует критерий ограничения подвижности отрезаемой части и полосы для классификации схем отрезки труб сдвигом, дополняя ее признаком движения отрезаемой части относительно исходной заготовки. Попытки разработки классификации способов и схем ломки проката предприняты в работах [11–13].

Ограничение подвижности отрезаемой части и полосы приводит к уменьшению растягивающих напряжений в очаге деформации и, как следствие, улучшению геометрической точности и уменьшению искажений поверхности разделения.

Выбор траектории относительного смещения отрезаемой части позволяет управлять формообразованием поверхности за счет создания сложного напряженно-деформированного состояния в очаге деформации или изменения физических свойств разделяемого материала.

В работах [14;15] предложена классификация схем отрезки по воздействию на плоскость разделения режущих элементов за счет нанесения концентраторов напряжений клиновыми выступами на торцевых поверхностях ножей. При этом в данной классификации присутствуют схемы, реализующие не только поступательное движение ножа, но и движения со сложной траекторией.

Автором выполнена классификация безотходных способов разделения сортового проката с использованием теории графов. Использование теории графов позволяет не только классифицировать существующие способы разделения по целому ряду функциональных признаков,

но и синтезировать новые решения с применением ЭВМ (рис. 1.1). Подробно рассмотрены современные, наиболее важные и действенные методы улучшения качества образующейся поверхности, снижения затрат энергии и уменьшения габаритов оборудования.

Разделение сортового проката холодной ломкой изгибом (2.3) применяется главным образом для крупных профилей (размер сечения свыше 80 мм) [7;16]. Сущность способа заключается в предварительном нанесении на прокат концентратора напряжений и изгибе проката до разрушения в плоскости концентратора напряжений. 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 также то, что с увеличением сечения ломаемого проката растет его склонность к хрупкому разрушению. К недостаткам способа холодной ломки изгибом относят: дифференцирование операций разметки, нанесения концентратора напряжений, ломки; сложность управления траекторией движения магистральной трещины и, как следствие, низкое качество поверхности разделения (косина, вырывы и козырьки).

Работы по изучению и совершенствованию способа холодной ломки изгибом сортового проката проведены в Коммунарском горнометаллургическом, Донецком физико-техническом институтах, а также в Тамбовском институте химического машиностроения, Воронежском политехническом, Кишиневском политехническом институтах и других под руководством Финкеля В.М., Тимощенко В. А., Высоцкого Е. Н., Борисова В. М. и др. [7; 10; 17;18]. В Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) работы по совершенствованию безотходных способов разделения сортового проката проводятся под руководством профессора Роганова Л. Л. [14;19].

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, продолжили 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 др.

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.

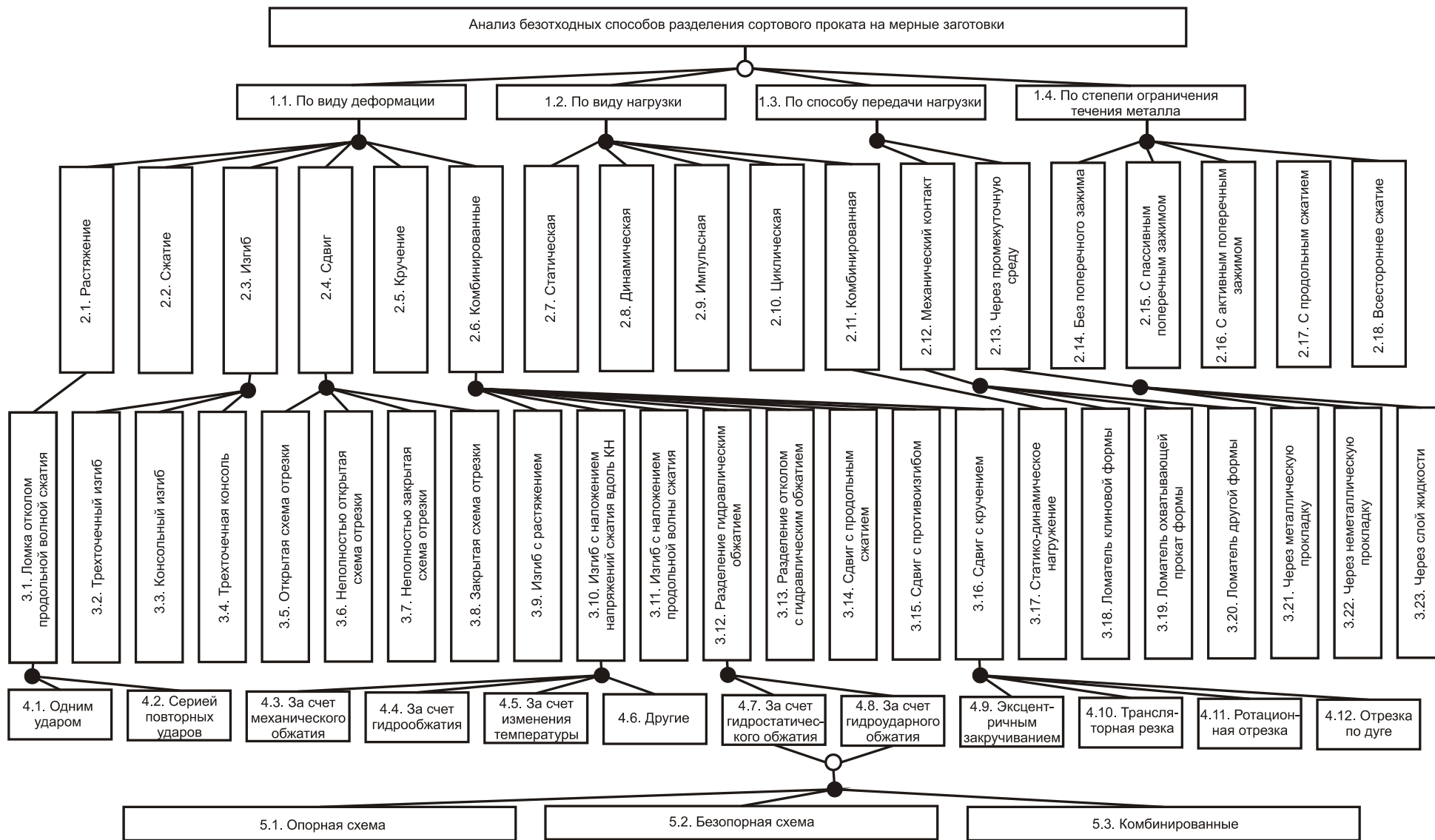


Рисунок 1.1 – Граф анализа безотходных способов разделения сортового проката [20]

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.

Ломка проката отколом (3.1)(см. рис. 1.1) – одно из перспективных направлений в развитии способов получения заготовок[7]. Под ломкой проката отколом понимают специфический вид разрушения по схеме растяжения (2.1) путем отрыва в результате интенсивной ударной нагрузки. Короткий импульс сжатия, создаваемый на одной из поверхностей образца высокоскоростным соударением, распространяется вглубь и, достигнув свободной поверхности, отражается в виде волны растяжения. Данный способ можно использовать для получения, как единичных заготовок, так и одновременного разделения всей штанги на их любое количество как за счет одного ударного импульса большой амплитуды, так и за счет повторных импульсов растяжения малой длительности. Однако способ ломки проката отколом не нашел применения в промышленности прежде всего вследствие его неизученности и необходимости обеспечения высоких значений скоростей удара.

Результаты динамической (2.8) ломки изгибом(см. рис. 1.1) показали, что точность и качество получаемых заготовок существенно зависят от способа и интенсивности передачи им ломающего усилия[7]. Предпочтение следует отдать безопорной схеме нагружения (5.2), которая исключает любой вид жесткого контакта поверхности проката с инструментом, что реализовано в способах разделения ломки проката гидравлическим обжатием (3.12).

Способ ломки проката гидростатическим обжатием (4.7) («гидравлический пинч») (см. рис. 1.1) заключается в том, что прокат с нанесенным концентратором напряжений вводится в кольцевую гидрополость цилиндра и обжимается гидростатическим давлением[7].

Вследствие реализации безопорной схемы нагружения поверхность излома не имеет сколов, вырывов, макротрещин и зон пластической деформации металла. Однако оборудование с реализацией «пинч-эффекта» не нашло широкого применения в промышленности вследствие недостаточной изученности, конструктивных недоработок и существенных недостатков данного способа разделения. К ним относят: сложность герметизации гидрополости высокого давления с введенным в нее прокатом; необходимость обеспечения высоких значений критических давленийд-

ля разделения, что приводит к усложнению конструкции оборудования и повышению требований к его надежности и безопасности работы; образование утяжины в зоне гидравлического обжатия.

Разрушение проката гидродинамическим давлением при реализации способа разделения гидродинамическим обжатием (4.8) (см. рис. 1.1) упрощает проблему герметизации гидрополости, поскольку разрушение наступает даже при величине зазора между поверхностью проката и уплотнением 0,1...0,2 мм. Однако все остальные недостатки, присущие разрушению гидростатическим обжатием, в данном способе не преодолены [7]. Поэтому получение геометрически точных заготовок способом ломки может быть достигнуто только при одновременном принятии в определенном сочетании дополнительных мер, повышающих хрупкость, например: создание дополнительных растягивающих напряжений в зоне действия концентратора напряжений, увеличение скорости и интенсивности нагружения, нанесение эффективно действующих концентраторов напряжений.

Разделение сортового проката способом отрезки сдвигом (2.4) (см. рис. 1.1) 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 – стоимость оборудования и оснастки. При этом технологический процесс требует нагрева проката перед отрезкой до температуры 300...900 °С, 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 размерами сечений не более 80...160 мм. Отрезка сдвигом не всегда обеспечивает требуемое качество заготовок, особенно при раскросе высокопрочных штамповых и инструментальных сталей.

В последние годы проведена большая работа по изучению и совершенствованию отрезки сдвигом сортового проката на территории стран СНГ (в 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. разработаны основы теории отрезки сдвигом, определены оптимальные параметры процесса, предложены новые схемы поперечного и продольного разделения сортового проката, созданы различные конструкции ножниц и штампов [8; 10; 21].

Путем охлаждения, а также нагрева (4.5) (см. рис. 1.1) до температурных “зон хрупкости” (синеломкости) можно снизить пластичность металла, сократить этап пластической деформации и, следовательно, уменьшить искажения геометрической формы разделяемых заготовок.

В работе Соловцова С. С. [8] показано, что все стали можно разделить на три группы по характеру изменения пластичности при снижении температуры.

Группа 1 – стали, показатели пластичности которых резко снижаются в определенном узком интервале температур (низкоуглеродистые стали).

К группе 2 относятся стали, характеристики пластичности которых с понижением температуры уменьшаются монотонно, например: 40ХНМА, 1Х13, 2Х13 и др.

К группе 3 относятся стали, характеристики пластичности которых с понижением температуры изменяются незначительно (например, стали марок 45, 12Х18Н9Т).

Применительно к широко используемым углеродистым сталям наиболее радикальный вид термообработки – закалка, которая сопровождается изменением структуры металла, образованием микро- и макротрещин и появлением остаточных внутренних напряжений.

Однако на практике способы изменения пластичности за счет нагрева или охлаждения проката не нашли применения из-за низкой производительности, дополнительных затрат на нагрев и охлаждение, необходимости наличия дорогостоящего оборудования [7;8].

Направление и скорость развития трещины определяется разрушающими напряжениями, величина и ориентация которых зависит от упруго-напряженного состояния в зоне разрушения. При этом существует корреляция между скоростью распространения трещины и пластической деформацией в ее вершине [7].

Разрушение проката в ортогональном сечении растяжением (2.1) или кручением (2.5) (см. рис. 1.1) требует сравнительно высоких сил нагружения, тогда как из-за возникающих задиров торцов и сваривания внешних волокон качество заготовок в целом не соответствует требованиям производства и в значительной мере зависит от физико-механических свойств разделяемого материала.

Наложение внешних сил поперечного сжатия (2.15, 2.16) (см. рис. 1.1) при отрезке сдвигом обеспечивает уменьшение в зоне утяжины растягивающих напряжений, что приводит к сужению очага пластической деформации в зоне реза, изменению направления трещины скалывания (начальный угол отклонения трещины убывает), повышению качества разделяемых заготовок. Прикладывая силу поперечного сжатия при разделении проката способом холодной ломки изгибом, например, создавая гидравлическое радиальное сжатие прутка и заготовки, можно прогнозировать стабилизацию роста трещины [7]. Однако конструктивная реализация этой схемы нагружения усложнена и не нашла применения на производстве при холодной ломке проката изгибом.

Под действием сил продольного сжатия (2.17) (см. рис. 1.1) при отрезке сдвигом сортового проката по закрытой схеме (3.8) отделение заготовки происходит пластическим сдвигом без образования трещины скалывания. Торцы отрезанных заготовок имеют плоскую гладкую поверхность. Однако данная схема разделения не нашла практического применения из-за схватывания металла проката и ножей, что приводит к образованию дефектов на контактных поверхностях и быстрому износу инструмента [8].

В результате исследований выявлено, что простые процессы разрезки, при которых разделение проката осуществляется путем поступательного перемещения подвижного ножа относительно неподвижного, не могут обеспечить геометрической точности заготовок, необходимой для последующего использования заготовок в операциях объемной штамповки без их доработки.

Необходимость доработки геометрически неточных заготовок, изготавливаемых простыми процессами разрезки, привела к разработке комплексных заготовительно-разделительных процессов (КЗРП) (2.6) (см. рис. 1.1)[22;23], в которых удачно сочетаются разделительный переход с возможностями пластической деформации отрезанной заготовки для повышения ее геометрической точности.

Возможны два варианта реализации КЗРП: 1 — пластическая деформация прутка редуцированием или высадкой и последующая отрезка заготовки; 2 — отрезка заготовки от прутка и дальнейшее ее деформирование осадкой или выдавливанием.

Оба варианта КЗРП могут осуществляться либо в одном штампе, устанавливаемом на прессе, за один ход ползуна, либо в нескольких штампах за 2...3 перехода в целях обеспечения простоты оснастки и удобства ее эксплуатации и обслуживания.

Исследования КЗРП, проведенные в Станкине, позволили установить, что комплексные процессы «отрезка сдвигом – закрытая продольная осадка», «отрезка сдвигом – поперечное выдавливание» и «отрезка сдвигом – закрытая поперечная осадка» наиболее пригодны для получения точных заготовок ($L/d \leq 1$) с диаметром сечения до 60 мм из мягких алюминиевых сплавов, меди, пластичных сталей. Заготовки разных форм (со скругленными кромками, фасками, наметками на торцах) и размеров используются в автоматизированном производстве.

Заготовки, изготавливаемые с помощью КЗРП, при оптимальных технологических параметрах имеют высокую точность формы и размеров благодаря формоизменяющему переходу, на котором устраняются различные геометрические искажения: продольная и поперечная утяжины, углы скоса торцов, неровность и шероховатость поверхности разделения.

Кроме того, в процессе продольной осадки или поперечного выдавливания на торцах заготовок можно формировать рельефные выступы, радиусные впадины или конические наметки для удобства центрирования пуансонов, реализующих дальнейшую объемную штамповку.

Одним из простых движений ножей является вращательное движение. При разделении кручением (3.16) (см. рис. 1.1) поверхность разделения лучше, чем при трехточечном изгибе (3.2), но имеет заметную дисплицацию. Кручением можно разделять как хрупкие, так и вязкие стали, но качество поверхности торцов заготовок зависит от механических свойств материала.

Одной из перспективных комбинированных механических схем деформации при разделении проката является схема отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах (разновидность неполностью закрытой отрезки) (4.9) (см. рис. 1.1) [24], при которой подвижный втулочный нож перемещается относительно неподвижного по окружности радиусом $R = (0,3...1,0)d$ и выполняет отрезку.

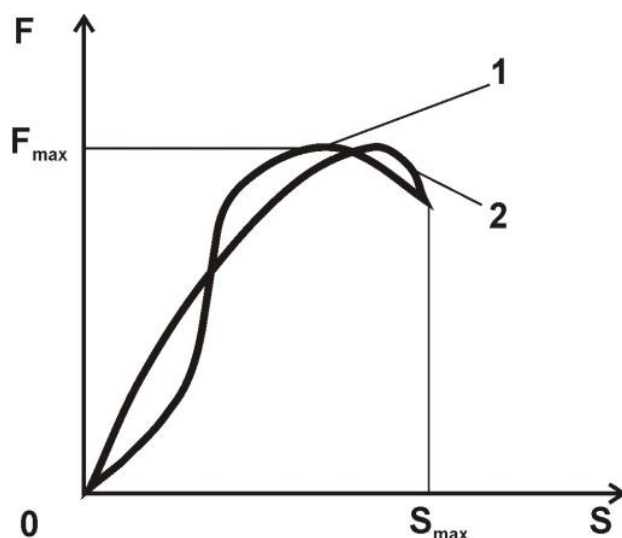
При этом отрезаемая часть осуществляет круговое движение вокруг оси, смещенной по отношению к оси разрезаемого проката на определенное расстояние – величину эксцентриситета e , который не превышает величины радиуса проката r . Данный способ отрезки является совмещенным процессом отрезки сдвигом и кручением и объединяет положительные стороны обоих процессов. Образующийся до начала разрушения в плоскости реза естественный концентратор напряжений в виде пластического пояска обеспечивает стабилизацию траектории трещины разрушения. Однако сама поверхность разделения характеризуется ступеньками и наплывами, а оборудование для осуществления этого движения – сложное по конструкции и требует доработки.

В некоторых случаях движение ножа может осуществляться с уменьшением радиуса вращения, что приводит к еще одному движению – по спирали (4.10–4.12) (см. рис. 1.1).

1.3 Основные аспекты физики и механики безотходного разделения сортового проката

Особое положение среди техпроцессов обработки металлов давлением (ОМД) занимают разделительные операции. Процесс отрезки начинается после прохождения инструментом пути S , на котором выбираются зазоры и происходит упругая деформация инструмента и машины, когда сила достигает максимума F_{max} (рис. 1.2). Далее от F_{max} идет спад силы

по мере уменьшения оставшейся площади среза. Поэтому для разделительных операций выбирают либо гидропрессы, либо механические (кривошипные) прессы. 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.



1 – вырубка – пробивка, 2 – разрезка прутков

Рисунок 1.2 – Типовой график разделения [25]

Технологические процессы сдвиговой отрезки и холодной ломки проката характеризуются следующими этапами [8; 10;26–29]:

- 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 [30].

На первом этапе для сравнительно точного по сечению проката ход может быть снижен до минимума (например, до $0,05...0,10d$, где d – диаметр заготовки).

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...200 МПа**, длину силовой цепи – **20...30d**, материал деталей – сталь с модулем упругости **$2 \cdot 10^5$ МПа**, то получим величину хода на этой фазе сдвиговой отрезки **0,01...0,03d**.

На третьем этапе отрезки величина хода зависит от свойств материала отрезаемой заготовки и для большинства сталей её можно принять **0,10...0,15d** [8;10].

На четвертом этапе отрезки величина хода также зависит от пластических свойств материала проката и её можно принять **0,10...0,20d**.

На пятом этапе для гарантии разделения проката и возможной механизации удаления отрезанной части проката величину хода можно принять **0,50...0,75d**. Если просуммировать величину хода на всех этапах отрезки, то ход инструмента составит **1,0...1,1d**, при этом на возрастание силы приходится **0,10...0,15d**, на спад силы – **0,10...0,20d**.

Наиболее интересными для исследования являются 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 прессы начинает перемещаться, импульсно растягивая анкерные болты. При этом возможно разрушение фундамента и просаживание прессы. 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 [28]. В результате этих явлений мощность прессового оборудования используется неполностью.

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 – $k_y < 0,4$ [26–29].

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 [28]. В технической литературе [26–29] имеются сведения о величине энергии упругой деформации станины и привода машины. Составляющая потеря упругой деформации кривошипных машин для разделительных операций 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 [28].

В процессе экспериментальных исследований на прессе П452 установлено, что при силе вырубki 560 кН сила отрыва фундаментных болтов составила 230 кН. По данным ВНИИ метмаша, на гидравлическом прессе с наибольшим рабочим усилием 4 МН время исчезновения технологической нагрузки при разделительных операциях в производственных условиях было менее $4 \cdot 10^{-4}$ с [28;29].

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...0,7** от силы деформирования.

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

1.4 Современные подходы к реализации способа холодной ломки изгибом

В литературе [7;12;31–38] приведены рекомендации по реализации процесса холодной ломки изгибом, которые различаются между собой, так как даны специалистами из разных областей науки и техники.

Каковы же технические и физические условия создания оптимальной схемы холодной ломки проката путем распространения в нем быстрой трещины? Прежде всего, схема должна обеспечивать минимальную работу разрушения. Одновременно с целью получения высокого качества поверхности раздела, должно быть реализовано распространение трещины по вполне определенной, заранее заданной траектории. При этом желательно частичное или полное исключение зон пластической деформации в местах приложения разрушающего усилия и под опорами. Необходимо стремиться к уменьшению величины вырывов металла, макронеровностей поверхности разрушения, а также макро- и микротрещин. Безусловно, необходимо, чтобы не происходило структурных изменений в объеме металла, подвергнутого разрушению. К перечисленным можно добавить и требование об отсутствии остаточных напряжений в прокате. Что касается оборудования для холодной ломки, то оно должно быть предельно простым по конструкции и дешевым. Некоторые схемы холодной ломки изгибом можно реализовать путем модернизации существующего кузнечно-прессового оборудования, а другие, в силу новизны технологических решений, требуют специализированного оборудования ударного действия.

Хрупкая трещина по своим потенциальным возможностям — идеальный инструмент для безотходного деления 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 деления, а также оборудования для их реализации [39].

Предпринимая попытки стабилизировать разрушение, необходимо понять, почему обычно стабильность отсутствует. Причина состоит в том, что нагрузка воздействует не непосредственно на трещину, а через материал детали. В этом материале в свою очередь накапливается упругая энергия, и когда в процессе разрушения эта энергия освобождается, ею не всегда можно управлять. Глюклих [11] исходит из известного условия распространения трещины

$$-\frac{\partial U}{\partial c} = \frac{\partial W}{\partial c}, \quad (1.1)$$

где U и W — упругая энергия, накопленная и релаксированная соответственно; c — длина трещины. По его мнению, в обычных условиях трещина, как правило, нестабильна. Однако имеются исключения, когда трещина остается стабильной, даже если удовлетворяется приведенное выше выражение. Именно эти случаи и представляют интерес с точки зрения использования теории процесса в инженерной практике.

Существуют три условия достижения стабильности:

1 Отношение $\partial W/\partial c$ непостоянно, но быстро возрастает с длиной трещины c . При этом, несмотря на то что $-\partial U/\partial c$ увеличивается с ростом c , неравенство $-\partial U/\partial c < \partial W/\partial c$ выполняется.

2 Отношение $-\partial U/\partial c$ не зависит от c , т. е. движущая (разрывающая) сила не увеличивается.

3 Отношение $-\partial U/\partial c$ является функцией, уменьшающейся с длиной трещины c , т. е. разрушающая сила уменьшается.

Первое условие (возрастание $\partial W/\partial c$ с длиной трещины) реализуют следующим способом. Образец, содержащий трещину, нагружают до тех пор, пока не становятся равными скорости изменения накопленной и рассеянной упругих энергий. Затем следует период роста трещины, т. е. этап нестабильности. При этом затраты энергии превышают ее поступление. Поэтому для дальнейшего продвижения трещины требуется возрастание внешней нагрузки. По достижении некоторых значений напряжений σ опять устанавливается равновесие и разрушение останавливается и т. д. Таким образом, при продвижении трещины чередуются стадии стабильности и нестабильности. Величина потребляемой энергии зависит от механических свойств материалов. В пластичных материалах энергия возрастает в результате увеличения зоны текучести в вершине трещины. Энергия, расходуемая на пластическую деформацию, пропорциональна размерам трещины или, что тоже самое, $\partial W/\partial c$ увеличивается с длиной трещины c . Аналогичное явление может наблюдаться и при отсутствии увеличения зоны деформации лишь вследствие упрочнения. В хрупких материалах потеря энергии может быть, в частности, связана с образованием систем микротрещин впереди магистральной.

Если все сказанное выше перевести в практическую плоскость, то можно сделать вывод, что стабильность траектории трещины определяется, во-первых, свойствами материалов. Благодаря им сопротивление разрушению растет с длиной трещины и отодвигает катастрофическое неуправляемое разрушение, если не исключает его вообще. С другой стороны, введение в материал пластифицирующих добавок снизит скорость трещины, но увеличит величину пластической деформации. А во-вторых — характером изменения нагрузки во времени. Очевидно, что знакопеременная циклическая нагрузка здесь подходит как нельзя лучше.

Второе условие стабилизации — создание ситуации, при которой отношение $-\partial U/\partial c$ не увеличивается с длиной трещины, а является достаточно независимым от него. Между разрушающим усилием и длиной трещины связи нет. По мнению Глюклиха, это означает, что в условиях сжатия трещина может иметь любой размер и оставаться стационарной. Именно такого рода равновесие он и называет нейтральным. Однако, учитывая, что в реальных материалах рассеяние энергии происходит посредством различных механизмов, можно считать, что равновесие этого вида способно оказаться и устойчивым. Практически это означает, что необходимо создать такое внешнее наведенное макроскопическое поле над всеми случайными упругими полями и эпизодами, которое подавляет все другие поля и обеспечивает однородное напряженное состояние во всем районе распространяющегося разрушения.

Третье условие получения стабильной трещины обеспечивается при отношении $\partial U/\partial c$, убывающем с длиной трещины c . Выше говорилось о том, что спонтанность связана с упругим резервуаром нагруженной системы. Следовательно, для того, чтобы трещина была управляема, нужно убрать этот посредствующий элемент и нагружать трещину непосредственно. Это означает, что нужно иметь дело с маленькими образцами, острыми концентраторами и по возможности более хрупкими материалами. В энергетически изолированном образце, когда внешняя сила полностью контролируется, а потребление энергии определяется поверхностной энергией и пропорционально длине трещины, может сложиться положение, при котором движущая трещину сила постоянно уменьшается, способствуя тем самым стабилизации трещины. Эта идея положена в основу метода Бенбоу и Реслера о влиянии на направление и устойчивость трещины поля сжимающих напряжений, приложенного вдоль ее трассы. Практически это означает создание узкого деформированного коридора, обеспечивающего продвижение трещины в необходимом направлении и по определенной траектории. Наличие обжимающих усилий вокруг траектории возможного разрушения создаст своеобразный волновод, внутри которого и будет происходить разрушение, так как сжимающие напряжения являются физическим препятствием. Узкий коридор такого рода позволит существенно стабилизировать трещину и улучшить качество поверхностей разрушения. Во-первых, сжимающие напряжения, которые возникнут по всему сечению образца, заставят трещину идти точно по заданному направлению. Во-вторых, при внешнем обжиге в стали возникают растягивающие напряжения, стремящиеся разорвать образец по оси. Они сравнительно невелики, но все же содействуют разрушению и подталкивают трещину.

Очень важно вести холодную ломку металла так, чтобы не создавать в нем серьезной пластической деформации. При этом могут возникнуть системы из многих микро- и макротрещин. В настоящее время разработана методика оценки пластичности проката, позволяющая определить условия, при которых обеспечивается удовлетворительное качество заготовок [40; 41]. Методика построена на сравнении диаграммы пластичности данного материала с областью допустимых для данного процесса значений пластических свойств. Для уменьшения искажений формы сечения проката, формирующихся на стадии изгиба, предшествующего появлению трещины разрушения, необходимо исключить в зоне растяжения выход пластической деформации на наружную поверхность вне концентратора. Ниже приведены рациональные значения параметров процесса, позволяющие решить поставленную задачу.

1 Все области очага растут с увеличением угла изгиба проката φ , поэтому важно, чтобы трещина разрушения образовывалась при минимальном φ , когда искажения развиты слабо. Угол изгиба не должен быть больше $\varphi \cong 0,14$ рад.

2 Плечо приложения нагрузки L рекомендуется выбирать меньшим и в диапазоне $2,4 \leq L/H \leq 4$, где H – толщина заготовки.

Указанные направления совершенствования реализованы в новых схемах ломки: реализация знакопеременного циклического нагружения при малых углах изгиба проката за счет увеличения плеча приложения нагрузки [42], обеспечение жесткой схемы нагружения для более раннего зарождения трещины разрушения (изгиб с растяжением [43]).

Если трещин много, то разрушение идет либо одновременно из многих центров, либо осложняется вследствие взаимодействия основной разделяющей магистральной трещины с другими. И в том, и в другом случае поверхность разрушения получается ущербной. Во избежание этого на прокат заранее наносят концентратор напряжений, который обеспечивает зарождение трещины в плоскости разделения и облегчает ее подрастание до критических размеров. При этом другие трещины заранее обречены: они обязательно «проиграют» магистральной. Глубину концентратора напряжений ΔH целесообразно принимать больше минимально допустимой $\Delta H/H > (\Delta H/H)_{\min}$; $(\Delta H/H)_{\min} \cong 0,05$. Если разрушению проката предшествует изгиб на угол $\varphi > 0,14$ рад, следует увеличить ΔH . Угол раскрытия надреза α_0 , концентратора напряжений и радиус закругления его вершины r целесообразно принимать исходя из условий $\alpha_0 < 0,4$ рад и $r/H < 0,006$ [40; 41]. Для повышения в вершине надреза эффекта концентрации напряжений целесообразно выполнять концентраторы, имеющие зубчатую форму дна [44].

Удар по прокату жестким пуансоном приводит к искажению формы заготовок в зоне их локального соприкосновения вследствие больших величин контактных напряжений, а также к образованию сколов, вырывов металла, микро- и макротрещин при разделении хрупких сталей. Введение между поверхностью проката и инструмента промежуточной среды в виде металлической прокладки позволяет улучшить качество излома и всей заготовки в целом. Наиболее эффективной и технологически удобной средой для передачи прокату динамической нагрузки является жидкость.

При разрушении по металлу движутся многочисленные группы упругих волн. Природа их различна, и падать на поверхность образца они могут под любыми углами, следовательно, и отражаются они произвольно. Потому взаимодействие их с трещиной в такой степени многовариантно, что предсказать его с достоверностью очень трудно, поэтому трещина далеко не всегда выходит на поверхность под прямым углом. Нужны специальные подходы, чтобы исключить влияние отраженных волн на растущую трещину. В работах [17;45;46] Высоцкого Е. Н. и Гришаева В. В. рассматривается предпочтительное направление распространения трещины, которое обусловлено направлением наибольших растягивающих напряжений и может быть определено по формуле

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (1.2)$$

где α – угол между нормалью к площадке наибольшего растягивающего напряжения и осью OX;

τ_{xy} – касательные напряжения;

σ_x, σ_y – растягивающие и сжимающие (со стороны опоры) напряжения в окрестности предполагаемой плоскости разделения.

Авторы сделали вывод о том, что условие $\sigma_x - \sigma_y > 0$, по существу, является критерием устойчивости траектории трещины. Если $\sigma_x - \sigma_y < 0$, трещина распространяется неустойчиво. С увеличением плеча L создается ситуация $\sigma_x - \sigma_y = \sigma_x - (\sigma_y^- + \sigma_y^+) > 0 < 0$ и трещина уходит в сторону, т. е. распространяется неустойчиво.

Чтобы трещина не успела достигнуть зоны сжимающих напряжений и отклониться, необходимо, чтобы время распространения трещины было не менее чем в три раза больше четверти периода свободных колебаний деформируемой части образца: $\tau > 3T/4$, где τ – полное время распространения трещины; T – период свободных изгибных колебаний незакрепленного стержня длиной, равной плечу приложения нагрузки. При неравных плечах приложения нагрузки трещина уходит в сторону большего плеча вследствие того, что с его стороны под опорой уровень сжимающих напряжений ниже, чем в коротком плече. При консольном нагружении,

если свободный конец достаточно короткий $L < 2,5d$, то трещина уходит под опору, но финиширует на кромке опоры; при $L > 2,5d$ трещина уходит в свободную часть стержня.

На картину развития поля вблизи опоры несимметрию вносит разность инерционных сил, создаваемых ускоренным движением недеформированных участков образца. Более короткий конец прижимается к опоре меньшей силой инерции, чем длинный, и трещина отклоняется в сторону короткого недеформированного конца.

Наличие эффективного концентратора напряжений позволяет увеличить длину плеч приложения нагрузки без ущерба для качества поверхности разрушения.

На основании вышесказанного авторы [17;45;46] делают вывод, что эффективным путем повышения геометрической точности получаемых заготовок (сохранения прямолинейности траектории трещины) является снижение скорости роста трещины. С другой стороны, скорость трещины должна быть возможно большей с целью понижения энергоемкости раскола. При этом она не должна быть чрезмерной во избежание появления сложного рельефа на поверхности разрушения. Предпочитают диапазон от 1000 до 1500 м/с. Здесь и энергоемкость низка и трещина еще достаточно устойчива.

На траекторию трещины влияют внутренние остаточные напряжения, особенно если они меняются от точки к точке. Сложнее переход трещины из зерна в зерно стали, создающей мелкую шероховатость раскола. Чувствительна трещина и к структурным составляющим. Однако при скорости трещины 1000 м/с и выше трещина способна одинаково успешно расти и по ферриту, и по перлиту. При таких скоростях трещина становится хрупкой и режет любые компоненты сталей. Ухудшают поверхность раскола дислокации, межзеренные границы и другие дефекты в стали. Можно считать, что самые мельчайшие неровности на срезе проката не могут быть меньше размера зерна в стали.

На основании вышесказанного можно сформулировать основные требования к процессу разделения:

1 Низкая энергоемкость процесса за счет:

- минимальной пластической деформации при разрушении;
- динамического (импульсного) приложения нагрузки;
- изменения температуры (хладноломкость).

2 Высокое качество получаемых заготовок за счет:

- обеспечения управляемости траекторией трещины;
- исключения больших пластических деформаций при разрушении;
- отсутствия больших контактных напряжений;
- исключения металлического контакта инструмента и заготовки;
- использование в качестве рабочего тела жидкости.

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.

К оборудованию для разделения сортового проката предъявляются следующие требования: высокие производительность, коэффициент полезного действия (КПД), жесткость, надежность и долговечность; простота конструкции и низкая стоимость; достаточная степень механизации и автоматизации; минимальные габариты, вес, эксплуатационные расходы и простота обслуживания.

1.5.1 Оборудование и оснастка для холодной ломки изгибом

Устройство хладноломов, выпускаемых отечественными и зарубежными заводами, отличается решением комплексной задачи холодной ломки изгибом проката в один цикл, конструктивным выполнением зоны приложения нагрузок в плоскости разделения и применением вспомогательных приспособлений. Все имеющиеся в настоящее время хладноломы выполнены на основе типового кузнечно-прессового оборудования или гидравлических прессов, специально спроектированных для этих целей.

Отметим базовую конструкцию технологической части хладноломов. В неё входят: опорные призмы для создания в прокате изгибающего момента за счет сил со стороны привода, узел мерного дозирования длины заготовки и механизм нанесения на прокат концентратора напряжений. В качестве примера рассмотрим конструкцию хладнолома с вертикальной компоновкой. Прокат перемещают по наклонному рольгангу к опорным призмам до упора, который предотвращает самопроизвольное горизонтальное перемещение прутка в процессе ломки. Главным недостатком этой конструкции является дифференцирование операций “нанесение концентратора напряжений” и “холодная ломка изгибом”, что предопределяет низкую производительность труда и невысокое качество разделяемых заготовок. Работа хладнолома сопровождается ударами прутка по рольгангу [5].

Более совершенным является устройство для холодной ломки изгибом проката по схеме трехточечного изгиба, предложенное Высоцким Е. Н. в работе [47], в котором нанесение концентратора напряжений и холодная ломка изгибом осуществляются за один цикл работы машины. Устройство (рис. 1.3) 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 профилей роликов и последовательностью их расположения реализуется требуемая схема выполнения надреза и разделения.

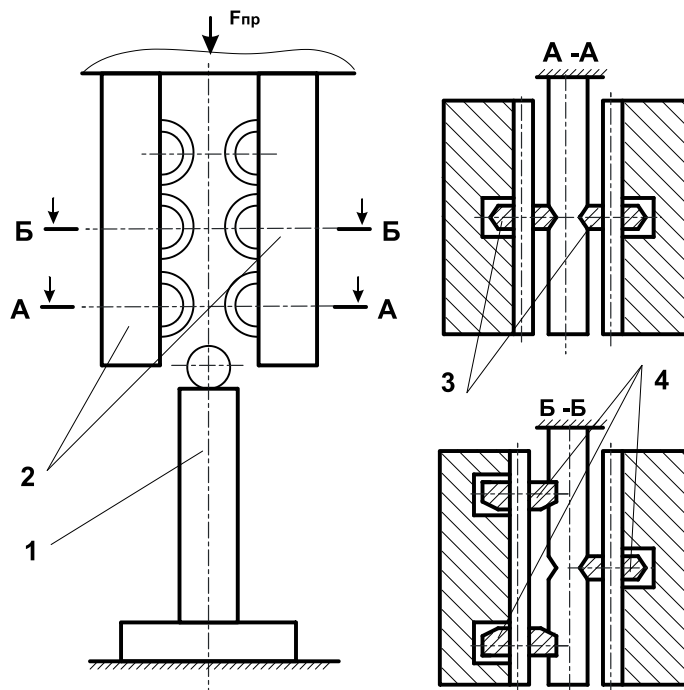


Рисунок 1.1 – Устройство для холодной ломки проката изгибом [47]

Данная установка позволяет разделять сортовой прокат диаметром от 60 до 90 мм на заготовки длиной от 140 до 900 мм из средне- и высокоуглеродистых конструкционных, легированных и инструментальных сталей [48]. Усилие для нанесения концентратора напряжений составляет 240 кН, усилие ломки – 620 кН. Габаритные размеры установки – 4180 x 2150 x 3770 мм. Допускаемая косина торцов у отрезаемых заготовок не превышает 3°, местные вырывы на торцах – не более 2 мм. Время переналадки установки на другой типоразмер проката составляет не более 15 мин.

Однако данная установка также имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего это относительно низкая стойкость роликов вследствие больших контактных напряжений. Кроме того, из-за высоких распорных сил технологическая головка имеет увеличенные габаритные размеры и невысокую жесткость. Перечисленные недостатки обуславливают невысокую надежность установки в целом.

Создано устройство, которое может быть использовано для ломки круглого проката на мерные заготовки на станках токарной группы. В процессе работы устройству сообщается подача в радиальном направлении,

а заготовке – вращательное движение. При движении устройства в указанном направлении резец прорезает в заготовке кольцевую канавку, глубина которой регулируется с помощью винта. Затем резец выходит из образованной им канавки и отгибающие ролики, взаимодействуя с поверхностью заготовки, отгибают ее конец. После определенного числа циклов вращения заготовка отделяется от прутка [49].

Использование статических нагрузок требует мощных кривошипных или специальных гидравлических прессов. Выгодно отличается в этом смысле использование динамических нагрузок, позволяющих уменьшить габариты и металлоемкость привода, снизить работу разрушения проката и расширить диапазон разделяемых материалов. Реализация этих методов, в силу новизны заложенных в них принципов, требует специального оборудования, в котором предварительно накопленная энергия трансформируется в короткие, мощные импульсы. Эти процессы осуществляются на высокоскоростных молотах и пресс-молотах.

В качестве примера рассмотрим конструкцию импульсной установки для холодной ломки изгибом сортового проката, предложенную Борисовым В. М. [18] (рис. 1.4).

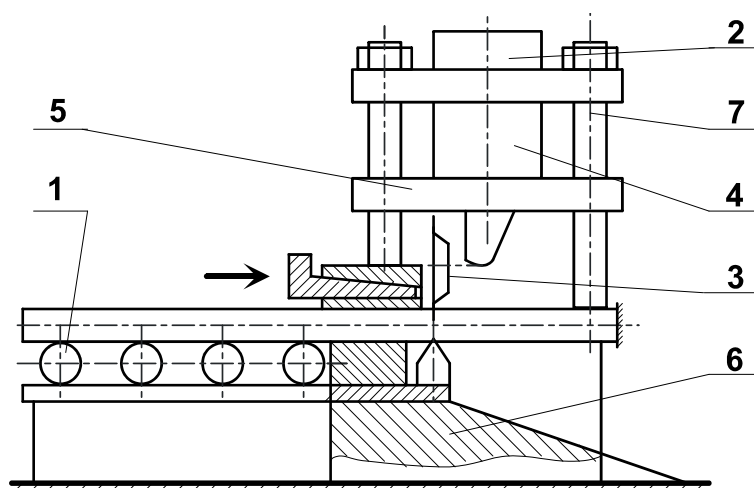
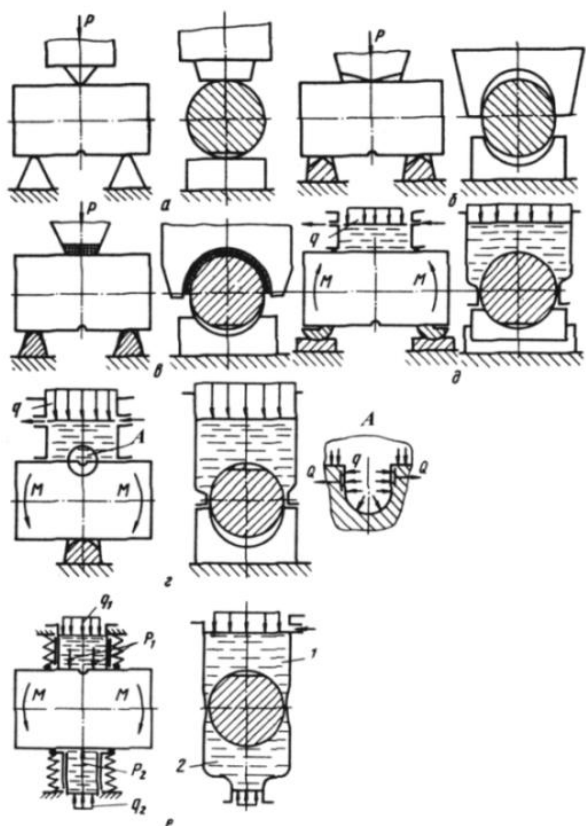


Рисунок 1.2 – Импульсная установка для холодной ломки проката изгибом [18]

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 техники безопасности и требует сложной регулировки энергии удара.

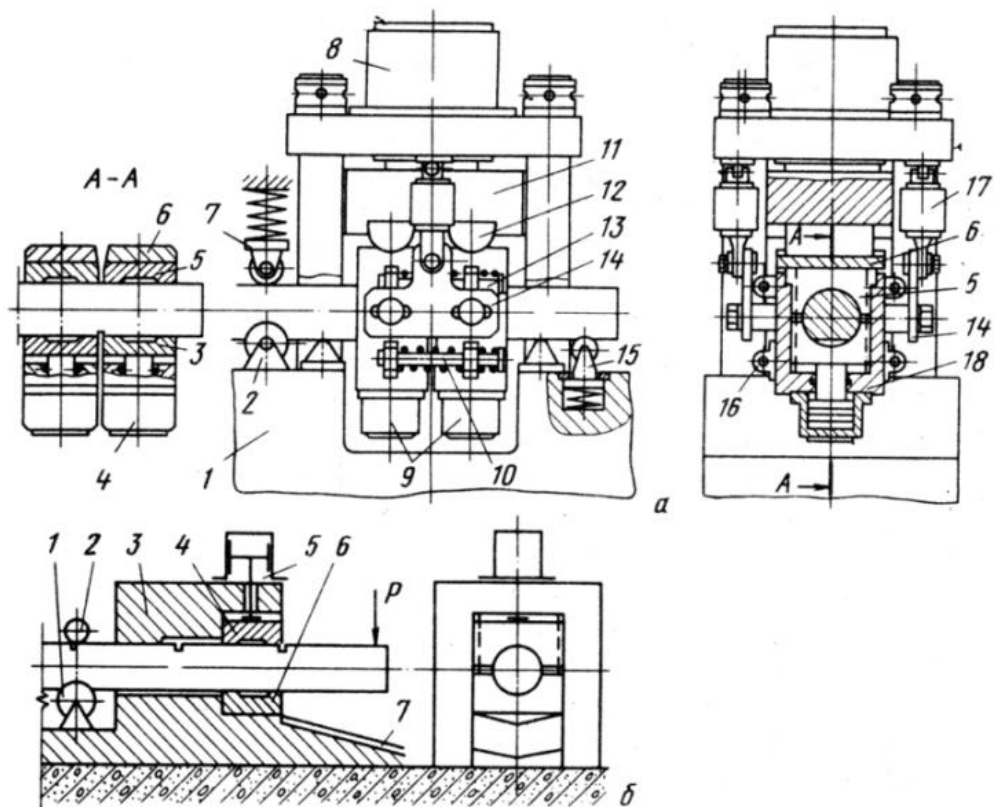
Данные недостатки преодолены в конструкциях высокоскоростных молотов и пресс-молотов с гидроупругим приводом, которые разрабатываются в ДГМА под руководством д-ра техн. наук, проф. Роганова Л. Л. Основной особенностью гидроупругого привода является использование для разгона подвижных частей и нагружения заготовки энергии упругой деформации сжатой жидкости и упругодеформируемых деталей кузнечно-прессовой машины [50;51]. 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 рабочего цилиндра; единый тип привода молотового и прессового оборудования; экологически чистое использование энергии за счет замкнутой безвыхлопной 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.

Группа исследователей: Финкель В. М., Головин Ю. И., Умрихин В. М., Родюков Г. Б. [7] предложили ряд методов (рис. 1.3) и конструкций оборудования (рис. 1.4) для их реализации.



а,б – ломка изгибом с металлическим контактом между инструментом и заготовкой; в – через промежуточную среду; г,д,е – ломка изгибом через слой жидкости; 1,2 – гидроразности; q_i – интенсивность динамической нагрузки; Q – сила расклинивания концентратора напряжений; M – изгибающий момент

Рисунок 1.1 – Схемы холодной ломки проката изгибом [7]



а – ломка по схеме трехточечного изгиба: 1 – основание; 2 – рольганг; 3 – подвижная вставка; 4 – гидроцилиндр; 5 – неподвижная вставка; 6 – крышка; 7 – ролик; 8 – электропривод; 9 – обжимающий механизм; 10, 13 – пружины; 11 – траверса; 12 – ломатели; 14 – планка; 15 – амортизатор; 16 – кронштейн; 17 – амортизатор; 18 – корпус;
б – консольная схема ломки: 1 – рольганг; 2 – ролик; 3 – корпус; 4, 6 – обжимающие вставки; 5 – гидроцилиндр; 7 – склиз

Рисунок 1.1 – Установки для холодной ломки проката гидростатическим обжатием [7]

Проанализируем основные из них.

Разделение гидростатическим обжатием. Этот способ ломки проката заключается в том, что прокат с нанесенным концентратором напряжений вводится в кольцевую гидрополость цилиндра и обжимается гидростатическим давлением (см. рис. 1.4). При этом вдоль концентратора напряжений одновременно создаются осевые растягивающие и радиальные сжимающие напряжения, в зоне излома трещина растет устойчиво в ортогональном к его оси сечении, что повышает качество поверхности торца. Шероховатость поверхности разделяемого металла не превышает размера зерна. Особенность этого метода — чрезвычайная легкость зарождения исходной трещины. Жидкость под давлением проникает в мельчайшие поры и создает дополнительное расклинивание, содействующее появлению трещины. Лучшая форма концентратора напряжений при этом — прямой

надрез. Однако оборудование предложенной конструкции не применяется на производстве из-за сложности герметизации гидрополости высокого давления с введенным в нее прокатом, а также необходимости обеспечения высоких значений критических давлений для разделения.

Разделение гидродинамическим обжатием. При реализации этого способа упрощается проблема герметизации гидрополости, поскольку разрушение наступает даже при величине зазора между поверхностью проката и уплотнением 0,1...0,2 мм (рис. 1.5). При этом разрушение начинается сразу из многих точек по всему периметру концентратора напряжений, а не в одной точке, как при гидростатическом обжатии. Увеличение величины импульса давления обеспечивает уменьшение пластической деформации при разрушении. Однако все остальные недостатки, присущие разрушению гидростатическим обжатием, в данном способе не преодолены [7].

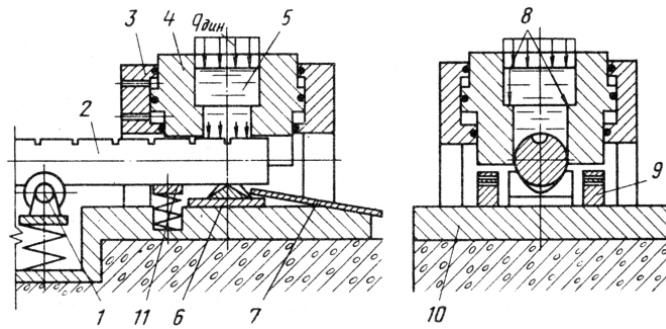
Более «экзотична» ломка металла, достигаемая в результате обжатия его мощным магнитным полем. Оно создается одновитковым соленоидом, по которому пропускается электрический импульс от батареи конденсаторов, достигающий 700 кЭ.

При этом в металле развиваются разрывающие напряжения в 0,8 ГПа. Этот метод не нуждается в уплотнениях. Более того, с его помощью, повышая энергию конденсаторов, можно, в принципе, ломать любые металлы. Но метод этот не годится для массового производства из-за своей опасности и чисто технических неудобств работы с высокими напряжениями.

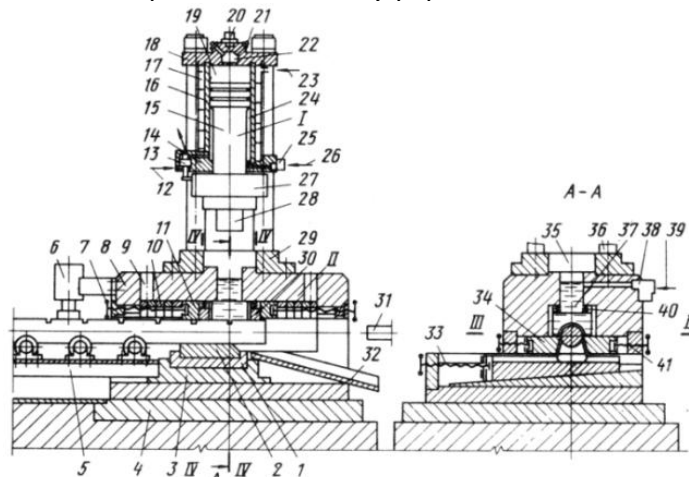
Ломка отколом. Идея метода заключается в том, что на стальной прутке длиной в несколько метров наносились концентраторы напряжений, а затем торец проката нагружали коротким продольным ударом (рис. 1.3). Например, можно стрелять стальным бойком со скоростью полета до 70...100 м/с; можно разогнать боек, используя потенциальную энергию упругой деформации сжатой жидкости или магнитным полем.

Боек, ударяя о торец проката, создает в нем волну сжатия. Волна эта распространяется до второго торца и, отражаясь от него, превращается в волну растяжения. При этом волна такого рода, как правило, быстро становится плоской. Это означает, что ее фронт по всему сечению проката ортогонален к его поверхности.

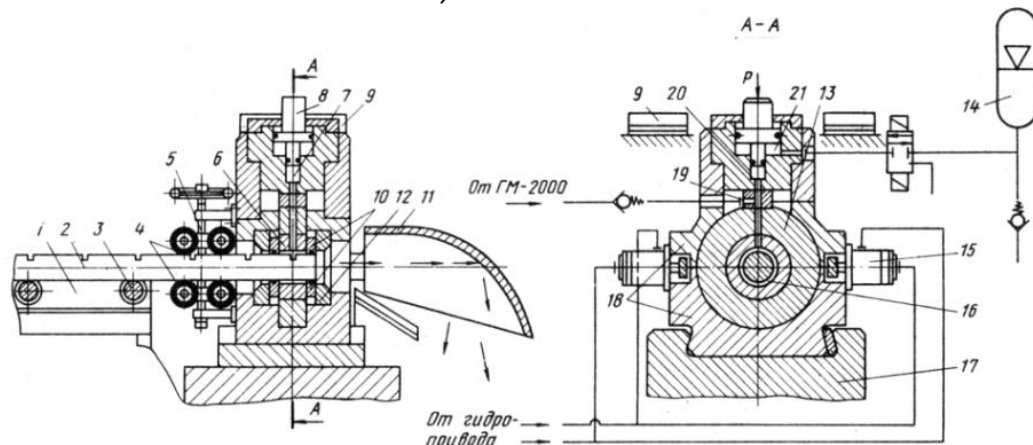
Поэтому возникающая на поверхности металла трещина распространяется точно перпендикулярно длине прутка, обеспечивая высокую геометрическую точность поверхности разрушения. Первое разрушение имеем на конце стержня по ближайшему концентратору напряжений, где амплитуда напряжений впервые превысит временное сопротивление материала.



1 – рольганг; 2 – прокат; 3 – корпус; 4 – подвижная втулка; 5 – гидрополость; 6 – опорная призма; 7 – склиз; 8 – гидрополость; 9 – буфер; 10 – основание; 11 – амортизатор

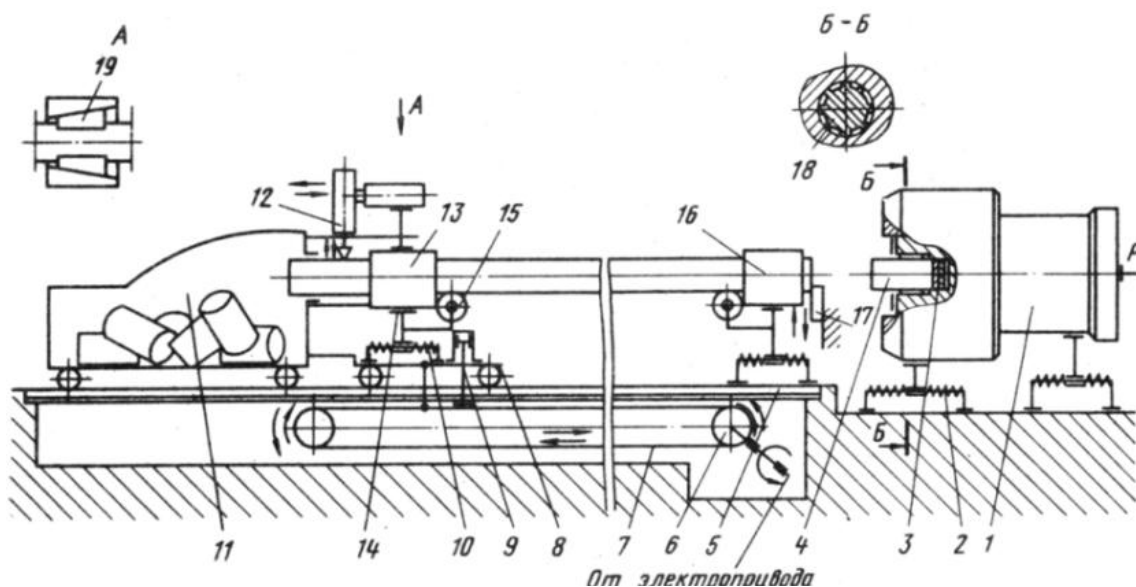


1 – направляющая; 2 – опора; 3 – основание; 4 – шабот; 5 – рольганг; 6 – пневмоцилиндр; 7 – ходовой винт; 8 – корпус; 9 – окно; 10 – упоры; 11 – призма; 12 – пневмоподвод; 13 – клапан; 14 – плита; 15 – шток; 16 – цилиндр; 17 – система охлаждения; 18 – плита; 19 – камера сгорания; 20 – клапан; 21 – электросвечи; 22 – форкамера; 23 – подача жидкости; 24 – подштоковая полость; 25 – клапан; 26 – подача; 27 – траверса; 28 – пуансон; 29 – пневмотормоз; 30 – вставка; 31 – упор; 32 – склиз; 33 – ходовой винт; 34 – призмы; 35 – буфер; 36 – колонна; 37 – гидрополость; 38 – клапан; 39 – питание; 40 – прижим; 41 – винт; I – энергопривод; II – технологическая часть; III-III, IV-IV – сечения



1 – рольганг; 2 – прокат; 3, 4 – ролики; 5 – механизм прижима; 6 – контейнер; 7 – гидрополость; 8 – плунжер; 9 – амортизаторы; 10 – вставки; 11 – ловитель; 12 – замок; 13 – корпус; 14 – пневмоаккумулятор; 15 – гидроцилиндр; 16 – гидрополость; 17 – шабот; 18 – корпус; 19 – опора; 20 – мультипликатор; 21 – пневмополость

Рисунок 1.1 – Установки для холодной ломки проката гидродинамическим обжатием [7]

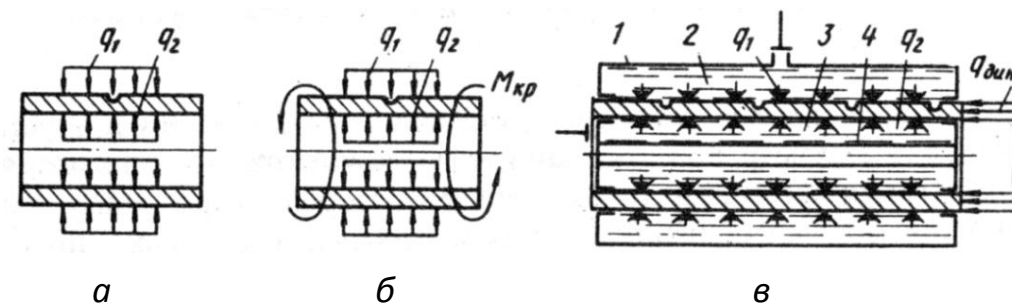


1 – пушка; 2,3,10 – амортизаторы; 4 – боек; 5 – фундамент; 6 – барабан;
7 – лента; 8 – тележка; 9 – гидроцилиндр; 11 – бункер; 12 – узел
нанесения концентратора напряжений; 13,16,19 – механизмы зажима;
14 – стойка; 15 – ролик; 17 – упор; 18 – оребрение

Рисунок 1.1 – Установка для разделения сортового проката
ломкой отколом [7]

К преимуществам ломки проката отколом относят: высокую производительность процесса вследствие возможности множественного откола; ударный характер нагрузки (позволяющий достаточно легко получать напряжения, превосходящие временное сопротивление); однородность напряженного состояния в поперечном сечении стержня, благоприятно влияющая на качество торцов заготовок; возможность получения коротких заготовок. Однако данный способ ломки проката отколом не нашел применения в промышленности из-за больших контактных напряжений на торце прутка. Например, для разделения проката из стали 45 с кольцевым концентратором напряжений с параметрами: глубиной 2 мм и радиусом закругления 0,1 мм – при комнатной температуре скорость удара превышает 120 м/с. Однако практически уже при скорости удара около 10 м/с на ударном конце стержня развивается локальная пластическая деформация.

Перспективным с точки зрения упрощения практической реализации является метод гидродинамической безопорной ломки по схеме трехточечного изгиба, где имеет место гидродинамическое обжатие (см. рис. 1.1, д), особенно при разделении труб (рис. 1.4). Однако подобные машины требуют решения задачи уплотнения необработанных поверхностей проката относительно корпуса, и их применение в промышленности является делом будущего.



а – разрушение за счет создания разности давлений жидкости внутри и снаружи трубчатой заготовки; б – заготовка дополнительно нагружается крутящим моментом; в – трубчатая заготовка дополнительно нагружается импульсом продольной силы сжатия;
1 – контейнер; 2,3,4 – гидрополости;
 q_i – статическая нагрузка; $q_{дин}$ – динамическая нагрузка

Рисунок 1.1 – Схемы нагружения трубчатых заготовок при разделении ломкой [7]

1.5.2 Оборудование для реализации способа разделения сортового проката отрезкой сдвигом

Безотходная отрезка сдвигом проката осуществляется в штампах и на ножницах. Производством оборудования для отрезки сортового проката занимаются как за рубежом, так и на территории стран СНГ такие фирмы, как: Ficer (Италия), Peddinghaus, VEB SKET (Германия), Soleco (Франция), Toyota y Dasha K.K. (Япония), ЭНИКМАШ, Воронежский СКБ КПМ, Донпрессмаш и др.

Отрезка сдвигом сортового проката на ножницах является наиболее дешевой, производительной и распространенной разделкой проката на заготовки, а в штампах – обходится дороже, но она точнее. Дополнительным преимуществом отрезных штампов перед сортовыми ножницами является возможность выполнения в них за один ход нескольких технологических операций.

Наибольший интерес для отрезки сортового проката представляет группа способов безотходной отрезки сдвигом в штампах, осуществляемая на прессах [8;52;53]. С одной стороны, данная группа достаточно изучена и классифицирована [8], а с другой – позволяет разработать и реализовать новые способы разделения, а также новые схемы оборудования и оснастки для их реализации.

Учитывая различные варианты классификации схем отрезки сдвигом, наиболее полно приведенные Соловцовым С. С. [8], рассмотрим возможные схемы приложения нагрузок к прутку и отрезаемой заготовке

(рис. 1.3). Независимо от скорости разделения, предварительно к прутку и отрезаемой его части прикладывают усилия, ограничивающие поворот и осевое смещение заготовки при отрезке.

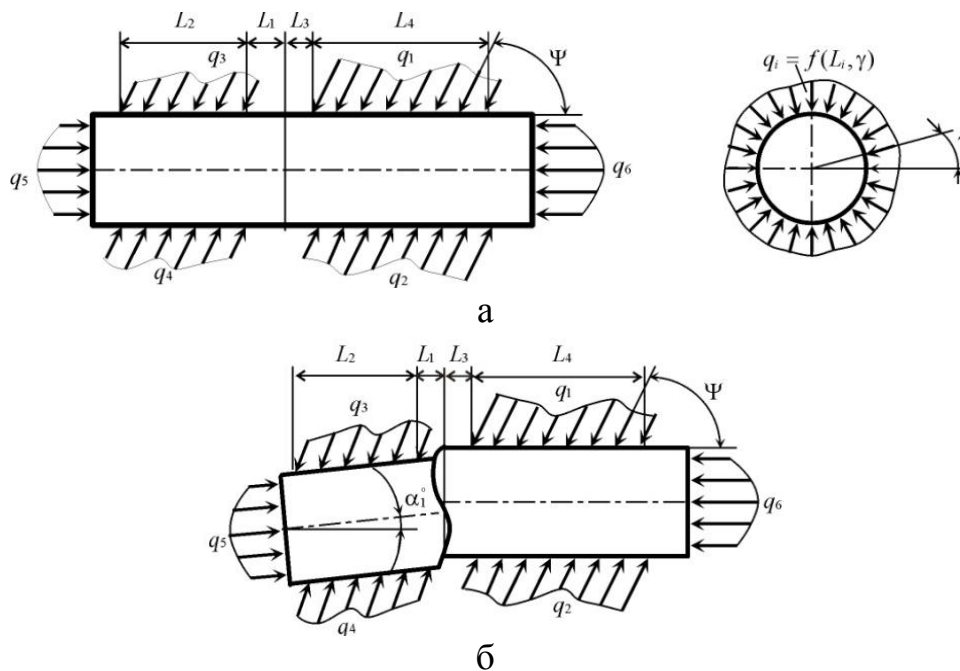


Рисунок 1.2 – Схема приложения внешних нагрузок к прутку перед разделением (а) и в процессе разделения (б)

Таким образом, информацию о схемах разделения можно представить в виде зависимости от параметров удельных нагрузок на пруток и заготовку q_i , распределения интенсивности по длине L_i , по периметру (угол γ), на торцах заготовки и прутка, от угла ψ направления нагрузок относительно образующей прутка, а также от угла α_1 поворота прутка и заготовки при разделении (см. рис. 1.2).

С точки зрения эвристики основным противоречием, которое устраняется в различных конструкциях штампов, является следующее: между инструментом и заготовкой поперечный зазор должен существовать, чтобы свободно ввести заготовку, и не должен существовать, чтобы исключить поворот прутка при отрезке и тем самым повысить качество отрезаемых заготовок. Поперечный зазор устраняется перед отрезкой с помощью различных конструкций узлов зажима за счет деформирования самой заготовки и т. д. Проанализируем конструктивные схемы поперечного зажима прутка и отрезаемой заготовки как важнейшего фактора, определяющего качество получаемых заготовок.

Для этого представим информацию в виде графа (рис. 1.3, 1.4) [54] и рассмотрим, какие схемы приложения нагрузок могут быть реализованы конструктивно.



Рисунок 1.1 – Граф вариантов поперечного зажима при отрезке сдвигом [54]

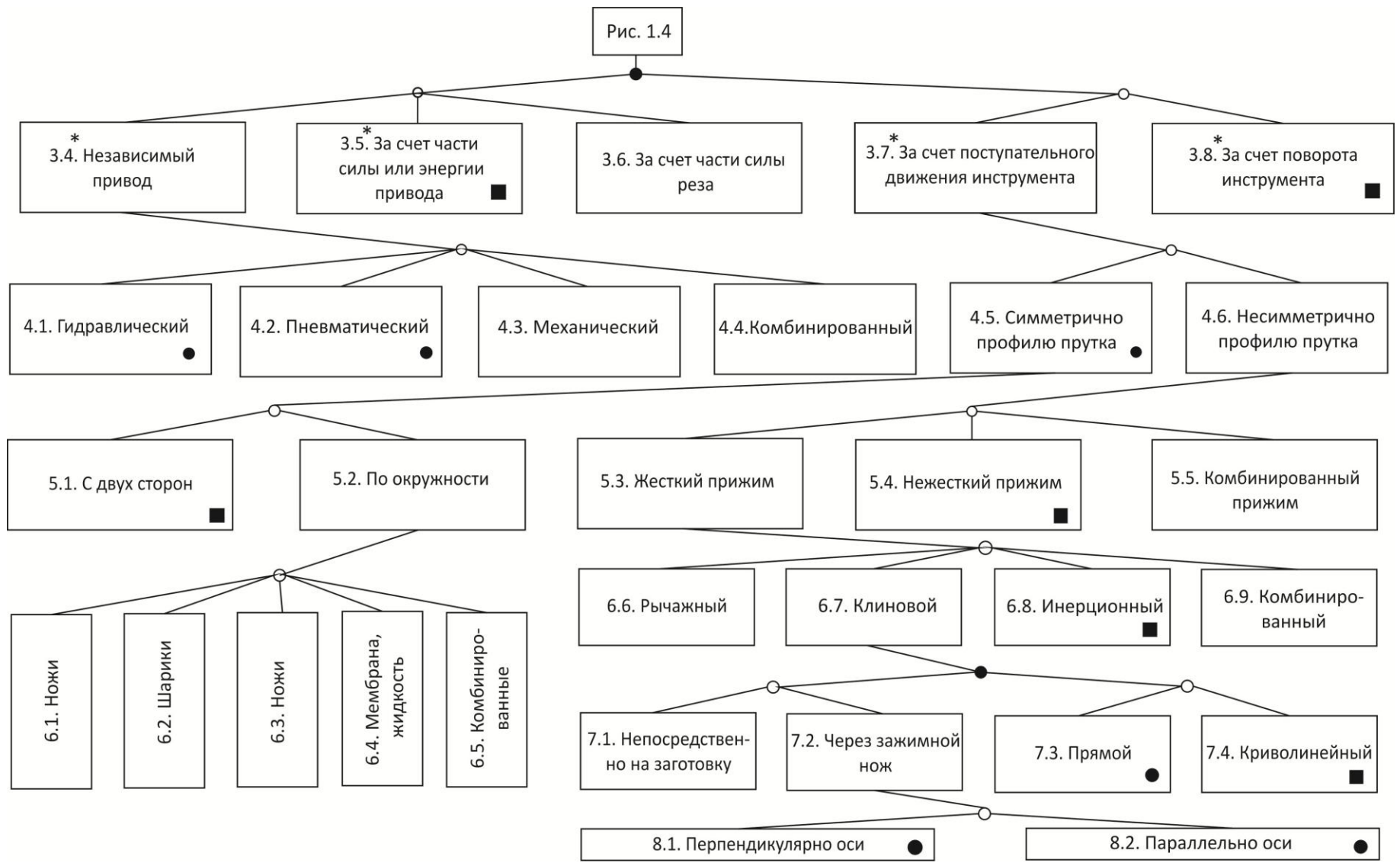


Рисунок 1.1 – Граф вариантов поперечного зажима при отрезке сдвигом [54]

Поле нагрузок, которое требуется создать $q_i = f(L_i, \gamma)$, может выступать в качестве основы для создания графа целей, а конструктивные варианты поперечного зажима проката и отрезаемой заготовки могут быть оценены экспертами с точки зрения достижения поставленных целей. Таким образом, может быть реализован на ЭВМ алгоритм метода морфологического анализа [55].

Схемы (2.1) с применением упоров (3.1), втулок (3.2) (см. рис. 1.3), ограничивающих смещение заготовки не позволяют создать нагрузки на отрезаемую заготовку и пруток перед началом разделения ($g_i = 0$). Разница между схемами состоит в том, что втулочный нож позволяет снизить радиальные зазоры и угловое смещение прутка до минимума и создать радиальные нагрузки на пруток в процессе реза. Снижению зазоров, а следовательно, и повышению точности отрезки в этом случае способствует применение калиброванного проката [8], но при этом возрастает себестоимость получаемых заготовок. Исследования высокоскоростной отрезки показывают положительное влияние инерционности заготовки на качество среза [8]. Однако данный параметр недостаточно управляем, поскольку требуются заготовки различной (отличной от оптимальной) длины и массы.

Наиболее распространены схемы с активным поперечным зажимом (2.2), а также комбинированные (2.4), например: пруток зажат (2.2), а заготовка отрезается втулочным ножом (3.2) (см. рис. 1.1).

Применение на оборудовании ударного действия схем штампов с дифференцированным зажимом проката (3.6) ограничено вследствие сложности конструктивной реализации, больших потерь на трение и чрезмерных габаритных размеров известных штампов (см. рис. 1.1).

Комбинированные методы (2.4) зажима прутка с использованием термического расширения – сжатия инструмента, подачи жидкости и другие практически не находят применения из-за низкой производительности и сложности реализации (см. рис. 1.1).

Рассматривая конструкции оборудования, обеспечивающие зажим прутка, отметим базовую конструкцию зажима, применяющуюся на ножницах, где за счет части силы привода (3.5) через упругую (гидравлическую) связь смещается верхний прижим (4.6, 3.5). Исключение поперечного зазора между прокатом и втулочным ножом (3.2) может быть достигнуто за счет редуцирования заготовки (2.3), при ее подаче в нож, за счет пластической деформации после подачи на позицию отрезки путем высадки (3.10). Однако такие схемы не нашли широкого применения в производстве из-за организационно-технических трудностей, связанных с подготовкой прутков (очистка, травление, фосфатирование) и возможности отрезки ограниченной номенклатуры металлов, обладающих относительно невысокой прочностью и повышенной пластичностью [8] (см. рис. 1.1, 1.1).

По длине отрезаемой заготовки и прутка могут быть приложены различные по величине нагрузки, в том числе вызывающие пластические деформации. К таким случаям относится нанесение концентратора напряжений за счет локальной пластической деформации прутка (4.12)(см. рис. 1.1). Перед отрезкой в пруток внедряется клиновой или роликовый инструмент в плоскости разделения, который ограничивает утяжину, создает условия для локализации очага пластической деформации, более быстрого зарождения трещины разрушения и стабилизации траектории этой трещины при разделении. Нанесение концентратора напряжений может производиться как при поступательном движении инструмента (3.12), так и при внедрении с поворотом (3.13, 3.14) [8]. Данные схемы могут быть эффективными и при высокоскоростной отрезке на пресс-молоте, так как при этом устраняются зазоры в плоскости реза.

Анализ графа (см. рис. 1.2) показывает, что как при активном вертикальном зажиме, так и при пассивном зажиме во втулочном ноже не исключается радиальный зазор в горизонтальной плоскости, хотя активный зажим снижает угол поворота прутка за счет устранения зазора в вертикальной плоскости. Это подтверждается и тем, что активный зажим не устраняет утяжину у плоскости реза, а торец получается овальным. Поэтому целесообразной представляется форма ножей, при которой устраняется поперечный зазор за счет вдавливания ножа с диаметром отверстия по минимальному допуску прутка.

Примеры конструктивной реализации рассмотренных схем разделения приведены ниже.

Высокая скорость резки прутков обеспечивается на импульсной машине ударного действия мод. ПМН, предназначенной для разделения проката диаметром от 30 до 50 мм из конструкционных, углеродистых и нержавеющей сталей. Наименьшая длина отрезаемой заготовки – **0,8d**, номинальная энергия машины – 30 кДж, скорость соударения ножа с заготовкой составляет 10...12 м/с. Производительность машины – 20...25 заг./мин. Габаритные размеры 2300 x 1000 x 2700 мм [56]. Благодаря высокой скорости деформирования металла величина очага пластической деформации в зоне прутка уменьшается, что устраняет образование макро- и микротрещин, которые присущи отрезке на пресс-ножницах.

На холодновысадочном пятипозиционном автомате **Coldmatic АКР4–5** фирмы **Hatebur**(Швейцария) предусмотрена позиция для высокоскоростной отрезки стальных прутковых заготовок под последующее холодное выдавливание. Отрезанные на этой позиции заготовки имеют параллельные торцы, незначительную овальность торцов. Высокое качество отрезаемых заготовок позволило ликвидировать операцию калибровки [57].

Разработано устройство для резки прутков на короткие заготовки ($L/d \geq 0,3$) по многоопорной схеме [58]. Режущая часть устройства представляет собой ряд втулочных ножей, собранных в корпусе без осевого зазора. Перед ножами соосно с ними расположена матрица-фильера, проталкивание прутка через которую с натягом обеспечивает постоянство размера прутка и величины радиального зазора в ножах. Отрезка заготовок осуществляется смещением подвижных ножей на величину хода, превышающую диаметр разрезаемого прутка. Точность возвращения ножей в исходное положение при обратном ходе ползуна пресса обеспечивается установкой и настройкой упоров. Отрезанные заготовки проталкиваются сквозь ножи при отведенном упоре. Подача прутка производится с помощью цангового зажима. Опробование устройства показало, что характер и качество поверхности разделения заготовок зависят от жесткости штампа и структурного состояния материала разделяемого проката. Наилучшие результаты получены на мягких отожженных медных и алюминиевых образцах. Их торцы плоские и гладкие, сколы и вырывы отсутствуют.

Хорошее качество заготовок обеспечивается при резке прутков в отрезных инструментах, устанавливаемых на прессы, выпускаемые предприятием **Kombinat Umformtechnik "Herbert Warnke"** (Германия). Пресс оснащается рольгангом и клещевой подачей, которая обеспечивает колебания объема отрезаемых заготовок до +0,5 %. Отрезной инструмент состоит из верхнего и нижнего ножей, верхнего и нижнего прижимов, а также дополнительного устройства для поддержания конца отрезаемой заготовки. Диаметр отрезаемого прутка составляет 16...60 мм, сторона квадрата – 16...55 мм. Длина отрезаемой заготовки за один ход клещей колеблется от 10 до 240 мм. Угол скоса торцов заготовок не превышает 2° [59].

Для реализации комплексных заготовительно-разделительных процессов в Станкине разработаны конструкции производственных штампов. Например, в одном из производственных штампов для выполнения комплексного процесса «отрезка – поперечное выдавливание – закрытая осадка» отрезной нож выполнен подвижным в двух взаимноперпендикулярных направлениях, благодаря чему отрезанная заготовка, находящаяся в его полости, последовательно подвергается поперечному выдавливанию и закрытой осадке. Пуансон и нож образуют инструмент для закрытой осадки. Заготовка после закрытой осадки удаляется через паз в боковой стенке штампа [22].

Анализ известных конструкций оборудования и оснастки показывает, что высокое качество реза в сочетании с высокой производительностью процесса обеспечивается при следующих условиях.

- 1 Применение дифференцированного зажима прутка.

- 2 Применение повышенных скоростей нагружения в диапазоне от 2 до 20 м/с.

- 3 Нанесение концентратора напряжений на прокат в плоскости реза.
- 4 Оснащение ножниц и штампов устройствами для автоматизации и механизации циклов загрузки, подачи, отрезки и выгрузки.
- 5 Применение устройств для дозированной отрезки.
- 6 Выбор оптимальной геометрии ножей и угла их установки.

1.5.3 Применение дифференцированного зажима проката при отрезке сдвигом

Из всего оборудования для отрезки проката сдвигом, в котором реализована схема с активным поперечным зажимом, наиболее перспективным представляется оборудование с зажимной силой, пропорциональной силе отрезки, известное под названием “оборудование с дифференцированным зажимом”. Принципиальное отличие таких схем отрезки состоит в том, что в них сила зажима прутка в ножах непостоянна по значению, а изменяется пропорционально силе отрезки. В момент образования скалывающих трещин сила отрезки F_p снижается до минимума и, следовательно, убывает пропорциональная ей сила поперечного зажима F_3 . Заготовка получает возможность отойти в осевом направлении от прутка, что предотвращает образование дефектов на торцах [8].

Исследования, выполненные в ЭНИКмаше, а также обобщение опыта эксплуатации оборудования с дифференцированным зажимом проката показывают, что необходимое соотношение F_3/F_p зависит от механических свойств разделяемого материала и возрастает с уменьшением величины $(\sigma_B - \sigma_T)/\sigma_B$. Чем больше величина F_3/F_p , тем лучше качество торцов, тем меньше вероятность образования торцовых трещин, вырывов, поперечных изломов. При $F_3/F_p > 1,5$ можно ожидать хорошего качества заготовок из высокопрочных специальных сталей и сплавов мелких и достаточно крупных сечений при отрезке сдвигом в холодном состоянии [8].

Ножницы, в которых реализован дифференцированный зажим проката, обеспечивают более высокое качество заготовок, чем, например, обычные сортовые ножницы, но вместе с тем они громоздки и металлоемки. Поэтому подробнее остановимся на анализе известных конструкций штампов с дифференцированным зажимом проката.

Отметим базовую конструкцию штампа с дифференцированным зажимом, предложенную Яшайевым С. Ш. [8;60](рис. 1.5). Пруток зажимается ножами-полувтулками 1 и 2, имеющими форму клина. Ножи заключены в ползушки 3 и 4, которые горизонтально перемещаются клиновыми соединениями. При ходе ползуна пресса вниз верхние клинья 5 и 6 перемещают ползушки 3, 4 сначала вниз, а потом горизонтально навстречу друг другу. Таким образом происходит зажим проката в ножах-полувтулках 1, 2 и окончательная отрезка заготовки.

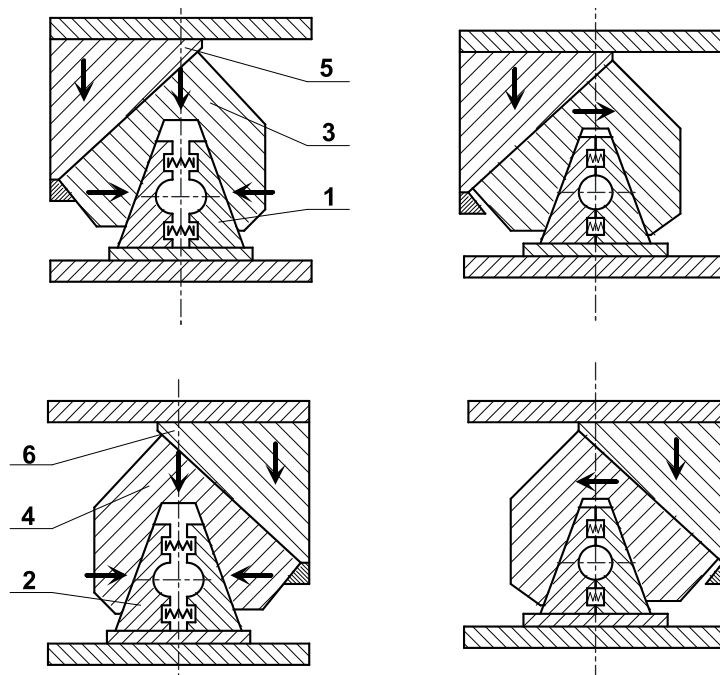


Рисунок 1.2 – Базовая конструкция штампа с дифференцированным зажимом проката [8;60]

В штампах, в которых ножи движутся во встречном направлении, происходит смещение оси проката в процессе зажима и отрезки, что приводит к усложнению конструкции подающего устройства и в целом отрицательно сказывается на качестве получаемых заготовок [53].

Штампы, в которых поперечный переменный зажим прутка и отрезка производятся в вертикальном направлении, имеют преимущество по сравнению со штампами, в которых ножи движутся горизонтально. Поскольку при этом уменьшаются потери на контактное трение, то в результате потребная сила пресса в 1,5...2,5 раза превышает силу отрезки, а также снижается износ контактных поверхностей рабочих частей из-за высоких удельных сил [8; 60].

Предпочтительной является конструкция штампа, в которой реализована комбинация постоянного и переменного углов клиновидности. Например, на этапе зажима необходимо иметь больший угол клиновидности для уменьшения хода зажима. На этапе отрезки – меньший угол для увеличения сил зажима и отрезки. Кроме того, в штампе предусмотрена возможность обеспечения изменения угла клина в зависимости от физико-механических свойств материала проката. Однако штампы такой конструкции не нашли применения на производстве из-за повышенной сложности.

Известны отрезные штампы с дифференцированным зажимом проката, в которых активный переменный поперечный зажим прутка и отрезка осуществляются с помощью одного, двух и более поворотных рычагов, несущих ножи. Соотношением плеч рычагов можно уменьшить потребную силу пресса [8]. Штампы могут различаться способом передачи нагрузки

от ползуна прессы поворотным рычагам. Преимуществом штампов с двумя рычагами, по сравнению со штампами с одним поворотным рычагом, является симметрия нагружения. Недостатками штампов с поворотными рычагами являются их невысокая жесткость, большие нагрузки на оси вращения рычагов и значительные габаритные размеры. Вращательное движение ножей в штампах требует усложнения конструкций устройств подачи проката в рабочую зону.

Отрезные штампы с наклонным перемещением ножей обеспечивают большую перпендикулярность торцов к оси заготовки, чем с вертикальным, но имеют более сложную конструкцию.

На Винницком инструментальном заводе разработан и внедрен в производство штамп с дифференцированным зажимом, предназначенный для резки прутка на заготовки в холодном или горячем состоянии [61]. На основании штампа закреплены упор и направляющие колонки, на которых установлены две обоймы. В каждой обойме размещены нож, прижим, клиновой механизм, механизм крепления ножа и фиксации прижима.

Штамп работает следующим образом. Пруток подается до упора. При ходе ползуна прессы вниз опускаются обе обоймы. При опускании первой обоймы зажимается пруток, а при опускании второй – отрезаемая часть прутка. После отделения заготовки от прутка усилие дифференцированного зажима автоматически снимается. После возврата обеих обойм в исходное положение заготовка выталкивается прутком при подаче на очередной рез.

Примером штампа с дифференцированным поперечным зажимом прутка и отрезаемой заготовки служит штамп, работающий следующим образом. Перемещающиеся вниз толкатели приводят в рабочее состояние оба поворотных рычага и ножи. Формируется очаг деформации неполностью закрытой резки сдвигом с дифференцированным поперечным зажимом прутка и отрезаемой заготовки, и происходит разделение проката за счет смещения отрезаемой части прутка по поверхности раздела под действием принудительно сближающихся ножей. Разработанный штамп предназначен для разрезки прутков диаметром до 60 мм из латуни, меди, алюминия и его сплавов и сталей ($\sigma_B \leq 700 \text{ МПа}$). Закрытая высота штампа составляет 440 мм, номинальное усилие резки – 1000 кН, скорость деформирования – 1,8 м/с [62]. Отрезанные заготовки могут использоваться для последующего изготовления деталей методом холодного, полугорячего и горячего выдавливания.

На основе анализа приведенной информации о конструкциях штампов с дифференцированным зажимом проката можно сделать следующие выводы:

1 Из известных схем разделения проката способом отрезки сдвигом наиболее прогрессивной следует признать отрезку сдвигом сортового проката с дифференцированным зажимом на ножницах и в штампах.

2 Промышленность нуждается в разработке конкретных рекомендаций для внедрения процесса отрезки сдвигом с дифференцированным зажимом, а также уточнения исходных данных для совершенствования оснастки и оборудования.

3 Несмотря на наличие информации о конструктивных реализациях дифференцированного зажима, подобное оборудование не нашло широкого применения на производстве. Это объясняется недостатками конструктивных разработок, прежде всего чрезмерными габаритными размерами штампа, из-за чего приходится выбирать пресс не по потребной силе, а по размерам штампового пространства, а также невысокой жесткостью штампа.

1.6 Анализ рекомендаций по выбору геометрических и силовых параметров безотходных способов разделения сортового проката

1.6.1 Параметры процесса холодной ломки изгибом

В работах Финкеля В. М., Тимощенко В. А., Борисова В. М., Высоцкого Е. Н. [7;10;17;18] 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, расположение концентратора напряжений относительно точек приложения нагрузки, длина разделяемых частей проката. Эффективность концентратора напряжений в первую очередь зависит от глубины 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. [14] получена эмпирическая зависимость силы внедрения клинового ножа F_B в прокат от глубины ΔH , радиуса r , угла α_0 заточки ножа и твердости материала HB :

$$F_B = \Delta H \sqrt[6]{r(0,0004\alpha_0 + 0,013)} HB. \quad (1.3)$$

Высоцкий Е. Н. [63] рассматривает внедрение плоского клина в заготовку, при этом сила внедрения определяется из выражения

$$F_B = 2,3\varepsilon \sigma_B \frac{\alpha_0 \Delta H}{2} \sqrt{d \Delta H} \left(1 + \frac{\alpha_0}{2}\right), \quad (1.4)$$

где $\varepsilon = 1,5 \dots 3,0$;

σ_B – временное сопротивление разрыву;

d – диаметр проката.

Выполнение инструмента в виде надрезающего и изгибающего роликов повышает его стойкость и снижает величину рабочего хода. Наибольшая сила накатки параллельных двусторонних концентраторов напряжений парой клиновидных роликов определяется из выражения [63]

$$2F_B = 2,3\varepsilon \sigma_B \frac{\alpha_0 \Delta H^2}{2} \left[1 + \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha_0}{2} \sqrt{\frac{\Delta H}{d}} \right) \right]. \quad (1.5)$$

Финкель В. М. в работе [7] полагает, что при статическом нагружении сила холодной ломки для случая трехточечного изгиба рассчитывается по формуле

$$F_{\text{л}} = \frac{4W_x \sigma}{k_\sigma L_0}, \quad (1.6)$$

где σ – разрушающее напряжение при изгибе;

W_x – осевой момент сопротивления сечения изгибу;

k_σ – коэффициент концентрации напряжений;

L_0 – расстояние между опорами.

Для случая консольного нагружения сила ломки определяется из выражения [7]

$$F_{\text{л}} = \frac{W_x \sigma}{k_\sigma L_0} \quad (1.7)$$

Борисов В. М. считает, что сила статической ломки по схеме трехточечного изгиба определяется из уравнения [18]

$$F_{\text{л}} = \frac{4W_x \sigma_B}{k_1 L_0}, \quad (1.8)$$

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. [18], определяется по формуле

$$F_{\text{л}} = k_1 \frac{4W_x \sigma_B}{L_0} \frac{1}{k_\sigma k_{\text{имп}}}, \quad (1.9)$$

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

$k_{\text{имп}} = 1,1 \dots 1,5$ – 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 [7].

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 работах [7;17] глубина концентратора напряжений определяется по формуле

$$\Delta H = k\sqrt[3]{d}, \quad (1.10)$$

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.

1.6.2 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 [8] относит: поперечный и осевой зазор, угол наклона прутка. Под поперечным зазором понимают разность размеров отверстия ножа и сечения прутка:

$$z_{\perp} = d_{\perp} - d, \quad (1.11)$$

где d_{\perp} – диаметр отверстия ножа.

Поперечный зазор ухудшает отрезку, снижает геометрическую точность заготовок вследствие поворота прутка при отрезке и уменьшении поверхности контакта ножей с прутком. Однако он необходим в штампах с цельными (штулочными) ножами для обеспечения возможности введения проката, компенсации несоосности установки ножей, исключения заклинивания заготовки в ножах. Величину поперечного зазора устанавливают с учетом практического опыта и состояния разрезаемого проката. Уменьшение или полное устранение поперечного зазора в осевой плоскости достигается применением разъемных ножей, а также сочетанием разрезки с редуцированием прутка в неподвижном ноже.

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 $(0..2)d$ [8]. При неполностью открытой и неполностью закрытой отрезке заготовок от стальных прутков с повышенной и высокой скоростью осевой зазор между ножами не нужен. В литературе приводятся противоречивые сведения относительно выбора осевого зазора в штампах с дифференцированным зажимом проката [8].

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° [8], так как сложно конструктивно реализовать регулировку угла наклона вследствие усложнения конструкции средств механизации и самого оборудования.

Одним из основных критериев, определяющих способность к отрезке, является твердость. По влиянию твердости на процесс разделения углеродистые стали можно разделить на три группы: мягкие ($HB < 140$), средней твердости ($140..180 HB$) и повышенной твердости ($180..260 HB$). Оптимальной является твердость в пределах $180..250 HB$. Большое значение имеют показатели пластичности. Установлено, что отрезка низколегированной стали сопровождается трудностями, если относительное удлинение δ ниже 10%. Хорошие результаты достигаются при $\delta \geq 12\%$ [8].

К силовым параметрам процесса отрезки сдвигом сортового проката относятся: сила отрезки, сила поперечного зажима, сила распора ножей, сила осевого сжатия, работа деформации.

В ряде работ Соловцова С. С., Мещерина В. Т., Трусова В. А., Кислого П. Е., Цеманна Г., Синицына В. Т. и др. [8;14;21] для определения силы отрезки предложены формулы, учитывающие те или иные параметры процесса.

Например, Трусов В. А. приводит формулу для определения силы отрезки [64]:

$$F_p = 3,42\tau_p(0,17 \cdot d^2 + 0,04 \frac{d^4}{h_g^2}), \quad (1.12)$$

где τ_p – напряжение сдвига;

h_g – высота очага деформации в осевом направлении.

Носалем В. В. [65] предложена формула расчета силы отрезки, которая имеет вид:

$$F_p = \sigma_B \cdot H^2 \left[\frac{0,4 \cdot \varepsilon_{p_{оп}}}{\operatorname{tg} \alpha_1} + 0,7 \right], \quad (1.13)$$

где $\varepsilon_{p_{оп}}$ – относительная глубина внедрения ножа, при которой происходит разделение;

H – высота разрезаемого металла;

α_1 – угол наклона ножа.

В инженерной практике чаще применяют формулы с экспериментально установленным поправочным коэффициентом. Широкое применение получила формула для определения силы полностью открытой и полностью закрытой отрезки, которая приведена в работе Соловцова С. С. [8] и имеет вид:

$$F_p = 0,72 \sigma_B A, \quad (1.14)$$

где A – площадь поперечного сечения проката.

Для определения наибольшей силы отрезки сдвигом используют также эмпирическую зависимость [8]:

$$F_{p_{max}} = \tau_{p_{max}} A, \quad (1.15)$$

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

Сила поперечного зажима проката должна быть достаточной для удержания отрезаемой части прутка в стабильном относительно ножей положении и определяется как часть силы отрезки [8]:

$$F_3 = k_3 F_{p_{max}}, \quad (1.16)$$

где k_3 – коэффициент пропорциональности, который может быть постоянным или переменным, пропорциональным силе отрезки.

При отрезке сдвигом со стороны разрезаемого металла на ножи действуют силы распора, стремящиеся раздвинуть ножи и увеличить осевой зазор между ними. В работе [8] приведена формула расчета силы распора при отрезке по открытой, полностью открытой и полностью закрытой схемам с поперечным зазором:

$$F_{расп} = N_N + F_T, \quad (1.17)$$

где N_N – нормальная сила на поверхности контакта с блестящим пояском;

F_T – касательная сила, вызванная контактным трением.

При закрытой отрезке отделяемая заготовка дополнительно нагружается активной сжимающей осевой силой. Исследования [8] показали, что удельная сила осевого сжатия зависит от прочности металла и длины отрезаемой заготовки и находится в диапазоне 2...5 предела текучести σ_T разделяемого материала. Чем короче отрезаемая заготовка, тем больше необходимая удельная сила осевого сжатия.

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 [8].

В работах Кононенко В. Г. [66] полная работа $A_{\text{полн}}$, затрачиваемая инструментом при разделении холодного металла по двухопорной 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 $A_{\text{дин}}$:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{ст}} + A_{\text{ин.заг}} + A_{\text{дин}} \quad (1.18)$$

1.6.3 Анализ исследований влияния скорости нагружения на качество разделяемых заготовок

Одним из перспективных направлений повышения качества заготовок, получаемых безотходными способами разделения сортового проката, является использование повышенных скоростей нагружения.

Большая заслуга в изучении вопросов влияния скорости деформирования на прочностные свойства металлов принадлежит ученым: Иоффе А. Ф., Давиденкову Н. Н., Шевандину Е. М., Гопкинсону Д., Эрдогану Е., Екобори Т., Партону В. З., Пирсону Д., Соколову Л. Д., Полухину П. И., Гуну Г. Я., Галкину А. М., Ионову В. Н., Кононенко В. Г. [36;67–70]. В их работах и более поздних исследованиях показано, что с увеличением скорости деформирования увеличивается сопротивление деформации.

Зависимость сопротивления деформации σ от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ при различных условиях деформации обычно представляют в виде линейной, степенной и логарифмической [70]:

$$\begin{aligned} \sigma &= a \dot{\varepsilon}; \sigma = a \left(\dot{\varepsilon} \right)^n; \sigma/\sigma_0 = \left(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \right)^n; \\ \sigma &= \sigma_0 = A \cdot \lg \left(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \right); \sigma = \sigma_0 + B \cdot \ln \left(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \right), \end{aligned} \quad (1.19)$$

где n – скоростной показатель, постоянный при данной температуре и определенном диапазоне скоростей деформации;

$\sigma_0, \dot{\varepsilon}_0$ – сопротивление деформации и скорость деформации в статических условиях;

a, A, B – константы.

В работе [67], исходя из теоретических предпосылок, указанных Давиденковым Н. Н., получена формула, дающая «двойную» логарифмическую зависимость σ от $\dot{\varepsilon}$:

$$\lg(\sigma/\sigma_0) = n \lg \left(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \right), \quad (1.20)$$

где $n = D_1/H_E$;

D_1 – коэффициент температурной зависимости сопротивления деформации;

H_E – релаксационная энергия активации процесса отдыха и самодиффузии.

Данная формула хорошо отвечает опытными данным при низких и высоких температурах.

Как отмечает Ионов В. Н. [70], изменение скорости деформирования приводит к существенным изменениям механических свойств материала:

- с увеличением скорости нагружения предел текучести σ_T увеличивается, причем увеличение значительнее в средах с выраженной площадкой текучести;
- предел прочности σ_B также зависит от скорости нагружения, увеличиваясь с ростом последней, причем разрушение с большой скоростью деформации вызывает меньшую остаточную деформацию, чем разрушение с малой скоростью при прочих равных условиях.

Результаты экспериментальных исследований позволили Давиденкову Н. Н. [67] сделать вывод, что испытания на удар при высокой скорости нагружения могут обнаружить у некоторых материалов склонность к хрупкости. Чувствительность к хрупкости при высокой скорости приложения нагрузки изменяется параллельно чувствительности к хрупкости при низких температурах.

При значительном увеличении скорости нагружения распределение деформации по длине и поперечному сечению испытуемых образцов существенно изменяется в связи с проявлением сил инерции материала образца и локальным выделением теплоты деформации. Развивающаяся при пластическом деформировании теплота при большой скорости нагружения не успевает распространиться по всему объему образца и, локализуясь в определенных плоскостях, может вызывать значительное местное нагревание – выше температуры перлитно-аустенитного превращения. Большое количество выделяемой теплоты приводит к значительному местному снижению сопротивления и локализации пластической деформации.

Как отмечает Соловцов С. С. [8], с увеличением скорости деформирования предел текучести возрастает интенсивнее, чем временное сопротивление. Характеризующий влияние скорости на сопротивление деформированию скоростной коэффициент $n_{ш} = \sigma_v / \sigma_0$ (где σ_v – сопротивление деформированию при большой скорости; σ_0 – сопротивление деформированию при малой скорости нагружения) зависит от ряда факторов, в том числе – от температуры плавления металла. С повышением температуры плавления скоростной коэффициент уменьшается. Влияние скорости убывает с увеличением содержания в стали легирующих элементов.

В работе Ионова В. Н. [70] рассматривается количественное изменение σ_T в зависимости от скорости деформации $\dot{\epsilon}$, описываемое соотношением

$$\sigma_T = \sigma_T^0 [1 + C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)]^n, \quad (1.21)$$

где σ_T^0 – предел текучести при скорости деформации $\dot{\epsilon}_0$;

C и n – постоянные, полученные из эксперимента.

Экспериментальные исследования поведения некоторых металлов в зависимости от скорости деформации показывают, что при мгновенном приложении напряжения выше предела упругости, текучесть наступает с некоторой задержкой, зависящей от величины напряжения и свойств материала. Это явление и служит причиной повышения значений динамического предела текучести при высокой скорости нагружения. Запаздывание текучести характеризуется временем [70]:

$$t_1 = t_0 \exp(-\sigma / \sigma_1), \quad (1.22)$$

где t_0 и σ_1 – постоянные, определяемые из эксперимента.

Разрушение тела при динамическом нагружении наступает при $\sigma_{вд} > \sigma_{вс}$, причем $\sigma_{вд}$ увеличивается с увеличением $\dot{\epsilon}$, но в меньшей степени, чем $\sigma_{ТД}$ (где $\sigma_{ТД}$ и $\sigma_{вд}$ – пределы текучести и прочности при динамическом нагружении; $\sigma_{вс}$ – предел прочности при статическом нагружении).

В работе [71] показано, что отношение динамического предела прочности к статическому для различных материалов может колебаться от 0,59 до 1,3, а при повышенных температурах – от 0,71 до 6,0. Оно сильно зависит как от скорости деформации, так и от материала, подвергнутого деформированию. С увеличением статического предела текучести это отношение заметно уменьшается. Например, для стали ШХ15 отношение динамического предела текучести к статическому – меньше единицы и уменьшается с увеличением скорости деформации.

В работе [72] рассматриваются результаты испытаний сплавов ВН8, ВК15, ВК20. Для исследуемых материалов наблюдается четкая зависимость прочности от скорости нагружения. Так, для сплава ВН8 предел прочности возрастает в среднем с 1300 МПа при скорости нагружения 3...4 м/с до 1510 МПа при 20 м/с (приблизительно на 17 %) и до 1940 МПа при 30 м/с (на 50 %). Для твердых сплавов ВК15 и ВК20 в аналогичных условиях нагружения предел прочности повышается более чем на 22 % при 20 м/с: с 1750 до 2150 МПа для сплава ВК15 и с 1640 до 2000 МПа для сплава ВК20.

При высокоскоростном деформировании на силовые характеристики процесса влияют силы инерции, вследствие чего на основное силовое поле накладываются дополнительные напряжения.

В результате совместного действия перечисленных факторов при высокой скорости нагружения изменяются поведение металла, характер пластической деформации и разрушения, напряженно-деформированное состояние металла, соотношение пластического этапа и этапа разрушения, форма и размеры очага деформации.

Повышение скорости нагружения при холодной ломке изгибом проката позволяет обеспечить минимально возможный уровень пластической деформации, предшествующий зарождению магистральной трещины, низкую энергоемкость процесса [7].

Экспериментальные исследования, проведенные в работе [8], показали, что повышение скорости деформирования позволяет получить высококачественные заготовки с применением довольно простой схемы отрезки. Например, при неполностью открытой отрезке сдвигом повышение скорости свыше 30 м/с приводит к резкому снижению показателей неточности при относительной длине заготовок $L/d \geq 3$. Уменьшается глубина внедрения ножа как до начала разрушения, так и до полного отделения заготовки от прутка. Уменьшается угол отклонения скалывающей трещины, спрямляется ее траектория, сокращается объем очага пластической деформации, уменьшаются боковые утяжины. Микро- и макротрещин на поверхности среза не обнаружено. Последнее объясняется следующим [70]:

- малая длительность процесса деформирования ($t = 0,005 \text{ с}$), за которую дислокации в продольном направлении заготовки не успевают выйти на поверхность среза, а соответственно, и не успевают возникнуть трещины;

- существенный нагрев металла в зоне деформации ($T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$), что приводит к снятию внутренних напряжений.

Соловцов С. С. [8] разделяет скорости деформирования на: обычные – меньше $1,5 \text{ м/с}$; повышенные – $2...20 \text{ м/с}$; высокие – более 20 м/с . Верхний предел скорости нагружения при разделении проката ограничивается стойкостью штамповой оснастки.

Из анализа факторов, влияющих на качество разделяемых заготовок, видно, что достичь его повышения можно разными способами. Относительно большая вязкость конструкционных сталей часто требует одновременного применения нескольких способов для управления уровнем пластической деформации при разделении. Наиболее экономичным будет только вполне определенное сочетание параметров схемы нагружения, параметров технологии нанесения концентратора напряжений и скорости приложения нагрузки.

Исследования, проведенные на территории стран ближнего и дальнего зарубежья, позволяют утверждать следующее:

- 1 Использование повышенных и высоких скоростей – эффективный путь повышения качества разделяемых заготовок.

- 2 Повышенные и высокие скорости нагружения положительно влияют на качество получаемых заготовок, прежде всего на пластическом этапе разделения.

- 3 Перспективным представляется использование повышенных скоростей нагружения в диапазоне $2...20 \text{ м/с}$ при неполностью закрытой схеме отрезки сдвигом, а также при холодной ломке изгибом.

1.6.4 Использование концентраторов напряжений для управления процессом разделения

Эффективным способом локализации разрушения является нанесение концентратора напряжений, позволяющее существенно снизить силу разделения и улучшить качество заготовок.

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.

Тимощенко В. А. [40;41] рекомендует выбирать глубину концентратора напряжений ΔH больше минимально допустимой $\Delta H/H \geq 0,05$, а радиус закругления в вершине трещины – $r/H < 0,006$.

В работе [17] глубина концентратора напряжений определяется по формуле

$$\Delta H = k\sqrt{H}, \quad (1.23)$$

где k – коэффициент, зависящий от пластичности сталей.

Ширина надреза и угол между стенками концентратора напряжений α_0 имеют второстепенное значение. Однако Тимощенко В. А. для уменьшения размеров пластических областей в зонах растяжения и сжатия при холодной ломке изгибом рекомендует выбирать $\alpha_0 < 0,4$ рад [40].

Наибольшей остротой обладает трещина, она и является эффективным концентратором напряжений [7]. Как показано в работах [10; 14], 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. В работе [40] показано, что при внедрении инструмента в заготовку на глубину $\Delta H = (0,01...0,05)H$ пластическая деформация распространяется на все сечение.

В литературе [73] указывается на применение острых дополнительных боковых надрезов, которые способствуют подавлению пластической деформации по толщине образца, приближая условия разрушения к условиям плоской деформации, что приводит к спрямлению фронта трещины и позволяет задавать направление ее распространения.

Количественной характеристикой концентрации напряжений является коэффициент концентрации напряжений. Большинство сведений относительно величины коэффициента концентратора напряжений получены опытным путем и представлены в работах Нейбера Г., Вейса В. В., Хардрата Е., Омана Л. [74–76]. Наибольшее распространение получила зависимость Нейбера, связывающая коэффициент концентрации напряжений k_σ и коэффициент концентрации деформаций k_ϵ с упругим теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_σ [76]:

$$k_\sigma k_\epsilon = \alpha_\sigma^2. \quad (1.24)$$

Определенную роль в процессе зарождения трещины в вершине концентратора напряжений играет и способ его нанесения на прокат. Способы нанесения концентратора напряжений можно разделить на тепловые, электромеханические и механические.

Надрезы, сделанные сваркой, эффективней, чем механические, за счет высокого перепада температур. Однако сварка сопровождается изменением структуры металла в прилегающих к концентратору напряжений областях и широким прорезным слоем, что не всегда отвечает требованиям, предъявляемым к качеству разделяемых заготовок.

Нанесение надреза электромеханическими способами, а также с помощью лазера обеспечивает эффективный концентратор напряжений. Зона термического влияния при этом почти отсутствует, а сам надрез имеет правильную геометрическую форму, минимальный радиус закругления у вершины. Применение данного способа нанесения концентратора напряжений на производстве сдерживается из-за низкой производительности процесса. Кроме того, как тепловые, так и электромеханические способы требуют наличия сложных по конструкции и управлению, дорогостоящих устройств, которые усложняют технологический цикл разделения проката.

Способы нанесения концентратора напряжений механическим путем нашли наибольшее применение на производстве.

Надрезы, сделанные с удалением прорезного металла в стружку, характеризуются повышенным расходом металла и инструмента, высокой стоимостью последнего, вредными условиями производства и сравнительно низкой производительностью процесса.

Способ нанесения концентратора напряжений методом пластической деформации является наиболее приемлемым как для компоновки рабочих схем разделения, работающих в один цикл, так и с точки зрения малоотходности процесса. Однако вдавливание клинового ножа в прутки приводит к быстрому затуплению его рабочей кромки и снижению остроты надреза. Повысить стойкость инструмента можно за счет нанесения концентратора напряжений с помощью роликов, но при этом узел нанесения концентратора напряжений получается громоздким из-за возникающих больших распорных сил, усложняется конструкция оборудования.

На основании приведенной выше информации можно сделать следующие выводы.

1 Способ нанесения концентратора напряжений методом пластической деформации наиболее приемлемый с точки зрения компоновки рабочих схем разделения, работающих в один цикл и обеспечения требований, предъявляемых к качеству получаемых заготовок.

2 Проблема нанесения эффективного концентратора напряжений на прокат является актуальной задачей, которая сдерживает развитие процессов разделения сортового проката на мерные заготовки. Этому вопросу в дальнейшем будет уделено наибольшее внимание.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОТХОДНЫХ СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА НА МЕРНЫЕ ЗАГОТОВКИ

2.1 Исследование процесса статико-динамического нагружения образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом на пресс-молотах

Возможность предварительного статического нагружения в сочетании с высокой скоростью деформирования позволяет создать в образце схему напряженного состояния, обеспечивающую требуемую геометрическую точность и качество получаемых заготовок.

В работах [77–79] разработана комплексная математическая модель процесса статико-динамического нагружения образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом на пресс-молоте с одинаковым направлением деформирующих сил, отличающаяся учетом предварительного статического нагружения и конструктивных особенностей пресс-молота. Существующие расчетные модели [80–82] разработаны применительно к ударным испытаниям на копрах и молотах, когда масса подвижного инструмента значительно больше массы образца. В этом случае в момент удара скорость инструмента равна скорости подвижных частей. На пресс-молотах масса промежуточного пуансона может быть соизмерима с массой образца, а его скорость в момент удара равна нулю. Промежуточный пуансон разгоняется при ударе одновременно с деформированием образца, поэтому необходимо учитывать изменение скорости пуансона в процессе нагружения.

Кроме того, в процессе ударного нагружения с высокими скоростями прогиб образца сопровождается упругими деформациями и колебаниями опор и инструмента. Необходимо учитывать также инерционные нагрузки, возникающие при смещении и повороте частей образца. Возможность предварительного статического нагружения на пресс-молотах позволит обеспечить исходное смещение образца на контакте с опорами и уменьшить колебания образца и инструмента.

На рис. 2.1 представлена схема статико-динамического нагружения образцов по схеме трехточечного изгиба на пресс-молоте.

Сила от подвижных частей (штока 1 и бабы 2) гидроупругого цилиндра передается через промежуточный пуансон 3 и боек 4, установленные по оси гидравлического цилиндра 5, образцу 6.

Для обобщенной постановки задачи шток 1 представляли в виде стержня переменного поперечного сечения с площадью поперечного сечения $A_1(x_1)$, модулем упругости E_1 , длиной L_1 и массой m_1 . Бабу 2 рассматривали в виде сосредоточенной массы m_2 в сечении $x_1 = L_1$.

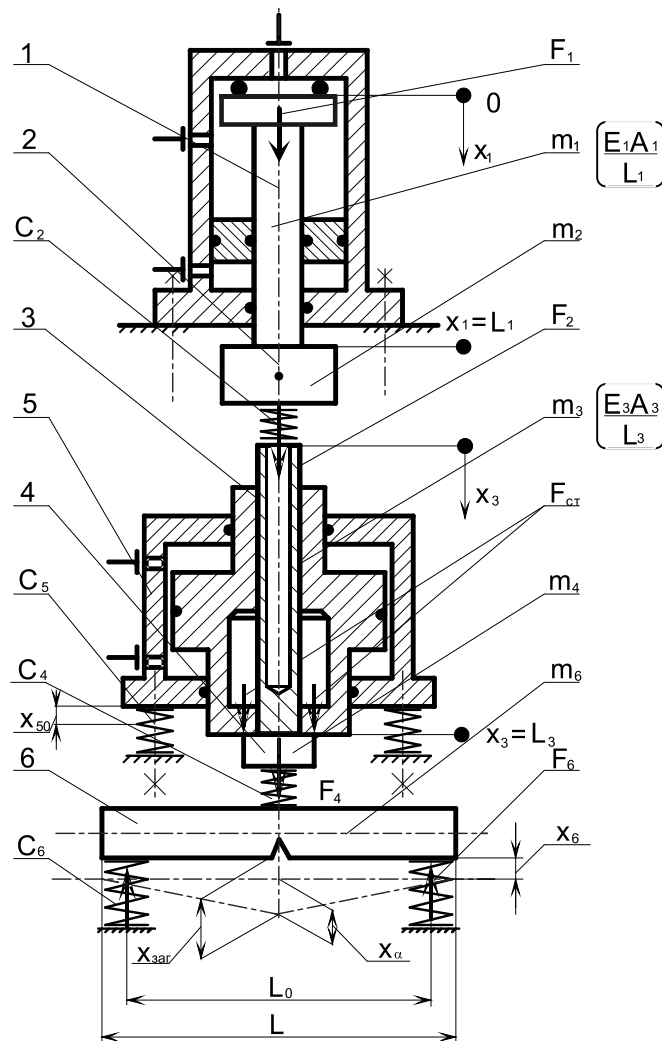


Рисунок 2.1 – Расчётная схема ударного и статико-динамического нагружения образцов способом холодной ломки изгибом на пресс-молоте [77]

Движение подвижных частей происходило под действием силы привода $F_1 = f[U_1(x_1 = 0)]$, где U_1 – перемещение штока в сечении x_1 . Промежуточный пуансон 3 массой m_3 представляли в виде стержня переменного поперечного сечения с параметрами $A_3(x_3), E_3, L_3$, а боек 4 – в виде сосредоточенной массы m_4 . Время удара $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с мало по сравнению с периодом собственных продольных колебаний сечения промежуточного пуансона. Поэтому для корректности математической модели необходимо учитывать волновые процессы, происходящие и в промежуточном пуансоне, поскольку длина пуансона L_3 соизмерима с длиной штока L_1 . Полагали, что зависимость изменения силы на контакте бабы 2 и промежуточного пуансона 3 от деформации $F_2 = f_2(\Delta_2)$ – нелинейная. Линеаризованная жесткость контакта бабы 2 и промежуточного пуансона 3 – $C_2 = \text{const}$. Технологическая сила $F_4 = f_4(\Delta_4)$ приложена к образцу 6

массой m_6 , расположенному на двух опорах. Элемент жесткостью $C_4 = \text{const}$ отражает упругие свойства на контакте образца с бойком. Два симметричных элемента жесткостью $C_6 = \text{const}$ моделируют упругие свойства контакта опор с образцом и воздействуют на образец силами F_6 . Подобное моделирование влияния опор на образец двумя равными силами F_6 хорошо согласуется с экспериментом [82]. На первом этапе образец жесткостью $C_{cm} = \text{const}$ нагружен статической силой F_{ct} гидравлического цилиндра 5, что вызывает деформацию элементов станины машины, которая имеет жесткость $C_5 = \text{const}$.

В предложенной комплексной модели процесса статико-динамического нагружения образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом на пресс-молоте частично использована известная модель ударных испытаний образцов на сосредоточенный изгиб [80; 81] с упругим шарниром, отличающаяся наличием исходных деформаций сечений под действием предварительной статической силы. Образец массой m_6 представляли в виде двух жестких половинок, соединенных между собой упругим шарниром, угол поворота α которого пропорционален изгибающему моменту $M_{изг}$ в центральном сечении [81]:

$$M_{изг} = \frac{\alpha L_0^2 C_{cm} H E B}{8}, \quad (2.1)$$

где L_0 – расстояние между опорами;

C_{cm} – статическая жесткость образца [81]:

$$C_{cm} = \frac{H E B}{\lambda a}, \quad (2.2)$$

где H – высота образца;

E – модуль упругости материала образца;

B – ширина образца;

λ – безразмерный тарировочный коэффициент образца [83];

a – длина трещины.

Известная модель [80; 81] применима в данном конкретном случае при холодной ломке изгибом, так как угол поворота половинок образца до разрушения мал и хрупкое разрушение происходит путем распространения трещины без существенной пластической деформации. Этот вывод подтверждается в работе [80], где показано, что расхождение теоретической кривой, построенной с помощью модели образца с упругим шарниром, и экспериментальной осциллограммы, составляет 5...10 %.

В работе [82] рассматривается численное моделирование экспериментов по определению динамической трещиностойкости материалов. Показано, что для ударных испытаний образцов по схеме трехточечного

изгиба возможно существенное упрощение процедуры определения базовых решений, которое достигается при его моделировании с использованием теорий Эйлера – Бернулли или Тимошенко. В таком случае наличие трещины моделируется введением дополнительного угла поворота в соответствующем сечении. Полученные при таком подходе данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что также свидетельствует в пользу выбранной модели ударных испытаний с упругим шарниром.

Уравнение движения произвольного сечения масс $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_3$ имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{U}_i}{\partial t^2} = \mathbf{c}_i^2 \left\{ \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{A}_i} \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \mathbf{x}_i} \frac{\partial \mathbf{U}_i}{\partial \mathbf{x}_i} + \frac{\partial^2 \mathbf{U}_i}{\partial \mathbf{x}_i^2} \right\}, \mathbf{i} = \mathbf{1}, \mathbf{3}, \quad (2.3)$$

где \mathbf{U}_i – перемещение сечения \mathbf{i} -того стержня;

\mathbf{c}_i – скорость звука в металле.

Запишем дифференциальные уравнения движения сосредоточенных масс $\mathbf{m}_2, \mathbf{m}_4$:

$$\mathbf{m}_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} + \mathbf{F}_{ai}(\Delta_{ai}) - \mathbf{F}_{bi}(\Delta_{bi}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{i} = \mathbf{2}, \mathbf{4}, \quad (2.4)$$

где \mathbf{x}_i – перемещение массы \mathbf{m}_i ;

$\mathbf{F}_{ai}(\Delta_{ai}), \mathbf{F}_{bi}(\Delta_{bi})$ – силы, действующие на \mathbf{i} -ю массу \mathbf{m}_i со стороны контактирующих с ней элементов, расположенных с противоположных сторон;

Δ_{ai}, Δ_{bi} – абсолютные деформации соответствующих упругих элементов.

Для бабы – \mathbf{m}_2 :

$$\mathbf{F}_{a_2} = \mathbf{E}_1 \mathbf{A}_1 \left. \frac{\partial \mathbf{U}_1}{\partial \mathbf{x}_1} \right|_{\mathbf{x}_1 = \mathbf{L}_1}; \quad (2.5)$$

$$\mathbf{F}_{b_2} = \mathbf{f} \left[\mathbf{U}_1 \Big|_{\mathbf{x}_1 = \mathbf{L}_1} - \mathbf{U}_3 \Big|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{0}} \right], \text{ при } \mathbf{U}_1 \Big|_{\mathbf{x}_1 = \mathbf{L}_1} \rangle \mathbf{U}_3 \Big|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{0}}, \quad (2.6)$$

в противном случае $\mathbf{F}_{b_2} = \mathbf{0}$, так как происходит нарушение контакта между элементами системы, а в случае линейной зависимости

$$\mathbf{F}_{b_2} = \mathbf{C}_2 \cdot \left[\mathbf{U}_1 \Big|_{\mathbf{x}_1 = \mathbf{L}_1} - \mathbf{U}_3 \Big|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{0}} \right]. \quad (2.7)$$

Для бойка – \mathbf{m}_4 :

$$\mathbf{F}_{a_4} = \mathbf{E}_3 \mathbf{A}_3 \left. \frac{\partial \mathbf{U}_3}{\partial t} \right|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{L}_3}; \quad (2.8)$$

$$\mathbf{F}_{b_4} = \mathbf{f} \left[\mathbf{U}_3 \Big|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{L}_3} - \mathbf{x}_{\text{заг}} \right], \text{ при } \mathbf{U}_3 \Big|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{L}_3} > \mathbf{x}_{\text{заг}}, \quad (2.9)$$

в противном случае $\mathbf{F}_{b_4} = \mathbf{0}$, а в случае линейной зависимости

$$\mathbf{F}_{b_4} = \mathbf{C}_4 \cdot \left[\mathbf{U}_3 \Big|_{\mathbf{x}_3 = \mathbf{L}_3} - \mathbf{x}_{\text{заг}} \right]. \quad (2.10)$$

Дополнительно к уравнениям движения подвижных частей и промежуточного пуансона (2.3, 2.4) записывали уравнения сил и моментов в центральном сечении с учетом инерционных составляющих, возникающих при ударном нагружении. В рамках предложенной математической модели деформирования образца по схеме трехточечной холодной ломки изгибом получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{\text{изг}} = \frac{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}}{8} \ddot{\mathbf{x}}_{\text{заг}} - \frac{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}^2}{24} \ddot{\alpha} + \frac{\mathbf{F}_6 \mathbf{L}_0}{2}; \\ \mathbf{F}_4 - 2\mathbf{F}_6 = \mathbf{m}_6 \ddot{\mathbf{x}}_{\text{заг}} - \frac{\ddot{\alpha} \mathbf{L} \mathbf{m}_6}{4}; \\ \mathbf{F}_4 = \mathbf{C}_4 (\mathbf{x}_4 - \mathbf{x}_{\text{заг}}), \text{ при } \mathbf{x}_4 > \mathbf{x}_{\text{заг}}; \\ \mathbf{F}_6 = \mathbf{C}_6 \left(\mathbf{x}_{\text{заг}} - \frac{\alpha}{2} \mathbf{L}_0 \right), \text{ при } \mathbf{x}_{\text{заг}} > \frac{\alpha}{2} \mathbf{L}_0, \end{cases} \quad (2.11)$$

где \mathbf{L} – длина образца;

$\ddot{\mathbf{x}}_{\text{заг}}$ – ускорение половинок образца;

$\ddot{\alpha}$ – угловое ускорение половинок образца.

После преобразований и подстановок уравнения системы (2.11) примут вид:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{x}}_{\text{заг}}(t) = -\frac{6\mathbf{L}_0 \mathbf{C}_{\text{см}}}{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}} \mathbf{x}_{\text{заг}}(t) + \left(\frac{\mathbf{C}_{\text{см}} \mathbf{L}_0}{\mathbf{C}_6} - \frac{4\mathbf{L}}{3} + 2\mathbf{L}_0 \right) \frac{6}{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}} \mathbf{F}_6(t) + \frac{4}{\mathbf{m}_6} \mathbf{F}_4(t); \\ \ddot{\alpha}(t) = -\frac{12\mathbf{L}_0^2 \mathbf{C}_{\text{см}}}{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}^2} \alpha(t) + \frac{24}{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}} \left(\frac{2\mathbf{L}_0}{\mathbf{L}} - 1 \right) \mathbf{F}_6(t) + \frac{12}{\mathbf{m}_6 \mathbf{L}} \mathbf{F}_4(t). \end{cases} \quad (2.12)$$

Граничные условия волновых уравнений:

- для штока при $\mathbf{x}_1 = \mathbf{0}$

$$\mathbf{E}_1 \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{U}_1}{\partial \mathbf{x}_1} \Big|_{\mathbf{x}_1 = \mathbf{0}} = \mathbf{F}_1; \quad (2.13)$$

при $\mathbf{x}_1 = \mathbf{L}_1$ с учетом (2.4...2.7)

$$\mathbf{m}_2 \frac{d^2 \mathbf{x}_2}{dt^2} = \mathbf{F}_2 - \mathbf{E}_1 \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{U}_1}{\partial \mathbf{x}_1} \Big|_{\mathbf{x}_1 = \mathbf{L}_1}; \quad (2.14)$$

- для промежуточного пунсона при $x_3 = 0$:

$$E_3 A_3 \left. \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right|_{x_3=0} = F_2 ; \quad (2.15)$$

при $x_3 = L_3$ с учетом (2.4, 2.8...2.10)

$$m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = F_4 - E_3 A_3 \left. \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right|_{x_3=L_3}. \quad (2.16)$$

Начальные условия в момент соударения $t = 0$

$$\left. \frac{dx_2}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{\partial U_1}{\partial t} \right|_{t=0} = V_0 ; \left. \frac{\partial U_3}{\partial t} \right|_{t=0} = \left. \frac{dx_4}{dt} \right|_{t=0} = 0 ; \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t=0} = 0 ; \left. \frac{dx_{зар}}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (2.17)$$

Образец, опоры, боек, станина прессовой части машины находятся под действием статической силы, вызывающей начальные смещения элементов,

$$F_4 \Big|_{t=0} = F_5 \Big|_{t=0} = 2 \cdot F_6 \Big|_{t=0} = F_{cr} ;$$

$$x_5 \Big|_{t=0} = \frac{F_5}{C_5} ; x_4 \Big|_{t=0} = \frac{F_4}{C_4} ; x_6 \Big|_{t=0} = \frac{F_6}{C_6} ; \alpha \Big|_{t=0} = \frac{2 \cdot F_4}{C_{cm} \cdot L_0} ; x_{зар} = \frac{F_4}{C_{cm}}. \quad (2.18)$$

Полагали, что за счет наличия бабы 2 массой m_2 , инерционности бабы 2 и собственной массы, шток 1 сжат силой привода F_1 , приложенной к торцу штока 1 со стороны привода, и движется в момент соударения с постоянным для каждого сечения ускорением. Внутренние деформации в штоке 1 определялись распределением массы по длине и силой F_1 :

$$[m_1(x_1) + m_2] \left. \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} \right|_{t=0} = F_1. \quad (2.19)$$

В соответствии с методом начальных параметров в форме Коши рассматривали перемещения элементов системы «пресс-молот – образец» в локальных координатах. Для перехода к общей системе координат совмещали ее начало с положением точки контакта образца с опорой перед статическим нагружением. Тогда исходные смещения центрального сечения образца – $x_{зар0}$, массы m_4 , деформация станины – x_{50} происходили под действием статической силы F_{cr} . Учитывая смещение сечений штока за счет действия силы F_{cr} , смещали начало локальной системы координат штока 1 на величину $(U_{1max} + x_{50})$, чтобы перемещение на контакте бабы 2 и промежуточного пунсона 3 в момент удара равнялось статическому. Общее смещение центрального сечения образца определялось в виде: $x_{зар} = x_6 + x_\alpha$.

Решать данную задачу целесообразно на ПЭВМ, для чего использовали метод конечных разностей, который хорошо разработан для аналогичных расчетов.

Аппроксимировали производные конечными разностями с использованием шаблона типа “крест” [84].

Уравнения сил и моментов в центральном сечении образца в конечно разностной форме с учетом уравнений (2.3...2.10) и граничных условий (2.13...2.16) примут вид:

$$\begin{cases} x_{\text{сдд}}^{j+1} = 2\left(1 - \frac{3L_0\tau^2 C_{\text{м}}}{m_6 L}\right)x_{\text{сдд}}^j - x_{\text{сдд}}^{j-1} + \left(\frac{C_{\text{м}} L_0}{C_6} + 2L_0 - \frac{4}{3}L\right)\frac{6\tau^2}{m_6 L}F_6(t) + \frac{4\tau^2}{m_6}F_4(t); \\ a^{j+1} = 2\left(1 - \frac{6L_0^2\tau^2 C_{\text{с}}}{m_6 L^2}\right)a^j - a^{j-1} + \frac{24\tau^2}{m_6 L}\left(\frac{2L_0}{L} - 1\right)F_6(t) + \frac{12\tau^2}{m_6 L}F_4(t). \end{cases} \quad (2.20)$$

Расчет процессов ударной и статико-динамической холодной ломки изгибом на пресс-молотах производили с использованием программы «Impactlomka» на ПЭВМ. Алгоритм расчета представлен на рис. 2.2.

С целью проверки теоретических предположений проведен расчет ударной и статико-динамической ломки образцов по схеме трехточечного изгиба на пресс-молоте 2ПМГИ 0,8/88 с энергией удара $W = 800 \text{ кДж}$ и силой статического привода $F_{\text{ст}} = (0...88) \text{ кН}$. Параметры пресс-молота 2ПМГИ 0,8/88: $F_1 = 0...12 \text{ кН}$; $F_4 = 0...80 \text{ кН}$; $m_2 = 2,0 \text{ кг}$; $m_4 = 0,22 \text{ кг}$; $L_1 = 0,155 \text{ м}$; $L_3 = 0,206 \text{ м}$; $C_2 = 100...500 \text{ МН/м}$; $V = 0...20 \text{ м/с}$.

Параметры образца: Сталь 40X ($\sigma_{\text{а}} = 817 \text{ МПа}$), $\tilde{N}_{\text{м}} = 5 \text{ МПа/м}$; $L = 0,076 \text{ м}$; $L_0 = 0,06 \text{ м}$; $\dot{A} = 2,05 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $m_6 = 0,25 \text{ кг}$.

Способ моделирования условий контакта между образцом и опорами существенно влияет на полученные результаты [82]. Поэтому на основании имеющейся схемы нагружения и рекомендаций [81] полагали, что форма контактной поверхности промежуточного пуансона соответствует форме опор: $C_4 = C_6 = 120 \text{ МН/м}$.

Величины площадей поперечного сечения штока 1 и промежуточного пуансона 3 по длине задавали в узлах ($i = 0...n$) расчетной сетки ($n_1 = 31, n_2 = 34$), где n – количество узлов.

Изучали влияние величины статической силы $F_{\text{ст}}$, жесткости контакта бабы 2 и промежуточного пуансона 4 – C_2 на форму изменения, амплитудные значения сил F_4, F_6 и соответствующие им величины перемещений элементов системы.

Расчеты проводили для величин жесткости $C_2 = 100 \text{ МН/м}$ и 500 МПа/м и величин статической силы $F_{\text{ст}} = 0...20 \text{ кН}$ (рис. 2.3, 2.4).

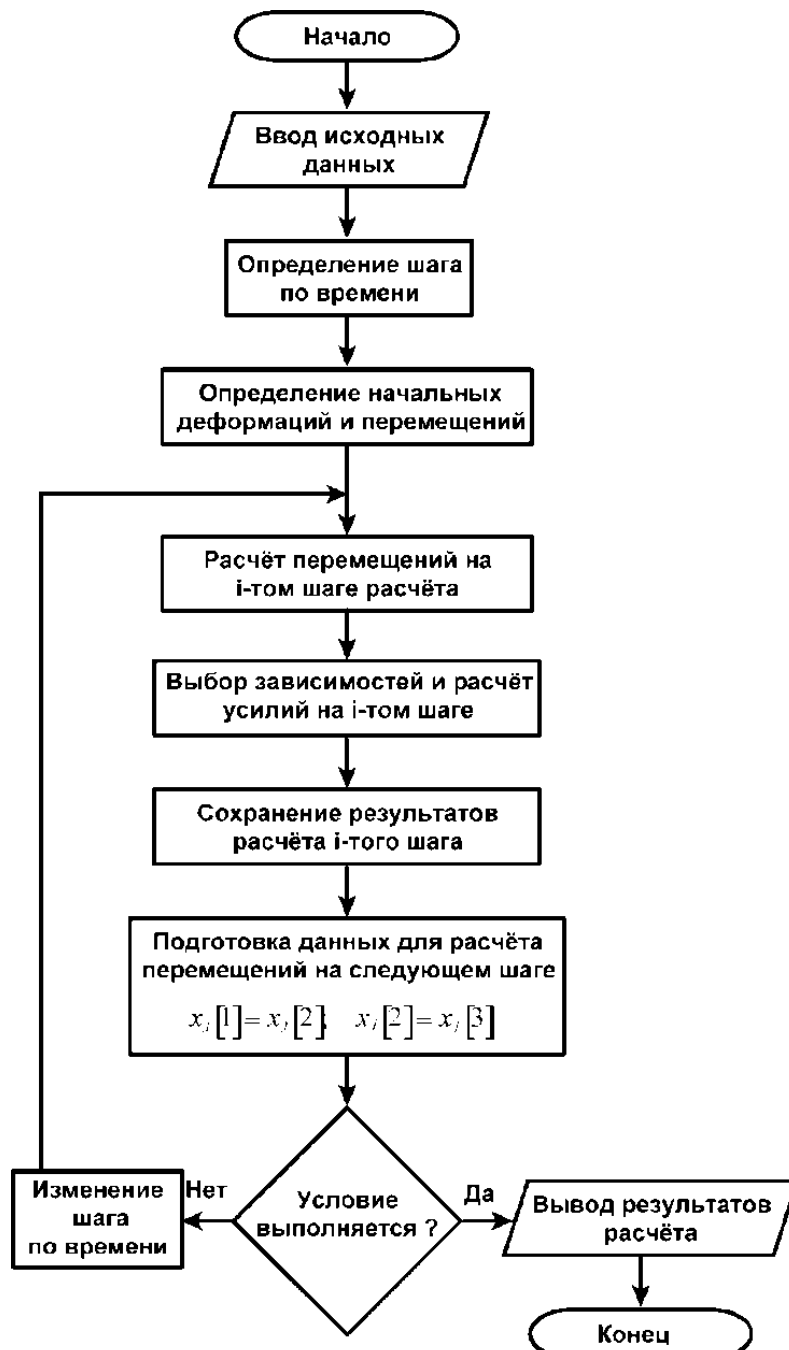
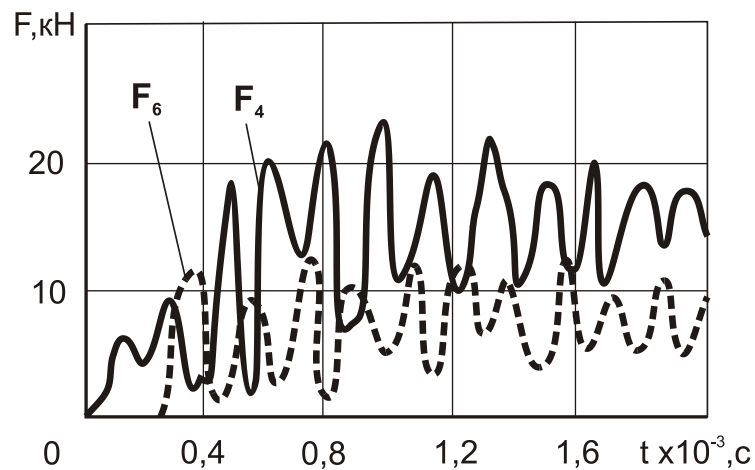
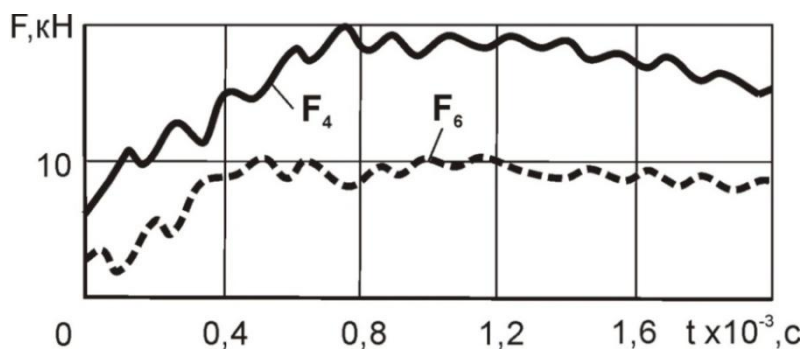


Рисунок 2.2 – Укрупнённый алгоритм численного расчёта процесса статико-динамического нагружения образцов на пресс-молоте с одинаковым направлением деформирующих усилий

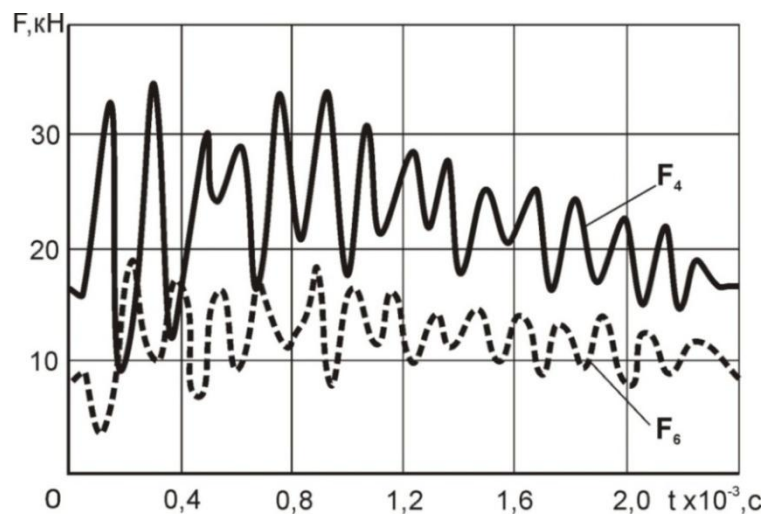
Анализ графиков $F_4 = f(t)$ и $F_6 = f(t)$ показывает, что при отсутствии статического нагружения в первоначальный момент времени образец отрывается от опор и $F_6 = 0$ (см. рис. 2.3, а), т. е. испытания в начальный момент времени фактически являются безопорными. Полученные данные согласуются с экспериментом, в котором наблюдалось длительное отсутствие контакта и значительный разрыв между образцом и опорами в начальной фазе нагружения [80;81].



а



б



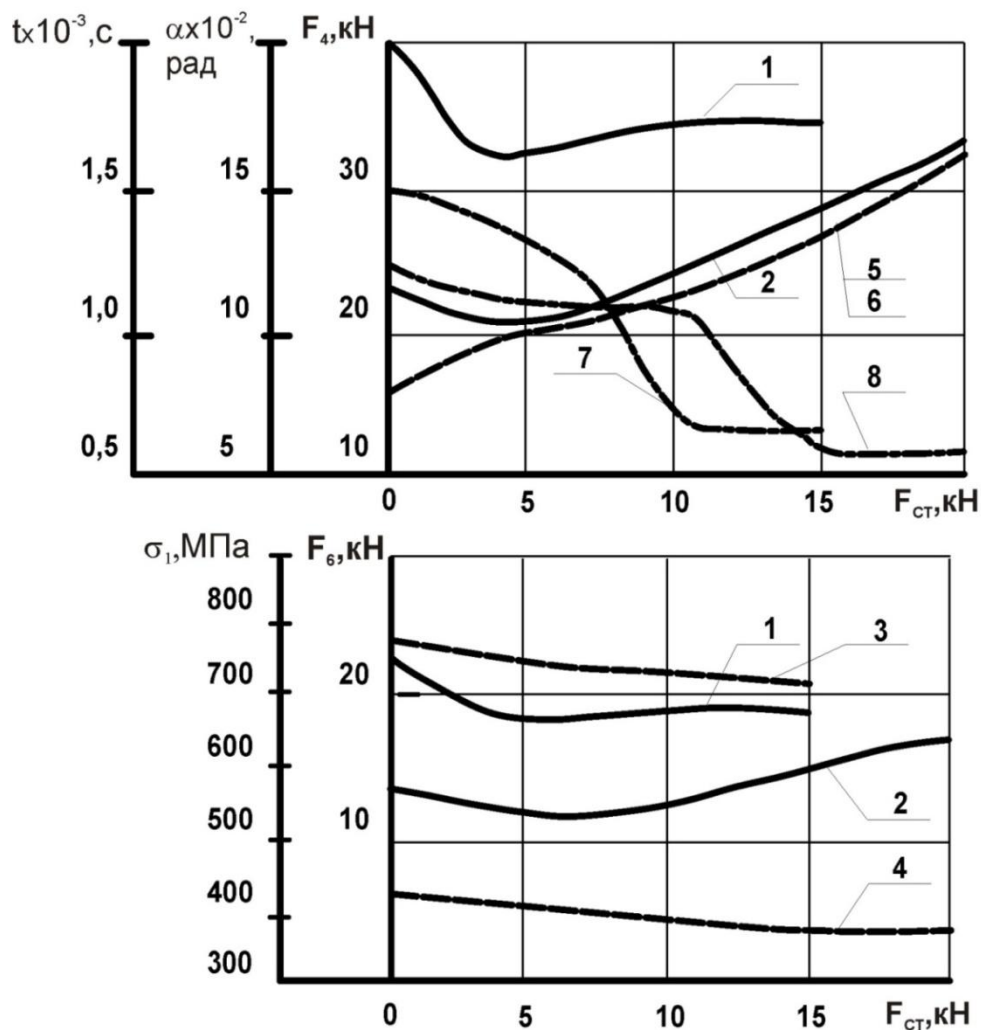
в

а – ударное нагружение $C_2 = 100 \text{ МН / м}$;

б – статико-динамическое нагружение $F_{\text{ст}} = 5 \text{ кН}, C_2 = 100 \text{ МН / м}$;

в – статико-динамическое нагружение $F_{\text{ст}} = 15 \text{ кН}, C_2 = 500 \text{ МН / м}$

Рисунок 2.3 – Расчётные кривые изменения сил на контакте бойка с образцом $F_4 = f(t)$ и образца с опорами $F_6 = f(t)$



1, 2 – F_4, F_6 ; 3, 4 – σ_1 ; 5, 6 – α ; 7, 8 – t_a ; 1, 3, 5, 7 – $C_2 = 500 \text{ 1/с}$; 2, 4, 6, 8 – $C_2 = 100 \text{ 1/с}$

Рисунок 2.4 – Зависимость амплитудных значений деформирующей силы F_4 , реакций опор F_6 , напряжений в штоке σ_1 , угла изгиба α и соответствующего ему времени t_a от статической нагрузки $F_{ст}$

С увеличением длины образца L уменьшается величина его отрыва от опор в начальной фазе нагружения, что положительно сказывается на качестве получаемых заготовок и подтверждается экспериментом.

Процесс деформирования при трехточечной ломке происходит с изгибными колебаниями образца, на которые накладываются колебания с более высокой частотой, связанные с податливостью зоны контакта образца с промежуточным пуансоном и опорами, и собственной частотой колебаний элементов системы. Форма графиков $F_4 = f(t)$ и $F_6 = f(t)$ соответствует экспериментальным данным [81].

Наличие статической нагрузки $F_{ст}$ в момент удара (см. рис. 2.3, б) приводит к более плавному нагружению образца, резкие пики сил на расчетных кривых исчезают. Увеличение статической составляющей приводит

к плавному росту амплитуды сил F_4, F_6 , а напряжения в штоке σ_1 незначительно снижаются (см. рис. 2.4), хотя максимальное значение амплитуды для ударного нагружения выше в связи с наличием пиковых значений сил.

Величина статической нагрузки $F_{ст}$, необходимая для предотвращения отрыва образца от опор, повышается с ростом C_2 (см. рис. 2.3, в).

Увеличение статической нагрузки $F_{ст}$ вызывает пропорциональный рост исходного угла изгиба образца α (см. рис. 2.4). При этом снижается время t_{max} достижения максимального угла изгиба α_{max} , величину которого следует ограничивать в пределах **0,14 рад** для обеспечения качества получаемых заготовок.

Анализ графиков $F_4 = f(t)$ и $F_6 = f(t)$ для различных величин C_2 (см. рис. 2.3) показывает, что уменьшение жесткости сглаживает кривые. При высоких значениях C_2 деформирование образца происходит за несколько соударений подвижных частей с промежуточным пуансоном. Конструкция промежуточного пуансона определяет его массу и жесткость контакта – C_2 . Требуемую податливость пуансона можно обеспечить увеличением его длины, уменьшением площади поперечного сечения за счет осевого сверления, формой контактной поверхности, использованием упругих вставок.

На основании проведенных расчетов можно утверждать следующее.

Предварительное статическое нагружение при холодной ломке изгибом с высокими скоростями нагружения позволяет снизить высокочастотные колебания системы «инструмент – образец – опоры», исключить нарушение контакта образца с опорами, понизить пиковые величины сил со стороны бойка и опор.

Наличие статической силы в момент удара обеспечивает определенный исходный уровень растягивающих напряжений в зоне концентратора напряжений, что повышает управляемость трещиной. Предполагается, что разрушающая трещина при этом всегда будет распространяться в области растягивающих напряжений.

Предполагается, что возникающие реактивные силы со стороны опор от действия статической силы совпадают с направлением инерционных сил половинок образца и дополнительно доламывают образец.

Величина статической силы, необходимая для исключения отрыва образца от опор, зависит от жесткости контакта бабы с промежуточным пуансоном и увеличивается с ростом последней.

Величину жесткости контакта бабы с промежуточным пуансоном следует выбирать оптимальной за счет специальной конструкции пуансона.

Анализ известных моделей разрушения и предложенной комплексной модели разрушения образцов [77] позволил установить, что поведение трещины зависит от целого ряда плохо управляемых факторов.

Задача усложняется при сложных динамических и статико-динамических схемах нагружения, когда необходимо учитывать влияние конструктивных параметров высокоскоростных машин, особенностей схемы нагружения.

2.2 Теоретическое обоснование нового способа разделения сортового проката по схеме «сдвиг – ломка»

Общий теоретический анализ напряженного состояния процессов холодной ломки изгибом и отрезки сдвигом обнаруживает, что они различаются по своей физической природе и одновременно дополняют друг друга.

Так, при отрезке сдвигом сортового проката для получения качественной поверхности торца образование поверхности раздела должно происходить вязкопластическим разрушением, однако с минимальным уровнем пластической деформации, прежде всего на пластическом этапе разрушения. При холодной ломке изгибом всякое снижение пластичности ведет к повышению качества торцов получаемых заготовок, при этом разрушение будет стремиться к хрупкому. Поэтому целесообразным представляется объединение двух процессов в одном, компенсируя недостатки холодной ломки изгибом преимуществами процесса отрезки сдвигом сортового проката. Прежде всего это касается способа нанесения концентратора напряжений на прокат.

В работах [27;85–87] предложен новый способ разделения сортового проката по схеме «сдвиг – ломка». Сущность способа заключается в том, что на первом этапе на прокат наносится объемный концентратор напряжений за счет частичного сдвига части проката относительно профиля на определенную величину. На втором этапе прокат нагружают изгибающей силой до разрушения в плоскости концентратора напряжений.

Как было показано выше, известные способы нанесения концентратора напряжений не удовлетворяют требованиям современного производства. В новом способе «сдвиг – ломка» нанесение концентратора напряжений в пластическом этапе разделения сопровождается возникновением и развитием субмикро- и микротрещин, их накоплением, что предопределяет направление будущей макротрещины. При этом в объеме металла, примыкающего к плоскости разрушения, при холодной отрезке сдвигом развивается упрочнение, сопровождающееся изменением механических характеристик макро- и микроструктуры металла. Повышается временное сопротивление, предел текучести, твердость, снижаются характеристики пластичности. Зарождается макротрещина на линии, соединяющей впадины надрезов. Таким образом, концентратором напряжений в данном способе является наведенная магистральная макротрещина.

Макротрещина может иметь предельно большие размеры, что отвечает оптимальным требованиям, предъявляемым к процессу холодной ломки изгибом. При этом предполагается, что вдоль всей трассы движения наведенной трещины создаются дополнительные напряжения сжатия, ориентированные вдоль необходимого направления раскря.

Развитие магистральной трещины происходит путем разрыва перемычек между микротрещинами и микродефектами, имеющимися как в исходном материале, так и образующимися на пластическом этапе отрезки. Предполагается, что наведенные напряжения сжатия в плоскости концентратора напряжений обеспечивают стабилизацию траектории трещины.

Применение повышенных и высоких скоростей нагружения при разделении сортового проката на мерные заготовки способом «сдвиг – ломка» обеспечивает снижение пластической деформации в вершине трещины, уменьшение энергоемкости процесса.

Рассмотрим пример конкретной реализации способа разделения по схеме «сдвиг – ломка». В работе [88] предложена установка для разделения проката (рис. 2.5), в которой под действием силы со стороны привода силового цилиндра 1 подвижная траверса 2 движется вниз, осуществляя зажим (с помощью упругого элемента 3) и ломку изгибом проката 4 с предварительно нанесенным концентратором напряжений в плоскости разделения относительно опор 5.

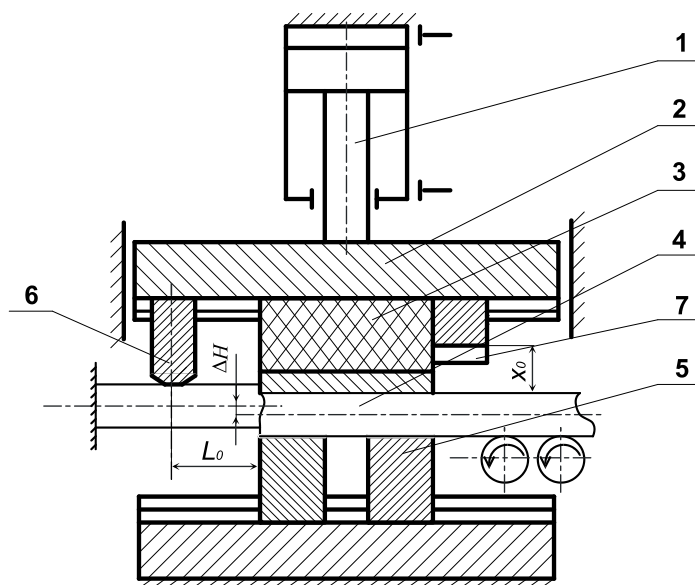


Рисунок 2.5 – Установка для разделения проката [88]

В момент разделения проката происходит резкий сброс силы разделения. Система «цилиндр 1 – подвижная траверса 2 – ломатель 6 – нож 7» становится динамически неуравновешенной.

Энергия, накопленная в машине за счет упругой деформации станины и привода, расходуется на совершение полезной работы – нанесение концентратора напряжений для холодной ломки изгибом следующей заготовки. Таким образом, в одном цикле работы установки совмещаются две операции: холодная ломка изгибом и нанесение концентратора напряжений в плоскости разделения следующей заготовки. Установка статического действия работает в динамическом режиме и обеспечивает повышенную скорость нанесения концентратора напряжений.

Возникает вполне резонный вопрос. Зачем ограничиваться нанесением концентратора напряжений, если можно произвести окончательное разделение проката способом отрезки сдвигом? Ответ на данный вопрос может быть сформулирован в следующем виде.

1 Использование высоких скоростей нагружения сдерживается из-за низкой стойкости штамповой оснастки. Применение нового способа безотходного разделения сортового проката позволяет уменьшить энергоемкость процесса по сравнению с отрезкой сдвигом. При этом в целом снижаются установочная мощность оборудования и нагрузки, действующие на детали конструкции.

2 Новый способ «сдвиг – ломка» удачно реализуется за один рабочий ход машины, позволяет утилизировать энергию упругой деформации станины и привода, а также использовать ее для совершения полезной работы – нанесения концентратора напряжений. При этом упрощается конструкция машины за счет исключения из нее специальных амортизаторов для гашения избыточной энергии.

3 Анализ графика зависимости технологической силы деформации от хода машины применительно к безотходным процессам разделения сортового проката на мерные заготовки показывает, что в момент отделения заготовки от проката происходит резкий сброс силы. 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 пресса и выводу из строя фундамента. Рассмотренные явления сопровождаются возникновением в гидросистеме машины гидравлического удара, связанного с кавитацией. При реализации нового способа разделения эти явления также имеют место, но значительная часть энергии утилизируется, и они проявляются в меньшей степени.

4 Применение безотходного способа разделения сортового проката на мерные заготовки по схеме «сдвиг – ломка» обеспечивает работу оборудования статического действия в динамическом режиме, что повышает качество разделяемых заготовок.

2.3 Исследование процесса разделения сортового проката на гидравлическом прессе при мгновенном исчезновении технологической нагрузки

Исследована работа гидравлического пресса при разделении проката в момент мгновенного исчезновения технологической нагрузки, соответствующий разрушению. В отличие от известных работ [28;89,90], предлагается “вредную” до сих пор энергию упругой деформации станины и привода утилизировать и использовать для совершения полезной работы – нанесения концентратора напряжений.

В литературе [89] исследована работа гидравлического пресса в момент спада технологического сопротивления. В этих случаях динамические процессы исследуют с учетом масс верхней и нижней поперечины, а также с учетом жесткости фундамента гидравлического пресса. Именно переходные процессы колебательного характера в этих условиях нагружения определяют воздействие напряжений в колоннах, давлений в цилиндрах и трубопроводах гидропресса, а также динамическое воздействие на фундамент.

Определяли основные зависимости динамики гидравлического пресса, рассматриваемого в виде трехмассовой системы (рис. 2.6). Изучали влияние элементов системы «пресс – заготовка» на процесс удара, величину нанесенного концентратора напряжений и работу деформирования.

Сила F_1 от гидравлического рабочего цилиндра, имеющего приведенную жесткость C_1 , передается через подвижную траверсу массой m_1 заготовке. Сила F_1 расходуется на холодную ломку изгибом проката и упругую деформацию колонн с жесткостью C_{23} , связывающих верхнюю m_2 и нижнюю m_3 поперечины. В результате возникает значительный потенциал энергии, накопленной в станине и приводе. В момент резкого спада силы технологического сопротивления система «пресс – заготовка» становится динамически неуравновешенной.

Накопленная энергия резко высвобождается. Элементы конструкции пресса под действием сил упругого восстановления начинают перемещаться. Подвижная траверса разгоняется на ходе x_0 и наносит на прокат концентратор напряжений глубиной ΔH (см. рис. 2.1). Для гашения импульсной нагрузки пресс установлен на резиново-металлических амортизаторах, имеющих жесткость C_4 .

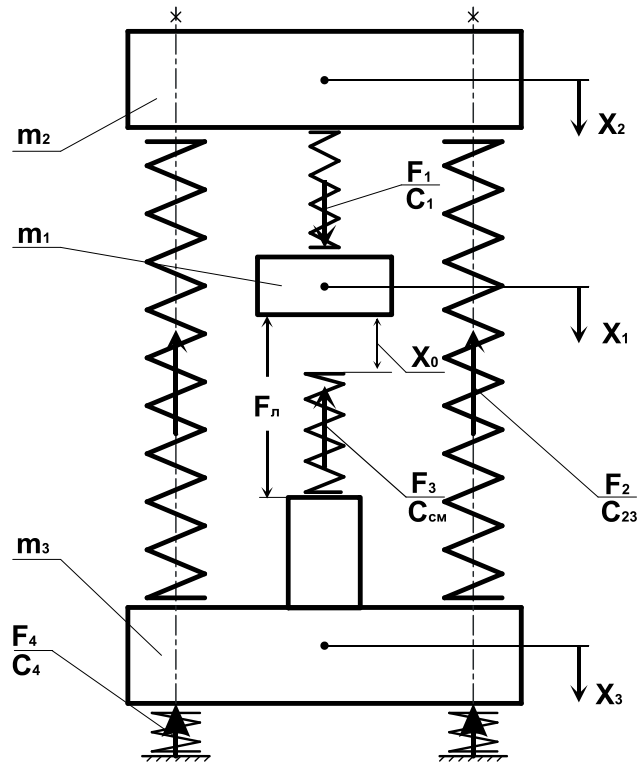


Рисунок 2.6 – Расчётная схема вертикального гидравлического пресса при мгновенном исчезновении технологической нагрузки

1 Активную силу F_1 (см. рис. 2.2), под воздействием которой происходит движение подвижных частей машины, определяли по формуле

$$F_1 = F_n - C_1(x_1 - x_2), \quad (2.21)$$

где F_n – сила холодной ломки проката изгибом по схеме консольного нагружения;

x_1, x_2 – перемещение подвижной траверсы и верхней поперечины;

$$C_1 = \frac{E_{ж} A_{пл}^2}{Q_0}, \quad (2.22)$$

где $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости;

$A_{пл}$ – площадь поперечного сечения плунжера;

Q_0 – объем аккумулятора.

2 Силу упругой деформации колонн под действием силы технологического сопротивления записывали в виде

$$F_2 = F_n - C_{23}(x_2 - x_3), \quad (2.23)$$

где x_3 – перемещение нижней поперечины;

$$C_1 = \frac{nEA_K}{L_K}, \quad (2.24)$$

где n – количество колонн;

E – модуль упругости материала колонн;

A_k – площадь поперечного сечения колонны;

L_k – длина колонны.

3 Для сравнения рассматривали два варианта нанесения концентратора напряжений на прокат круглого сечения. В первом случае концентратор наносился за счет внедрения жесткого двухстороннего клинового инструмента в прокат, а во втором – за счет частичного сдвига части проката относительно профиля в соответствии с предложенным способом «сдвиг – ломка». Определяли зависимость силы нанесения концентратора напряжений от хода деформации ΔH - $F_3 = f(\Delta H)$, где $\Delta H = x_1 - x_0 - x_3$; x_0 – ход разгона подвижной траверсы с ножом:

$$x_0 = \frac{p_0 Q_0}{E_{\text{ж}} A_{\text{пл}}}, \quad (2.25)$$

где p_0 – максимальное рабочее давление в гидроцилиндре пресса.

Давление в рабочем цилиндре пресса p изменяется по закону

$$p = p_0 - \frac{E_{\text{ж}} A_{\text{пл}} x_0}{Q_0}, \quad (2.26)$$

4 Считали, что сила в резиново-металлических амортизаторах изменяется по закону

$$F_4 = G + C_4 x_3, \quad (2.27)$$

где G – вес пресса.

5 Получили систему дифференциальных уравнений движения:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = F_1 - F_3(\Delta H); \\ m_2 \ddot{x}_2 = F_2 - F_1; \\ m_3 \ddot{x}_3 = F_3(\Delta H) - F_2 - F_4. \end{cases} \quad (2.28)$$

Решали данную задачу с использованием метода Рунге – Кутты 4-го порядка [91] с помощью разработанной программы «Lomka» на ПЭВМ. Для этого преобразовывали систему дифференциальных уравнений 2-го порядка к системе уравнений 1-го порядка, вводя новую переменную:

$$y[1] = x_1; y[2] = \dot{x}_1; y[3] = x_2; y[4] = \dot{x}_2; y[5] = x_3; y[6] = \dot{x}_3. \quad (2.29)$$

Тогда существующая система уравнений (2.28) переписется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} y[1]' = y[2]; \\ y[2]' = \frac{F_1 - F_3}{m_1}; \\ y[3]' = y[4]; \\ y[4]' = \frac{F_2 - F_1}{m_2}; \\ y[5]' = y[6]; \\ y[6]' = \frac{F_2 + F_4 - F_3}{m_3}. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Начальные условия записывались в виде:

$$\begin{aligned} x_1(0) = 0; \quad x_2(0) = 0; \quad x_3(0) = 0; \\ \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = 0. \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.3.1 Расчет напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при нанесении концентратора напряжений путем внедрения жесткого двухстороннего клинового инструмента в прокат

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при нанесении концентратора напряжений клиновым инструментом, используемом при холодной ломке изгибом, было осуществлено на основе метода полей линий скольжения, отличающегося своей информативностью и позволяющего в полной мере учесть двухмерный характер пластического формоизменения [92–94].

Методика решения задач данного класса рассмотрена в работах [95–97], более того, в работе [94] дана количественная оценка силы внедрения гладкого клинового инструмента при отсутствии внешнего трения на его контактных поверхностях. В работах [95;98] авторы делают допущение о сохранении плоскостности поверхности деформируемой заготовки, пренебрегая тем самым объемом вытесняемого металла. Вместе с тем численная интерпретация метода полей линий скольжения позволяет повысить точность и расширить круг решаемых задач.

Используемая в этом случае расчетная схема одной из половин очага деформации представлена на рис. 2.3 [99].

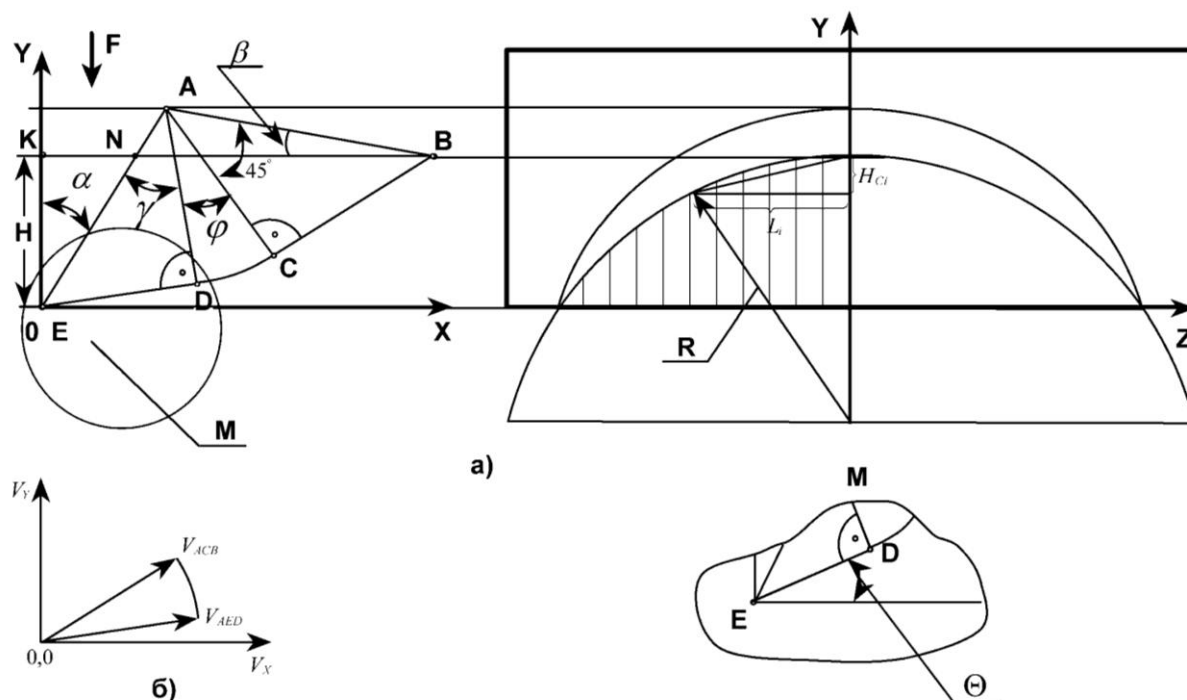


Рисунок 2.7 – Расчётная схема построения полей линий скольжения при внедрении жесткого двухстороннего клинового ножа в прокат круглого сечения [99]

При этом непосредственно построение поля характеристик в физической плоскости (см. рис. 2.3, а), а вместе с этим и в плоскости годографа (см. рис. 2.1, б) было осуществлено путем численного определения геометрических координат всей совокупности особых точек A , B , C , D и E по отношению к осям X , Y , имеющим свое начало на острие клинового ножа.

Обозначив глубину внедрения ножа через H , записывали геометрические соотношения, определяющие координаты вспомогательных точек N , K ; принадлежащих первоначальной поверхности заготовки:

$$x_N = H \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad y_N = H, \quad (2.32)$$

$$x_K = 0; \quad y_K = H, \quad (2.33)$$

где α – полуугол при вершине двустороннего клинового ножа.

С учетом чего площадь треугольника ENK , определяющего объем вытесненного металла, можно определить как

$$A_{ENK} = x_N \cdot \frac{y_K}{2} = \frac{H^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2}. \quad (2.34)$$

Задавись предварительно протяженностью отрезка NA , определяли геометрические координаты особой точки A :

$$x_A = x_N + L_{NA} \cdot \sin \alpha, \quad y_A = y_N + L_{NA} \cdot \cos \alpha. \quad (2.35)$$

Приняв по аналогии с методиками работ [92–94] поверхность вытесненного металла **AB** прямолинейной и учитывая, что высота треугольника **BAN** равна $(y_A - y_N)$, а его площадь должна соответствовать площади треугольника **EKN**, определяли протяженность отрезка **NB**:

$$L_{NB} = \frac{2 \cdot A_{ENK}}{(y_A - y_N)}. \quad (2.36)$$

Вместе с этим определяли геометрические координаты точки **B**:

$$x_B = x_N + L_{NB}, \quad y_B = H, \quad (2.37)$$

В соответствии со свойствами линий скольжения угловые характеристики равнобедренного прямоугольного треугольника **BAC** равны: $\angle BCA = \frac{\pi}{2}$, $\angle CBA = \angle CAB = \frac{\pi}{4}$, а протяженность гипотенузы **BA** соответствует равенству

$$L_{BA} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_A - y_B)^2}. \quad (2.38)$$

Тогда протяженности катетов **CB** и **CA** могут быть представлены как

$$L_{CB} = L_{CA} = \frac{L_{BA}}{\sqrt{2}}. \quad (2.39)$$

Исходя из того что угол подхода гипотенузы **BA** к горизонтали равен

$$\beta = \arctg \frac{(y_A - y_B)}{(x_B - x_A)}, \quad (2.40)$$

геометрические координаты особой точки **C** составят:

$$\begin{aligned} x_C &= x_B - L_{CB} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{4} - \arctg \left(\frac{(y_A - y_B)}{(x_B - x_A)} \right) \right]; \\ y_C &= y_B - L_{CB} \cdot \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arctg \left(\frac{(y_A - y_B)}{(x_B - x_A)} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.41)$$

В самом общем случае поле характеристик в физической плоскости при внедрении жесткого клинового ножа (см. рис. 2.1, а) представляет собой решение четвертой краевой задачи статически определимого плоского течения металла [92], характеризуемой наличием особой точки **A**, в которой характеристики **CA**, **DA** образуют центрированный веер с углом φ . Учитывая, исходя из изложенного выше, что $L_{DA} = L_{CA}$, а угол наклона характеристики **DA** по отношению к вертикали равен $(\gamma - \alpha)$, где $\gamma = 0,5 \cdot \arccos(\tau/k)$ – угол подхода характеристики **DA** к контактной поверхности деформирующего инструмента, определяемый соотношением

касательных контактных напряжений τ и сопротивлением деформируемого металла сдвигу k , геометрические координаты особой точки D составят:

$$x_D = x_A + L_{DA} \cdot \sin(\gamma - \alpha); \quad y_D = y_A - L_{DA} \cdot \cos(\gamma - \alpha). \quad (2.42)$$

И, наконец, выразив из прямоугольного треугольника ADE протяженность катета $L_{DE} = L_{DA} \cdot \operatorname{tg}\gamma$ и определив угол его подхода к горизонтали $\Theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - (\frac{\pi}{2} - \gamma) = (\gamma - \alpha)$, расчетные, т. е. соответствующие данному значению протяженности отрезка L_{NA} , координаты особой точки E могут быть представлены в виде равенства

$$x_{E_{\text{расч}}} = x_D - L_{DE} \cdot \cos(\gamma - \alpha); \quad y_{E_{\text{расч}}} = y_D - L_{DE} \cdot \sin(\gamma - \alpha), \quad (2.43)$$

где расчетные значения $x_{E_{\text{расч}}}$, $y_{E_{\text{расч}}}$ согласно принятой расчетной схеме (см. рис. 2.1, а) должны соответствовать началу координат, т. е. должны быть равны нулю.

Выполнение данного условия, в свою очередь, может быть обеспечено на основе организации дополнительной итерационной процедуры определения требуемой протяженности отрезка NA с использованием, например, метода целенаправленного перебора вариантов:

$$L_{NA}(k+1) = L_{NA} \cdot k + A_L \cdot \operatorname{sign} Y_{E_{\text{расч}}} \cdot k, \quad (2.44)$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

A_L – шаг изменения протяженности отрезка NA ;

$\operatorname{sign} Y_{E_{\text{расч}}}$ – функция знака, соответствующая знаку расчетной геометрической координаты точки E .

При выполнении условия $Y_{E_{\text{расч}}} \cong 0$ искомая угловая характеристика φ определялась как:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_C - x_A}{y_A - y_C}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{x_D - x_A}{y_A - y_D}\right). \quad (2.45)$$

С учетом (2.45) гидростатическое (среднее) напряжение σ_T в особой точке E , а вместе с ним нормальные напряжения σ_{xE} , σ_{yE} и приведенные к единице ширины значения сил F_x , F_y , согласно свойствам линий скольжения [92–94], составят соответственно:

$$\sigma_E = k + 2 \cdot k \cdot \varphi = k \cdot (1 + 2\varphi); \quad (2.46)$$

$$\sigma_{xE} = \sigma_E - k \cdot \sin 2\Theta; \quad (2.47)$$

$$\sigma_{yE} = \sigma_E + k \cdot \sin 2\Theta; \quad (2.48)$$

$$\mathbf{F}_x = \sigma_{xE} \cdot \mathbf{y}_A - \tau \cdot \mathbf{x}_A; \quad (2.49)$$

$$\mathbf{F}_y = \sigma_{yE} \cdot \mathbf{x}_A + \tau \cdot \mathbf{y}_A, \quad (2.50)$$

где количественная оценка касательных напряжений может быть задана при помощи коэффициента пластического трения $\mu = \tau/2k$.

С учетом симметричности схемы нагружения полная сила осадки клинового инструмента при наличии квадратной или прямоугольной заготовки шириной \mathbf{b} и i -ой во времени величине глубины внедрения \mathbf{H}_i составит

$$\mathbf{F}_i = 2\mathbf{F}_{yi} \cdot \mathbf{b}. \quad (2.51)$$

В случае наличия заготовки с круглым поперечным сечением картина несколько видоизменяется и требует организации дополнительного численного решения с разбиением на элементарные сечения по ширине, т. е. по оси \mathbf{z} . При этом по аналогии с очагом деформации процесса прокатки [100] полуширина площадки внедрения \mathbf{L}_i в i -тый момент времени, т. е. при известной глубине внедрения в средней части заготовки \mathbf{H}_{ci} , может быть определена из условия (см. рис. 2.1, а)

$$\mathbf{L}_i^2 = \mathbf{R}^2 - (\mathbf{R} - \mathbf{H}_{ci})^2 = 2\mathbf{R}\mathbf{H}_{ci} - \mathbf{H}_{ci}^2, \quad (2.52)$$

откуда

$$\mathbf{L}_i = \sqrt{2\mathbf{R}\mathbf{H}_{ci} - \mathbf{H}_{ci}^2}. \quad (2.53)$$

С учетом известного значения \mathbf{L}_i и заданного значения количества разбиений \mathbf{KRj} шаг разбиения будет равен $\Delta\mathbf{z}_i = \frac{\mathbf{L}_i}{\mathbf{KRj}}$, а координата каждого отдельного j -того значения по отношению к оси \mathbf{z} , имеющей свое начало в центре заготовки составит:

$$\mathbf{z}_{ij} = \Delta\mathbf{z}_i \cdot \mathbf{j}. \quad (2.54)$$

Глубина внедрения в j -том сечении \mathbf{H}_{ij} будет соответствовать

$$\mathbf{H}_{ij} = \mathbf{R} - \sqrt{\mathbf{R}^2 - \mathbf{z}_{ij}^2}. \quad (2.55)$$

В зависимости от чего, согласно рассмотренному выше алгоритму, может быть определена сила \mathbf{F}_{ij} , а полная величина силы внедрения составит

$$\mathbf{F}_i = 2 \left[\mathbf{F}_{ci} \cdot \Delta\mathbf{z}_i + \sum_{j=2}^{\mathbf{KRj}-2} \frac{\mathbf{F}_{ij} + \mathbf{F}_{i(j-1)}}{2} \Delta\mathbf{z}_i + \mathbf{F}_{i(\mathbf{KRj}-1)} \cdot \frac{\Delta\mathbf{z}_i}{2} \right], \quad (2.56)$$

где \mathbf{F}_{ci} – сила внедрения для среднего сечения, соответствующего глубине \mathbf{H}_{ci} .

При известном же значении F_i и заданном значении количества разбиений глубины внедрения ножа KRi , т. е. с учетом шага разбиения $\Delta H_c = H_c / KRi$, может быть определена и работа, затраченная на внедрение клина на данную глубину H_c :

$$A = \sum_{i=1}^{KRi-1} \frac{F_i + F_{(i+1)}}{2} \cdot \Delta H + F_1 \cdot \frac{\Delta H}{2}. \quad (2.57)$$

В целом зависимости (2.32–2.57), наряду с расчетом удвоенного сопротивления сдвигу с учетом реальных скоростей деформации, составили полный алгоритм по автоматизированному построению полей характеристик и последующему расчету применительно к внедрению жесткого двухстороннего клинового ножа в заготовку любой формы поперечного сечения (рис. 2.4).

В качестве примера численной реализации предложенной математической модели на рис. 2.3, 2.4, 2.5 представлены расчетные распределения удельных значений силы $F/2k$ и работы $A/2k$ в зависимости от глубины внедрения H , полуугла двухстороннего клинового ножа α , коэффициента внешнего трения μ и диаметра разделяемого сортового проката d .

Из анализа представленных результатов является очевидным, что с увеличением глубины внедрения H , полуугла двухстороннего клинового ножа α , коэффициента внешнего трения μ и диаметра разделяемого сортового проката d энергосиловые параметры интенсивно возрастают.

При этом только изменение коэффициента внешнего трения μ в пределах $0...0,2$ может привести к увеличению силы и работы на $20...30\%$, что еще раз подтверждает необходимость корректного учета всей совокупности факторов, свойственных рассматриваемому технологическому процессу.

В общем случае сопротивление металла холодной деформации зависит от степени наклепа, скорости деформации, температуры металла и знака нагружения.

Поскольку концентратор напряжений наносится динамической силой со скоростями деформирования в диапазоне $2...3$ м/с при комнатной температуре $t = 20^\circ\text{C}$, величину напряжения сопротивления деформации определяли по формуле

$$\sigma_{T_i} = \sigma_{T_0} \cdot n_{u_i}, \quad (2.58)$$

где σ_{T_0} – величина предела текучести исходного материала, полученная при стандартных скоростях деформации U_0 ;

n_{u_i} – коэффициент, учитывающий отличие скорости деформации от условий, имеющих место при стандартных испытаниях.

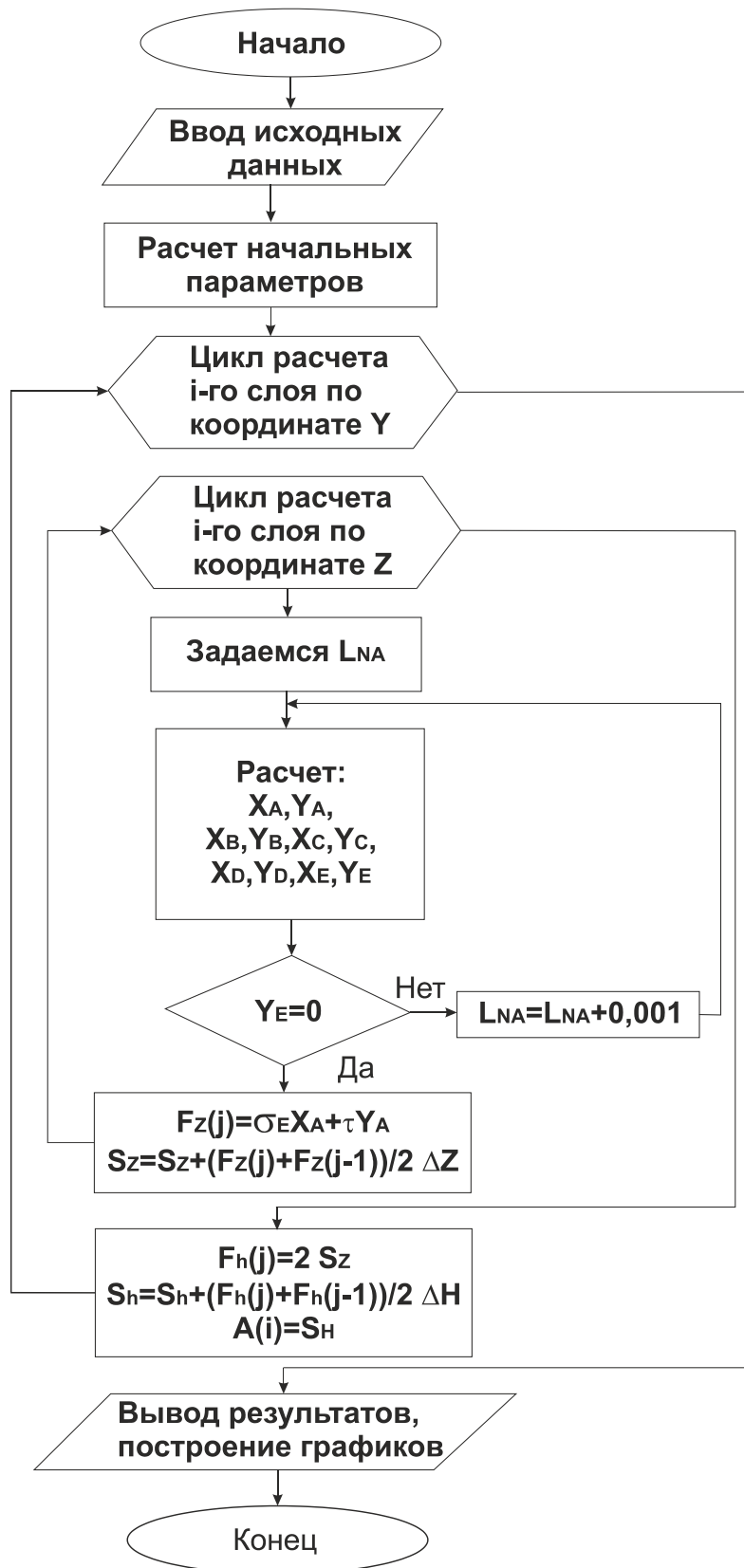
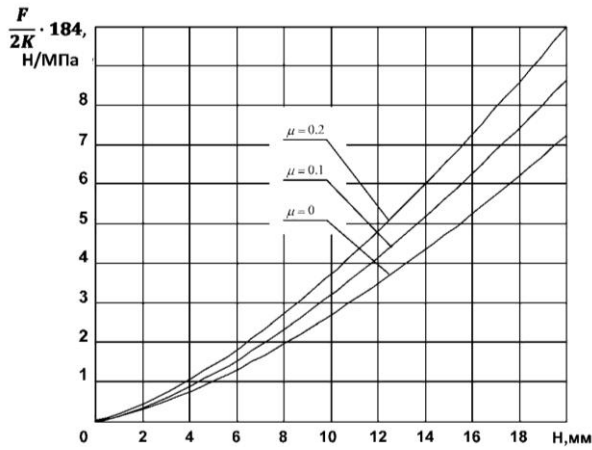
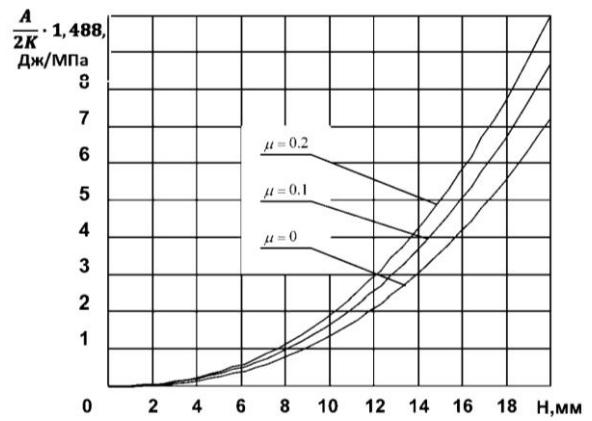


Рисунок 2.8 – Укрупнённый алгоритм расчёта напряжённо-деформированного состояния и энергосиловых параметров при нанесении концентратора напряжений путём внедрения жесткого двухстороннего клиновидного ножа в прокат произвольной формы поперечного сечения [99]

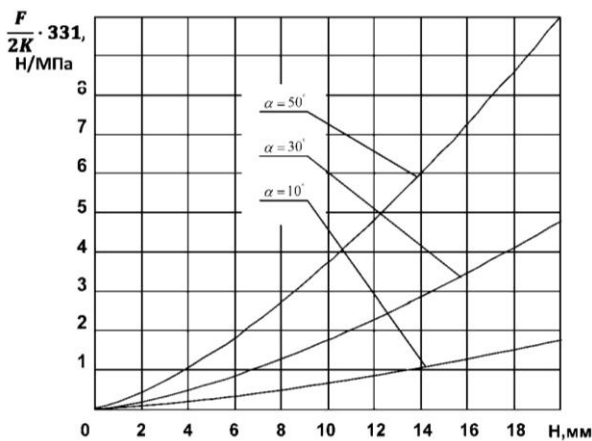


а

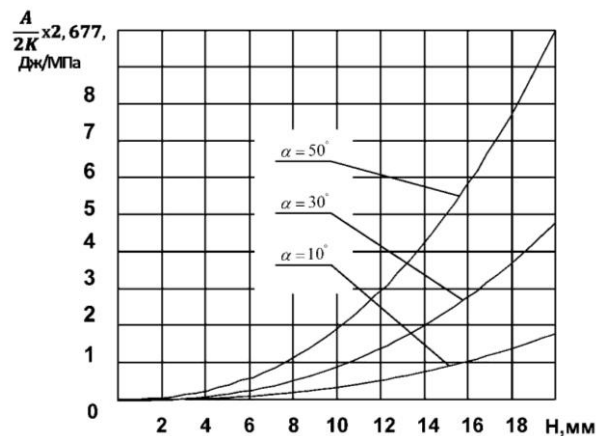


б

Рисунок 2.9 – Графики зависимостей удельных значений силы $F/2k$ (а) и работы $A/2k$ (б) от глубины внедрения H клинового ножа при $\alpha = 30^\circ$, $d = 200$ мм [99]



а



б

Рисунок 2.10 – Графики зависимостей удельных значений силы $F/2k$ (а) и работы $A/2k$ (б) от глубины внедрения H клинового ножа при $\mu = 0,1$, $d = 200$ мм [99]

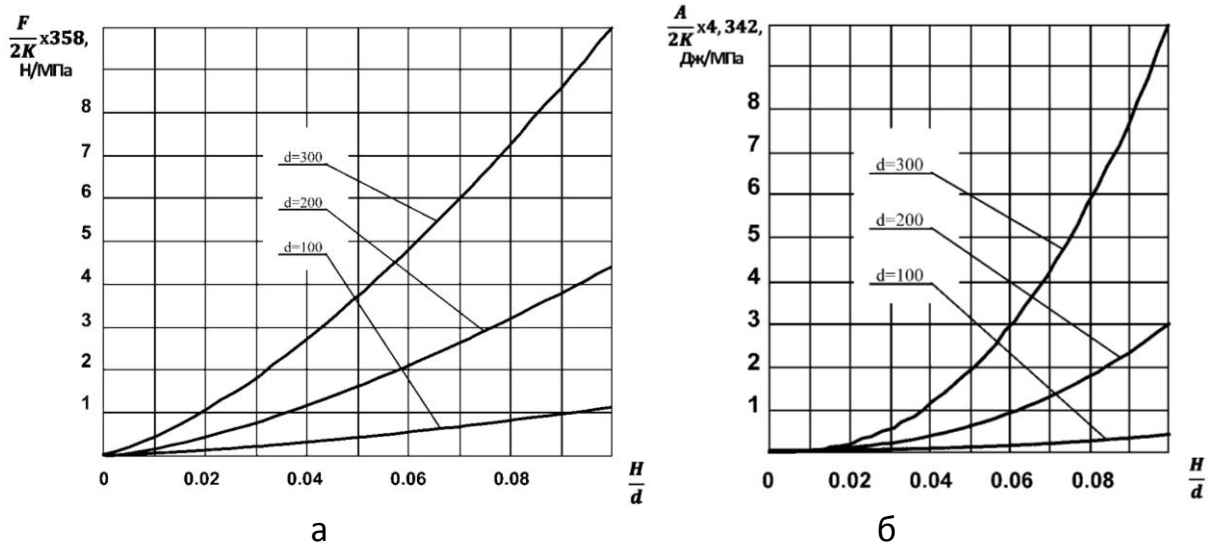


Рисунок 2.11 – Графики зависимостей удельных значений силы $F/2k$ (а) и работы $A/2k$ (б) от относительной глубины внедрения H/d клинового ножа при $\mu = 0,1$, $\alpha = 30^\circ$ [99]

На основании справочных экспериментальных данных, приведенных в работе [38] для стали 45, при испытании на сжатие (рис. 2.6) построена зависимость $n_{ц} = f(U_i)$ для величины относительной деформации $\varepsilon = 0,032$, которая соответствует относительной глубине внедрения клинового ножа $H/d = 0,1$ при угле заточки $2\alpha = 60^\circ$, где U_i – скорость деформации материала разделяемого проката (рис. 2.3).

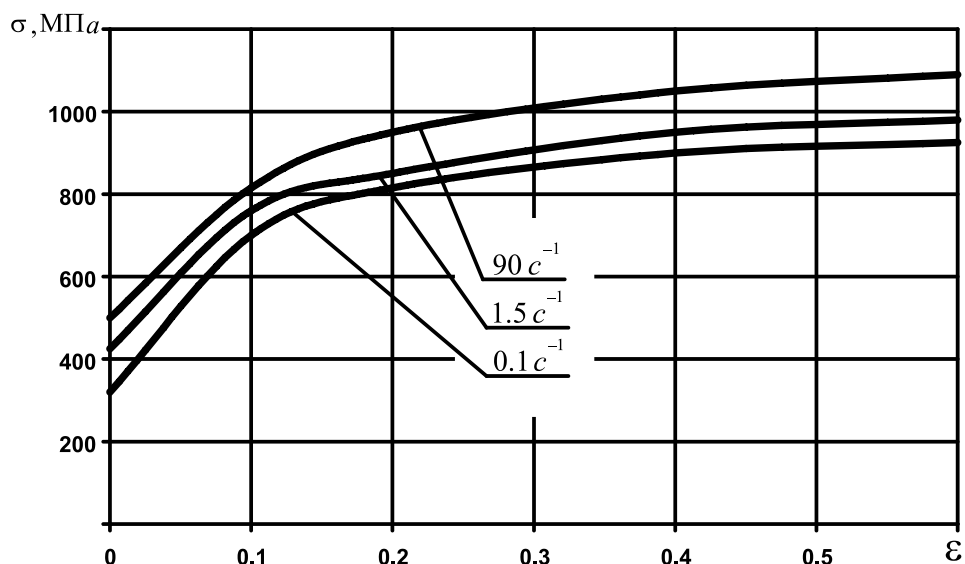


Рисунок 2.12 – Зависимость напряжения сопротивления деформации металла от величины относительной деформации и скорости деформации для стали 45 при испытании на сжатие ($t = 20^\circ \text{C}$) [38]

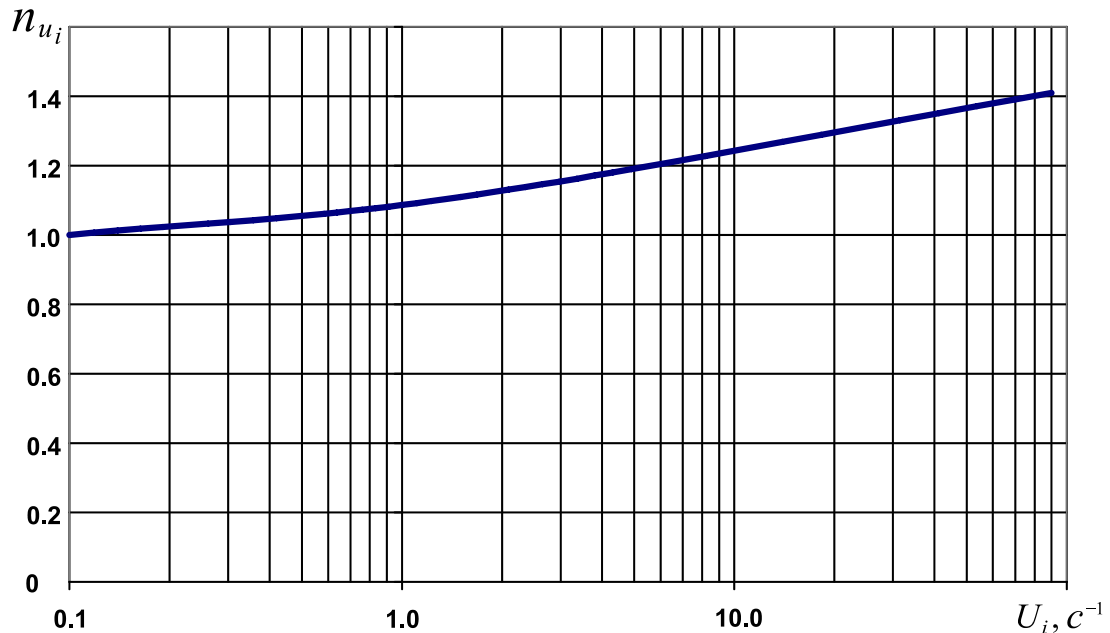


Рисунок 2.13 – Зависимость коэффициента, учитывающего влияние скорости деформации от величины скорости деформации в логарифмических координатах для стали 45 ($\varepsilon = 0,032$)[99]

Относительную деформацию ε при внедрении двухстороннего клинового ножа рассчитывали, как

$$\varepsilon = \Delta V / V, \quad (2.59)$$

где $\Delta V, V$ – выдавленный и исходный объемы металла под ножом.

Аналитически функциональная связь $n_{u_i} = f(U_i)$ для стали 45 является близкой к линейной в логарифмических координатах и может быть аппроксимирована с погрешностью менее 3 % зависимостью

$$n_{u_i} = A_n \cdot \ln \frac{U_i}{U_0}, \quad (2.60)$$

где A_n – коэффициент пропорциональности;

$U_0 = 0,1 c^{-1}$ – скорость деформации при стандартных условиях испытаний.

Аналогичные зависимости могут быть получены и для других сталей.

Для стали 45 путем аппроксимации полиномом 3-й степени [91, рассчитывали величину предела текучести исходного проката, полученную при стандартной скорости деформации $U_0 = 0,1 c^{-1}$ и относительной деформации $\varepsilon = 0,032$:

$$\sigma_{T_0} = a_1 \varepsilon^3 + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon + a_0 = 3125 \varepsilon^3 + (-5437,5) \varepsilon^2 + 3137,5 \varepsilon + 320 = 414 \text{ МПа.}$$

Скорость деформации U_{xi} при внедрении двухстороннего клинового ножа определяли с учетом скорости инструмента \dot{x}_1 , которую рассчитывали с использованием математической модели разгрузки гидравлического пресса (см. подраздел 2.3):

$$U_{xi} = \dot{x}_1 / \left(d_0 - \frac{2}{3} H_i \right). \quad (2.61)$$

Для заданных исходных данных инструмента ($2\alpha = 60^\circ; H/d = 0,1; \mu = 0,1$) и материала проката (сталь 45) скорость деформации составила $U_{xi} = 11,6 \text{ с}^{-1}$.

Тогда по графику (см. рис. 2.3) определяли $n_{ui} = 1,25$. С учетом значения n_{ui} , удвоенное сопротивление сдвигу для стали 45 составит

$$2K = 1,55 \cdot \sigma_{T_0} \cdot n_{ui} = 1,55 \cdot 414 \cdot 1,25 \cong 802 \text{ МПа}.$$

Полученные аналитические решения, наряду с программным модулем расчета удвоенного сопротивления сдвигу $2K$, составили методику расчета энергосиловых параметров гидравлического пресса и оснастки для нанесения концентратора напряжений при холодной ломке проката изгибом.

2.3.2 Исследование энергосиловых параметров процессананесения концентратора напряжений за счет частичного сдвига части проката относительно профиля при реализации способа «сдвиг – ломка»

Зависимость усилия внедрения плоского ножа от глубины внедрения получали с помощью аппроксимации полиномом 3-й степени [91] типовых графиков «усилие отрезки – относительная деформация» для сортового проката из разных сталей: 10, 45, 65Г. Исследование кинематических и энергосиловых параметров процесса нанесения концентратора напряжений, согласно способу «сдвиг – ломка», производили с помощью разработанной математической модели с использованием утилизированной энергии упругой деформации станины и привода.

Расчеты производились для гидравлического четырехколонного пресса мод. П424 усилием 2,5 МН с параметрами: $m_1 = 4000 \text{ кг}$; $m_2 = 7000 \text{ кг}$; $m_3 = 7000 \text{ кг}$; масса пресса $m = 18000 \text{ кг}$; $n = 4$; $L_\epsilon = 3,5 \text{ м}$; диаметр колонны $d_\epsilon = 0,1 \text{ м}$; $\tilde{N}_4 = 5 \cdot 10^8 \text{ Ђ}$; диаметр плунжера $d_{пл} = 0,2 \text{ м}$; $Q_0 = 0,1 \text{ м}^3$; $E_{ж} = 1500 \text{ МПа}$. Параметры разделяемого проката: $d = (100, 150, 200) \text{ мм}$, относительная величина плеча приложения нагрузки $L/d = 2$.

Результаты расчетов кинематических и энергосиловых параметров процесса нанесения концентратора напряжений, проведенных для стали 45 ($\sigma_B = 598 \text{ МПа}$, $\delta_5 = 16 \%$), представлены на рис. 2.4, 2.3, 2.4 [101].

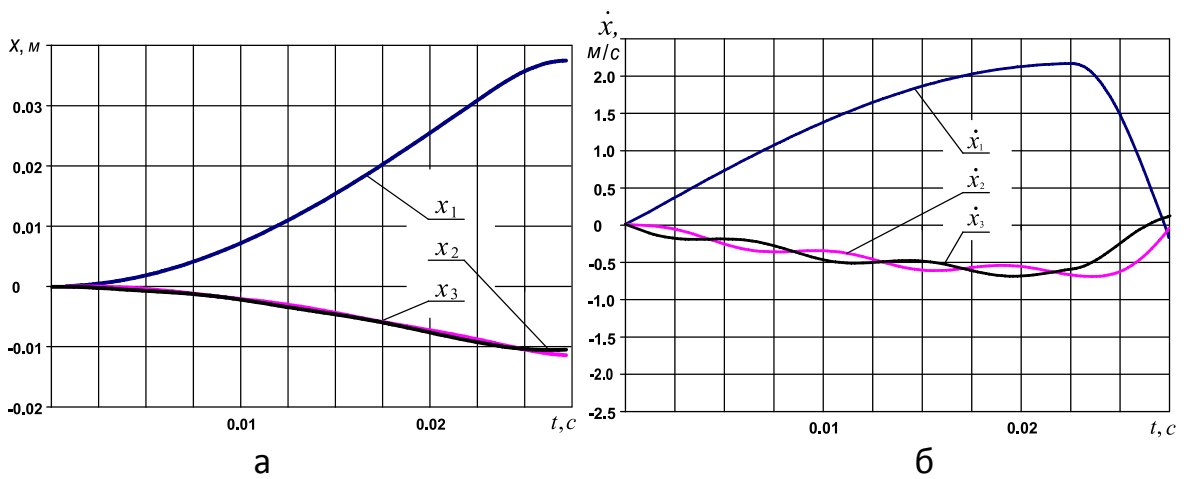


Рисунок 2.14 – Зависимость перемещений (а) и скоростей (б) элементов гидравлического пресса от времени при разделении проката $d = 200$ мм, $L = 400$ мм из стали 45 [101]

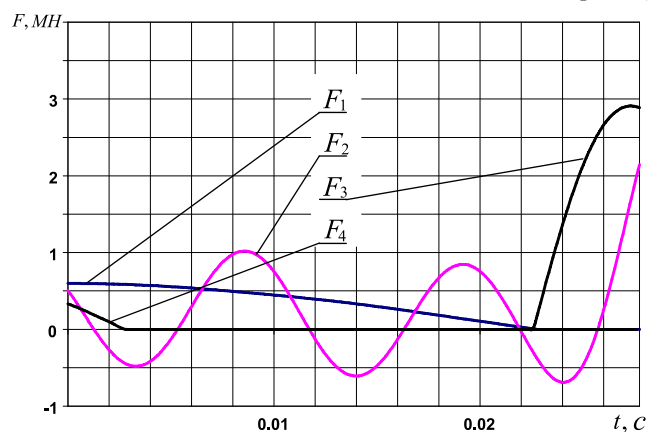


Рисунок 2.15 – Зависимость сил, действующих на элементы гидравлического пресса от времени при разделении проката диаметром 200 мм из стали 45 ($L/d = 2$) [101]

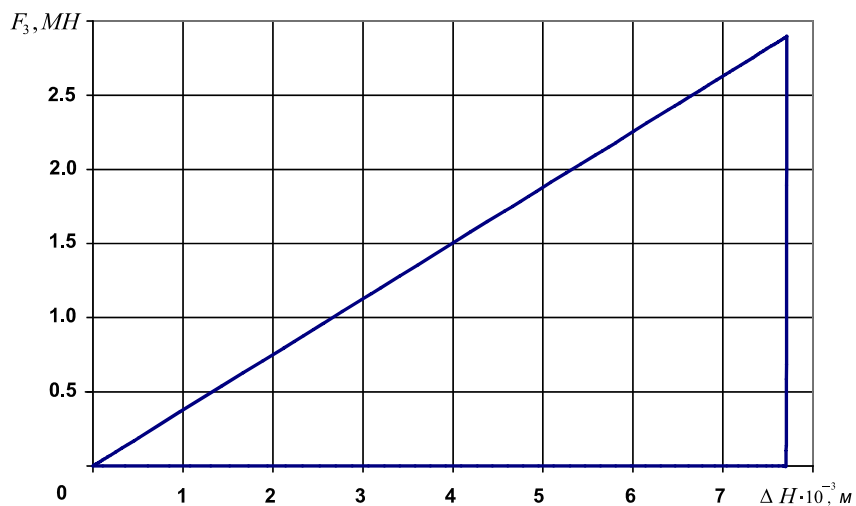


Рисунок 2.16 – Зависимость силы нанесения концентратора напряжений от глубины внедрения ножа в прокат диаметром 200 мм из стали 45 ($L/d = 2$) [101]

Анализ графиков $x = f(t), \dot{x} = \dot{f}(t)$ (см. рис. 2.2) показывает, что время разгрузки гидропривода пресса составило $t_r = 0,018$ с. Скорость траверсы достигает $\dot{x}_1 = 2,17$ м/с, а ускорение – $\ddot{x}_1 = 711$ м/с².

Анализ результатов расчетов (см. рис. 2.1, 2.1) показывает, что сила нанесения концентратора напряжений равна $F_3 \cong 2.84$ МН при глубине внедрения $\Delta H \cong 7,7 \mu\text{m}$, что составляет приблизительно 3,85 % от диаметра проката. Работа нанесения концентратора напряжений равна $A \cong 11$ кДж, что составляет около 5 % от работы отрезки сдвигом (рис. 2.4).

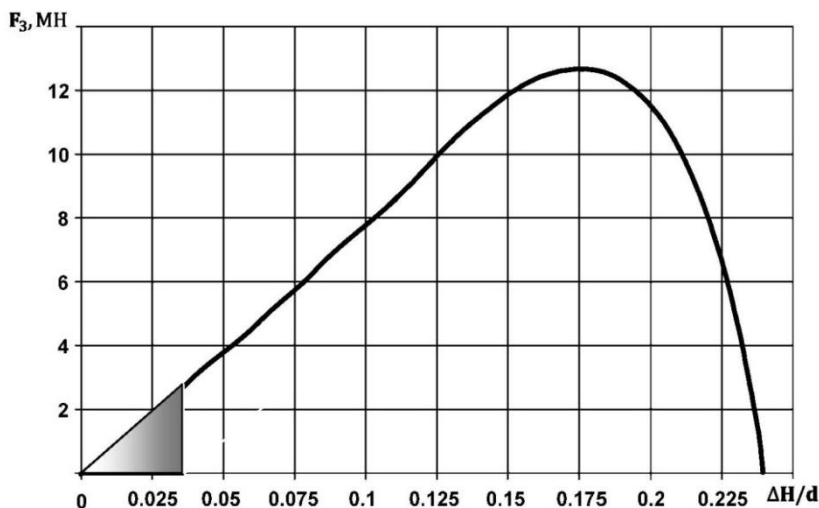


Рисунок 2.17 – Соотношение работы отрезки сдвигом и работы нанесения концентратора напряжений по способу «сдвиг – ломка» [101]

Результаты расчетов работы нанесения концентратора напряжений, выполненные для проката из сталей: 10 ($\sigma_B = 333$ МПа, $\delta_5 = 31\%$), 45 ($\sigma_B = 598$ МПа, $\delta_5 = 16\%$), 65Г ($\sigma_B = 696$ МПа, $\delta_5 = 11\%$) с варьированием диаметра проката $d = (100, 150, 200)$ мм представлены на рис. 2.3.

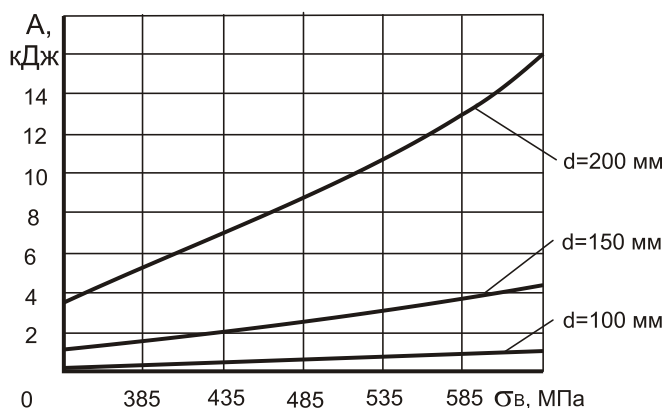


Рисунок 2.18 – Зависимость работы деформирования от прочностных свойств материала разделяемого проката при плече приложения нагрузки $L = 2d$ [101]

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением прочностных свойств материала при увеличении диаметра разделяемого проката работа нанесения концентратора напряжений возрастает более интенсивно. На основании проведенных расчетов можно определить энергию нанесения концентратора напряжений при разделении проката из различных материалов.

2.4 Методика расчета параметров гидравлического пресса и оснастки с использованием эффекта утилизации энергии упругой деформации станины и привода

При разделении проката на гидравлическом прессе с использованием утилизированной энергии упругой деформации станины и привода величина запасенной энергии может оказаться недостаточной для нанесения эффективного концентратора напряжений. В этом случае необходимо модернизировать стандартный гидравлический пресс в направлении повышения величины запасаемой энергии. Укрупненный алгоритм расчета параметров гидравлического пресса при разделении проката представлен на рис. 2.3.

Расчеты по определению работы нанесения концентратора напряжений на прокат из сталей 10, 45, 65Г в зависимости от относительной величины плеча приложения нагрузки и объема аккумулятора, проведенные для гидравлического пресса П424 усилием 2,5 МН, представлены на рис. 2.3. С уменьшением плеча приложения нагрузки при холодной ломке проката изгибом и увеличении объема аккумулятора работа нанесения концентратора напряжений резко возрастает.

На основании проведенных исследований предложены основные пути повышения эффективности работы гидравлического пресса применительно к процессу разделения проката на мерные заготовки:

1 Повышение уровня потенциальной энергии, накапливаемой в гидроприводе пресса. Величина энергии в большей мере зависит от рабочего давления в гидроцилиндре и аккумуляторе и в меньшей степени – от объема аккумулятора и модуля упругости рабочей жидкости. Однако, поскольку рабочее давление для стандартного кузнечно-прессового оборудования ограничивается величиной 32 МПа, целесообразным представляется увеличение объема аккумулятора пресса.

2 Изменение массовых параметров пресса. Необходимо стремиться к увеличению разгоняемых масс для повышения эффективности удара.

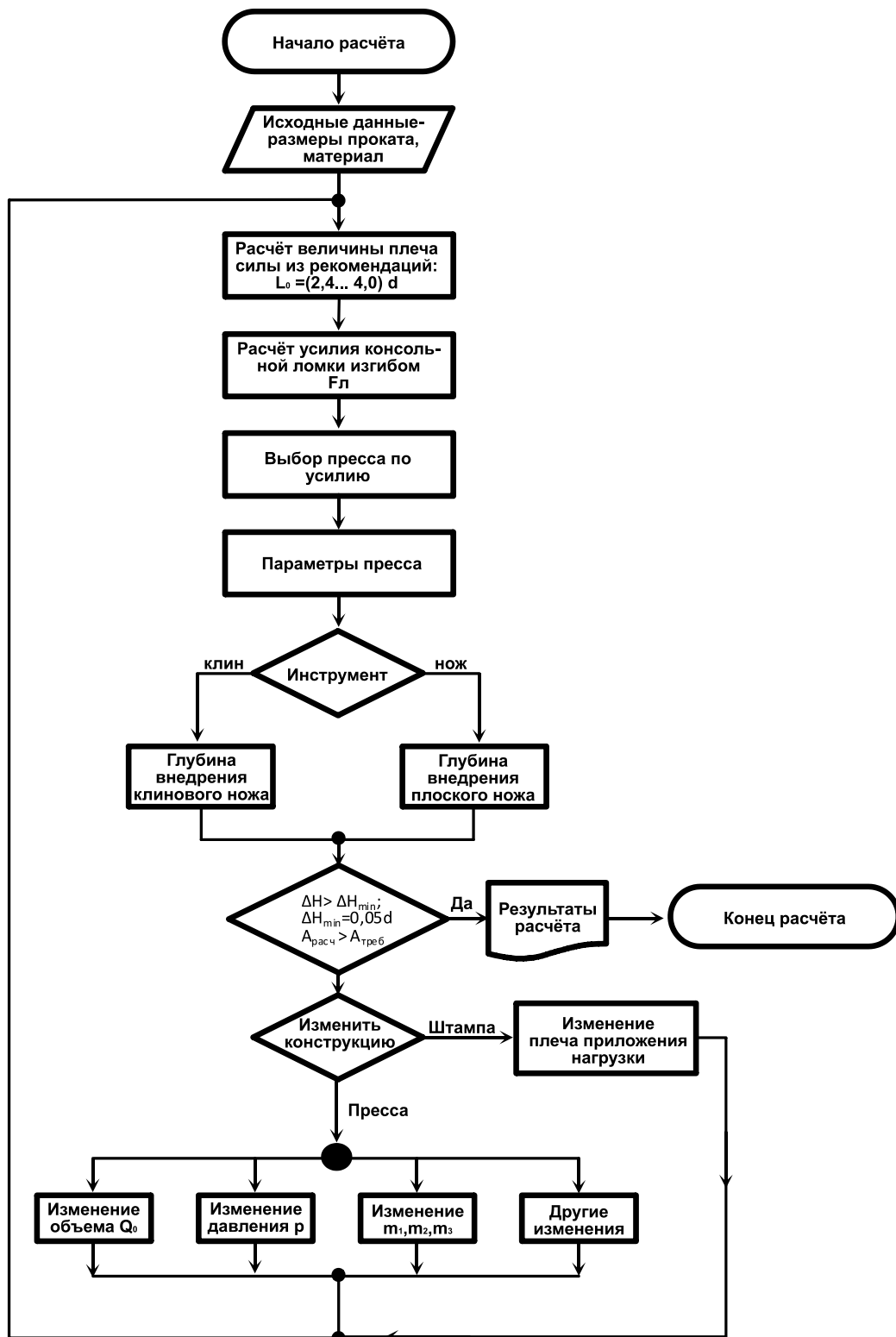


Рисунок 2.19 – Укрупнённый алгоритм расчёта параметров гидравлического прессы и оснастки при разделении проката с использованием утилизированной энергии упругой деформации станины и привода [101]

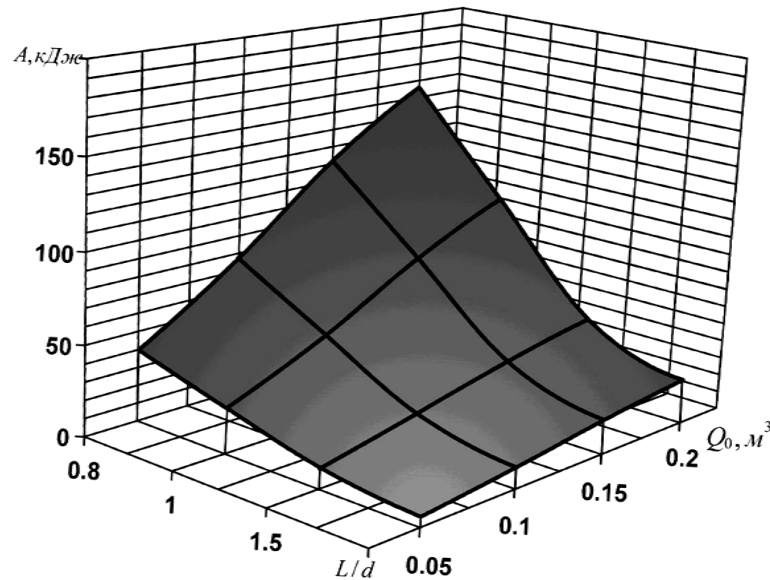


Рисунок 2.20 – Зависимость работы нанесения концентратора напряжений от относительного плеча приложения нагрузки и объёма аккумулятора гидравлического пресса при холодной ломке проката из стали 45 [101]

2.5 Математическое моделирование процесса разделения сортового проката по схеме отрезки эксцентричным закручиванием

Одной из перспективных схем разделения проката является отрезка эксцентричным закручиванием во втулочных ножах, при которой отрезаемая часть осуществляет круговое движение вокруг оси, смещенной по отношению к оси разрезаемого проката на определенное расстояние – величину эксцентриситета e . Величина эксцентриситета e не может превышать величины радиуса проката r .

Рассматриваемый способ отрезки является совмещенным процессом отрезки сдвигом и кручением и объединяет положительные стороны обоих процессов. При этом сечение реза разделено на две зоны: зону чистого кручения и зону перемещения разделяемых частей по дуге. Удельная доля указанных зон зависит от величины эксцентриситета e . При $e = 0$ имеет место чистое кручение, при $0 < e < r$ – эксцентричное закручивание, при $e \geq r$ – отрезка по дуге, а при $e \cong \infty$ имеем отрезку эквивалентную поступательным перемещениям разделяемых частей проката.

Способ отрезки эксцентричным закручиванием имеет следующие преимущества:

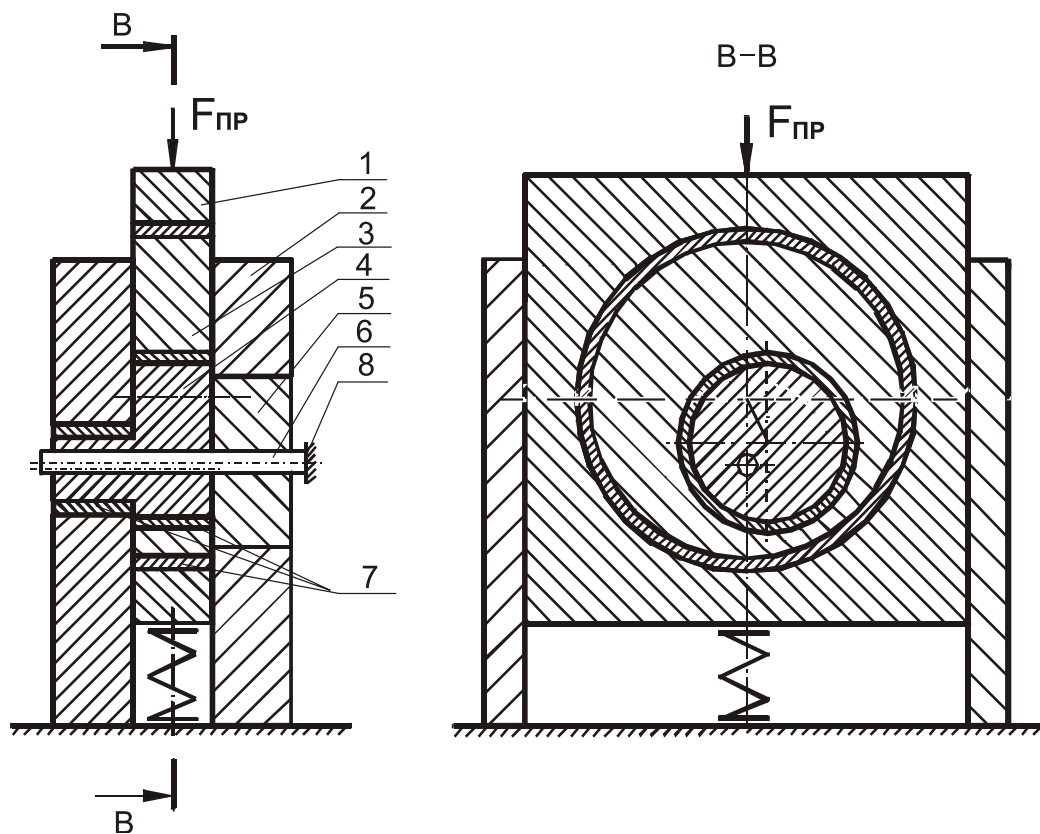
1 Подвижный режущий нож-втулка совершает сложное движение относительно неподвижной части разделяемого проката, постепенно внедряясь в прокат на дуге охвата около 180° . При этом глубина внедрения

ножа в прокат уменьшается по сравнению с отрезкой сдвигом. Таким образом, снижаются энергосиловые затраты по сравнению с отрезкой на кривошипных ножницах с поступательным перемещением инструмента.

2 Уменьшение силы отрезки в момент разделения снижает последствия явления мгновенной разгрузки оборудования, которое сопровождается разрушением фундамента, расслаблением соединений, кавитацией и т. д.

3 Процесс отрезки осуществляется плавно и бесшумно, что повышает культуру производства.

На рис. 2.4 представлена конструктивная схема устройства для отрезки проката эксцентричным закручиванием [102].



- 1, 2 – подвижная и неподвижная ползушки; 3 – круговая шайба (шатун);
 4, 5 – режущие ножи-втулки; 6 – разделяемый прокат;
 7 – подшипники скольжения; 8 – упор

Рисунок 2.21 – Конструктивная схема отрезки эксцентричным закручиванием [103]

Основными элементами устройства являются: подвижная 1 и неподвижная 2 ползушки; круговая шайба (шатун) 3, расположенная в подвижной ползушке 1 с эксцентрично вставленными режущими ножами-втулками 4, 5. Величина эксцентриситета соответствует длине шатуна. Режущий нож-втулка 4 установлен эксцентрично относительно своей оси

вращения. Величина эксцентриситета соответствует радиусу кривошипа. В свою очередь прокат размещается в полости ножей также с эксцентриситетом $e < r$.

Устройство работает следующим образом. В исходном положении режущие ножи-втулки 4, 5 расположены соосно. В полость этих втулок подается прокат 6 до упора.

Под действием силы со стороны кузнечно-прессового оборудования подвижная ползушка 1 движется вниз в направляющих оснастки. При этом прокат заклинивается в ножах 4, 5. Происходит пластическое внедрение ножей, вызывающее тангенциальное смещение частиц металла, и на прокат наносится концентратор напряжений. При превышении сил трения на поверхностях режущего ножа 4, круговой шайбы 3 и проката 6 режущий нож 4 получает вращательное движение относительно своей оси и увлекает за собой отрезаемую часть проката, что вызывает ее кручение в плоскости реза и приводит к окончательному разделению проката 6. Отрезка заканчивается при повороте режущего ножа-втулки 4 на величину, которая зависит от механических свойств разделяемого материала (примерно около 180°). После совершения ножом 4 полного оборота на 360° оси режущих ножей-втулок 4, 5 вновь совпадают друг с другом. Устройство готово для принятия очередного прутка.

Образующийся до начала разрушения в плоскости реза естественный концентратор напряжений в виде пластического пояска обеспечивает стабилизацию траектории трещины разрушения. Конструкция устройства проста и надежна в работе. Развитая площадь опоры подвижного ножа-втулки, круговой шайбы и достаточная длина направляющих позволяют использовать ударные нагрузки для реализации процесса отрезки. При этом не только уменьшаются габариты и металлоемкость устройства, но и повышается геометрическая точность разделяемых заготовок, расширяется диапазон размеров поперечного сечения проката и разделяемых марок материала. На рис. 2.3 представлена схема образования поверхности среза.

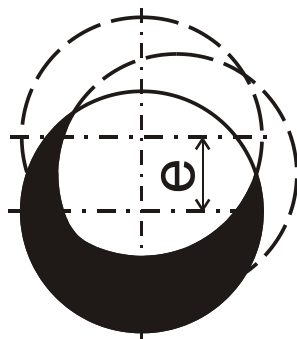


Рисунок 2.22 – Схема образования поверхности среза

Для оценки работы деформирования рассчитывали момент сопротивления, который может преодолеть штамп при технологическом усилии прессы $F_3 = 1000$ кН. На рис. 2.4 представлена расчетная схема механизма, соответствующая штампу (см. рис. 2.2).

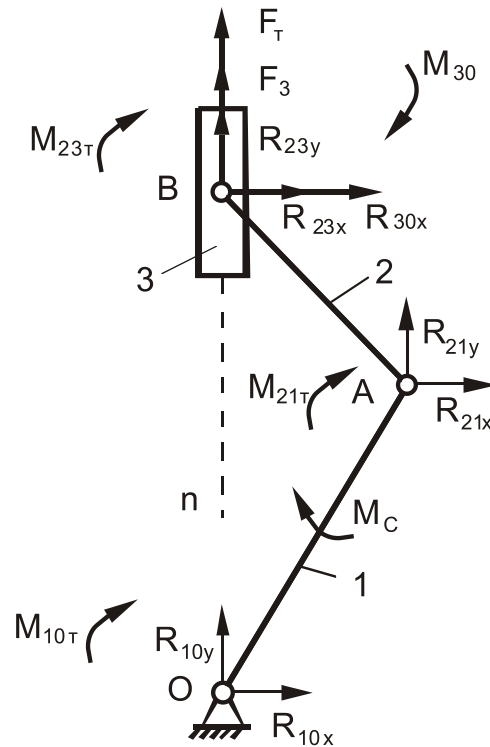


Рисунок 2.23 – Схема механизма с приложенными силами и реакциями в кинематических парах [103]

При выполнении расчета полагали, что сила F_3 , приложенная к ползуну, задана. Силами тяжести и инерции деталей штампа пренебрегали. Силовой расчет начинали с рассмотрения структурной группы 2–3.

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

$$\sum M_A(F_i)_2 = 0: \quad R_{23x}(y_A - y_B) - R_{23y}(x_A - x_B) + M_{21T} + M_{23T} = 0; \quad (2.62)$$

$$\sum M_B(F_i)_3 = 0: \quad M_{32T} + M_{30} = 0; \quad (2.63)$$

$$\sum (F_{ix})_3 = 0: \quad -R_{23y} + F_3 + F_T = 0; \quad (2.64)$$

$$\sum (F_{iy})_3 = 0: \quad R_{30x} - R_{23x} = 0; \quad (2.65)$$

$$\sum (F_{ix})_2 = 0: \quad R_{21x} + R_{23x} = 0; \quad (2.66)$$

$$\sum (F_{iy})_2 = 0: \quad R_{21y} + R_{23y} = 0, \quad (2.67)$$

где $\mathbf{R}_{21x}, \mathbf{R}_{21y}, \mathbf{R}_{23x}, \mathbf{R}_{23y}$ – реакции в шарнирах; \mathbf{R}_{30x} – реакция в поступательной паре; \mathbf{F}_T – сила трения в поступательной паре; \mathbf{F}_3 – сила, приложенная к ползуну; $\mathbf{M}_{21T}, \mathbf{M}_{23T}, \mathbf{M}_{32T}$ – моменты трения во вращательных парах, которые могут быть представлены в виде следующих зависимостей:

$$\mathbf{M}_{21T} = -\sqrt{\mathbf{R}_{21x}^2 + \mathbf{R}_{21y}^2} f_A r_A \text{Sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1); \quad (2.68)$$

$$\mathbf{M}_{23T} = -\sqrt{\mathbf{R}_{23x}^2 + \mathbf{R}_{23y}^2} f_B r_B \text{Sign}(\dot{\varphi}_2); \quad (2.69)$$

$$\mathbf{M}_{12T} = -\mathbf{M}_{21T}; \quad \mathbf{M}_{32T} = -\mathbf{M}_{23T}; \quad (2.70)$$

$$\mathbf{F}_T = -|\mathbf{R}_{30x} f_n| \text{Sign}(\dot{x}_3), \quad (2.71)$$

где r_A, r_B – радиусы шарниров; f_A, f_B, f_n – коэффициенты трения; $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ – передаточные функции первого порядка.

В результате решения системы уравнений могут быть определены реакции в кинематических парах, силы и моменты трения. Для определения знака сил трения и моментов трения необходимо знать передаточные функции первого порядка всех звеньев. С целью их определения разработана методика кинематического анализа механизма. Для решения нелинейной системы уравнений использован метод Ньютона [104]. Зная реакции $\mathbf{R}_{21x}, \mathbf{R}_{21y}$, определяли момент сопротивления со стороны образца из условия равновесия звена 1:

$$\sum \mathbf{M}_O(\mathbf{F}_i)_1 = \mathbf{0}: \mathbf{M}_{10T} + \mathbf{M}_C + \mathbf{M}_{12T} + \mathbf{R}_{21x}(y_O - y_A) - \mathbf{R}_{21y}(x_O - x_A) = \mathbf{0}, \quad (2.72)$$

$$\sum (\mathbf{F}_{ix})_1 = \mathbf{0}: \quad -\mathbf{R}_{21x} + \mathbf{R}_{10x} = \mathbf{0}; \quad (2.73)$$

$$\sum (\mathbf{F}_{iy})_1 = \mathbf{0}: \quad -\mathbf{R}_{21y} + \mathbf{R}_{10y} = \mathbf{0}; \quad (2.74)$$

где \mathbf{M}_C – момент сопротивления, $\mathbf{R}_{10x}, \mathbf{R}_{10y}$ – реакции в шарнире; \mathbf{M}_{10T} – момент трения во вращательной паре, который может быть представлен в виде следующей зависимости:

$$\mathbf{M}_{10T} = -\sqrt{\mathbf{R}_{10x}^2 + \mathbf{R}_{10y}^2} f_0 r_0 \text{Sign}(\dot{\varphi}_1), \quad (2.75)$$

где r_0 – радиус шарнира; f_0 – коэффициент трения.

Результаты расчета в соответствии с исходными данными, приведенными выше, представлены на рис. 2.5 в виде графика изменения момента сопротивления от угла поворота кривошипа.



Рисунок 2.24 – График изменения момента сопротивления от угла поворота кривошипа [103]

Анализ графика показывает, что в крайних положениях момент имеет отрицательное значение, что соответствует зонам заклинивания штампа. Для устранения заклинивания необходимо, чтобы разделение проката осуществлялось в диапазоне углов поворота кривошипа $25...130^\circ$. Максимальная сила отрезки соответствует углу поворота кривошипа 90° . Работа деформирования составила **1148 Дж**.

Разработанная методика кинематического и силового расчета штампа для отрезки проката эксцентричным закручиванием позволяет установить взаимосвязь между конструктивными параметрами штамповой оснастки: длиной кривошипа и шатуна, величиной эксцентриситета и технологическими параметрами процесса отрезки: глубиной концентратора напряжений, величиной поперечного зазора между ножом и прокатом, критическим углом закручивания проката, силой отрезки и работой деформирования.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОТХОДНЫХ СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА

3.1 Применение критериев разрушения при выборе способа разделения сортового проката

До настоящего времени не существует инструмента, позволяющего сделать правильный выбор способа разделения и получить прогнозируемый положительный результат для материалов в широком диапазоне механических свойств, длин и размеров поперечных сечений заготовок при минимальной энергоёмкости и высокой производительности процесса. Другими словами, нет методики выбора того способа разделения сортового проката на мерные заготовки, который обеспечил бы получение заготовок по минимальной себестоимости.

Известные безотходные способы разделения сортового проката не гарантируют высокого качества получаемых заготовок, т. е. не являются универсальными для всех марок сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов.

Поэтому важным является нахождение наиболее информативной системы критериев, позволяющих достоверно классифицировать материалы по их чувствительности к разрушению, в частности для выбора рационального способа разделения проката на мерные заготовки.

Для правильного выбора того или иного способа разделения, схемы разделения, температурно-скоростных условий необходимо знать: размеры заготовки, вид и свойства разделяемого материала, назначение заготовки и требования к ее качеству, показатели способа разделения проката, масштаб производства и размер партии заготовок.

В результате анализа закономерностей формоизменения и разрушения проката выявлено, что развитие геометрических дефектов вызвано пластическим течением в процессе разделения. Поэтому разрушение принято классифицировать с учетом величины предшествующей пластической деформации: если разрушению предшествовала значительная пластическая деформация, его называют вязким; если пластическая деформация составила менее 1...2 % – хрупким.

Для комплексной оценки чувствительности материала к разрушению в работе [105] разработаны критерии разрушения: показатель вязкости металла – W_c , критерий зарождения трещины – $K_{ЗТ}$, критерий распространения трещины – $K_{РТ}$, критерий хрупкости – $P_{ХР}$ и критерий «масштаб» – M .

Величина W_c рассчитывается по формуле

$$W_c = 0,5(\sigma_T + \sigma_K)\varepsilon^{пред}, \quad (3.1)$$

где σ_T – предел текучести;

σ_K – истинное сопротивление разрушению, равное $\sigma_B(1 + \delta)$;

$\varepsilon^{\text{пред}}$ – истинное сужение площади поперечного сечения образца к моменту разрушения.

W_c показывает, что чем больше удельная работа деформации, тем труднее зарождаются и распространяются трещины.

Критерий зарождения трещины K_{3T} количественно определяет способность материала сопротивляться возникновению трещин при деформации (чем выше K_{3T} , тем труднее в материале зарождаются трещины):

$$K_{3T} = W_c / \sigma_T. \quad (3.2)$$

Критерий распространения трещины K_{pT} количественно определяет способность материала сопротивляться свободному движению трещин при деформации в условиях достижения критического напряженного состояния (чем выше K_{pT} , тем труднее в материале распространяются трещины):

$$K_{pT} = W_{c_{кр}} \sigma_T, \quad (3.3)$$

где $W_{c_{кр}}$ – критическая предельная удельная энергия деформации, определяемая при критическом напряженном состоянии (трехосном растяжении), когда энергия деформации, затрачиваемая на пластическую деформацию, равна энергии, расходуемой на упругое искажение объема.

Критерий хрупкости P_{xp} количественно оценивает понятие «хрупкость» по соотношению предыдущих критериев (чем выше P_{xp} , тем значительнее критерий распространения трещины превышает критерий зарождения трещин и металл противостоит хрупкости):

$$P_{xp} = K_{pT}^2 / (K_{3T} \sigma_T). \quad (3.4)$$

«Масштаб» M (величина безразмерная) учитывает взаимосвязь размеров заготовки, образца и чувствительности сталей к разрушению (по характеристикам упругости):

$$M = e_{xx} / P_{xp}, \quad (3.5)$$

где $e_{xx} = (E W_{c_{кр}}^2) / ((1 + \nu)(1 - 2\nu))$;

E – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона материала.

В данной работе известные критерии разрушения применены для комплексной оценки чувствительности материала при холодной ломке изгибом.

Результаты проведенных расчетов для различных сталей и сплавов цветных металлов представлены в табл. 3.1 [106]. Поскольку E и ν считаются структурно-нечувствительными величинами, то в расчетах всех сталей принимали $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0,28$, а $W_{C_{кр}} \cong 0,75 \cdot W_C$.

Материалы по каждому критерию ранжированы в зависимости от величины расчетных значений, что позволяет выполнить их сравнительный анализ.

Анализ табл. 3.1 показывает, что наиболее информативным критерием для выбора способа разделения является критерий M . Согласно этому критерию, к материалам, находящимся в хрупком состоянии, следует отнести стали и сплавы цветных металлов, для которых критерий M находится в диапазоне $M = 0 \dots 600$. Например, стали марок ШХ15, 65Г, 60С2А, У8А, 40Х.

Аналогично к материалам, находящимся в пластичном состоянии, следует отнести стали и сплавы цветных металлов, для которых M находится в диапазоне $M = 1500 \dots 3000$. Например, стали марок Ст 3, 3Х13, 10, 20 и латунь ЛС59-1.

Остальные стали и сплавы цветных металлов можно отнести к вязкоупругим материалам, хотя при различных температурно-скоростных условиях для этих материалов может реализоваться как хрупкое, так и вязкое разрушение. Например, сталь ШХ15 при разных режимах термической обработки может быть отнесена как к упругим материалам (закалка 860 °Ñ, масло, температура отпуска 550 °Ñ), так и к вязкоупругим (отжиг 800 °Ñ, печь до 730 °Ñ, затем до 650 °Ñ со скоростью $(10 \dots 20$ °Ñ/÷ãñ, воздух). Поэтому использование всего комплекса критериев дает более объективную картину о докритическом и закритическом росте магистральной трещины, а также возможность прогнозировать геометрическую точность получаемых заготовок.

Для оценки меры способности критериев разрушения характеризовать чувствительность материала к разделению была определена информативность этих критериев. Для этого была решена таксонометрическая задача нахождения в многомерном пространстве признаков множества минимальной мощности, обеспечивающего классификацию объектов с заданной достоверностью [107].

Поиск решения такой задачи состоит из итеративной последовательности выполнения двух операций: выдвижения и верификации гипотез.

Таблица 3.1 – Механические свойства и синергетические критерии металлов

Кластер	Номер критерия Марка материала	σ_T ,	σ_B ,	δ ,	ψ ,	НВ,	W_C ,	Ранг	K_{3T}	Ранг	K_{PT} ,	Ранг	P_{XP} ,	М	Ранг	
		МПа	МПа	%	%	МПа	МДж/м ³				(МДж/м ³) ²		(МДж/м ³) ³			
		1	2	3	4	5	6		7		8		9	10		
1	Сталь Ст3	240	433	32	62	131	397	9	1.7	2	71446	11	12860216	14	2569	1
1	Сталь 10 (горячекатанная)	206	333	31	55	137	256	14	1.2	6	39616	18	6120638	19	2253	3
2	Сталь 10 (калиброванная нагартованная)	294	412	8	50	187	256	15	0.9	13	56471	14	12451841	15	1105	9
1	Сталь 20 (горячекатанная)	245	412	25	55	156	303	11	1.2	7	55756	16	10245128	17	1885	5
2	Сталь 20 (калиброванная нагартованная)	287	471	30	63	131	441	7	1.5	3	94932	8	20434044	9	1996	4
2	Сталь 30 (горячекатанная)	294	490	21	50	179	307	10	1.0	8	67776	13	14944704	13	1326	7
2	Сталь 40 (горячекатанная)	334	568	19	45	217	302	12	0.9	12	75622	10	18943282	10	1009	10
3	Сталь 45	408	688	20	49	187	415	8	1.0	9	127088	7	38888802	6	930	12
2	Сталь 45 (горячекатанная)	353	598	16	40	241	267	13	0.8	15	70777	12	18738229	11	800	13
2	Сталь 45 (калиброванная нагартованная)	324	636	6	30	250	178	19	0.5	18	43256	17	10511273	16	632	14
3	Сталь 40Х	695	879	16	56	255	704	2	1.0	10	366878	1	191235256	2	543	18
3	Сталь 65Г	412	696	11	35	269	255	16	0.6	16	78840	9	24361414	8	560	17
3	Сталь 60С2	545	962	17	42	207	455	6	0.8	14	185979	5	76018878	5	571	16
3	Сталь 30ХГСА	490	794	22	63	229	725	1	1.5	4	266492	3	97935763	3	1126	8
2	Сталь 3Х13	294	539	34	69	159	595	4	2.0	1	131222	6	28934553	7	2567	2
2	Сталь У8А	362	735	21	28	201	206	18	0.6	17	55803	15	15150579	12	585	15
3	Сталь ШХ15 (закалка 860 °С, масло, температура отпуска 550 °С)	900	1080	8	36	360	461	5	0.5	19	311245	2	210090435	1	212	20
3	Сталь ШХ15 (отжиг 800 °С, воздух)	487	692	25	61	207	637	3	1.3	5	232492	4	84917565	4	1001	10
1	Латунь ЛС 59-1	235	392	35	43	101	215	17	0.9	11	37856	19	6672115	18	1450	6

Выдвижение гипотез осуществляется по алгоритмам выбора признаков [108]. В частности, по алгоритму последовательного добавления признаков, когда вначале рассматривается одномерное пространство N признаков, после чего на основании признака с наилучшей оценкой переходят к рассмотрению пространства $(N-1)$ признаков и т. д. Верификация информативности получаемого множества признаков осуществляется путем выполнения на его основании операции классификации объектов и последующего сравнения результата с эталоном.

При этом наибольшую сложность представляет задача классификации объектов в многомерном пространстве признаков. Данная задача решается методами кластерного анализа, предназначенного для разбиения исходного множества объектов на заданное (или неизвестное) число классов-кластеров на основании некоторых критериев, отражающих основные требования разбиения [107].

Кластеризация объектов выполняется в многомерном пространстве, формируемом из векторов, компоненты которых представляют собой параметры объектов. Тогда кластером будет являться группа векторов, расстояние между которыми внутри этой группы меньше, чем расстояние до соседних групп.

В связи с высокой размерностью задач кластеризации одним из наиболее эффективных инструментов, применяемых для их решения, являются нейронные сети, представляющие собой универсальное средство аппроксимации [109].

В настоящее время существует несколько видов специальных нейронных сетей, предназначенных для решения задач кластеризации. Наибольшее распространение получили так называемые самоорганизующиеся структуры, в частности, самоорганизующиеся карты (СОК) Кохонена [110].

Таким образом, СОК можно считать одним из методов проецирования многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью (двумерное), при этом векторы, схожие в исходном пространстве, оказываются рядом и на полученной карте.

Область применения СОК для кластеризации ограничивается задачами, в которых число кластеров заранее известно. В то же время фиксированное число кластеров за счет достаточно медленной модификации весов делает данный алгоритм по сравнению с аналогами более устойчивым, способным функционировать в условиях помех и пропуска данных.

С помощью разработанного программного обеспечения для решения задач кластерного анализа выполнен анализ критериев разрушения для заданных видов материалов (см. табл. 3.1) [111].

В качестве эталона была принята кластеризация материалов, выполненная на основании метода экспертных оценок с выделением трех классов, что соответствует традиционной классификации материалов на те, которые могут поставляться в хрупком, упругопластическом и пластиче-

ском состоянии. Такая классификация материалов удобна при выборе способа разделения. Для разделения сортового проката в хрупком состоянии рекомендуется способ холодной ломки изгибом при статическом нагружении; в упругопластическом состоянии – холодная ломка изгибом при статико-динамическом нагружении или отрезка сдвигом; в пластическом состоянии – отрезка сдвигом с дифференцированным зажимом проката и комплексно-заготовительные процессы.

В кластер материалов, находящихся в пластичном состоянии, были объединены: сталь Ст3, сталь 10 (горячекатанная), сталь 20 (горячекатанная), латунь ЛС 59-1.

В кластер материалов, находящихся в упругопластическом состоянии, были объединены стали марок: 10 (калиброванная нагартованная), 20 (калиброванная нагартованная), 30 (горячекатанная), 40 (горячекатанная), 45 (горячекатанная), 45 (калиброванная нагартованная), 3Х13, У8А.

В кластер материалов, находящихся в хрупком состоянии, были объединены стали марок: 45, 40Х, 65Г, 60С2, 30ХГСА, ШХ15 (закалка 860 °С, масло, температура отпуска 550 °С), ШХ15 (отжиг 800 °С, воздух).

Оценка информативности множества классифицирующих критериев осуществлялась подсчетом количеств совпадений и несовпадений находившихся объектов в заданных кластерах. Количество итераций при построении СОК составляло **7000** для каждого вычислительного эксперимента, что обеспечивало устойчивость классификации при суммарной коррекции, не превышающей 10^{-5} . Применение метода последовательного добавления признаков дало следующие результаты.

На первой итерации были получены десять множеств, состоящих из одного классифицирующего критерия. Гистограмма результатов оценки их информативности приведена на рис. 3.1. Наиболее информативным среди всех является критерий № 1 «предел текучести» $r(t)$, среди комплексных – критерий № 10 «масштаб».

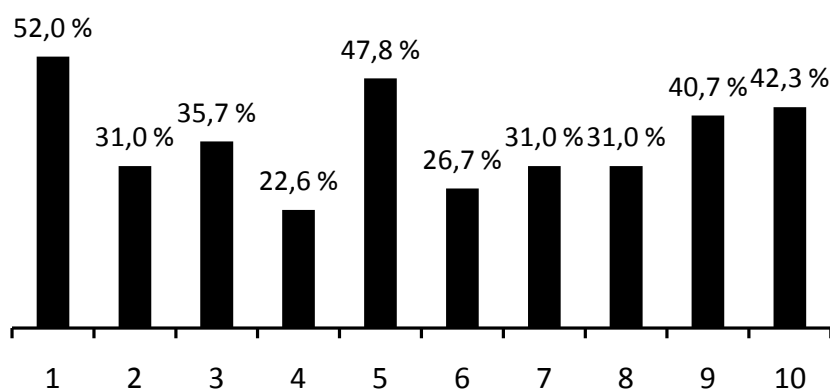


Рисунок 3.1 – Гистограмма оценки информативности каждого критерия [111]

На второй итерации получаются девять множеств по два критерия. Гистограмма результатов оценки их информативности приведена на рис. 3.2. Наиболее информативными являются множества критериев 1–4 (предел текучести – относительное сужение) и 1–9 (предел текучести – критерий хрупкости).

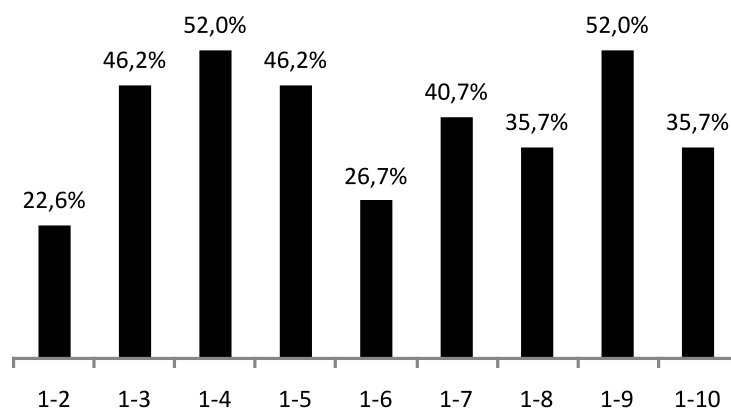


Рисунок 3.2 – Гистограмма оценки информативности пар критериев [111]

При равенстве оценок информативности множеств выбор в качестве базового множества критериев традиционных механических свойств 1–4 (предел текучести – относительное сужение), приводит к получению на седьмой итерации множества 1–4–3–5–7–9–8 (предел текучести – относительное сужение – относительное удлинение – твердость – критерий зарождения трещин – критерий распространения трещин – критерий хрупкости), оценка информативности которого равна 100 % (рис. 3.3).

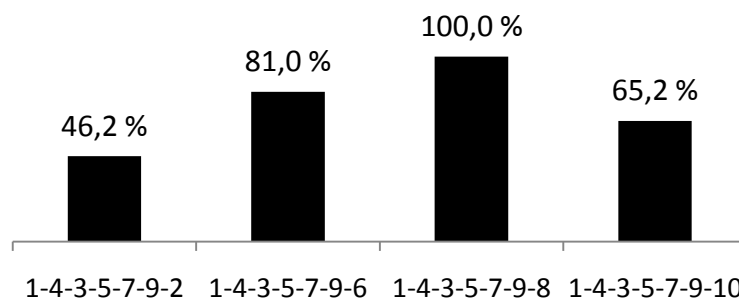


Рисунок 3.3 – Гистограмма оценки информативности множеств на базе критериев 1–4–5–7–9 [111]

При выборе в качестве базового множества критериев 1–9 (предел текучести – критерий хрупкости), уже на четвертой итерации получаем множество 1–9–6–8 (предел текучести – критерий хрупкости – показатель вязкости металла – критерий распространения трещин), обеспечивающее полную идентичность полученных кластеров эталонным (рис. 3.3).

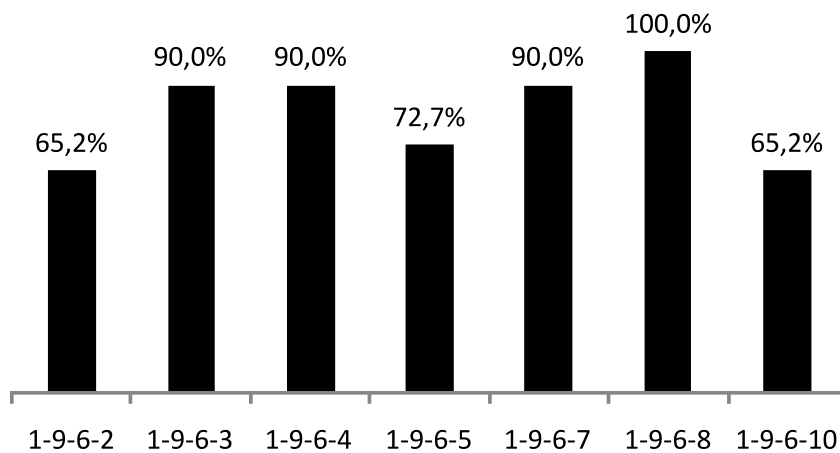


Рисунок 3.4 – Гистограмма оценки информативности множеств на базе критериев 1–9–6 [111]

Применяя алгоритм последовательного удаления признаков, было установлено, что множество 1–9–6–8 можно без снижения его информативности сократить до вида 9–6–8. Дальнейшие вычислительные эксперименты показали, что комплексные критерии 8–9 (критерий распространения трещин – критерий хрупкости) являются базовыми информативными признаками, и при добавлении к ним любого из оставшихся комплексных критериев они образуют искомые информативные множества минимальной мощности.

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1 Наиболее информативным среди традиционных критериев является предел текучести, среди комплексных – «масштаб».

2 Среди традиционных критериев механических свойств не обнаружено множество, позволяющее с заданной достоверностью классифицировать материалы по их чувствительности к разделению.

3 Комплексные критерии: критерий распространения трещин и критерий хрупкости – являются базовыми информативными признаками, и при добавлении к ним любого из оставшихся комплексных критериев (критерия зарождения трещин или «масштаба») они образуют наиболее информативные множества минимальной мощности, обеспечивающие с заданной достоверностью классификацию материалов по их чувствительности к разделению.

Для проверки теоретических расчетов проведены экспериментальные исследования процесса разделения сортового проката по схеме трехточечной холодной ломки изгибом.

Для проведения экспериментов использовался пресс-молот модели 2ПМГИ 0,8/88 оригинальной конструкции, а также цилиндрические образцы из проката диаметром 16 мм и длиной 160 мм из следующих марок

сталей: 20, 45, 40X, ШХ15. На образцы предварительно с помощью токарного резца наносили одинаковые концентраторы напряжений в форме кольцевой канавки треугольного профиля глубиной 3 мм и радиусом при вершине 0,15 мм.

Фотографии образцов из разных марок сталей, разделенные по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статическом нагружении, представлены на рис. 3.4.

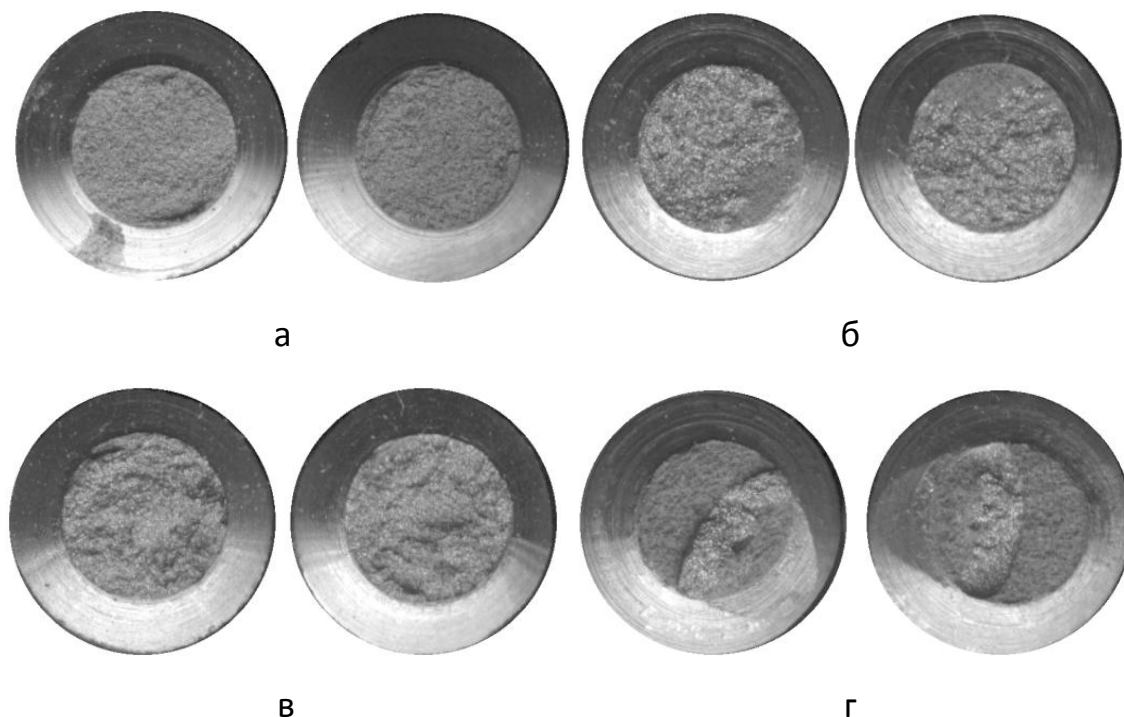


Рисунок 3.5 – Фотографии заготовок из марок сталей ШХ15 (а), 45 (б), 40X (в), 20 (г)

Геометрическую точность получаемых заготовок оценивали по размерам вырывов и сколов торцов, которые измеряли с помощью индикаторной головки.

Анализ рис. 3.4 показывает, что наиболее высокое качество заготовок наблюдается при разделении образцов из стали ШХ15: трещина пересекла образец точно в плоскости концентратора напряжений ортогонально оси образца, области пластической деформации визуально не наблюдаются, поверхность разрушения – зеркальная, мелкозернистая, что соответствует ранжиру критерия **М** – № 20, наибольшему значению $\sigma_T = 900$ МПа и хрупкому разрушению.

При разделении образцов из марок сталей 45, 40X на заготовках присутствуют зоны локализованной пластической деформации, излом покрыт неглубокими рубцами, веерообразно расходящимися от концентратора в направлении развития быстрой трещины.

Поверхность разрушения ближе к “матовой зоне”, которая переходит в “перьевую”, более шероховатая, что соответствует вязкоупругому разрушению и данным табл. 3.1: W_C – № 8, K_{3T} – № 9, K_{PT} – № 7, P_{XP} – № 6, M – № 12). Вблизи концентратора высота рельефа торца соответствует размеру зерна материала образца, тогда как по мере удаления от него к оси образца она увеличивается и достигает величины **0,4 мм**.

При статическом нагружении образцов из стали 20 в пластическом состоянии (см. рис. 3.4) разрушение происходило при больших углах изгиба $-20...25^\circ$. Поверхность излома перьевая, наблюдались единичные вырывы и сколы с высотой рельефа до **0,8 мм**. Разрушение вязкоупругое, что соответствует критерию M – № 4.

Выводы:

1 Разработано программное обеспечение, позволяющее решать задачу кластеризации в многомерном пространстве параметров и представлять полученную информацию в наглядном виде с использованием самоорганизующихся карт Кохонена. Выполнен кластерный анализ критериев разрушения материалов. Наиболее информативным среди традиционных критериев является предел текучести, среди комплексных – «масштаб».

2 Установлен диапазон значений критерия «масштаб» для предсказания характера разрушения материала: упругого (материал в хрупком состоянии) – $M=0...600$; вязкоупругого – $M=600...1500$; вязкопластичного (материал в пластическом состоянии) – $M=1500...3000$.

3 Комплексные критерии: критерий распространения трещин и критерий хрупкости являются базовыми информативными признаками, и при добавлении к ним любого из оставшихся комплексных критериев (критерия зарождения трещин или «масштаба») они образуют наиболее информативные множества минимальной мощности, обеспечивающие с заданной достоверностью классификацию материалов по их чувствительности к разделению.

4 С учетом полученных результатов можно дать следующие рекомендации для выбора способа разделения сортового проката. Наименее энергоемкий способ разделения – холодная ломка изгибом – может быть рекомендован для разделения преимущественно хрупких материалов из сталей марок ШХ15, 65Г, 60С2, 50ХФА, У8А и др., а также для разделения вязкоупругих материалов из сталей марок 45, 40Х, 30ХГСА и др. при создании в зоне разрушения определенного напряженного состояния, например, за счет комбинированного статико-динамического нагружения. Способом отрезки сдвигом целесообразно разделять вязкоупругие материалы для получения высокой геометрической точности заготовок. Для разделения пластичных материалов из сталей марок 3, 5, 10, 20,

а также меди М1, латуни ЛС59-1 и др. целесообразно использовать схему отрезки с дифференцированным зажимом проката, отрезку при повышенных скоростях деформирования, способ отрезки во втулочных ножах без поперечного зазора или отрезки эксцентричным закручиванием. Если к геометрической точности заготовок из пластичных материалов предъявляются повышенные требования, рекомендуется использовать комплексные заготовительно-разделительные процессы.

3.2 Результаты измерения максимальной скорости подвижных частей высокоскоростных машин

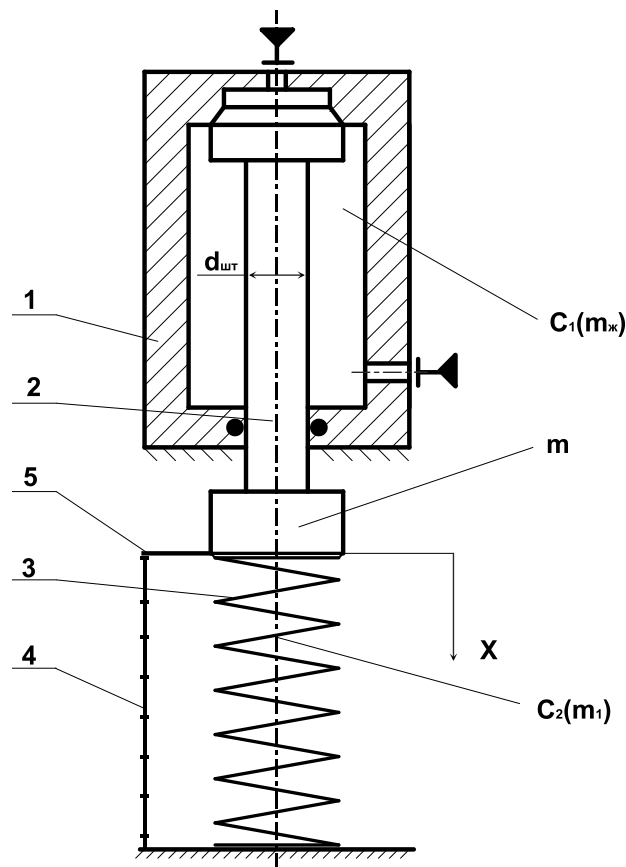
Скорость перемещения подвижных частей высокоскоростных машин является одним из основных параметров, который определяет важнейшие технические характеристики машины: расчетную энергию удара, размеры заготовки, время рабочего цикла и т. д.

При исследовании процессов высокоскоростного деформирования металлов наибольшее распространение получили способы и приборы, позволяющие измерить среднюю скорость приближения инструмента к заготовке. Однако эти способы измерения скорости связаны с необходимостью применения сложной контрольно-измерительной аппаратуры, наличием навыков работы с ней, проведением экспериментов в лабораторных условиях, большим объемом пересчетов и т. д., что ограничивает их использование в производстве. Для практического применения важно знать максимальную скорость подвижных частей высокоскоростных машин.

Для преодоления недостатков известных способов измерения скорости на кафедре «Основы проектирования машин» (ОПМ) ДГМА разработан способ измерения максимальной скорости подвижных частей высокоскоростных машин (ВСМ) [112]. Сущность предлагаемого способа заключается в том, что потери энергии в высокоскоростной машине оцениваются по деформации измерительной пружины, имитирующей реальное сопротивление деформированию.

На рис. 3.5 показана схема измерительной установки.

В комплект установки входят: исследуемый объект – гидроупругий цилиндр пресс-молота 1 со штоком и бабой 2, тарированная пружина 3 и измерительная линейка 4. Деформацию пружины замеряли по длине царапины на пластилине, которую оставлял стержень 5, прикрепленный к бабе пресс-молота. В свою очередь пластилин крепился на специальной оправке к станине пресс-молота.



Риснок 3.6 – Схема измерений максимальной скорости подвижных частей ВСМ [112]

Определим основные зависимости динамики пресс-молота.

1 Уравнение движения подвижных частей высокоскоростной машины с учетом силы сопротивления измерительной пружины записывали в виде (см. рис. 3.5):

$$m_{пр} \ddot{x} = (\Delta p \cdot A - C_1 \cdot \bar{x}) - C_2 \cdot \bar{x}, \quad (3.6)$$

где $m_{пр}$ – приведенная масса подвижных частей пресс-молота;

Δp – рабочее давление в гидроупругом цилиндре высокоскоростной машины;

A – площадь поперечного сечения штока;

C_1 – жесткость гидравлической пружины, выполненной в виде гидроупругого цилиндра с аккумуляторами;

C_2 – жесткость измерительной пружины.

В результате решения уравнения (3.6) для скорости, имеем:

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{2}{m_{пр}} \cdot (\Delta p \cdot A \cdot \bar{x} - \frac{C_1 + C_2}{2} \cdot \bar{x}^2)}. \quad (3.7)$$

Максимальное значение скорости $\dot{\bar{x}}_{\max}$ соответствует предельному значению перемещения подвижных частей ВСМ $\bar{x}_{\text{пред}}$, которое определялось из условия

$$\begin{aligned} f'(\bar{x}) &= 0; \\ \left(\frac{2}{m_{\text{пр}}} \cdot \left(\Delta p \cdot A \cdot \bar{x} - \frac{C_1 + C_2}{2} \cdot \bar{x}^2 \right) \right)' &= 0; \\ \bar{x}_{\text{пред}} &= \frac{\Delta p \cdot A}{C_1 + C_2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Подставляя (3.8) в (3.7), имеем:

$$\dot{\bar{x}}_{\max} = \sqrt{\frac{(\Delta p \cdot A)^2}{m_{\text{пр}} \cdot (C_1 + C_2)}}. \quad (3.9)$$

2 Рассматривали уравнение движения подвижных частей пресс-молота при работе в режиме холостого хода без учета сопротивления пружины:

$$m \ddot{x} = \Delta p \cdot A - C_1 \cdot x, \quad (3.10)$$

где m – масса подвижных частей пресс-молота.

Тогда, аналогично рассмотренному выше, максимальную скорость подвижных частей высокоскоростной машины определяли из выражения

$$\dot{\bar{x}}_{\max} = \sqrt{\frac{(\Delta p \cdot A)^2}{C_1 m}}. \quad (3.11)$$

3 Выражали $\dot{\bar{x}}_{\max}$ через \bar{x}_{\max} из соотношения соответствующих этим скоростям кинетических энергий движения подвижных частей:

$$\frac{W}{\bar{W}} = \frac{m \cdot \dot{\bar{x}}_{\max}^2}{2} \Big/ \frac{m_{\text{пр}} \cdot \dot{\bar{x}}_{\max}^2}{2} = \frac{(\Delta p \cdot A)^2}{C_1} \Big/ \frac{(\Delta p \cdot A)^2}{(C_1 + C_2)}. \quad (3.12)$$

Откуда

$$\dot{\bar{x}}_{\max} = \sqrt{\frac{m_{\text{пр}} (C_1 + C_2)}{m C_1}} \cdot \dot{\bar{x}}_{\max}. \quad (3.13)$$

Тогда уравнение (3.11) можно представить в виде:

$$\dot{\bar{x}}_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p \cdot A}{C_1 + C_2}\right)^2} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m_{\text{пр}}}}. \quad (3.14)$$

Зная, что $\bar{x}_{\text{пред}} = \frac{\Delta p \cdot A}{C_1 + C_2}$ уравнение (3.14) примет вид:

$$\dot{\bar{x}}_{\max} = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m_{\text{пр}}}} \bar{x}_{\text{пред}}. \quad (3.15)$$

4 Уравнение (3.7) может быть преобразовано в выражение

$$\frac{1}{2} m_{\text{пр}} \dot{\bar{x}}^2 = \left(-\frac{C_1 + C_2}{2}\right) \left(\bar{x} - \frac{\Delta p \cdot A}{C_1 + C_2}\right)^2 + \frac{(\Delta p \cdot A)^2}{2(C_1 + C_2)}. \quad (3.16)$$

Откуда

$$\frac{\dot{\bar{x}}^2}{\frac{(\Delta p \cdot A)^2}{m_{\text{пр}}(C_1 + C_2)}} + \left(\bar{x} - \frac{\Delta p \cdot A}{C_1 + C_2}\right)^2 / \frac{(\Delta p \cdot A)^2}{(C_1 + C_2)^2} = 1. \quad (3.17)$$

Выражение (3.17) – это уравнение эллипса, изображенного на рис. 3.6. Анализ уравнения показывает, что

$$\bar{x}_{\text{пред}} = \frac{1}{2} \bar{x}_{\text{экср}}, \quad (3.18)$$

где $\bar{x}_{\text{экср}}$ – максимальный ход подвижных частей пресс-молота, соответствующий конечной деформации измерительной пружины.

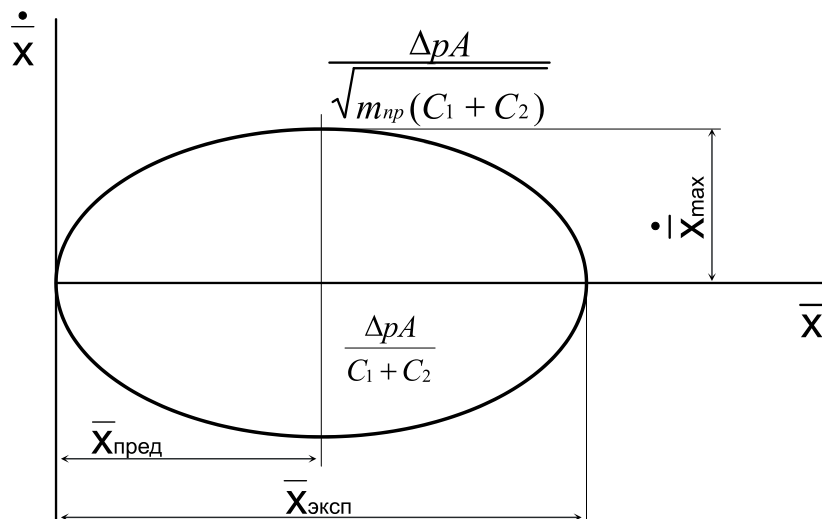


Рисунок 3.7 – Графическое представление зависимости скорости перемещения подвижных частей пресс-молота от деформации пружины [112]

Тогда уравнение (3.15) максимальной скорости подвижных частей высокоскоростных машин записывали в виде:

$$\dot{x}_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{m_{\text{пр}}}} \bar{x}_{\text{экс}}. \quad (3.19)$$

Подставляя (3.19) в (3.13), получали уравнение для расчета максимальной действительной скорости подвижных частей пресс-молота с учетом потерь энергии на трение, дросселирование рабочей жидкости, упругую деформацию станины и привода и т.д.:

$$\dot{x}_{\max} = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) \sqrt{\frac{1}{C_1 \cdot m}} \bar{x}_{\text{экс}}. \quad (3.20)$$

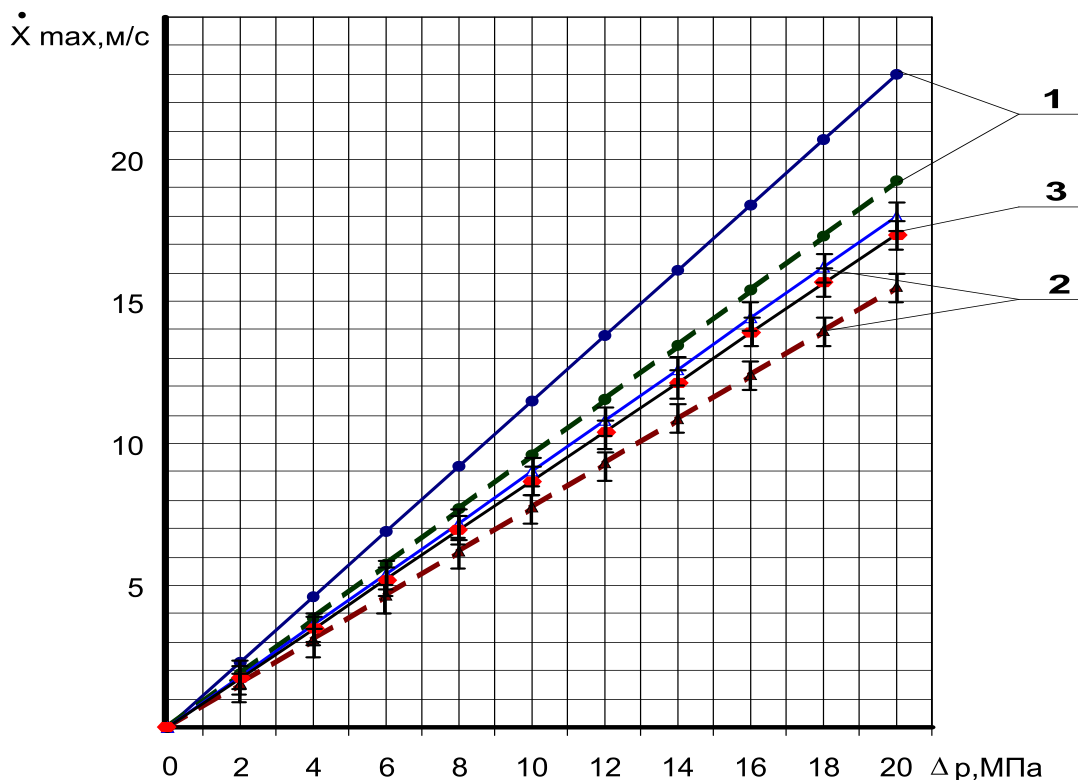
Для практической проверки предложенных теоретических зависимостей исследовался модернизированный пресс-молот модели 2ПМГИ 0,8/88 с техническими параметрами, приведенными выше. Приведенный модуль объемной упругости системы $E_{\text{пр}} = 1300 \text{ МПа}$.

В эксперименте использовались разные массы подвижных частей: $m_2 = 6,25 \text{ кг}$, $m_3 = 9,34 \text{ кг}$; а также измерительная пружина с жесткостью $C_2 = 1 \text{ МН/м}$ и соответствующей массой $m_{\text{пр}} = 5,4 \text{ кг}$.

Данные расчета теоретических и фактических максимальных скоростей подвижных частей пресс-молота представлены в виде графиков (рис. 3.3). На основе анализа графиков $\dot{x}_{\max} = f(\Delta p)$ можно утверждать следующее:

1 Расхождение значений теоретической (кривые 1) и фактической (кривые 2) максимальных скоростей составляет в среднем 18%. Потери скорости подвижных частей пресс-молота связаны в большей степени с потерями на трение штока в уплотнениях, дросселирование рабочей жидкости, а также с потерями энергии на раскрытие импульсного клапана гидроупругого цилиндра в момент формирования переднего фронта ударной волны.

2 Предложенная математическая модель расчета максимальной скорости подвижных частей высокоскоростной машины обеспечивает получение достоверных данных, что подтверждается экспериментами, проведенными по известной методике. На рис. 3.2 построена зависимость $\dot{x}_{\max} = f(\Delta p)$ – кривая 3, найденная способом измерения скорости с помощью магнитной ленты для массы подвижных частей $m_2 = 6,25 \text{ кг}$ [98]. Кривая 3 практически совпадает с кривой 2, построенной для массы подвижных частей пресс-молота m_2 .



— для массы $m_2 = 6,25$ кг; — для массы $m_3 = 9,34$ кг;
 ● — теоретическая скорость; ▲ — фактическая скорость;
 ⬡ — скорость, измеренная с использованием известного способа
 для $m_2 = 6,25$ кг

Рисунок 3.8 – Теоретические и действительные скорости подвижных частей пресс-молота модели 2ПМГИ 0,8/88 [112]

3. Значения полезной энергии движения подвижных частей пресс-молота массами m_2 и m_3 отличаются в среднем на 10 %. Это связано с погрешностью измерения действительных максимальных скоростей, которая составляет в среднем 5 % для масс m_2 и m_3 .

4. В отличие от известных способов измерения скорости подвижных частей высокоскоростных машин, предлагаемый способ прост в реализации, не требует наличия сложного измерительного оборудования, на погрешность эксперимента не влияют реальные условия кузнечно-прессового производства, уменьшается время проведения эксперимента и объем пересчетов.

Таким образом, предложенный способ измерения максимальной скорости подвижных частей может быть рекомендован для внедрения на производстве при исследовании возможностей высокоскоростных машин и разработке связанных с ними технологических процессов.

3.3 Исследование силовых параметров процесса внедрения жесткого клинового инструмента в прокат

Интенсивный рост потребления мерных заготовок на машиностроительных предприятиях предопределил развитие безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки. Из безотходных способов раскроя проката особый интерес представляет холодная ломка изгибом. Инструментом в этом способе является хрупкая трещина, которая по своим потенциальным возможностям – почти идеальный инструмент для безотходного разделения твердых материалов на части. Широкому внедрению холодной ломки изгибом препятствует нестабильный характер распространения трещины. Нанесение концентратора напряжений – неотъемлемая часть процесса ломки. Способ создания концентратора, как и его форма, существенно влияют на работу зарождения трещины и условия разрушения.

С точки зрения обеспечения производительности и автоматизации процесса разделения перспективным является механический способ нанесения концентратора напряжений клиновым ножом.

Очевидно, использовать в полной мере преимущества ломки изгибом можно только при условии принятия дополнительных мер по радикальному улучшению качества скола и уменьшению энергоемкости процесса. Для этого необходимы исследования условий нанесения эффективного концентратора напряжений.

Учитывая тот факт, что теоретические расчеты в теории квазистатических трещин недостаточно подкрепляются практическими рекомендациями, экспериментальные исследования процесса нанесения концентратора напряжений при холодной ломке изгибом являются актуальными. Однако определение величины возникающего при ударе усилия ввиду весьма малой длительности соударения представляет известную проблему.

Для проведения эксперимента разработана оснастка, конструкция которой представлена на рис. 3.3. Она состоит из станины 1, в которой с возможностью возвратно-поступательного движения установлен ползун 2, где закрепляется инструмент 3 клиновидной формы. Данные о форме и размерах инструмента приведены в табл. 3.2 [113].

В пазах станины располагается образец 4, который укладывается на опору 5. В глухом отверстии ползуна 2 установлена месдоза 6 и к нему с помощью рычага 7 жестко прикреплена ползушка 8 с возможностью возвратно-поступательного движения относительно направляющей 9 катушки сопротивления 10 с диаметром проволоки 0,08 мм.

В эксперименте использовались цилиндрические образцы с диаметром 16 мм, которые являются характерными представителями материалов в пластическом и хрупком состояниях. Механические свойства материалов образцов представлены в табл. 3.3.

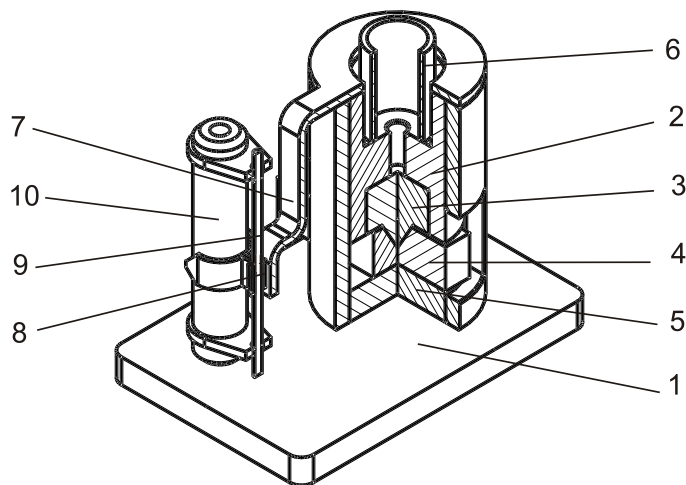


Рисунок 3.9 – Конструктивная схема экспериментальной оснастки [113]

Таблица 3.2 – Форма и размеры клиновидного инструмента [113]

Форма	Эскиз	Размеры, мм
Клин		h = 7мм; α = 43°; B = 13мм; L = 13мм
Конус		h = 12мм; α = 28°; D = 13мм
Пирамида		h = 11мм; α = 31°; S = 13мм
Сдвоенный клин		h = 5мм; α = 33°; B = 13мм; L = 13мм

Таблица 3.3 – Механические свойства материалов образцов [113]

Марка	Форма	σ_T , МПа	σ_B , МПа	НВ	$\delta\%$	$\gamma\%$
Сталь 20	Цилиндрическая	287	471	131	30	63
Сталь 45		408	688	187	20	49
Сталь 40Х		695	879	255	16	56
Сталь ШХ15		487	692	207	25	61
Сталь20	Прямоугольная	245	440	167	25	55
Д16		264	392	129	10	16
АД1		73	108	25	25	28

В эксперименте использовались фольговые тензорезисторы ФКТК 10-200С-1, включенные по мостовой схеме. Тарировка месдозы производилась на гидравлическом прессе при статическом нагружении в рабочем диапазоне до 30 кН. В качестве регистрирующего устройства применялась ПЭВМ с установленным специализированным модулем SDI-ADC16-32, который позволяет производить измерения по 16 дифференциальным каналам с гальванической развязкой от электрических цепей компьютера.

При проведении эксперимента использовались два параллельных канала для построения зависимости «сила F – перемещение H инструмента». Входной сигнал оцифровывался шестнадцатититным аналого-цифровым преобразователем с частотой до 100 кГц с возможностью усиления в диапазоне 1...1000. Регистрация и обработка результатов измерений проводилась с помощью разработанного программного обеспечения.

Сравнительные данные результатов экспериментов и теоретических расчетов, выполненные по известным математическим моделям [114], представлены в виде кривых $F = f(H)$ (рис. 3.3).

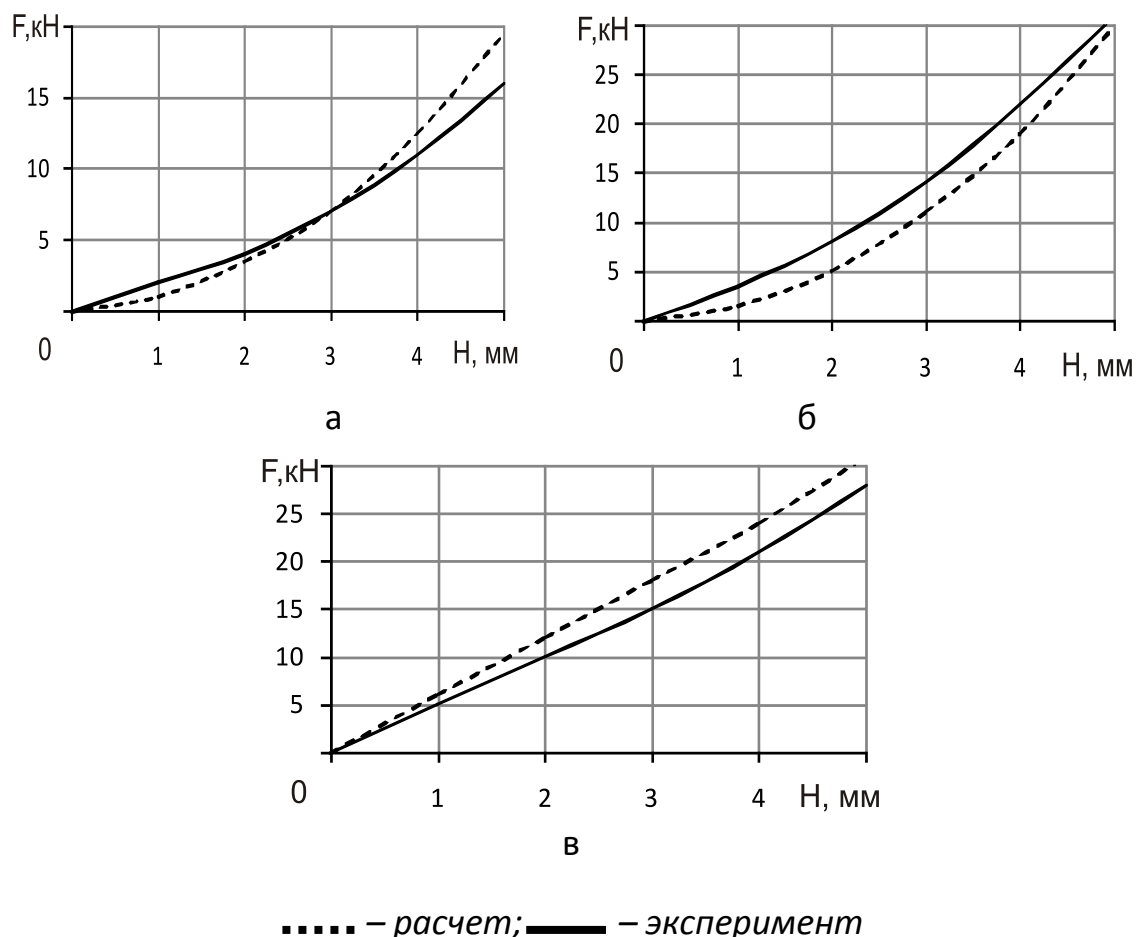


Рисунок 3.10 – График изменения силы внедрения от перемещения инструмента $F = f(H)$ при внедрении конуса в образец из стали 20 (а), пирамиды – в образец из сплава Д16 (б), клина – в образец из стали 20 (в) [113]

Зависимость значения силы внедрения клинового ножа в образцы из материалов с разными механическими свойствами $F = f(\sigma_T)$ представлена на рис. 3.3.

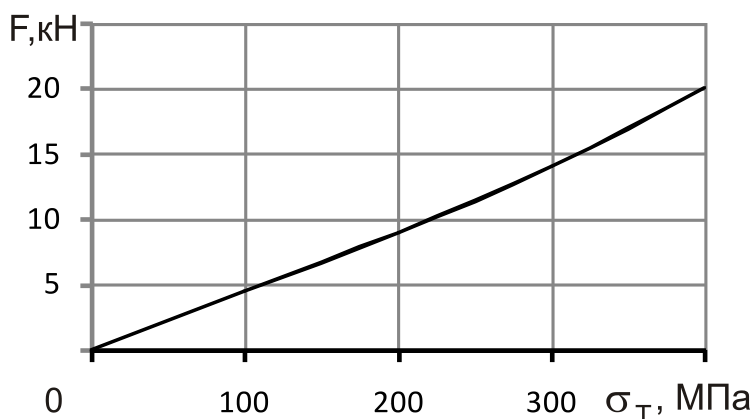


Рисунок 3.11 – Зависимость силы внедрения клина от предела текучести материала $F = f(\sigma_T)$ (глубина внедрения 2,2 мм) [113]

Выводы:

1 Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами, которые выполнены по известным математическим моделям [114]: расхождения между кривыми составили не более 5...10 %.

2 Анализ полученных зависимостей $F = f(H)$ при внедрении инструмента различной формы показывает, что наиболее точные результаты обеспечивает математическая модель при внедрении конуса. При внедрении клина и пирамиды имеем заниженные результаты. Это связано с тем, что в этих случаях математическая модель не учитывает упрочнение материала в области деформирования. Кроме того, необходимо более корректно выбирать значения коэффициентов трения скольжения.

3 Получена зависимость силы внедрения клина для различных материалов при фиксированной глубине внедрения.

3.4 Экспериментальные исследования холодной ломки сортового проката изгибом

3.4.1 Исследование влияния скорости деформирования на энергосиловые характеристики процесса трехточечной холодной ломки изгибом и геометрическую точность получаемых заготовок при статическом и динамическом нагружениях

Одним из перспективных направлений уменьшения уровня пластической деформации при разделении проката является использование высоких скоростей нагружения.

При этом разработка новых высокоскоростных процессов разделения сортового проката должна основываться на современных методах экспериментального анализа. Знание поведения материала при ударном нагружении – одно из необходимых условий правильного выбора технологических режимов процесса разделения.

Однако определение величины возникающего при ударе усилия ввиду весьма малой длительности соударения представляет известную проблему. Кратковременность действия нагрузки и появление волновых эффектов с ростом скорости деформирования значительно затрудняют анализ поведения материалов и влияния скорости нагружения на его механические свойства.

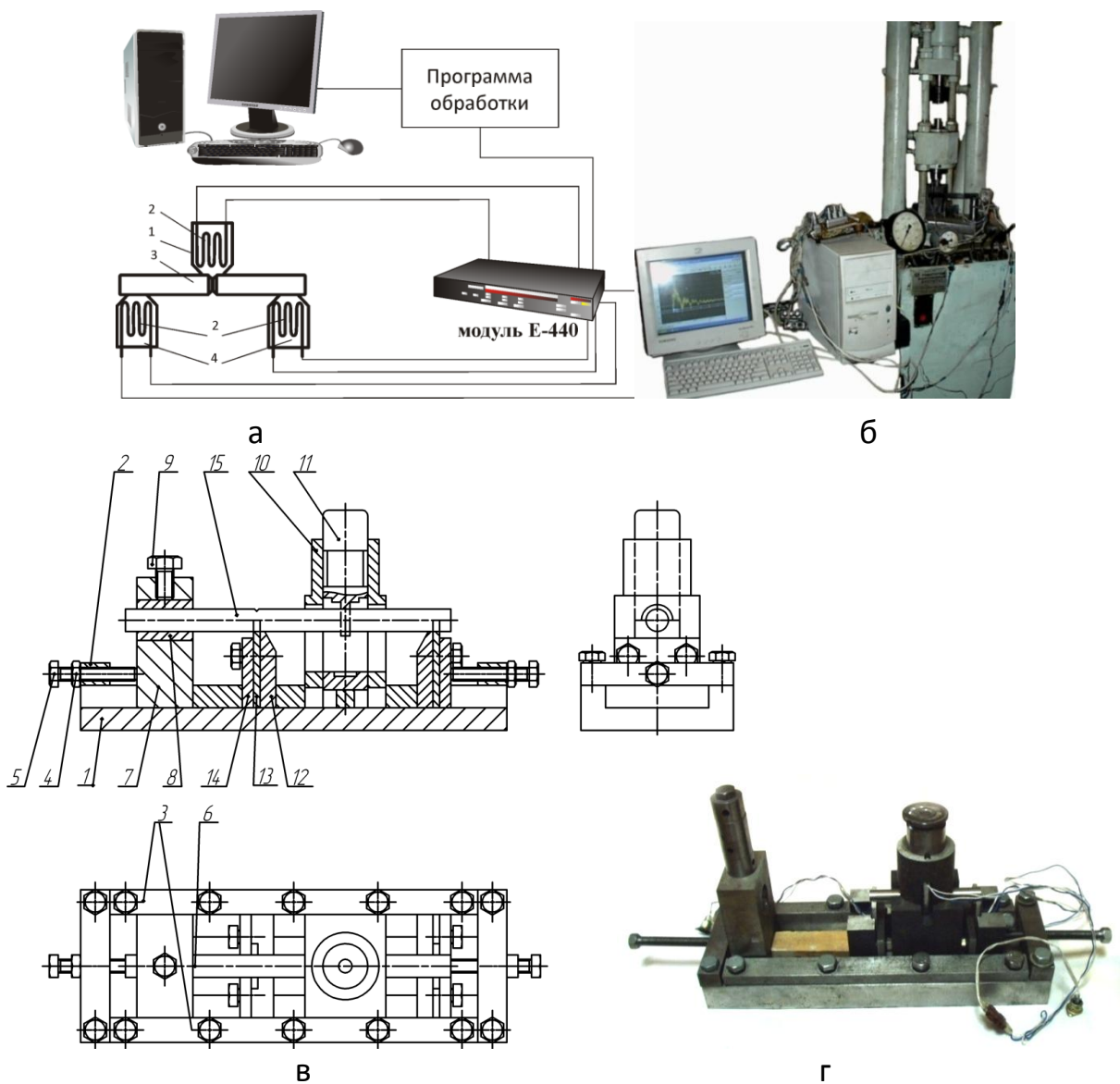
Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о чувствительности материалов к скорости нагружения, о том, что скорость нагружения может как увеличивать, так и уменьшать прочностные характеристики материалов в зависимости от структуры, состава и технологии их получения. Однако опубликованные экспериментальные данные сами по себе противоречивы и их объем недостаточный, особенно применительно к процессам разделения сортового проката на мерные заготовки.

С целью получения таких данных проведены экспериментальные исследования по трехточечной холодной ломке изгибом образцов из сталей различных марок при статическом и ударном нагружениях.

Традиционно ударные испытания проводят с использованием инструментальных копров, на которых определяют энергию, затрачиваемую на разрушение образцов [115], а по виду их излома – долю вязкой составляющей в изломе или значение поперечного расширения образца в зоне излома. Более широкие возможности для проведения подобных испытаний обеспечивает использование пресс-молотов с гидроупругим приводом, которые разрабатываются в ДГМА. Пресс-молот имеет следующие основные преимущества: возможность создания квазистатических, ударных и комбинированных нагрузок в широком диапазоне скоростей, энергий и сил; точное дозирование энергии или силы при деформировании заготовки и др. [50].

Для проведения экспериментов использовался пресс-молот с характеристиками: максимальная энергия удара – **1,3 кДж**; сила, развиваемая прессовой частью – **106 кН**; максимальная теоретическая скорость подвижных частей машины – **24,6 м/с** и соответствующий ей ход штока – **114,6 мм**; объем аккумулятора – **$12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$** ; максимальное рабочее давление – **18 МПа**; масса подвижных частей – **6,25 кг**.

На рис. 3.3 приведена схема регистрации данных при проведении экспериментов (рис. 3.2, а), конструктивная схема (рис. 3.2, в), а также фотографии экспериментального оборудования (рис. 3.2, б) и оснастки (рис. 3.2, г) [116].



а: 1 – ломатель; 2 – тензодатчики; 3 – образец; 4 – опоры

Рисунок 3.12 – Схема регистрации экспериментальных данных (а), конструктивная схема (в) и фотографии экспериментального оборудования (б) и оснастки (г) [116]

Установка для разделения образцов способом холодной ломки изгибом (см. рис. 3.2, в) состоит из: станины 1, в направляющих которой размещаются механизмы зажима проката, ломателя и опор, установленных с возможностью возвратно-поступательного движения, ограниченного упорами 2 и накладками 3, которые крепятся к станине 1 болтами. Положение механизмов зажима, ломателя и опор фиксируется с помощью болтов 5, вкрученных в упоры 2, гаек 4 и проставок 6. Механизм зажима проката состоит из корпуса 7, в отверстии которого размещается образец 15 между полувтулками 8, которые зажимаются с помощью болта 9, вкрученного в корпус 7. Механизм ломателя состоит из корпуса 10, собственно ломателя 11, установленного с возможностью возвратно-поступательного движения в направляющих корпуса. Механизм опоры состоит из корпуса 12 и опорной пластины 13, которая удерживается накладкой 14 с помощью болтов с шайбами.

Информация с тензодатчиков через регистрирующее универсальное устройство многоканального сбора информации Е-440 подавалась в ПЭВМ, где после обработки с использованием оригинальной программы хранилась в табличном и графическом видах, удобных для последующего анализа.

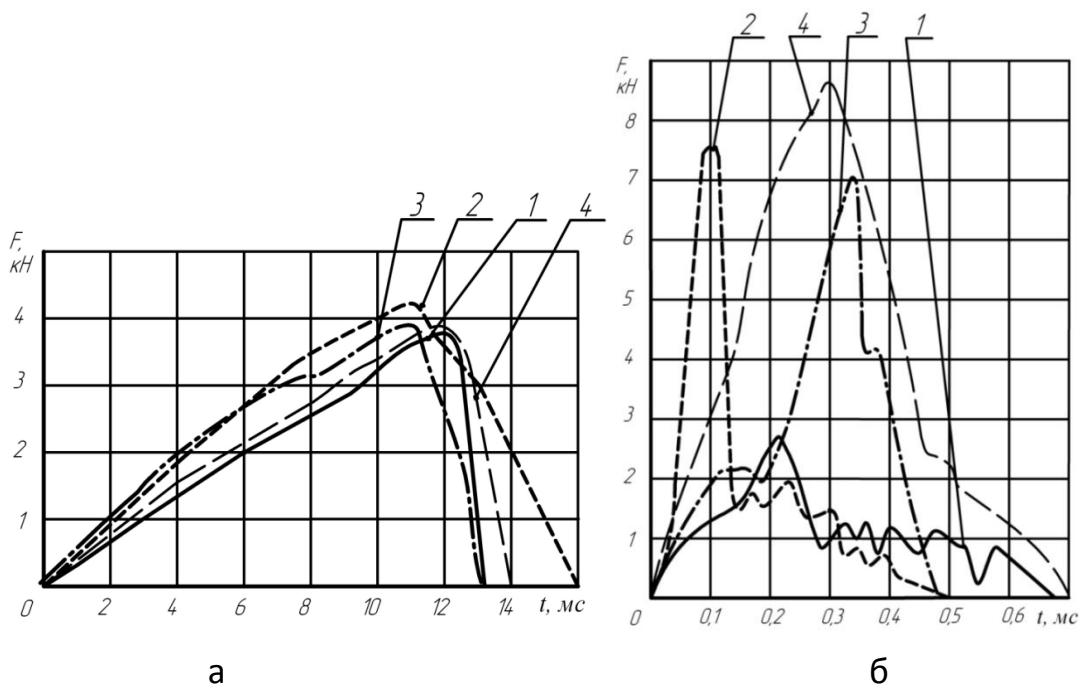
Основные характеристики регистрирующего устройства Е-440: современный цифровой сигнальный процессор ADSP-2185М с тактовой частотой работы 48 МГц; 16 дифференциальных каналов или 32 канала с общей землей для аналогового ввода с возможностью автоматической корректировки нуля; максимальная частота работы 14-битного АЦП – 400 кГц, что позволяет использовать данное устройство для исследования ударных процессов.

Благодаря нескольким каналам регистрации записывались сигналы одновременно по 3 каналам: на ломателе 1 и на опорах 4 (см. рис. 3.1, а).

В эксперименте использовались цилиндрические образцы из проката диаметром 16 мм и длиной 150 мм из разных марок сталей, находящихся в пластическом – Ст3, упругопластическом – 20, 45, 40Х и хрупком состояниях – 60С2, ШХ15. На образцы предварительно с помощью токарного резца наносили концентраторы напряжений в форме кольцевой канавки треугольного профиля с параметрами: глубина $\Delta H = 1,3$ мм, радиус при вершине – 0,15 мм. Плечи приложения нагрузки – 50 мм. Размеры зон деформирования и разрушения образцов определяли путем анализа поверхности излома с использованием микроскопа.

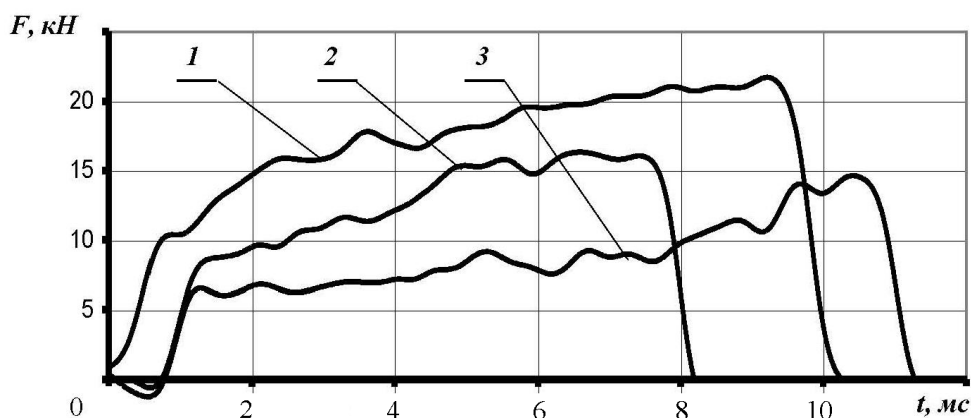
Измерение геометрических параметров, характеризующих геометрическую точность разделенных образцов, производили методом макроструктурного анализа путем замеров абсолютных и относительных величин искажений геометрической формы с использованием универсального измерительного инструмента.

Типовые графики изменения энергосиловых параметров процесса трехточечной холодной ломки изгибом от времени при разделении образцов из разных марок сталей с концентратором напряжений $\Delta H = 3 \text{ мм}$, нагружаемых статическими и ударными силами, представлены на рис. 3.3. Изменение $F(t)$ при трехточечной холодной ломке изгибом образцов с концентратором напряжений $\Delta H = 1 \text{ мм}$ при статическом и ударном нагружениях представлены на рис. 3.3, 3.4.



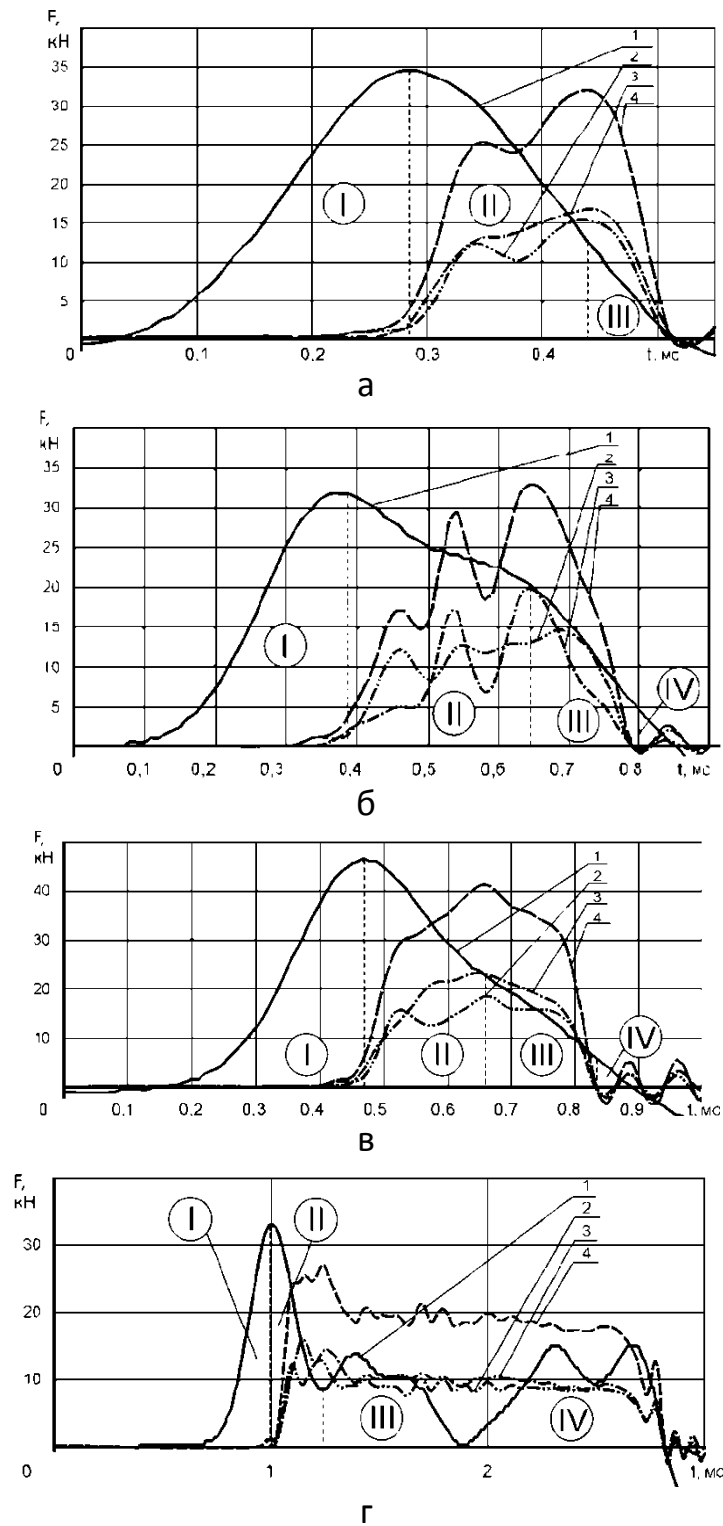
*а – статическое нагружение; б – ударное нагружение;
1 – сталь ШХ15; 2 – сталь 20; 3 – сталь 40Х; 4 – сталь 45*

Рисунок 3.13 – Зависимость силы на ломателе от времени для образцов из разных марок сталей при $\Delta H = 3 \text{ мм}$



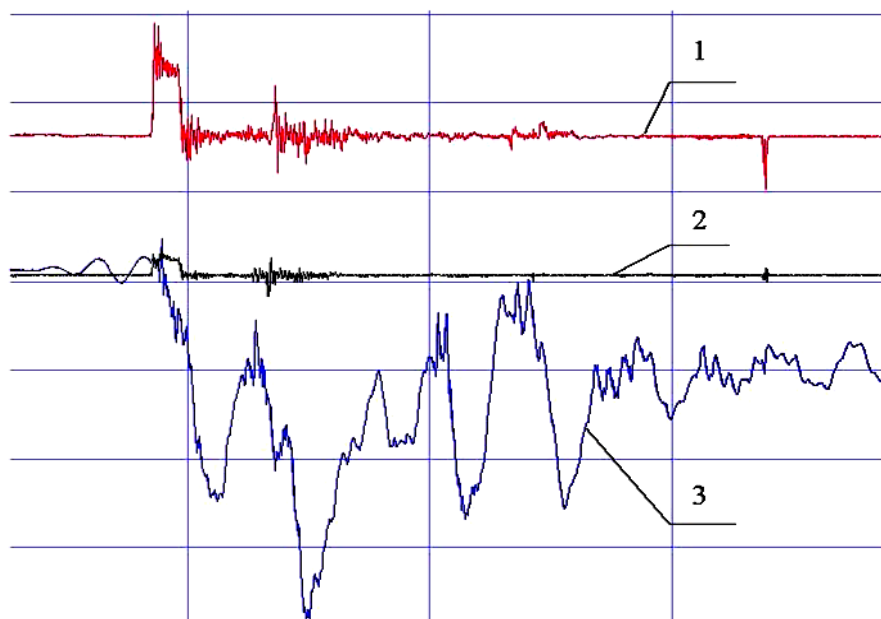
1 – сталь 60С2; 2 – сталь 45; 3 – Ст 3

Рисунок 3.14 – Зависимость статической силы на ломателе от времени для разных марок сталей при $\Delta H = 1 \text{ мм}$



а – сталь 60С2; б – сталь 45; в – сталь 40Х; г – сталь 20;
 I – энергия зарождения трещины; II – энергия вязкого подрастания трещины; III – энергия хрупкого разрушения; IV – энергия вязкого долома;
 1 – сила на ломателе; 2 – сила на левой опоре (опора 1);
 3 – сила на правой опоре (опора 2); 4 – сумма сил на опорах
 Рисунок 3.15 – Графики изменения $F(t)$ для разных марок сталей при ударном нагружении ($V = 18$ м/с) по схеме трехточечной холодной ломки изгибом [116]

Типовые осциллограммы холодной ломки образцов по схеме трехточечного изгиба при ударном (динамическом) нагружении показаны на рис. 3.5, 3.3 [117].



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

Рисунок 3.16 – Типовая осциллограмма зависимости сил на ломателе и опорах от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для стали марки 60С2 (ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с) [117]

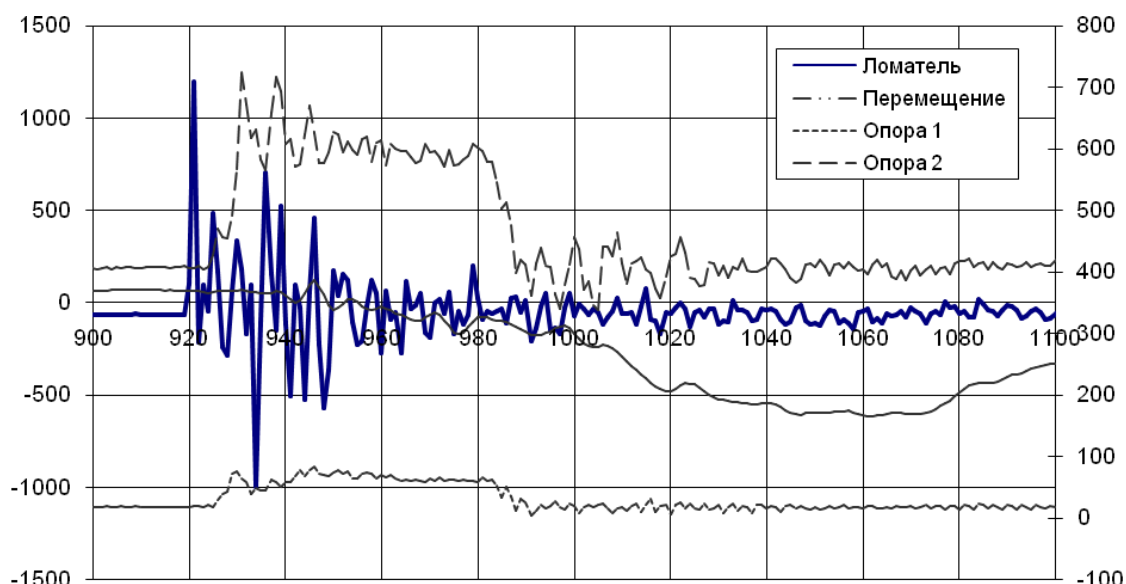


Рисунок 3.17 – Обработанные данные зависимости сил на ломателе, опорах и перемещения от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для стали марки 60С2 (ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с) [117]

Изменение энергосиловых параметров процесса трехточечной холодной ломки изгибом в зависимости от времени для образцов из разных материалов при динамическом нагружении показано на рис. 3.4, 3.3, 3.4.

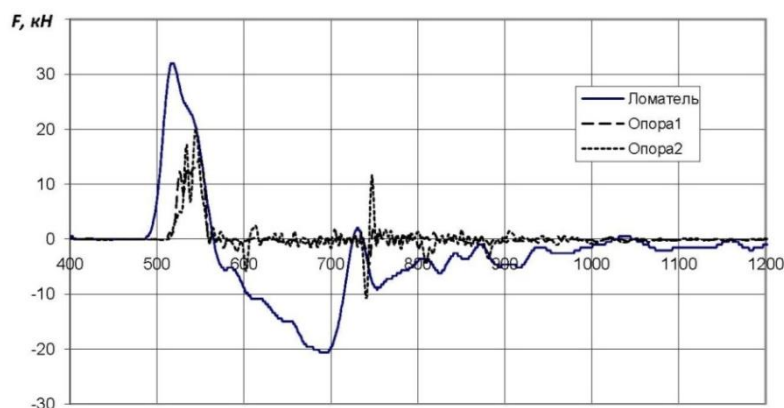


Рисунок 3.18 – Зависимость силы на ломателе и опорах от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для образцов из стали 45(ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с) [117]

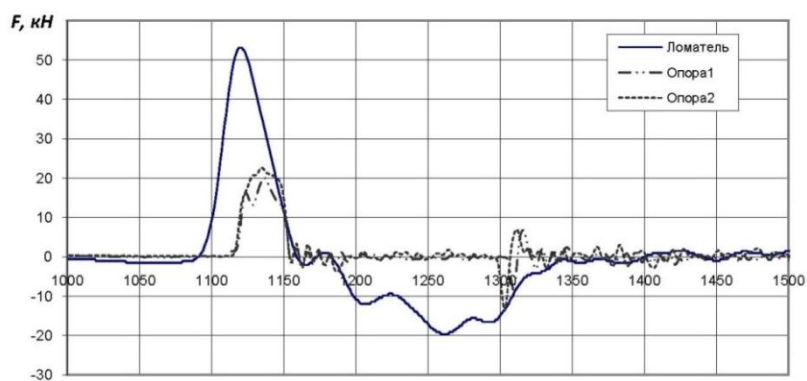


Рисунок 3.19–Зависимость силы на ломателе и опорах от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для стали 40X(ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с) [117]

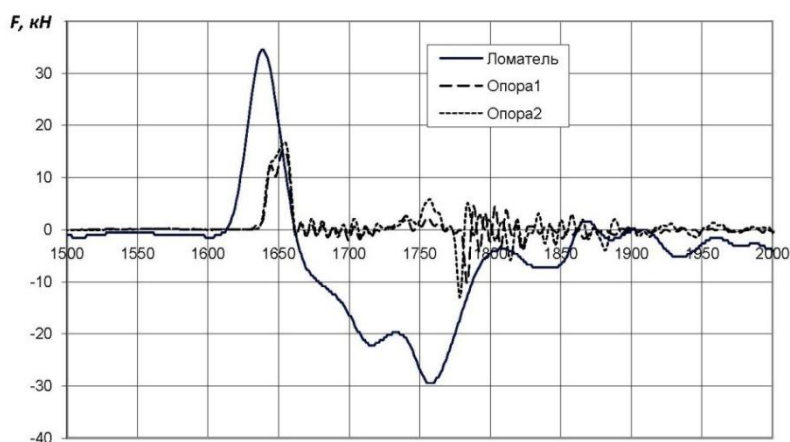


Рисунок 3.20–Зависимость силы на ломателе и опорах от времени (показания трех каналов, снимаемых одновременно) для стали 60С2(ось X – время, масштаб – 10^5 измерений в 1 с) [117]

Анализ полученных результатов экспериментов представлен в табл. 3.4 [118].

Таблица 3.4 – Результаты экспериментов [118]

Марка стали	$\Delta H = 3 \text{ мм}$		$\Delta H = 1 \text{ мм}$		Коэффициент динамичности k_d
	Максимальная сила ломки, кН				
	$F_{лс}$	$F_{лд}$	$F_{лс}$	$F_{лд}$	
ШХ15	3,8	2,7	–	–	0,7
60С2	–	–	22,0	35,0	1,6
45	3,9	8,6	16,0	32,0	2,0...2,2
40Х	3,9	7,0	21,0	45,0	1,8...2,1
20	4,2	7,5	22,0	35,0	1,6...1,8

Соотношение максимальных сил ломки при статическом $F_{лс}$ и ударном $F_{лд}$ нагружениях оценивалось коэффициентом динамичности $k_d = F_{лд}/F_{лс}$, который для разных марок сталей составил соответственно: ШХ15 – 0,7; 60С2 – 1,6; 45 – 2,0...2,2; 40Х – 1,8...2,1; 20 – 1,6...1,8 [119].

Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в литературе [120], где k_d с ростом скорости деформирования до 100 м/с для армко-железа увеличивается в 3,4; для стали 45 – в 2,8; для стали Ст3 – в 2,9 раза; для высокопрочных сталей, например ШХ 15, – $k_d < 1$, что объясняется начальными процессами разрушения в металле и позволяет считать структурный фактор определяющим на начальном диапазоне высокоскоростных испытаний материалов.

По полученным диаграммам $F(t)$ (рис. 3.1,а,б,в,г) для образцов из разных марок сталей, имеющих достаточно высокое разрешение по обеим координатам, можно определить энергию, затрачиваемую на разрушение образца, а также ее составляющие: энергию до момента образования трещины и энергию вязкого и (или) хрупкого распространения трещины. Кроме того, учитывая высокие характеристики быстродействия системы и возможность накопления большого объема данных, можно избирательно рассматривать полученный сигнал длительностью в несколько миллисекунд в интересующих нас очень узких временных диапазонах (порядка единиц и десятков микросекунд), что позволяет оценивать скорость распространения трещин.

Величину составляющих энергии определяли путем преобразования зависимости «нагрузка – время» в зависимость «нагрузка – перемещение». Результаты обработки экспериментов представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.5 – Значения общей энергии деформирования и разрушения, а также ее составляющих при скорости $V = 18$ м/с [116–118].

Марка стали	Общая энергия деформирования и разрушения, Дж	Энергия зарождения трещины, Дж	Энергия вязкого подрастания трещины, Дж	Энергия хрупкого разрушения, Дж	Энергия вязкого долома, Дж
60С2	120,0	54,0	18,0	5,2	0,3
45	80,0	25,6	12,8	7,2	1,8
40Х	90,0	35,1	12,5	6,7	1,7
20	110,0	20,9	4,0	5,5	8,8

Фотографии образцов из разных марок сталей, разделенных по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статическом и ударном нагружениях, представлены на рис. 3.4.

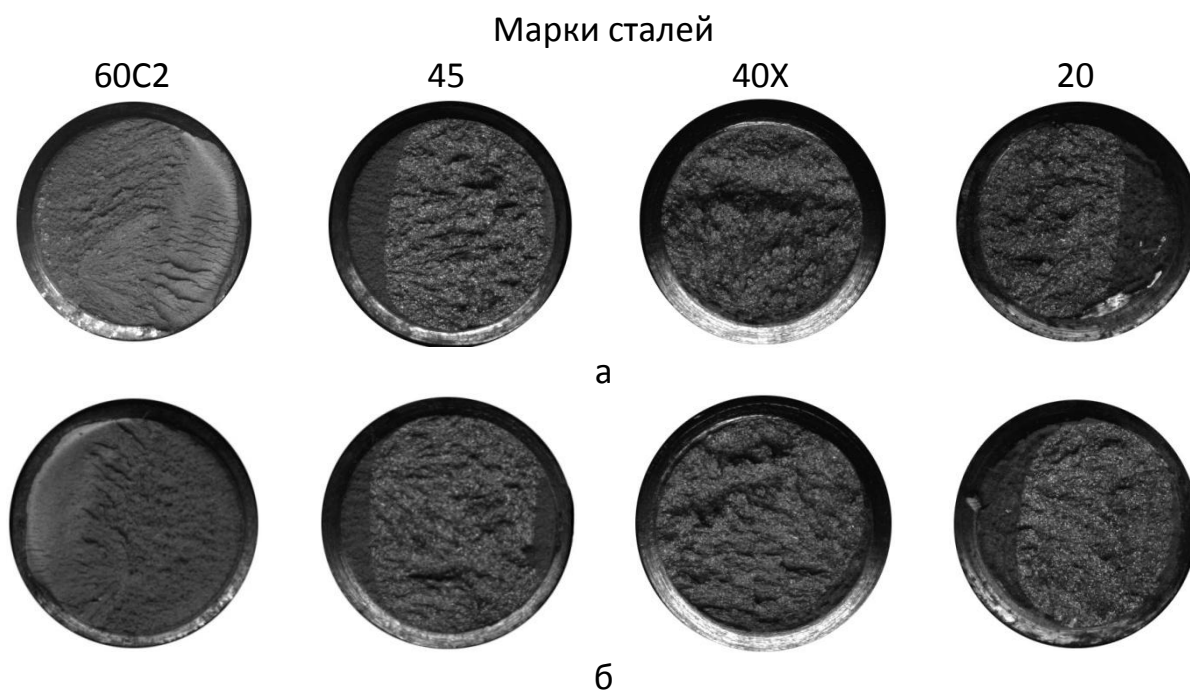


Рисунок 3.21 – Фотографии заготовок, полученных при статическом (а) и ударном (б) нагружениях способом трехточечной холодной ломки изгибом [117]

Была проанализирована геометрическая точность полученных заготовок и результаты представлены в табл. 3.6.

Анализ результатов обработки экспериментов показывает, что большая часть энергии расходуется на зарождение и вязкое подрастание трещины, тогда как энергия, затрачиваемая на хрупкое разрушение, является незначительной. Наблюдается проскок трещины при комнатной температуре, свойственный хрупкому разрушению, что согласуется с данными эксперимента [115] при температурах ниже 50 °С.

Таблица 3.6 – Результаты измерений геометрической точности полученных заготовок (см. рис. 3.2) [117]

Марка стали	Описание заготовок
Статическое нагружение	
60С2	Угол изгиба до разрушения составил примерно 10°. Участки заготовок, примыкающие к концентратору напряжений, пластически деформированы. Имеется небольшой вырыв в зоне напряжений сжатия со стороны лома-теля. Поверхность матовая. Качество торца удовлетворительное.
45	Участки заготовок, примыкающие к концентратору напряжений, пластически деформированы. Поверхность скола в зоне растяжения в начале движения трещины матовая, оставшаяся перьевая, полосчатая, шероховатая с фракцией 0,3...0,4 мм. Качество заготовок удовлетворительное.
40Х	Поверхность разрушения сильно шероховатая, имеются вырывы, борозды. Однако траектория трещины прямолинейная. Качество заготовок удовлетворительное.
Ст 3	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°. Участки, примыкающие к концентратору напряжений, сильно изогнуты. Видимая часть поверхности скола матовая, что соответствует началу старта трещины в области растягивающих напряжений
Динамическое нагружение	
60С2	Разрушение хрупкое, поверхность разрушения матовая, имеется небольшой вырыв со стороны зоны сжимающих напряжений, траектория трещины прямолинейная, области образца вблизи концентратора напряжений практически не деформированы. Качество заготовок высокое
45	Разрушение хрупкое, поверхность разрушения полосчатая, шероховатая фракцией 0,2...0,3 мм, траектория трещины прямолинейная. Участки заготовок, примыкающие к концентратору напряжений, практически не изогнуты. Качество заготовок удовлетворительное
40Х	Разрушение вязкоупругое, поверхность разрушения полосчатая, крупнозернистая с вырывами (фракция 0,6...0,8 мм), области вблизи концентратора напряжений деформированы слабо. Качество заготовок удовлетворительное
Ст 3	Образец не разрушился, так как не хватило хода инструмента до полного разрушения. При этом угол изгиба составил примерно 30°. Участки, примыкающие к концентратору напряжений, сильно изогнуты

Длительность проскока трещины по указанным зонам деформирования и разрушения I–IV (см. рис. 3.1) представлена в табл. 3.3.

Таблица 3.7 – Результаты экспериментов при $V = 18$ м/с [116–118]

Марка стали	Время проскока трещины по зонам I–IV, мс (см. рис. 3.1)			
	t_1	t_2	t_3	t_4
60С2	0,26	0,16	0,07	0,02
45	0,32	0,25	0,15	0,06
40Х	0,34	0,18	0,17	0,06
20	0,60	0,30	0,60	0,95

Анализ данных табл. 3.1 показывает, что длительность проскока хрупкой трещины для сталей разных марок составляет $t = 0,07...0,60$ мс. Это дает возможность с достаточной точностью оценить среднюю скорость распространения хрупкой трещины (длину трещины определяли по излому разрушенного образца (см. рис. 3.1)), которая для образцов из разных марок сталей составила соответственно: 60С2 – 120 м/с; 45 – 80 м/с; 40Х – 60 м/с; 20 – 50 м/с.

Из анализа рис. 3.1 также видно, что снижение нагрузки при распространении хрупкой трещины происходит достаточно плавно, без резких скачков. Также можно оценить скорость развития вязкого разрушения: скорость трещины для образцов из разных марок сталей составляет 10...25 м/с. Такие величины скоростей согласуются с оценкой, полученной по результатам испытаний [31;115].

Анализ геометрической точности заготовок, разделенных холодной ломкой изгибом, из разных марок сталей при статическом и ударном нагружении (см. рис. 3.1) позволил сделать вывод о том, что с повышением скорости деформирования качество заготовок улучшается, но незначительно.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологии процесса разделения сортового проката на мерные заготовки способом холодной ломки изгибом.

3.4.2 Экспериментальные исследования разделения образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении

Эксперимент проведен для практической проверки теоретических расчетов по разделению образцов по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении.

В эксперименте использовались образцы диаметром 20 мм и длиной 100 мм из следующих марок сталей: ВСтЗпс; 30, 40, 50ХФА. На образцы предварительно с помощью токарного резца наносили одинаковые концентраторы напряжений в форме кольцевой канавки с параметрами $\Delta H = 1,5$ мм; $r = 0,15$ мм.

Высокое качество заготовок наблюдалось при разделении стали 50ХФА.

На рис. 3.3 показана фотография заготовок из стали 50ХФА, полученных способом трехточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении. Величина отклонения траектории трещины от прямолинейности δ_i практически равна нулю, поверхность разрушения матовая. Области пластической деформации в зоне поверхности излома отсутствовали.



Рисунок 3.22 – Заготовки из стали 50ХФА, полученные способом трёхточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении

При статико-динамическом нагружении образцов из стали 30 по схеме трехточечной холодной ломки изгибом наблюдалось повышение качества заготовок по сравнению со статическим и динамическим нагружениями. Величина отклонения траектории трещины в среднем составила $\delta_i = (1,4 \pm 0,05)$ мм (рис. 3.3), на поверхности излома имелись отдельные сколы, вырывы металла, микро- и макротрещины, высота макронеровностей уменьшилась и не превышала 0,3 мм.

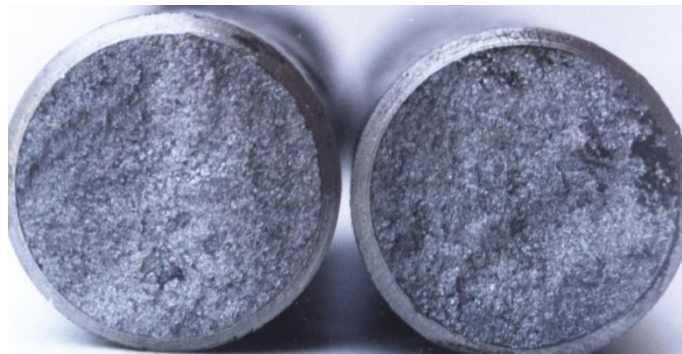


Рисунок 3.23 – Заготовки из стали 30 при статико-динамическом нагружении

При статико-динамическом нагружении образцов из стали 40 также наблюдалось повышение качества разделяемых заготовок. Величина отклонения траектории трещины от прямолинейности в среднем составила $\delta_i = (0,8 \pm 0,05)$ мм (рис. 3.4), поверхность излома имела меньшие сколы, вырывы, макротрещины.

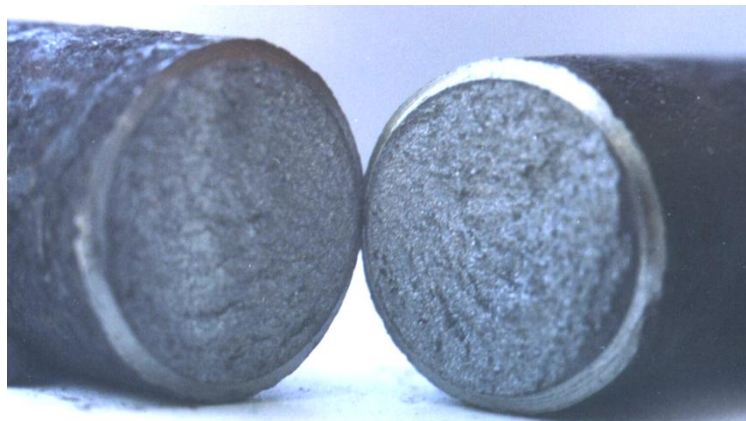


Рисунок 3.24 – Заготовки из стали 40, полученные способом трёхточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении

При статико-динамическом нагружении образцов из мягких пластичных сталей (ВСтЗпс) разрушение происходило при больших углах изгиба половинок образцов в диапазоне $30...35^\circ$ (рис. 3.5).

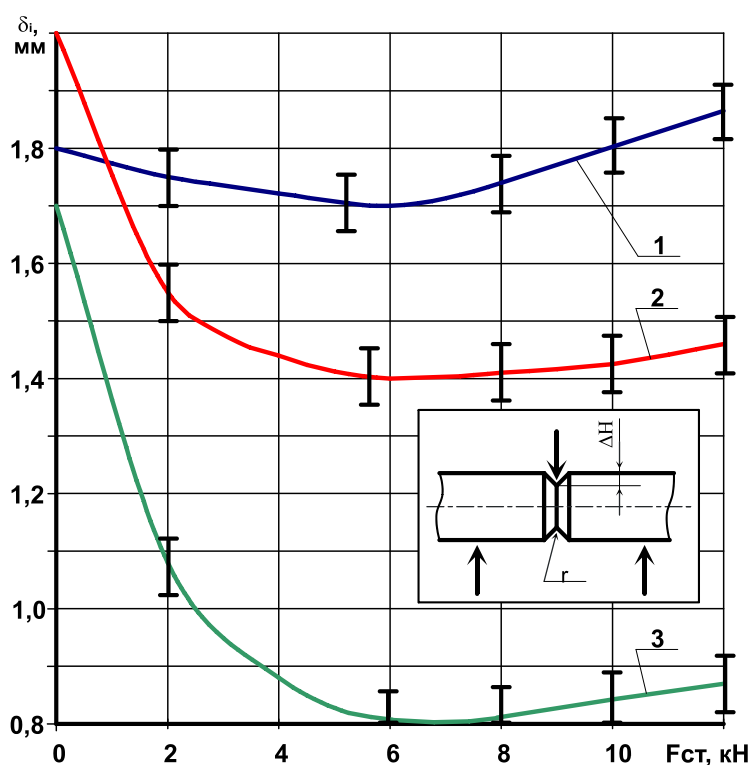


Рисунок 3.25 – Заготовки из стали ВСтЗпс, полученные способом трёхточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении

Большие углы изгиба являются причиной выхода пластической деформации на поверхность образца. В результате на поверхности образцов имелись утяжки. Средние параметры геометрической точности заготовок

из стали ВСтЗпс при статико-динамическом нагружении имели следующие значения: утяжка продольная – 12 мм; утяжка поперечная – 5 мм; $\delta_i = 1,8$ мм; косина – 4 мм; на поверхности имелась небольшая вмятина от бойка. Разделение проходило за два и более удара с энергией удара $W = (300 \pm 5) \text{ Дж}$. При этом поверхность излома не имела сколов, вырывов, макротрещин. Это объясняется тем, что при малых нагрузках на образец трещина росла медленно и не набирала скорость, достаточную для ветвления.

Зависимость величины отклонения траектории трещины от величины статической нагрузки для сталей разных групп твердости представлена на рис. 3.6.



1 – для стали ВСтЗпс; 2 – для стали 30; 3 – для стали 40

Рисунок 3.26 – Зависимость отклонения траектории трещины от величины статической нагрузки при трехточечной холодной ломке изгибом образцов на пресс-молоте

Анализ зависимостей $\delta_i = f(F_{СТ})$ показывает, что для получения заготовок высокого качества рекомендуется выбирать величину статической силы $F_{СТ}$ в диапазоне 40...50 % от силы трехточечной холодной ломки изгибом $F_{л}$. На основании анализа зависимости величины отклонения траектории трещины от значения предела прочности разделяемых образцов $\delta_i = f(\sigma_B)$ (рис. 3.7) установлено, что с увеличением прочности материала повышается качество получаемых заготовок.

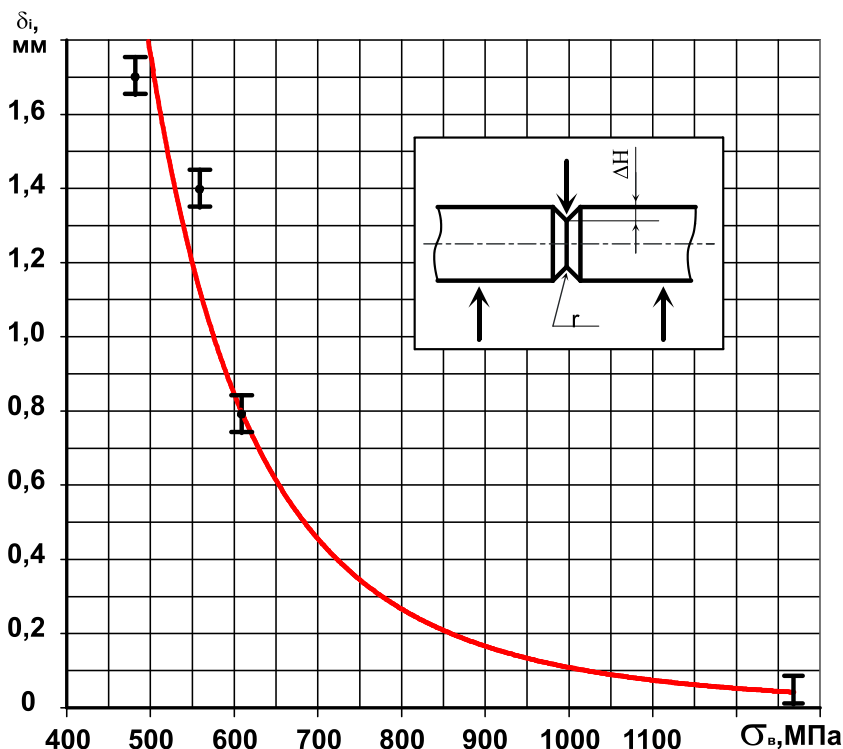


Рисунок 3.27 – Зависимость величины отклонения траектории трещины от предела прочности разделяемых материалов способом трёхточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении

Эксперимент в целом показал, что комбинированное статико-динамическое нагружение образцов при холодной ломке изгибом положительно влияет на качество разделяемых заготовок, что подтверждает теоретические выводы. Существенное повышение качества наблюдалось при разделении сталей средней группы твердости: величина отклонения траектории трещины δ_i уменьшилась в среднем на 75 % по сравнению с динамическим нагружением.

На основании проведенных экспериментов установлен средний диапазон величин статической силы 40...50 % от силы ломки для получения заготовок высокого качества.

3.5 Проведение экспериментов с использованием новых схем разделения

3.5.1 Экспериментальные исследования разделения образцов по схеме ломки с перераспределением напряжений по сечению заготовки

Одним из направлений повышения качества разделяемых заготовок является создание способов нагружения, которым органически присуще однородное напряженное состояние. Из анализа картины распределения

сжимающих напряжений под сосредоточенной силой на фотоупругих моделях [17] следует, что линии равного значения относительно плоскости симметрии образуют своеобразный угловой коридор, в который, как в ловушку, и попадает трещина. Тогда дальнейшее ее продвижение определяется картиной поля сжимающих напряжений под сосредоточенной силой и условиями их релаксации во времени. При больших скоростях трещина может огибать поле сжимающих напряжений, разветвляясь при этом в двух направлениях, что и определяет высокий процент брака при холодной ломке изгибом проката на заготовки мерной длины. Одной из основных причин нестабильности трещины является близость ее вершины к движущейся перед ней нейтральной линии, за которой расположена зона сжимающих напряжений, ориентированных нормально к плоскости разделения [45]. Поэтому традиционные схемы ломки (трехточечная и консольная) иногда приводят к низкой точности торцов и не гарантируют разделение пластичных материалов.

Для обеспечения качества разделяемых заготовок разработаны конструкции устройств для разделения проката холодной ломкой изгибом [121; 122]. Сущность предлагаемых решений заключается в перераспределении напряжений по сечению проката в плоскости разделения, в соответствии с которым зона растягивающих напряжений увеличивается за счет уменьшения зоны сжимающих напряжений.

Экспериментальные исследования предложенной схемы разделения проводили на установке (рис. 3.8), которая состоит из ломателей-втулок 1, установленных с возможностью вращательного движения вокруг оси, смещённой относительно оси разделяемого проката 2 на величину эксцентриситета e и закреплённых в отверстиях вертикальных стоек станины 3 болтом 4 с гайкой 5. Прокат 2 зажимается в парах зажимных полувтулок 7, которые взаимодействуют по конической поверхности с соответствующими поверхностями втулок-ломателей 1 и установлены конусностью навстречу друг другу. Ломатели-втулки 1 контактируют по клиновой поверхности с клином 6. Величина эксцентриситета e может варьироваться за счёт изменения положения оси – e_1 [123].

Установка работает следующим образом. Прокат с предварительно нанесенным концентратором напряжений зажимается в ломателях-втулках 1 за счёт перемещения пар зажимных полувтулок 7. Под действием силы привода пресса клин 6 перемещается вниз и расклинивает систему «клин – ломатель – втулки». При этом ломатели-втулки проворачиваются относительно оси болта 4, осуществляя холодную ломку проката (труб) изгибом.

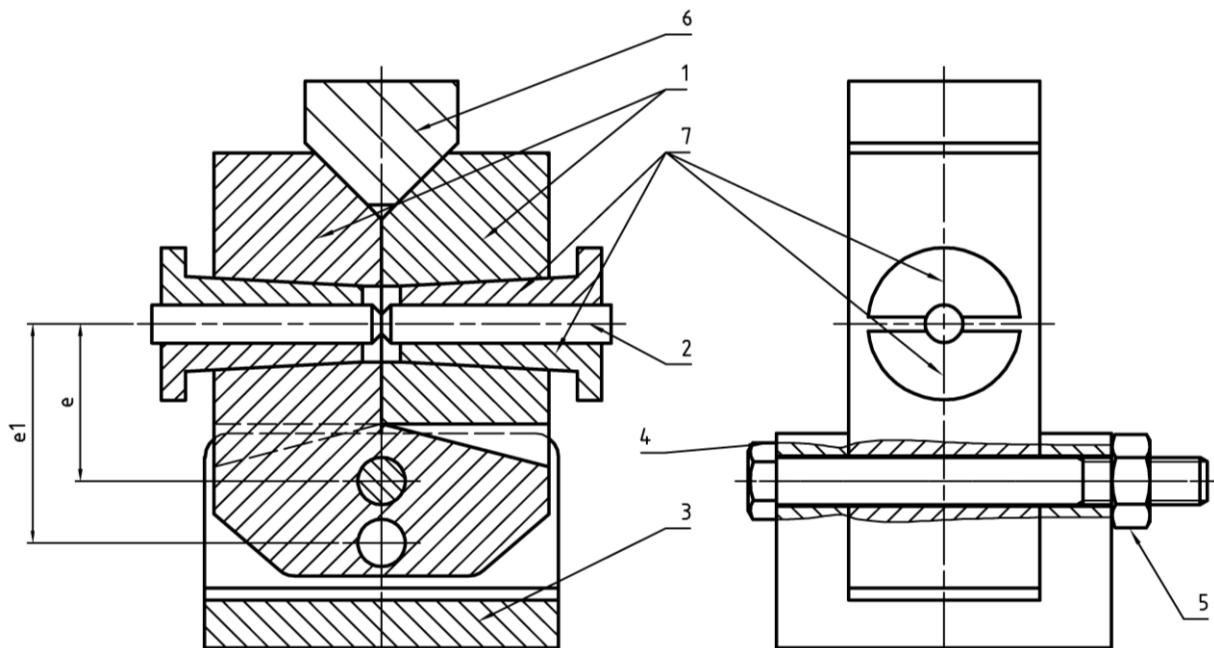


Рисунок 3.28 – Экспериментальная установка [123]

В эксперименте использовались цилиндрические образцы из проката диаметром 16 мм и длиной 150 мм, выполненные из сталей, находящихся: в пластическом (Ст3), упругопластическом (сталь 45), хрупком (сталь 60С2) состояниях. На образцы предварительно с помощью токарного резца наносили одинаковые концентраторы напряжений в форме кольцевой канавки треугольного профиля глубиной 1 мм и радиусом при вершине примерно 0,15 мм.

В качестве регистрирующего устройства использовался модуль Е-440. Результаты испытаний представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.8 – Результаты экспериментов [123]

Марка стали	Описание заготовок
Сталь Ст3	Разрушить образец не удалось
Сталь 45	Качество заготовок невысокое. Траектория трещины не прямолинейная. Поверхность разрушения шероховатая с вырывами и козырьками. Размер козырька до 5 мм
Сталь 60С2	Качество заготовок невысокое. Магистральная трещина отклонилась от заданного концентратором напряжений направления движения. Поверхность разрушения сильно шероховатая с вырывами и козырьками размером до 5 мм

Зависимость силы холодной ломки изгибом от хода инструмента для образцов из стали 60С2 представлена рис. 3.9.

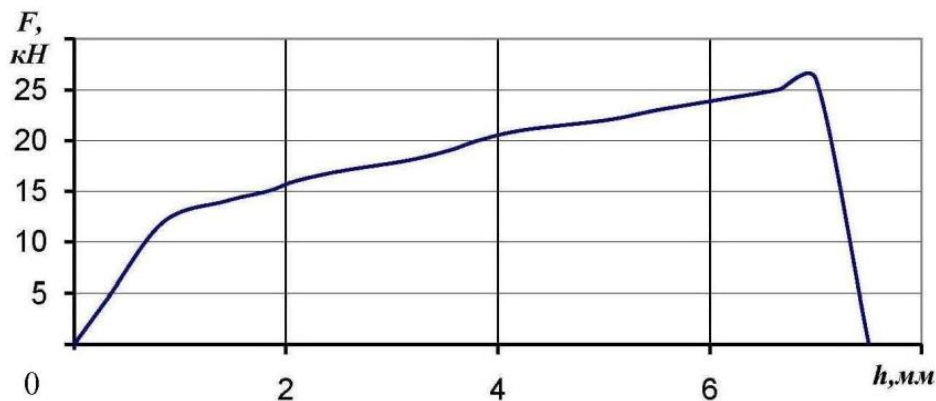


Рисунок 3.29 – Зависимость силы ломки от перемещения при разделении образцов из стали 60С2 [123]

На основании проведенных исследований можно сделать такие выводы и дать следующие рекомендации:

1 Факторами, влияющими на качество разделяемых заготовок, являются величина эксцентриситета e и надежность фиксации заготовки в зажимных устройствах.

2 При нагружении образцов статическими и ударными нагрузками ($V \cong 18$ м/с) геометрическая точность получаемых заготовок оставалась практически одинаковой.

3.5 Экспериментальные исследования процесса разделения образцов по схеме «сдвиг – ломка»

Эксперимент проведен с целью нахождения величины энергии, необходимой для нанесения эффективного концентратора напряжений при реализации способа «сдвиг – ломка».

В эксперименте использованы образцы из сталей с разными механическими свойствами: мягких – ВСтЗпс; средней твердости – 20Х; 45 и хрупких – У8А. Размеры образцов: $B = 15$ мм; $H = 15$ мм. Конструкция оснастки представлена на рис. 3.3. При этом оснастка дополнительно комплектовалась ломателем.

На первом этапе на образец отдельно статической и динамической силами наносили концентратор напряжений за счет сдвига части образца относительно профиля по схеме неполностью открытой отрезки сдвигом, на втором этапе нагружали статической силой прессового цилиндра пресс-молота до разрушения по схеме консольной холодной ломки изгибом. Схемы нагружения представлены на рис. 3.2.

Показатели геометрической точности, по которым оценивалось качество разделяемых заготовок, приведены на рис. 3.3.

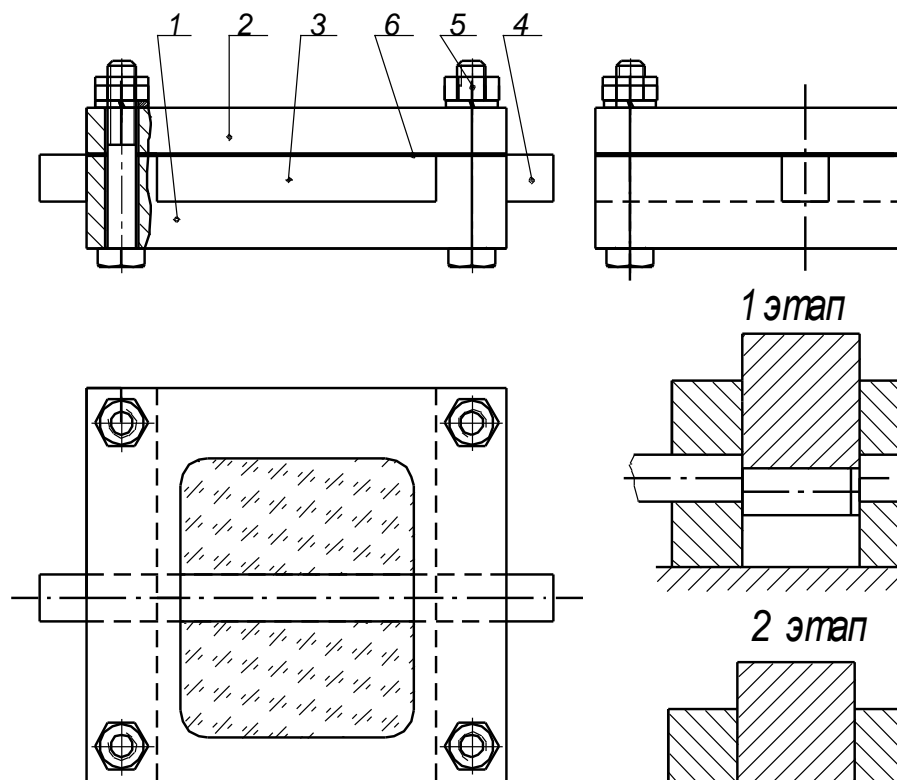
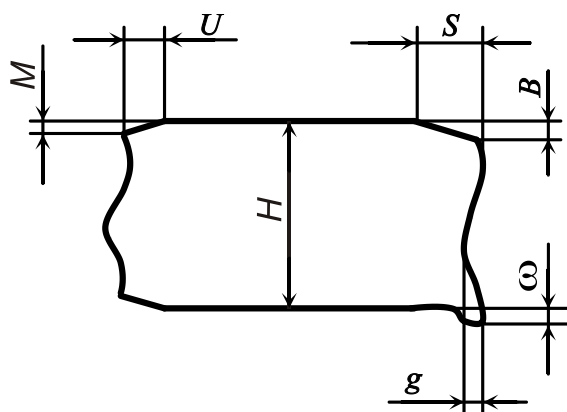


Рисунок 3.30 – Оснастка и схемы нагружения для проведения экспериментов по разделению образцов способом «сдвиг – ломка»



U, M – поперечный и продольный размеры утяжки;
 S, B – поперечный и продольный размеры вмятины от ножа;
 g – глубина волны на торце; ω – длина заусенца

Рисунок 3.31 – Схема измерения искажений геометрической точности заготовок

Оценивали минимально возможные величины силы и энергии, которые необходимы для нанесения эффективного концентратора напряжений для получения геометрически точных заготовок. Предварительно пресс-молот тарировался по давлению с использованием данных замера максимальной скорости подвижных частей (см. рис. 3.1).

Выборка результатов измерений и расчетов представлена в табл. 3.3.

Таблица 3.9 – Замеры геометрической точности заготовок

Материал заготовки	σ_B , МПа	δ , %	Статика			Динамика		
			F_p , кН	Сила нанесения КН, в % от F_0 , Í	$g' = g/H$	W_p , Дж	Энергия для нанесения КН, в % W_0 , Äæ	g'
ВСтЗпс	480	26	$82,5 \pm 0,01$	80 ± 2	$0,30 \pm 0,03$	800 ± 5	71 ± 1	$0,28 \pm 0,03$
20Х	590	5	$100,1 \pm 0,01$	70 ± 2	$0,20 \pm 0,03$	935 ± 5	61 ± 1	$0,17 \pm 0,03$
45	600	16	$103,1 \pm 0,01$	70 ± 2	$0,15 \pm 0,03$	950 ± 5	60 ± 1	$0,13 \pm 0,03$
У8А	710	17	$120,7 \pm 0,01$	63 ± 2	0,03	1100 ± 5	52 ± 1	0,02

где F_p – сила отрезки образца сдвигом;
 W_p – энергия, необходимая для разделения образца способом отрезки сдвигом;
 g' – относительная волнистость торца.

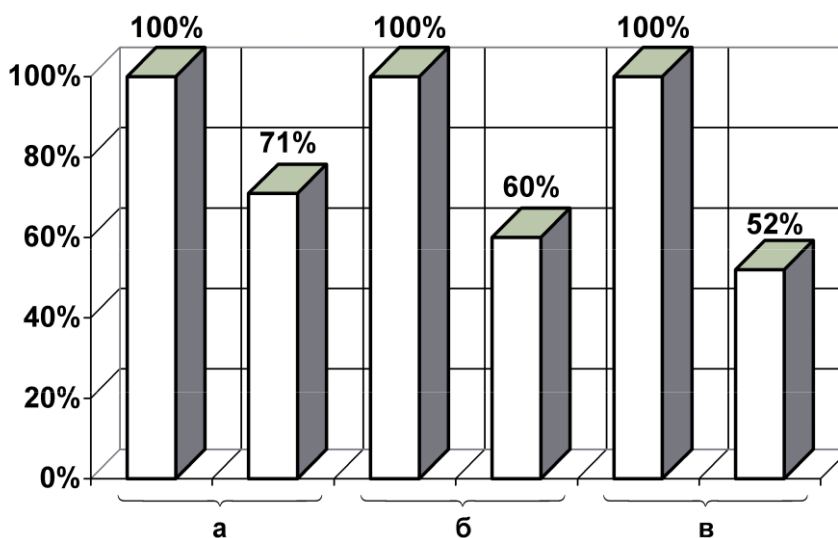
Завышенные значения силы F_p и энергии W_p , которые необходимы для отрезки сдвигом образцов, связаны с потерями на упругую деформацию станины экспериментального пресс-молота и оснастки.

Высокое качество заготовок наблюдалось при разделении проката из сталей с высокими прочностными характеристиками(рис. 3.4).



Рисунок 3.32 – Заготовки из стали У8А, полученные способом «сдвиг – ломка» с нанесением концентратора напряжений динамической силой

При этом показатели геометрической точности заготовок из стали У8А (см. рис. 3.4) были следующие: продольная утяжка – 1,8 мм; поперечная утяжка – 0,3 мм; смятие продольное – 3 мм; смятие поперечное – 0,6 мм; волнистость торца – практически отсутствует; заусенец – отсутствует. Величина энергии, необходимая для нанесения эффективного концентратора напряжений, составила в среднем 52 ± 1 % от энергии W_p (рис. 3.5).



а – для стали ВСтЗпс; б – для стали 45; в – для стали У8А

Рисунок 3.33 – Соотношение энергий, необходимых для отрезки образцов сдвигом и нанесения эффективного концентратора напряжений

При разделении мягких сталей (ВСтЗпс) наблюдалось невысокое качество разделяемых заготовок. Прежде всего, имела место большая волнистость торца – 0,3 (рис. 3.6).



Рисунок 3.34 – Заготовки из стали ВСтЗпс, полученные способом «сдвиг –ломка» с нанесением концентратора напряжений динамической силой

Поверхность торцов состояла из двух неоднородных участков: плоского, гладкого пластического пояска, образованного пластическим внедрением ножа и шероховатого участка, образованного при разрушении. Шероховатая часть поверхности торца имела криволинейную (волнообразную) форму, образованную слиянием распространяющихся от кромок ножей трещин скалывания. Разрушение происходило вдоль линий разрыва скорости деформации сдвига по границе очага пластической деформации, имеющего форму двояковыпуклой линзы. Минимальная величина энергии, необходимая для нанесения концентратора напряжений, составила в среднем $(71 \pm 1)\%$ от W_p (см. рис. 3.5, а). Большие отклонения наблюдались у заднего конца заготовки, так как при отрезке сдвигом при неполноте открытой схеме происходит отгиб отрезаемой заготовки [8].

При разделении сталей средней группы твердости (45, 20Х) также наблюдалось невысокое качество разделяемых заготовок: утяжка продольная – 3 мм; утяжка поперечная – 1 мм; смятие продольное – 4,5 мм; смятие поперечное – 1,5 мм; волнистость торцов – 0,13...0,17; заусенец – 0,75 мм (рис. 3.7).



Рисунок 3.35 – Заготовка из стали 20Х, полученная способом «сдвиг – ломка» с нанесением концентратора напряжений динамической силой

Минимальная величина энергии, необходимая для нанесения концентратора напряжений составляла в среднем $(60 \pm 1)\%$ от W_p . Разделение заготовок происходило при углах изгиба $35...40^\circ$. С увеличением угла изгиба пластические зоны в зоне сжатия также увеличиваются, что приводит к снижению геометрической точности получаемых заготовок.

Зависимость величины волнистости торца g' заготовок от величины предела прочности σ_B разделяемых образцов представлена на рис. 3.8.

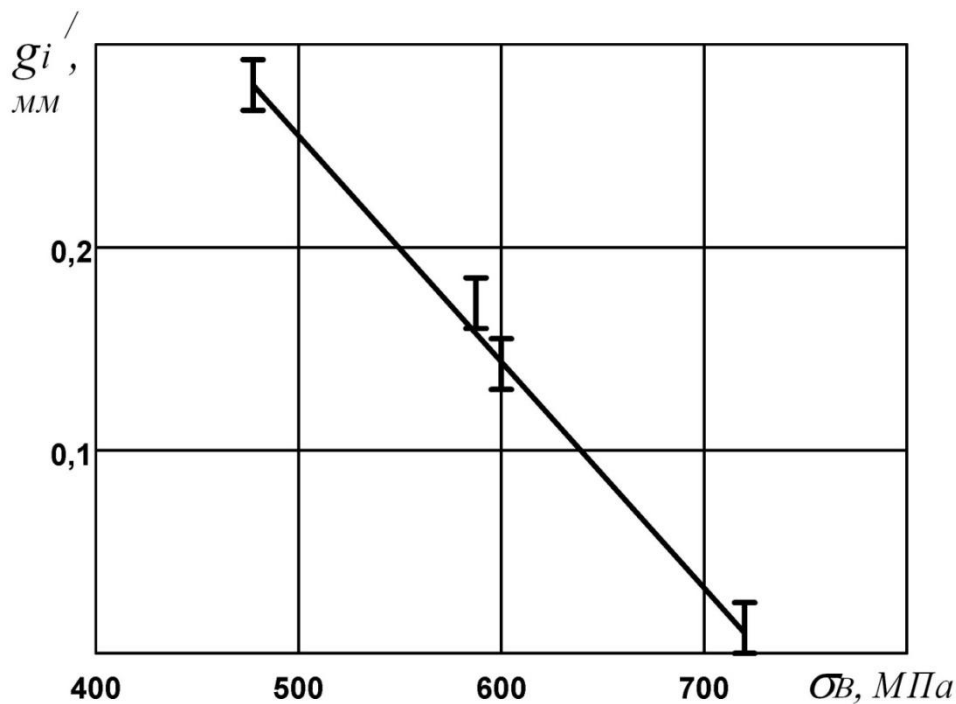


Рисунок 3.36 – Зависимость величины волнистости торца заготовок от предела прочности разделяемых материалов

При статическом нагружении для нанесения эффективного концентратора напряжений требуется больший ход пуансона, снижается качество заготовок: увеличивается продольная и поперечная утяжки, волнистость торца, величина зоны интенсивной пластической деформации.

На основании проведенных экспериментов доказана возможность разделения сортового проката по схеме «сдвиг – ломка». Установлена зависимость между твердостью материала и качеством поверхности разрушения разделяемых заготовок: чем выше твердость разделяемого материала, тем меньше неплоскостность поверхности разрушения. Целесообразным является использование предложенного способа для разделения сталей с высокими прочностными свойствами. Качество получаемых заготовок можно повысить за счет использования активного поперечного зажима проката. Выравнивание волнистости поверхности торцов, уменьшение шероховатости могут быть достигнуты осадкой заготовки.

4 ПРИКЛАДНОЙ АСПЕКТ ПРОЦЕССОВ БЕЗОТХОДНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА НА МЕРНЫЕ ЗАГОТОВКИ

4.1 Разработка штампов для отрезки сортового проката с дифференцированным зажимом

На кафедре ОПМДГМА разработаны, исследованы и внедрены в производство различные конструкции штампов с дифференцированным зажимом для отрезки проката диаметром до 30 мм, а также от 30 до 50 мм [124–132].

На основании анализа информации об оборудовании и оснастке для отрезки сдвигом была выбрана схема с дифференцированным зажимом по обе стороны от плоскости реза, в конструкции штампа применены клиновые механизмы для зажима и отрезки проката, так как они имеют высокую жесткость.

Рассмотрим базовую конструкцию предложенного штампа (рис. 4.1).

Штамп состоит из корпуса, выполненного в виде двух опорных (1, 2) и двух поперечных (3, 4) плит, соединенных с помощью шпилек 5, двух пар взаимно и попарно подпружиненных ножевых вкладышей (6, 7), установленных с возможностью взаимодействия по клиновым поверхностям с ведущей 8 и ведомой 9 ползушками. Ведущая ползушка 8 взаимодействует по клиновой поверхности с нажимным клином 10 и подпружинена с помощью буфера 11, а ведомая 9 установлена в корпусе в направляющих, ориентирующих ее перемещение только в горизонтальном направлении. При этом ползушки (8, 9) связаны между собой посредством шпонки 12, которая обеспечивает совместное горизонтальное смещение ползушек (8, 9) в направлении ножевых вкладышей (6, 7) и вертикальное смещение ведущей ползушки 8 относительно ведомой 9. Осевой зазор между ножевыми вкладышами (6, 7) регулируется с помощью клина 13.

С ростом силы пресса возрастает сила поперечного зажима проката и, когда вертикальная составляющая силы на клине 10 превысит силу предварительного сжатия буфера 11, ведущая ползушка 8 начинает двигаться вертикально, осуществляя окончательную отрезку заготовки.

По своим технико-экономическим показателям предложенные штампы с дифференцированным зажимом проката соответствуют современным образцам аналогичной штамповой оснастки. В процессе разделения в вертикальной плоскости обеспечивается неизменное положение оси проката. Исключается передача силы на зажим через прокат. Величина силы зажима проката регулируется за счет изменения силы предварительной затяжки буфера.

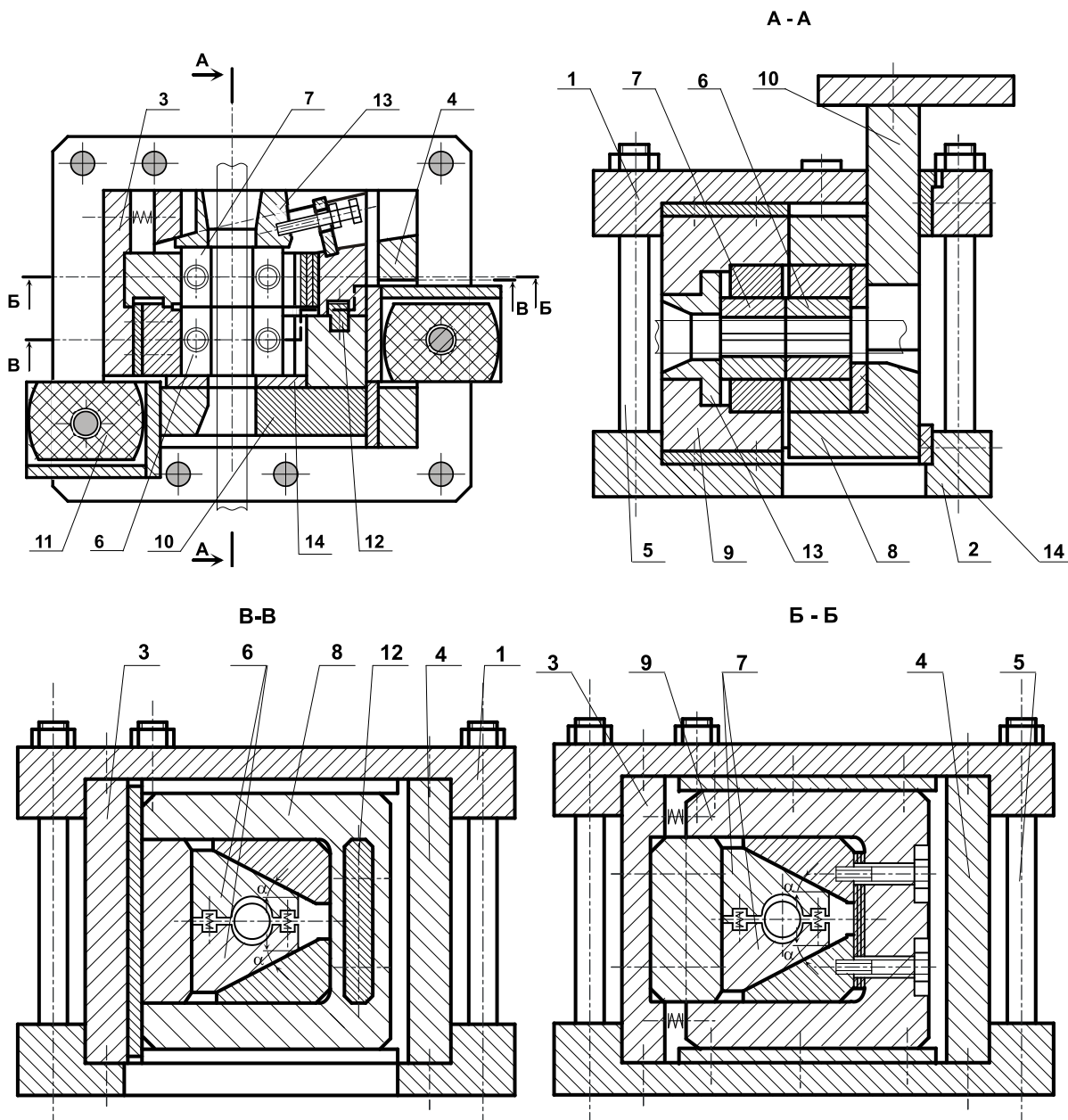


Рисунок 4.1 – Штамп для отрезки проката сдвигом с дифференцированным зажимом базовой конструкции [124]

Выполнение корпуса штампа в виде двух опорных (1, 2) и двух поперечных плит (3, 4), соединенных с помощью шпилек 5 таким образом, что поперечные плиты (3, 4) установлены по краям в прямоугольных глухих выборках опорных плит (1, 2), что позволяет значительно повысить жесткость штампа и компенсировать возникающие при отрезке проката распорные силы и скручивающие моменты. Выполнение ползушек (8, 9) в виде прямоугольных плит замкнутой формы с глухой выборкой под ножовые вкладыши (6, 7) обеспечивает высокую жесткость и прочность ползушек в условиях действия циклических напряжений. Тем самым повышается качество разделяемых заготовок и надежность работы штампа в целом.

Предусмотрена компенсация возможной овальности проката, его изгиба по длине, погрешностей изготовления деталей штампа. Расположение ножевых вкладышей (6, 7) между клином 13 и задвижкой 14 обеспечивает возможность переточки и замены последних без разборки штампа. По сравнению с известными конструкциями, в предложенном штампе поперечные размеры и масса снижаются в среднем на 25 %, а высота открытого штампового пространства – на 10 %.

Экономичность эксплуатации штампа существенно зависит от механизации вспомогательных операций, в частности от устройства упора и механизма подачи проката. Точность длины заготовки зависит от конструкции подающего устройства (порционной подачи, рольганга, упора).

Для решения поставленных проблем автором разработан механизм упора к штампу (рис. 4.2) [133], который работает следующим образом. В исходном положении упор выдвинут, и контактирует винтом 1 с прокатом. Под действием силы пружины клинья 2 движутся вниз и перемещают подвижную рамку 3 вместе с гильзой 4 и винтом 1 горизонтально вперед. При этом пружина, преодолевая силу подачи рольганга, также движется вперед на заданную величину, обеспечивая отрезку заготовок заданной длины. В этом случае исключается отскок проката от упора, что обеспечивает высокую точность отрезанных заготовок. При дальнейшем движении ползуна пружины вниз происходит зажим и отрезка проката. Поскольку предполагается, что упор в крайнем положении располагается в полости ножевых вкладышей, то при отрезке проката происходит поворот упора относительно оси шпильки 5. Под действием силы пружин 6 и 7 механизм упора к штампу возвращается в исходное положение. При этом под действием силы со стороны рольганга пружина проталкивает отрезанную заготовку и она падает в тару. Пружина движется вперед до контакта с винтом 1. Цикл работы упора возобновляется. В аварийном случае (например, заготовка не выпала и заклинила механизм) срабатывает предохранительный механизм и упор работает вхолостую.

Для расширения технологических возможностей и повышения жесткости упора последний комплектуется сменной головкой 8 (см. рис. 4.2). Ножевые вкладыши при смыкании взаимодействуют по конической поверхности 9 со сменной головкой упора 8. При этом возникает горизонтальная составляющая от силы со стороны ножевых вкладышей, что обеспечивает осевое сжатие отрезаемой части проката и фиксацию самого упора в ножевых вкладышах. Предложенная конструкция механизма упора к штампу универсальна, так как позволяет разделять как длинные, так и короткие заготовки, а также обеспечивает высокую точность длины отрезаемых заготовок.

В целях автоматизации процесса разделения проката на мерные заготовки разработан и внедрен в производство механизм порционной подачи проката диаметром до 50 мм (рис. 4.3). Работа механизма порционной подачи проката поясняется принципиальной комбинированной схемой (рис. 4.4) и циклограммой (табл. 4.1).

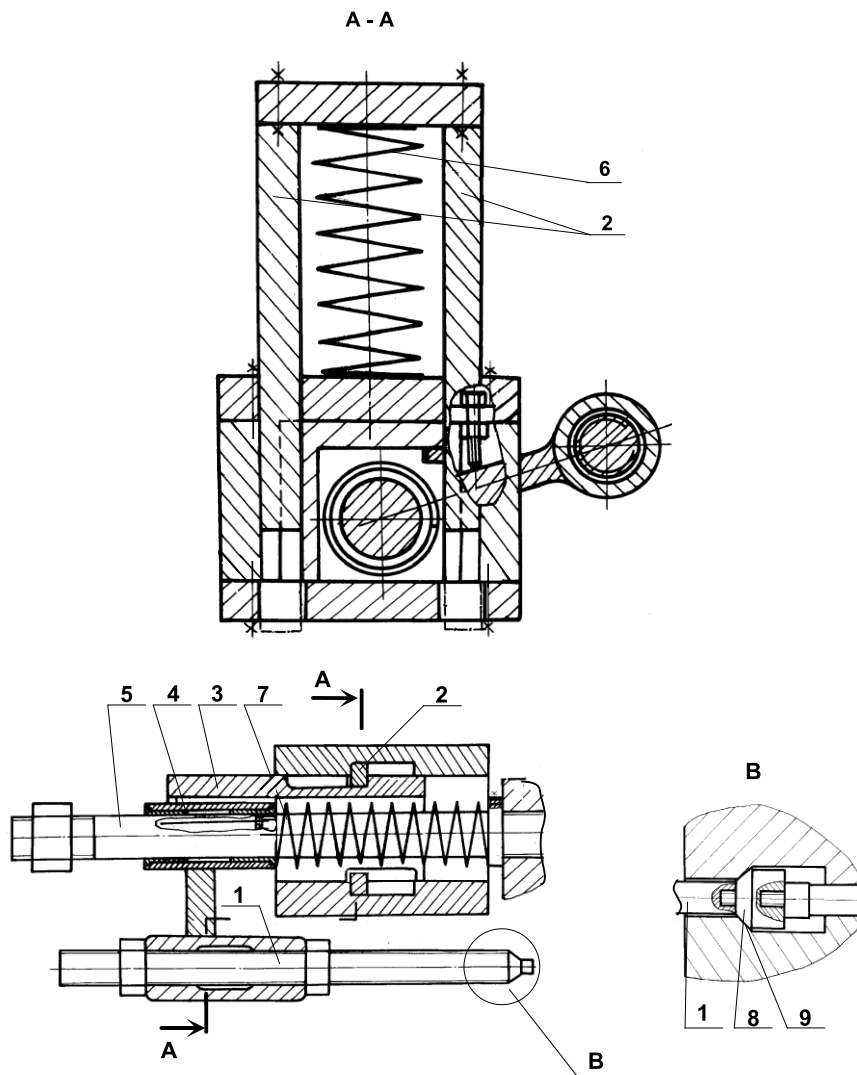


Рисунок 4.2 – Механизм упора к штампу для отрезки проката [133]

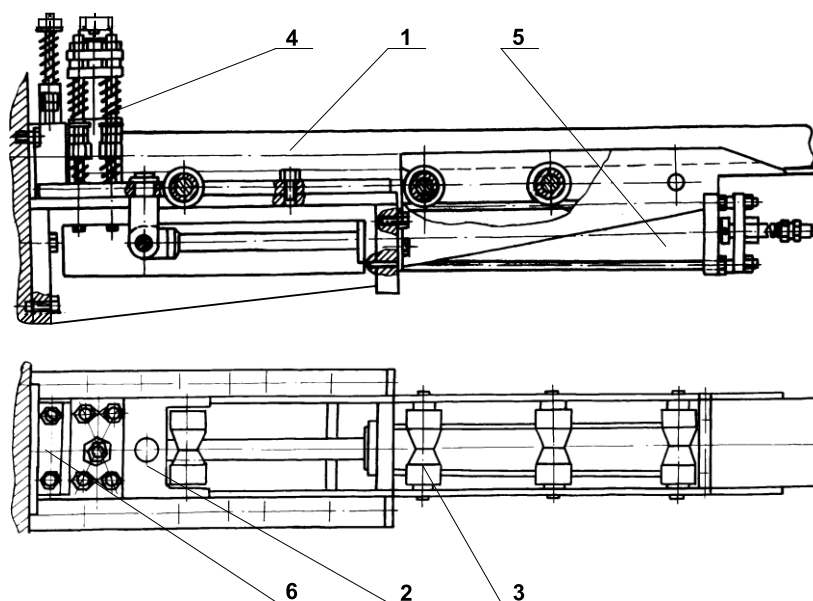


Рисунок 4.3 – Механизм порционной подачи сортового проката

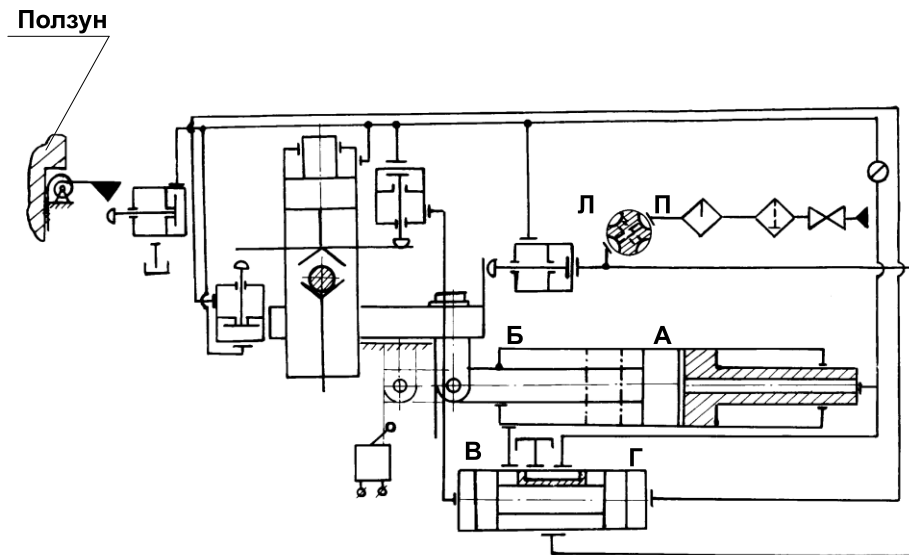


Рисунок 4.4– Принципиальная комбинированная схема порционной подачи проката

Таблица 4.1 – Циклограмма механизма порционной подачи проката

Номер позиции	1		2		3		4	5	6	7	8
	А	Б	В	Г	Л	П					
Цикл работы	А	Б	В	Г	Л	П	4	5	6	7	8
Исходное положение	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-
Зажим проката	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-
Ход штока пневмоцилиндра вперед	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+
Рабочий ход пресса	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+
Холостой ход пресса	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+
Разжим	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	+
Ход штока пневмоцилиндра назад	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-

Механизм порционной подачи проката (см. рис. 4.3) состоит из рамы 1, в направляющих которой установлена каретка 2 с возможностью возвратно-поступательного движения, и рольганга 3. Рама 1 вместе с рольгангом 3 крепится к штамповой оснастке. На каретке 2 установлен механизм зажима проката 4 с приводом от пневмоцилиндра. За счет того, что механизм зажима проката 4 выполнен подпружиненным, он является самоустанавливающимся и адаптируется относительно положения проката, подаваемого в зону реза. Каретка 2 механически связана со штоком силового пневмоцилиндра 5. Для обеспечения плавности работы пневмоцилиндра 5 в нем выполнены тормозные полости. Для обеспечения надежной фиксации проката в момент возврата каретки 2 в исходное положение, а также для погашения инерционных нагрузок, имеющих место при движении проката с ускорением, в конструкции механизма порционной подачи проката предусмотрен тормоз 6, который крепится непосредственно к штампу.

Сила зажима проката, а также начальное и конечное ускорения при перемещении прутка на заданный шаг выбираются с учетом массы прутка так, чтобы исключить проскальзывание в зажиме.

4.1.1 Силовой расчет базовой конструкции штампа

Для анализа предложенной конструкции штампа, выработки практических рекомендаций и расчета основных силовых параметров проведен силовой расчет штампа предложенной конструкции [129]. Расчетные схемы нагружения основных элементов штампа представлены на рис. 4.5.

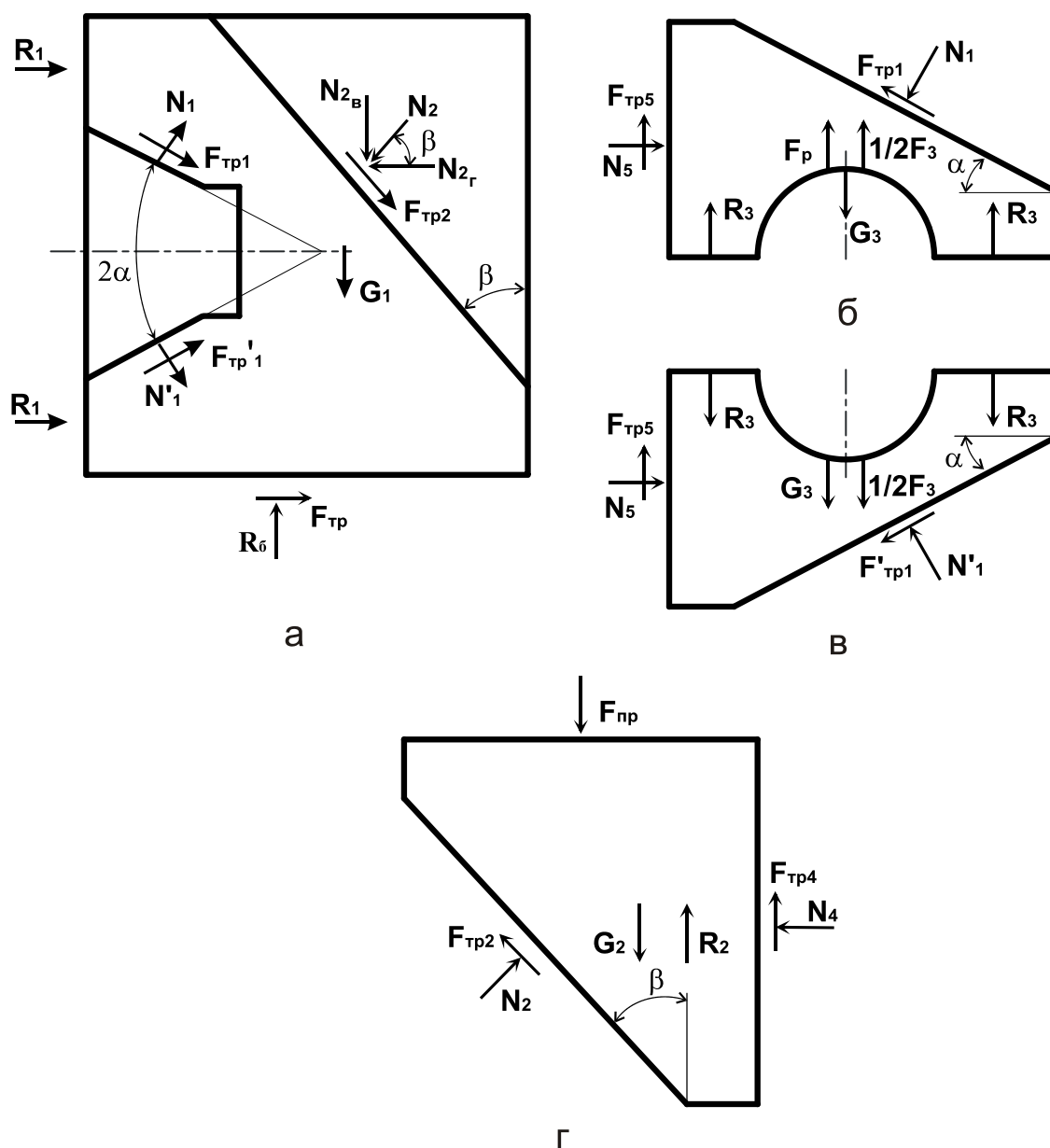


Рисунок 4.5 – Расчетные схемы нагружения основных элементов штампа [129]

1 Уравнения равновесия ведущей и ведомой ползушек (см. рис. 4.5, а):

$$\begin{cases} \Sigma F_{xi} = 0 : (F_{TP1} + F'_{TP1}) \cos \alpha + (N_1 + N'_1) \sin \alpha - N_2 \cos \beta + F_{TP2} \sin \beta + F_{TP} + R_1 = 0; \\ \Sigma F_{yi} = 0 : (N_1 - N'_1) \cos \alpha + (F'_{TP1} - F_{TP1}) \sin \alpha - N_2 \sin \beta - F_{TP2} \cos \beta + R_6 - G_1 = 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

где F_{TPi}, N_i – силы трения и нормального давления на контактных поверхностях деталей штампа;

R_i – сила пружин;

R_6 – сила со стороны буфера;

G_i – вес детали;

α, β – углы передачи силы на зажим и отрезку проката.

2 Уравнения равновесия ножевых вкладышей по элементам:

а) уравнение равновесия верхней полувтулки (см. рис. 4.5, б):

$$\Sigma F_{yi} = 0 : F_p + \frac{1}{2} F_3 - N_1 \cos \alpha + F_{TP1} \sin \alpha + F_{TP5} + R_3 - G_3 = 0, \quad (4.2)$$

где F_p – сила отрезки проката сдвигом;

F_3 – сила зажима проката;

б) уравнение равновесия нижней полувтулки (см. рис. 4.5, в):

$$\Sigma F_{yi} = 0 : -\frac{1}{2} F_3 + N'_1 \cos \alpha - F'_{TP1} \sin \alpha + F_{TP5} - R_3 - G_3 = 0. \quad (4.3)$$

3 Уравнение равновесия нажимного клина (см. рис. 4.5, г):

$$\Sigma F_{yi} = 0 : F_{TP2} \cos \beta + F_{TP4} + N_2 \sin \beta - F_{np} + R_2 - G_2 = 0; \quad (4.4)$$

где F_{np} – потребная сила прессы.

Совместное рассмотрение уравнений (4.1)–(4.4) дает систему уравнений расчета сил, действующих в штампе:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{-F_p - \frac{1}{2} F_3 - R_3 + G_3}{2\mu \sin \alpha - \cos \alpha}; \\ N'_1 = \frac{\frac{1}{2} F_3 + R_3 + G_3}{\cos \alpha}; \\ N_2 = \frac{-N_1 \sin \alpha (1 + \mu^2) - N'_1 (2\mu \cos \alpha + \sin \alpha (1 - \mu^2)) - R_2 - \mu G_1}{2\mu \sin \beta + \cos \beta (\mu^2 - 1)}; \\ R_6 = N_2 (\sin \beta + \mu \cos \beta) - (N_1 - N'_1) (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + G_1; \\ F_{np} = N_2 (2\mu \cos \beta + \sin \beta) + R_2 - G_2, \end{cases} \quad (4.5)$$

где μ – коэффициент трения скольжения.

Разработанная математическая модель базовой конструкции штампа с дифференцированным зажимом проката может быть использована для расчета потребной силы прессы, размеров буфера, а также выработки рекомендаций к выбору величин углов передачи силы на зажим и отрезку проката. Расчеты проводили для проката диаметром **28 мм**, длиной **75±0,5 мм** из стали 40X ($\sigma_b = 817 \text{ МПа}$). Силовые параметры штампа: **$R_1 = 300 \text{ Н}$** ; **$R_2 = 1200 \text{ Н}$** ; **$R_3 = 400 \text{ Н}$** ; **$G_1 = 300 \text{ Н}$** ; **$G_2 = 80 \text{ Н}$** ; **$G_3 = 20 \text{ Н}$** . Для обеспечения высокого качества отрезанных заготовок полагали, что **$F_3 = 1,5 \cdot F_p$** .

Результаты расчетов представлены в виде графиков зависимостей силы со стороны буфера и потребной силы прессы от углов α, β и коэффициента μ (рис. 4.6, 4.7, 4.8).

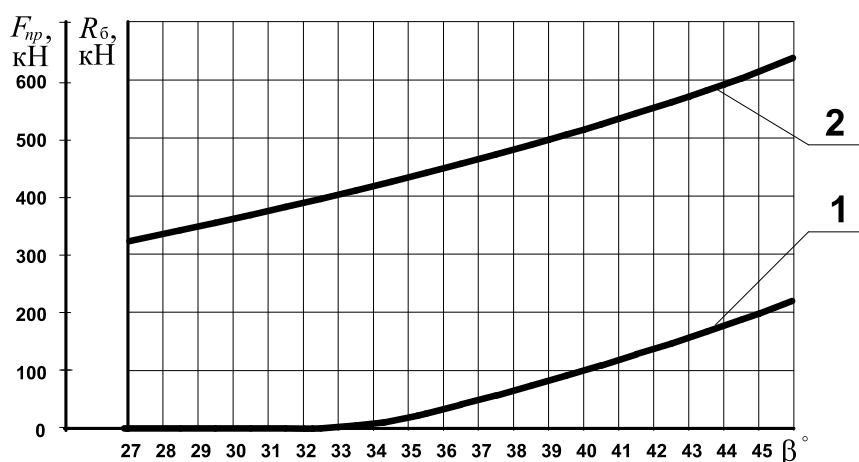


Рисунок 4.6 – Графики зависимостей силы буфера (1) и потребной силы прессы(2) от угла передачи силы на зажим и отрезку β при $\mu = 0,05, \alpha = 27^\circ$

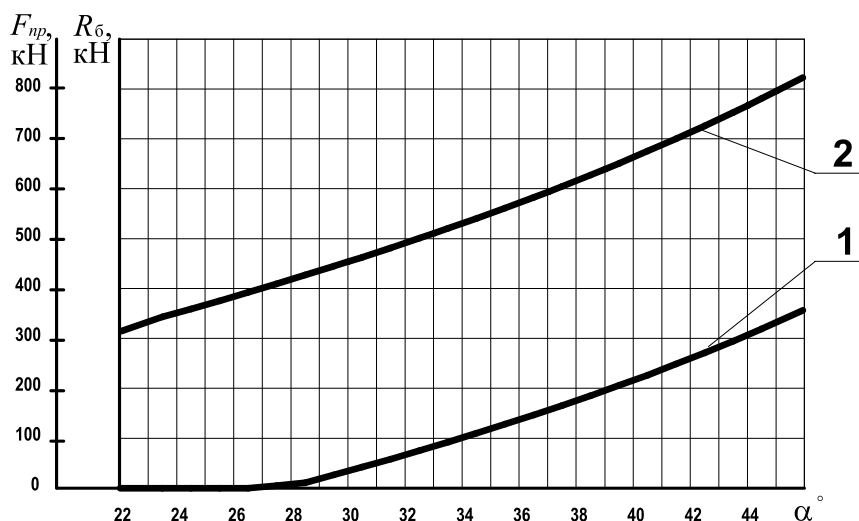


Рисунок 4.7 – Графики зависимостей силы буфера (1) и потребной силы прессы (2) от угла передачи силы на зажим и отрезку α при $\mu = 0,05, \beta = 33^\circ$

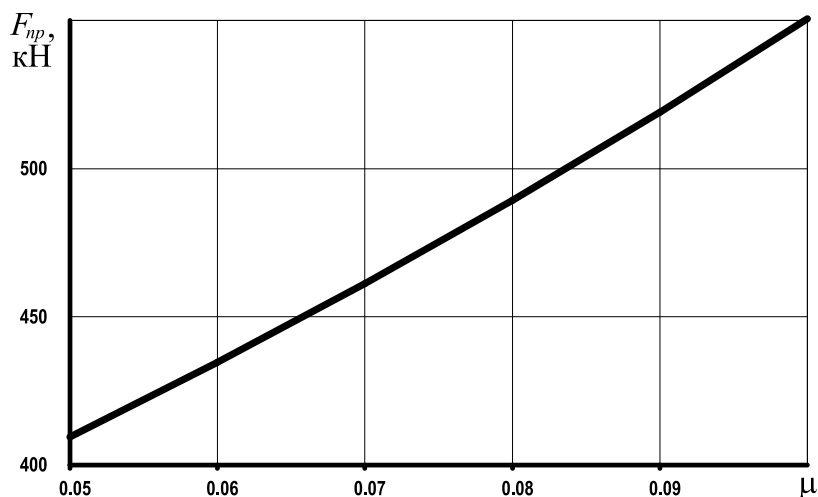


Рисунок 4.8 – График зависимости потребной силы прессы от коэффициента трения μ при $\alpha = 27^\circ$, $\beta = 33^\circ$

Анализ полученных зависимостей $R_6 = f(\alpha)$ и $R_6 = f(\beta)$ показывает, что при $\alpha = 27^\circ$, $\beta = 33^\circ$ сила со стороны буфера имеет минимальное значение при невысоких значениях потребной силы прессы. Уменьшение угла β нецелесообразно вследствие значительного увеличения вертикального хода прессы, что предопределяет большие габаритные размеры штампа. При этом минимальное значение силы R_6 обуславливает минимальные габаритные размеры буфера.

Для уменьшения потребной силы прессы $F_{пр}$ (см. рис. 4.8) необходимо снижать коэффициент трения за счет использования антифрикционных материалов на контактных поверхностях и обеспечения хороших условий смазки.

4.1.2 Внедрение результатов исследований в производство

Результаты работы внедрены на *Одесском ПО «Стройгидравлика»* в виде двух штампов с дифференцированным зажимом для отрезки проката диаметром до 30 мм (рис. 4.9).

Экономический эффект от внедрения составил 100 000 руб. в ценах 1992 года.

Приемочные испытания показали работоспособность конструкции.

Геометрическая точность отрезанных заготовок измерялась по схеме, приведенной на рис. 4.10. Результаты проведенных измерений относительных средних величин искажений геометрической формы заготовок, полученных отрезкой в штампе новой конструкции, представлены в табл. 4.2.

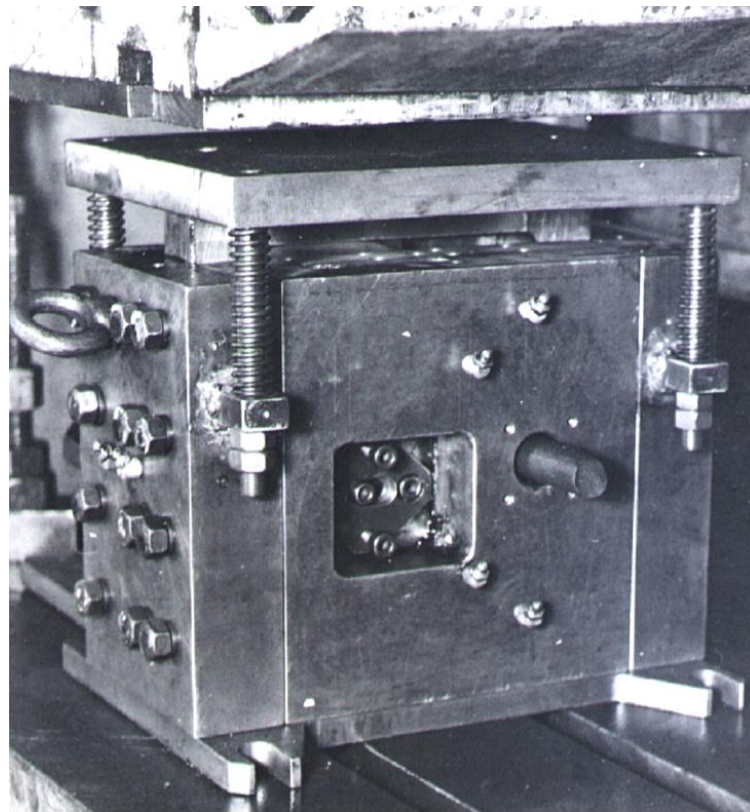
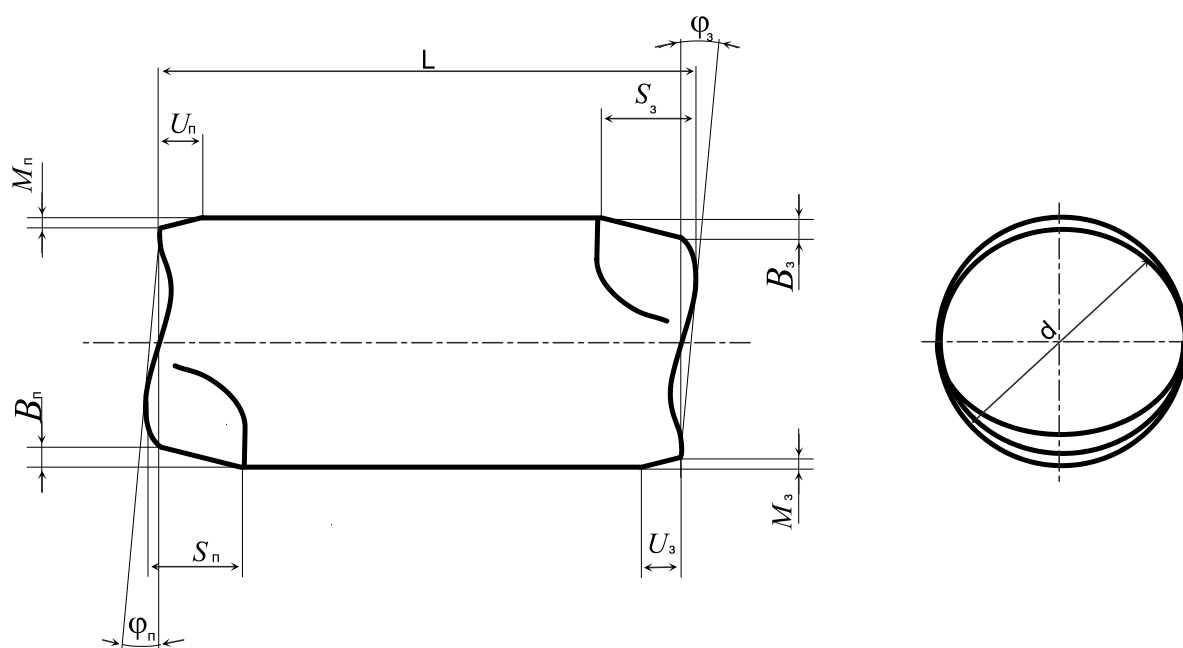


Рисунок 4.9 – Штамп с дифференцированным зажимом проката новой конструкции [124]



ϕ – угол скоса торца; M, U – поперечный и продольный размеры утяжки;
 B, S – поперечный и продольный размеры вмятины от ножа;
 n, z – индексы, обозначающие передний и задний торцы

Рисунок 4.10 – Основные искажения формы заготовок

Таблица 4.2– Параметры геометрической формы отрезанных заготовок

Материал заготовки	Длина заготовки	Величина искажений									
		φ^0		$u = U/d$		$s = S/d$		$m = M/d$		$b = B/d$	
		φ_{II}	φ_3	u_{II}	u_3	s_{II}	s_3	m_{II}	m_3	b_{II}	b_3
Сталь 40X	75 (2,5d)	0,50	0,55	0,35	0,35	0	0	0,03	0,04	0	0
	35 (1,2d)	0,60	0,70	0,30	0,43	0	0	0,03	0,04	0	0
	20 (0,7d)	1,00	1,50	0,32	0,35	0	0	0,03	0,04	0	0
Сталь 38X2МЮА	75 (2,5d)	0,40	0,45	0,40	0,43	0	0	0,03	0,03	0	0
Ст0	75 (2,5d)	0,50	0,55	0,40	0,50	0	0	0,07	0,08	0	0
	35 (1,2d)	0,70	0,70	0,50	0,50	0	0	0,09	0,10	0	0
	20 (0,7d)	1,30	1,70	0,35	0,35	0	0	0,12	0,12	0	0

На рис. 4.11 представлены фотографии образцов заготовок из стали 38X2МЮА, отрезанных в предложенном штампе. Анализ экспериментальных данных позволяет утверждать следующее:

- штампы новой конструкции работоспособны и надежны в эксплуатации;
- качество отрезанных заготовок соответствует показателям качества заготовок, отрезанных на современном аналогичном оборудовании.

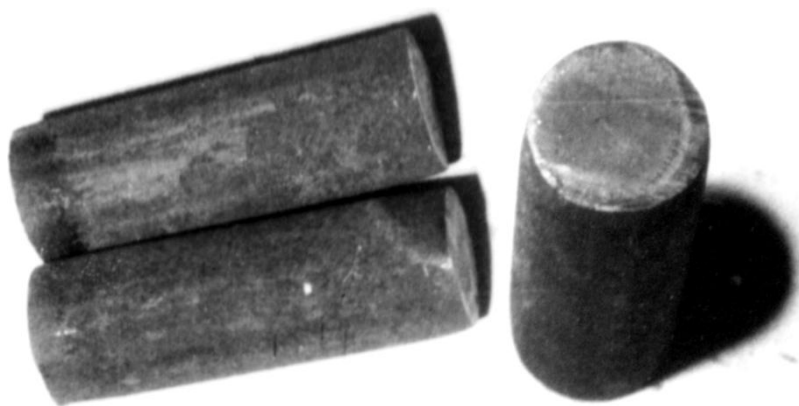


Рисунок 4.11 – Образцы из стали 38X2МЮА, отрезанные в штампе новой конструкции

4.1.3 Рекомендации по проектированию штампов с дифференцированным зажимом проката

На основе теоретического анализа, проведенных экспериментальных исследований и опыта эксплуатации штампов с дифференцированным зажимом проката, были проверены известные и сформулированы новые рекомендации к проектированию подобных штампов.

1 Необходимо обеспечить дифференцированный зажим проката по обе стороны от плоскости разделения. При $F_3 / F_p \geq 1$ достигается высокое качество получаемых заготовок [8].

2 Сила поперечного зажима проката должна регулироваться в зависимости от механических свойств разрезаемого материала и возрастать с уменьшением отношения $(\sigma_B - \sigma_T) / \sigma_B$ [8].

3 Разделение проката желательно производить в вертикальной плоскости для уменьшения потерь на контактное трение и снижения износа контактных поверхностей силовых деталей [8].

4 Корпус штампа рекомендуется выполнять коробчатой формы с замками для компенсации распорных сил и скручивающих моментов сил, возникающих при отрезке, что исключает нарушение соосности ножевых вкладышей, обеспечивает требуемый постоянный осевой и поперечный зазоры. Для повышения жесткости штампа силовые детали должны иметь замкнутую форму.

5 Для упрощения конструкции подающего устройства и повышения качества разделяемых заготовок желательно обеспечить неизменное положение оси проката в процессе зажима и отрезки.

6 В конструкции штампа необходимо предусматривать вертикальную и осевую регулировку положения зажимных и отрезных ножевых вкладышей для компенсации неточности изготовления деталей штампа, его ремонтпригодности, возможной овальности и кривизны проката.

7 Ножевые вкладыши удобно располагать между двумя элементами: клином и задвижкой. Применение клина обеспечивает простоту регулирования положения ножевых вкладышей после заточки. Угол клина следует выбирать большим, чем угол трения. Применение задвижки обеспечивает возможность смены ножевых вкладышей без разборки штампа.

8 Требуемую точность заготовок по длине желательно обеспечивать использованием упора, активно действующего на торец с определенной осевой силой, или применением порционной подачи проката.

9 Регулировку силы зажима проката удобно осуществлять за счет затяжки буфера с упругим элементом из полиуретана или резины.

4.1.4 Разработка системы автоматизированного проектирования штампов с дифференцированным зажимом проката

В работе [128] описана параметрическая модель штампов с дифференцированным зажимом проката.

В качестве объекта исследования выбрана базовая конструкция штампа с дифференцированным зажимом проката [124], который состоит из 67 деталей и стандартных изделий.

Учитывая трудоемкость создания сборочных чертежей и требование их параметризации, в качестве внутренней модели для представления штампа была выбрана объемная твердотельная модель.

Каждая деталь или стандартное изделие проектируется отдельно, но во взаимной связи с другими элементами для обеспечения целостности сборки. Проектирование каждого элемента штампа происходит по одинаковой схеме:

- определяются размеры, которые необходимы для построения данного элемента, но принадлежат другому элементу, который будет спроектирован позднее (присутствует при необходимости);

- рассчитываются размеры, используемые для построения проектируемого элемента;

- определяются данные, необходимые для дальнейшего расчета других элементов (выбираются из размеров, полученных на предыдущем этапе);

- рассчитываются непосредственно точки, по которым будет происходить построение.

При разработке параметрической модели большое внимание было уделено последовательности построения сборочных элементов. При этом одновременно решались следующие задачи:

- соответствие последовательности создания элементов штампа процессу реальной сборки для большей визуализации;

- упрощение расчетов параметров сборочных элементов для того, чтобы они определялись непосредственно перед прорисовкой данного элемента (например, плита с отверстием под винт рассчитывалась уже после создания этого винта).

Размеры деталей определялись с использованием математической модели штампа (см. п. 4.1.1), а также с учетом следующих критериев работоспособности.

1 Размеры опорных поверхностей нажимного клина, отрезной и зажимной ползушек, ножевых вкладышей выбирались из условия износостойкости контактных поверхностей направляющих.

2 При расчетах было введено ограничение по высоте деталей штампа, так как из-за больших габаритных размеров оборудование приходится выбирать не по потребной силе, а по открытой высоте штампового пространства. При этом поперечные размеры штампа не ограничивались.

3 Размеры буфера выбирались по диаграмме давления в зависимости от силы деформации для полиуретана СКУ-7Л и величины требуемой силы зажима проката [134].

4 Отрезная и зажимная ползушки проверялись на изгиб и дополнительно на жесткость.

5 Размеры шпонки выбирались из условия прочности на смятие.

Расчет модели штампа производится после задания пользователем исходных данных и проверки этих данных на корректность.

Основные исходные данные для расчета: диаметр отрезаемого проката d , углы α, β , под которыми происходит передача силы на зажим и отрезку проката. Некоторые размеры определены как константы вне зависимости от введенных данных, так как являются минимальными и достаточными и определяют необходимые кинематические и прочностные характеристики элемента. Например, поперечный зазор между заготовкой и ножевыми вкладышами – 5 мм, ход зажима ползущек – 10 мм, вертикальный ход отрезной ползущки равен диаметру отрезаемой заготовки.

Система «САПР – ШТАМП ДЗ» разработана в среде *AutoCAD* на языке *AutoLisp* с использованием средств описания диалога, предоставляемых языком *DCL*, также встроенным в *AutoCAD* [135]. Алгоритм построения модели штампа основан на алгоритме расчета параметрической модели, но с добавлением процедур сборки. Сборка осуществляется по элементам после их расчета и построения. Построение элементов происходит с привязкой к точке $\mathbf{p} = (x, y, z)$. Все элементы строятся отдельно от остальных. После построения сборочный элемент переносится непосредственно к месту сборки, которое определяется точкой $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)$. Для устранения влияния уже созданных элементов на вновь создаваемые эти точки значительно удалены от места сборки. Алгоритм разработки базовой конструкции штампа с дифференцированным зажимом проката с помощью системы «САПР – ШТАМП ДЗ» представлен на рис. 4.12.

Результаты работы системы «САПР – ШТАМП ДЗ» представлены в виде объемной модели штампа с ДЗ для отрезки проката диаметром $d = 28$ мм, длиной $L = 75 \pm 0.5$ мм и углах передачи силы: $\alpha = 27^\circ, \beta = 33^\circ$ (рис. 4.13).

Разработанная система «САПР – ШТАМП ДЗ» имеет практическую ценность и может быть использована для автоматизированной разработки конструкторской документации штампов с дифференцированным зажимом для отрезки сортового проката любого размера. Это позволяет не только сократить сроки проектирования, но и создавать штамповую оснастку с дифференцированным зажимом для узкого диапазона диаметров разделяемого проката.

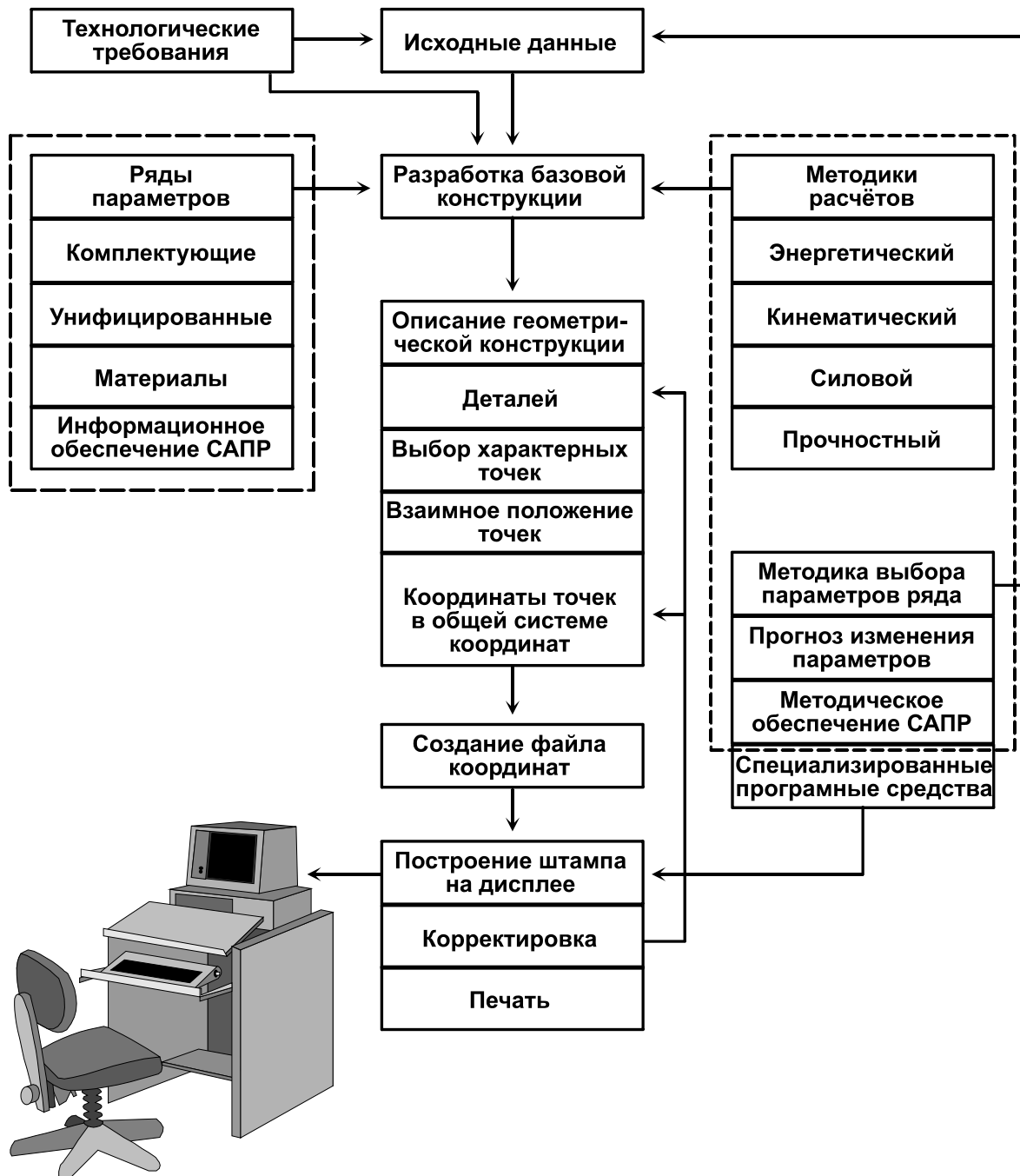


Рисунок 4.12 – Структура САПР разработки базовой конструкции штампа с дифференцированным зажимом проката

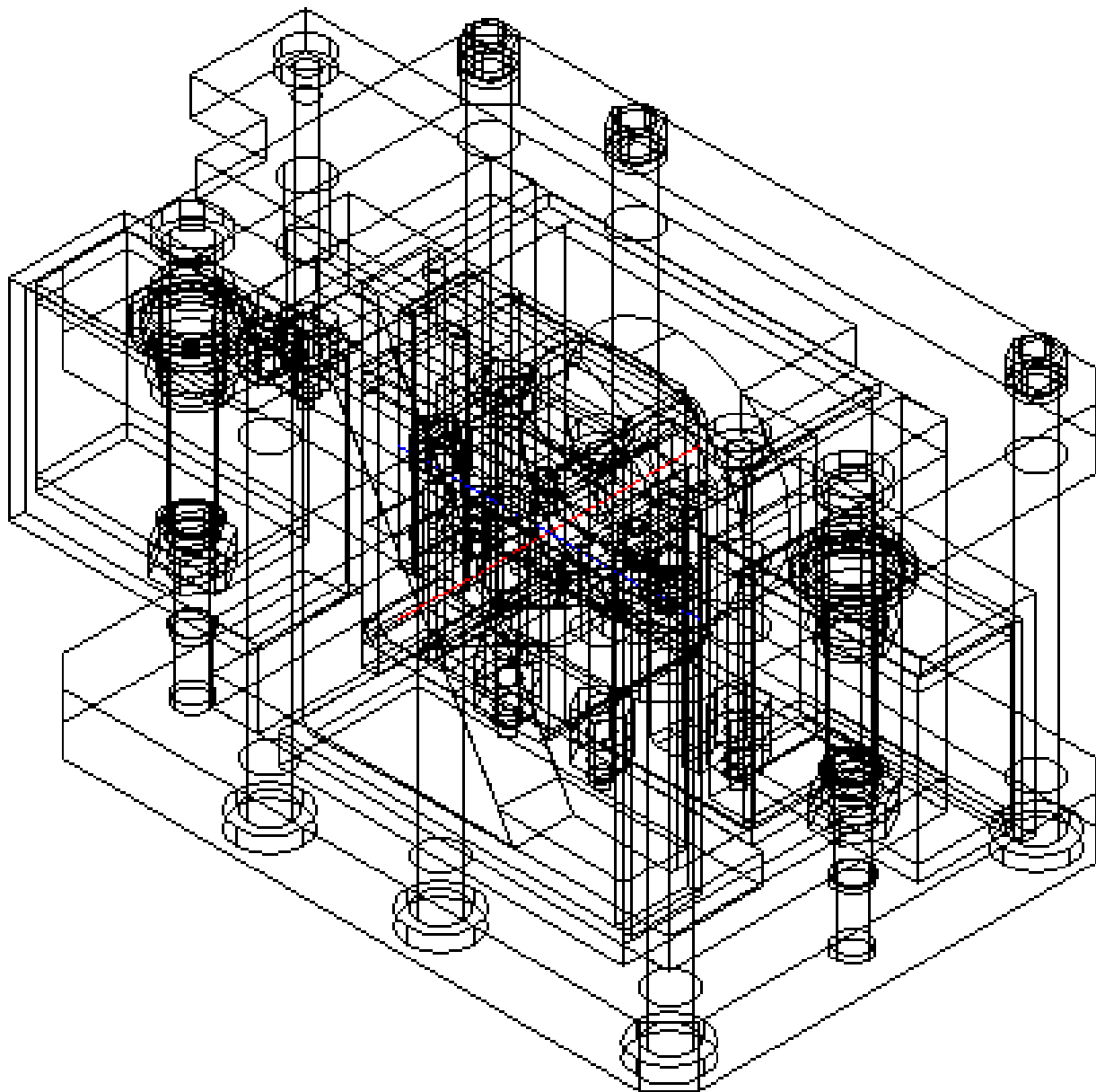


Рисунок 4.13 –Объемная твердотельная модель штампа с дифференцированным зажимом проката новой конструкции

4.2 Перспективы развития процесса разделения проката на мерные заготовки

На основании проведенных исследований разработанных графов анализа безотходных способов разделения сортового проката (см. рис. 1.1) и вариантов поперечного зажима проката (см. рис. 1.1, 1.1), предложены новые конструктивные решения в области совершенствования безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки[85; 86; 88; 121; 122; 136–145].

Предложенные разработки можно разделить на группы по следующим направлениям.

1 Управление схемой напряженного состояния в зоне нагружения:

- активный поперечный зажим проката [136];
- статико-динамическое нагружение проката в зоне реза [137–141];
- увеличение зоны растягивающих напряжений за счет уменьшения зоны сжимающих напряжений [121; 122].

2 Использование повышенных скоростей нагружения [142;143].

3 Разделение проката по схеме «сдвиг-ломка»:

- нанесение на прокат эффективного концентратора напряжений [85; 86];

- утилизация энергии упругой деформации станины и привода [88].

4 Разработка нового способа отрезки сортового проката во втулочных ножах [144].

5 Разработка комплексных заготовительно-разделительных процессов [145].

Рассмотрим предложения первой группы. В работе [136] предложен штамп для отрезки проката диаметром до 100 мм, в котором реализована схема неполностью закрытой отрезки сдвигом с активным поперечным зажимом. Штамп для отрезки проката (рис. 4.14) содержит станину 1, отрезные 2 и зажимные 3 ползушки, ножевые вкладыши 4,5, систему зажима проката, буфер 6. При этом станина штампа 1 состоит из двух продольных и поперечных стенок, которые образуют соединения в форме «ласточкиного хвоста». Этим самым обеспечивается высокая жесткость и прочность штампа за счет того, что компенсируются распорные силы и скручивающие моменты сил, возникающие при отрезке проката. Система зажима проката выполнена в виде клиньев 7, взаимодействующих с соответствующими клиновыми поверхностями зажимных ползушек 3, и обратных клиньев 8, установленных с возможностью возвратно-поступательного движения относительно отрезных ползушек 2. В свою очередь ползушки 2,3 взаимодействуют по клиновым поверхностям с подпружиненными ножевыми вкладышами 4,5.

При этом плоскости ползушек 2, 3 контактируют с коромыслом 9, которое имеет криволинейную поверхность и закреплено с помощью оси 10, установленной с зазором.

Штамп для отрезки проката работает следующим образом. Прокат от привода рольганга подается до упора. Под действием силы со стороны зажимных цилиндров, траверса 11 и клинья 7 движутся вниз и перемещают ползушки 2,3 навстречу друг другу. При этом ножевые вкладыши 4,5 смыкаются, осуществляя зажим проката.

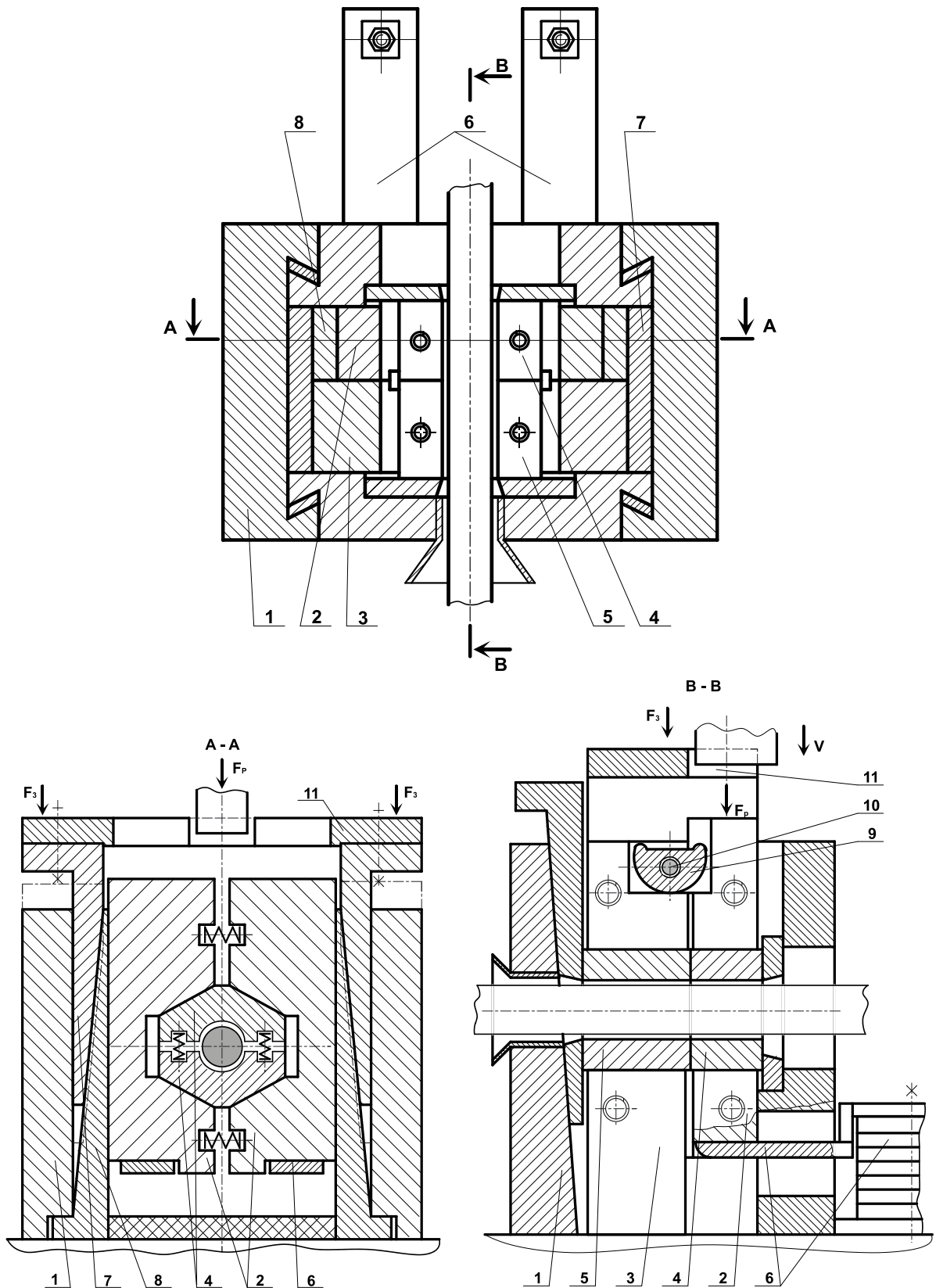


Рисунок 4.14 – Штамп для отрезки проката [136]

Под действием силы со стороны привода главного цилиндра траверса прессы воздействует на отрезные ползушки 2, которые, преодолевая сопротивление буфера 6, движутся вниз, осуществляя разделение проката.

После разделения проката высвободившаяся энергия разгрузки станины и привода расходуется на «выдергивание» клиньев 11 и расклинивание системы зажима проката. Осуществляется это следующим образом. В нижнем крайнем положении клиньев 7 коромысло 9 контактирует одним плечом с траверсой 11. При падении технологической нагрузки траверса пресса воздействует на второе плечо коромысла 9, которое перекачивается по ползушкам 2,3, поворачиваясь относительно оси 10, и выталкивает клинья 7, расклинивая систему «штамп – заготовка». Для уменьшения силы трения предусмотрена в штампе принудительная смазка под давлением. Смазка трущихся поверхностей штампа осуществляется непосредственно перед разделением проката. Предлагаемая конструкция штампа обеспечивает надежную работу и высокое качество разделяемых заготовок.

Использовать преимущества безотходных способов разделения проката можно только при условии принятия дополнительных мер по радикальному улучшению качества разделяемых заготовок. Использование статико-динамического нагружения позволяет расширить технологические возможности оборудования и повысить качество разделяемых заготовок. В работах [137–139] разработана конструкция механо-гидравлического пресса (рис. 4.15), позволяющая осуществить статико-динамическое нагружение проката.

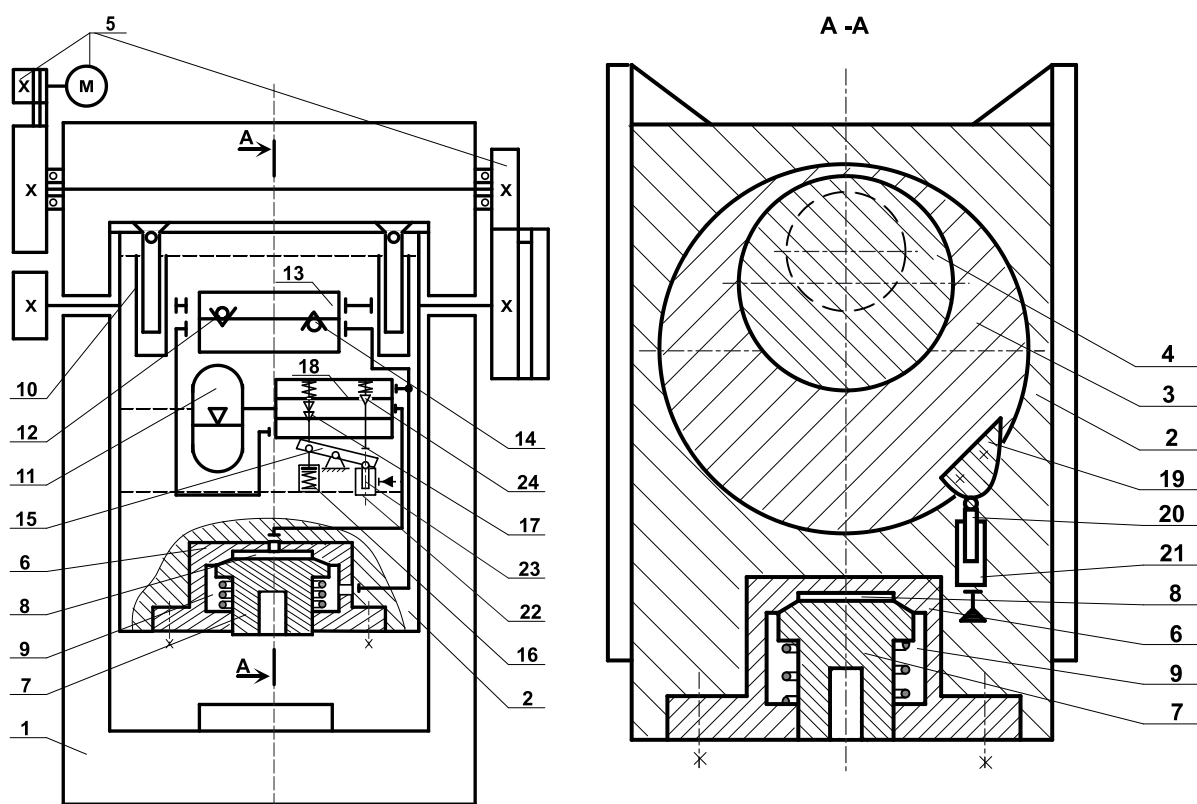


Рисунок 4.15 – Механо-гидравлический пресс [139]

Механо-гидравлический пресс содержит станину закрытого типа 1, рамный ползун 2, установленные в ползуне круговой шатун 3 и эксцентриковый вал 4, привод эксцентрикового вала 5 и гидропружинное устройство, расположенное в ползуне 2 и состоящее из гидропривода, гидроцилиндра 6 с подпружиненным ударным поршнем 7, разделяющим полость гидроцилиндра на поршневую полость низкого давления 8 и штоковую полость высокого давления 9.

Пресс работает следующим образом. На рабочем ходу пресса в плунжерных гидроцилиндрах 11 создается разрежение, и минеральное масло из пневмогидравлического аккумулятора 10 всасывается через обратный клапан 12 двухклапанного распределителя 13 в полости гидроцилиндров 11, связанных между собой. На холостом ходу пресса происходит сжатие масла в плунжерных гидроцилиндрах 11, которое через обратный клапан 14 поступает в штоковую полость 9 высокого давления гидроцилиндра 6. В исходном положении коромысло 15 с одной стороны подпружинено пружиной 16 так, что сливной клапан 17 двухклапанного распределителя 18 открыт и соединяет полость 8 с пневмогидравлическим аккумулятором низкого давления 10. В определенном положении кругового шатуна 2 расположенный на нем профилированный кулачок 19 воздействует на плунжер 20 управляющего гидроцилиндра 21, соединенного с другим управляющим гидроцилиндром 22 с помощью гидравлической связи. При этом плунжер 23 второго управляющего плунжерного гидроцилиндра 22 движется вверх и переводит коромысло 15 в новое положение. Коромысло 15 воздействует на шток впускного клапана 24 двухклапанного распределителя 18, соединяя полость низкого давления 8 с полостью высокого давления 9 гидроцилиндра 6. При этом ударный поршень 7 ускоренно движется вниз, совершая полезную работу. Цикл работы пресса возобновляется.

В кривошипно-круговом механизме величина коэффициента шатуна достигает значений 0,4...0,5, что обеспечивает уменьшение активной зоны деформации и увеличение жесткости пресса в 2,2...3,0 раза. Сочетание кривошипно-кругового механизма с рамным ползуном, охватывающим его и сверху, и снизу, обеспечивает устойчивость ползуна. Развитая площадь опоры шатуна в ползуне механизма снижает удельные силы в этой опоре и способствует гашению колебаний, что в сочетании с малой деформационной зоной приводит к высокой динамической устойчивости и отсутствию раскачивания на фундаменте.

Для создания высокого давления в полости гидроцилиндра гидропружинного устройства используется холостой ход пресса. При этом не требуется дополнительное устройство для создания давления, более равномерно нагружается электродвигатель привода пресса, повышается культура производства. Широкие технологические возможности механо-гидравлического пресса позволяют получать заготовки высокого качества.

В основу другого конструкторского решения была положена задача создания такого пресс-молота, в котором новое выполнение рабочего цилиндра позволило бы генерировать кольцевой радиальносходящийся удар в полости рабочего цилиндра [140].

Устройство (рис. 4.16,а) содержит станину 1, в которой выполнен рабочий цилиндр 2, кольцевой импульсный клапан 3, притертый к рабочему цилиндру 2. Концентрично клапану 3 расположен разовый гидравлический аккумулятор 4. Рабочий цилиндр 2 снабжен опорой 5 плунжера 6. Опора 5 и плунжер 6 образуют радиальный канал 7 и контактируют основаниями. Устройство снабжено узлом поджима заготовки в виде подвижного стола 8 и клина 9 с дополнительным приводом. На столе расположена технологическая оснастка.

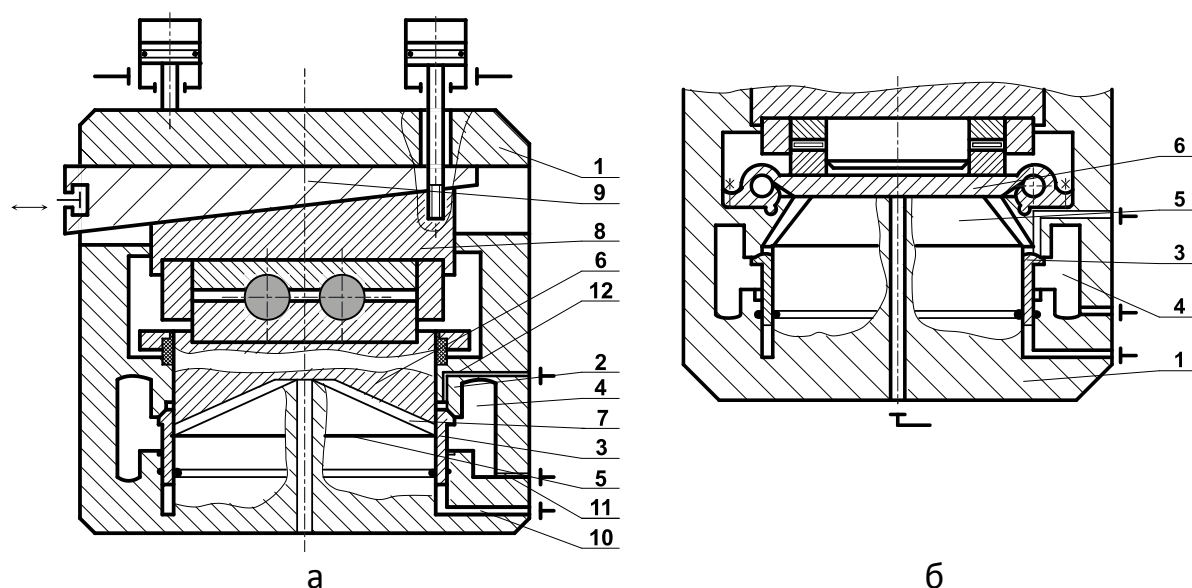


Рисунок 4.16 – Импульсный пресс-молот [140]

Пресс-молот работает следующим образом. Заготовка устанавливается в рабочую зону технологической оснастки. При этом клин 9 выдвинут из станины 1 устройства, стол 8 поднят, плунжер 6 в исходном нижнем положении опирается на опору 5 рабочего цилиндра 2. Давление в гидросистеме отсутствует. Затем стол 8 опускается клиновым устройством 9 и нагружает прокат статической силой. По каналу 10 в полость рабочего цилиндра 2 подается жидкость высокого давления и производится статическое деформирование проката. Импульсный клапан 3 при этом закрыт. После этого давление из рабочего цилиндра 2 сбрасывают по каналу 10 и повторно поджимают прокат к плунжеру 6 и опоре 5 с помощью клина 9. Затем производится зарядка аккумулятора 4 по каналу 11. Для осуществления генерирования кольцевого гидроудара в полости под импульсным клапаном по каналу 12 подают жидкость под давлением. Происходит

разгон импульсного клапана на пути перекрытия им плунжера, затем открывается кольцевой канал, в котором генерируется гидроудар. Волна давления распространяется от аккумулятора 4 к центру плунжера 6 и опоры 5.

При достижении волной центра плунжера 6 происходит импульсное увеличение давления, осуществляющее его смещение и деформирование проката. Интенсивность импульсного нагружения регулируется давлением в разовом гидравлическом аккумуляторе 4, который в процессе смещения плунжера разряжается до требуемого давления. Статическая нагрузка на прокат за счет этого сохраняется. Величина статической составляющей регулируется силой, создаваемой приводом клина. Соотношение между статической и импульсной силами регулируется путем создания в полости рабочего цилиндра требуемого избыточного давления (по каналу 10) перед срабатыванием импульсного клапана 3. Выполнение радиального канала сужающимся к центру по высоте позволяет сформировать гидравлический удар и обеспечивает равенство скоростей жидкости по радиусу цилиндра при смещении плунжера в процессе деформирования проката. Возможны различные варианты выполнения сужающегося к центру канала. Возможно выполнение стенок канала в виде параболических поверхностей частей сферы, поверхностей более высокого порядка в зависимости от характера перемещения плунжера (от технологической нагрузки). Выполнение плунжера в виде мембраны (см. рис. 4.16, б) позволяет снизить его инерционность и повысить компактность устройства, а также динамичность нагружения проката.

В работах [50; 51; 146] показано, что перспективным направлением развития оборудования для разделительных операций является применение гидроупругого или клиношарнирного приводов, которые разрабатываются в ДГМА.

Наряду с преимуществами, машинам с гидроупругим и клиношарнирным приводом присущи недостатки. Прежде всего, применение машин с гидроупругим приводом с большой энергией удара сдерживается из-за низкой стойкости штамповой оснастки. На машинах с клиношарнирным приводом нагружение осуществляется при ходе клина, равном или меньшем угла трения, что является причиной заклинивания машины. Для расклинивания необходимо приложить к клину силу, большую технологической. Совместное применение клиношарнирного и гидроупругого приводов позволяет устранить заклинивание и снизить необходимую мощность привода. Становится возможным использовать привод при малых углах клина ($3..5^{\circ}$), что повышает силу технологического нагружения, поскольку ударное деформирование заготовки с помощью гидроупругого цилиндра снимает нагрузку с клиношарнирного механизма. Сочетание клиношарнирного и гидроупругого приводов обеспечивает снижение энергии удара, повышение стойкости инструмента.

В работе [141] разработана конструкция устройства статико-динамического нагружения (рис. 4.17).

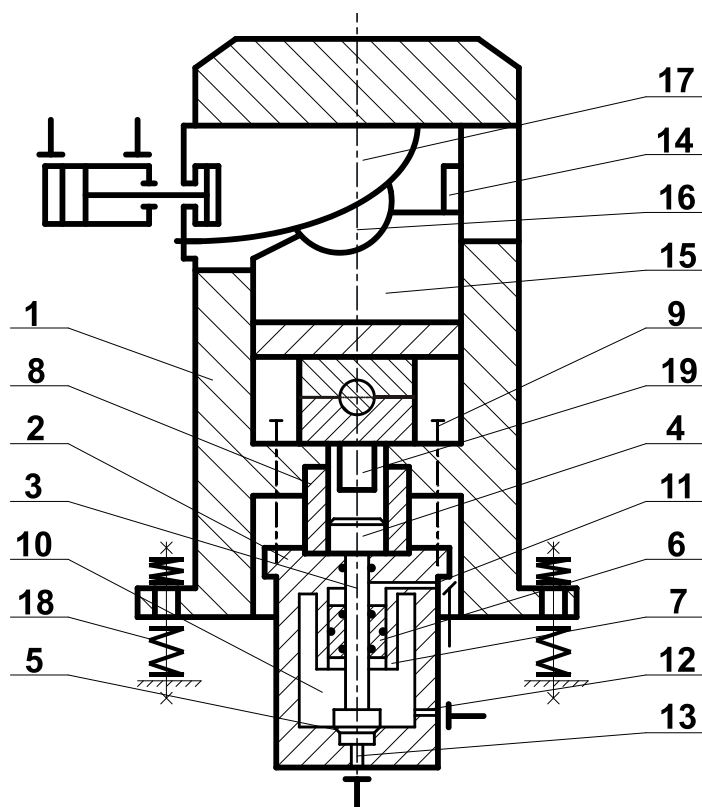


Рисунок 4.17 – Устройство статико-динамического нагружения [141]

Устройство состоит из станины 1 с расположенным на ней гидроупругим цилиндром 2, содержащим шток 3 с бойком 4. Торец штока уплотнен относительно дна цилиндра 2 кольцевым уплотнением 5 с диаметром, большим диаметра штока 3. Концентрично штоку 3 установлен кольцевой поршень 6 с направляющей 7. Цилиндр 2 центрируется относительно станины 1 проставкой 8 и крепится винтами 9 к ее столу. Внутренняя полость 10 цилиндра 2 является аккумулятором энергии. Управление цилиндром осуществляется по каналам 11,12,13.

В направляющих 14 станины 1 установлена подвижная траверса 15, контактирующая с шарниром 16, на который воздействует клин 17 с цилиндрической образующей, опирающийся плоской частью на станину 1.

На подвижной траверсе 15 и плите станины 1 установлена технологическая оснастка. Для снижения динамических нагрузок на фундамент устройство содержит упругие элементы 18.

Устройство работает следующим образом. В исходном положении подвижная траверса 15 вместе со штамповой оснасткой поднята, клин 17 выведен из станины 1. Шток 3 с бойком 4 гидроупругого цилиндра 2 находится в нижнем положении на кольцевом уплотнении 5. При рабочем ходе вводят клин 17 в станину 1. Клин 17 воздействует на шарнир 16, который,

поворачиваясь относительно своей оси на рабочий угол α , опускает по направляющим 14 подвижную траверсу 15. При этом происходит деформирование проката, например нанесение концентратора напряжений. Привод клина 17 может быть как статического, так и динамического действия. После набора давления в полости цилиндра 10 жидкость подают под кольцевое уплотнение 5 по каналу 13 под давлением. Происходит разгон штока 3 с бойком 4 и удар по промежуточной проставке 19. В процессе удара производится разделение проката. После удара и отскока бойка 4 за счет дополнительной деформации заготовки технологическая сила на подвижную траверсу 15 снижается или снимается полностью. Приводом клина 17 осуществляется его вывод из станины 1 и подъем подвижной траверсы 15. Цикл работы повторяется.

Предлагаемая конструкция устройства статико-динамического нагружения обладает широкими технологическими возможностями, имеет высокую жесткость и надежность.

Одним из направлений повышения качества разделяемых заготовок является создание способов нагружения, которым органически присуще однородное напряженное состояние. С этой целью разработаны различные конструкции устройств для разделения проката ломкой изгибом. Сущность предлагаемых решений заключается в том, что зона растягивающих напряжений увеличивается за счет зоны сжимающих напряжений [121; 122].

В работе [121] описана конструкция устройства для разделения проката (рис. 4.18), в которой реализована консольная схема ломки изгибом.

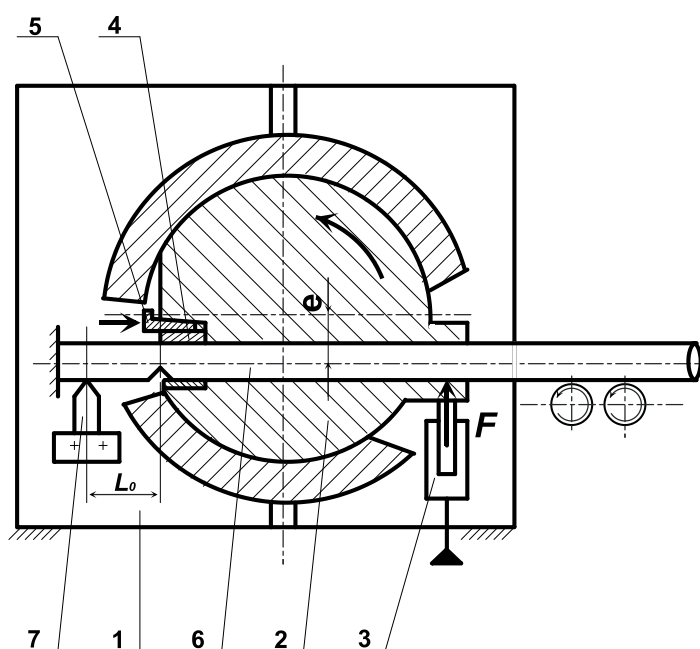


Рисунок 4.18 – Устройство для разделения проката способом консольной ломки изгибом [121]

Устройство содержит станину 1, опорное приспособление, выполненное в виде цилиндра 2 с хвостовиком, контактирующим с ломателем 3, зажимные втулки 4 и клин 5. При этом цилиндр 2 установлен в станине 1 с возможностью вращательного движения относительно своей оси, а ось цилиндра 2 смещена от оси проката 6 на величину ϵ . Прокат 6 закрепляется в цилиндре 2 и контактирует с опорой 7, установленной на станине 1.

Установка работает следующим образом. Прокат 6 с предварительно нанесенным концентратором напряжений подается до упора и фиксируется в зажимных втулках 4 с помощью клина 5, который движется вперед под действием силы привода и заклинивает систему «цилиндр – зажимные втулки». Под действием силы привода ломатель 3 воздействует на цилиндр 2, который вращается относительно своей оси в станине 1, и осуществляет изгиб и ломку проката в плоскости концентратора напряжений.

В другом варианте выполнения установки для холодной ломки изгибом проката и труб [122] реализована схема трехточечной холодной ломки изгибом (рис. 4.19).

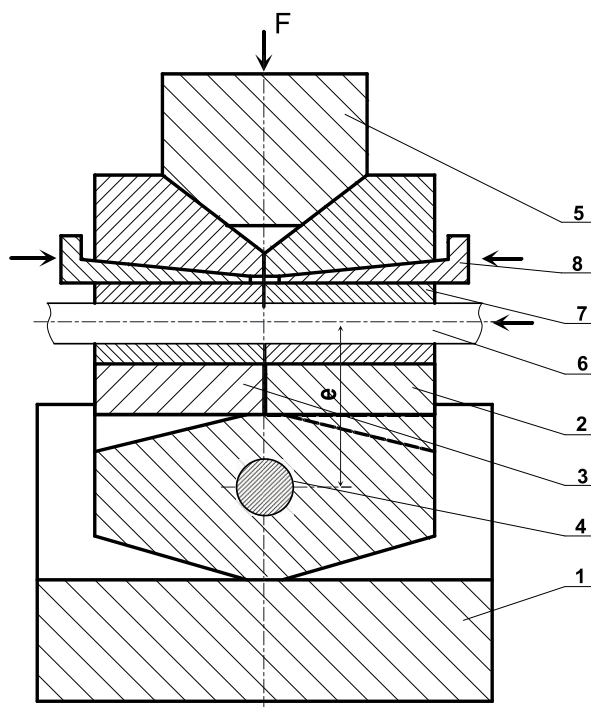


Рисунок 4.19 – Установка для холодной ломки изгибом сортового проката и труб [122]

Установка содержит станину 1, механизм зажима проката, ломатели, выполненные в виде двух втулок 2,3 и установленные с возможностью вращательного движения относительно неподвижной оси 4, которая смещена от оси проката на величину ϵ . При этом ломатели 2,3 контактируют с бойком 5 по клиновым поверхностям.

Установка работает следующим образом. Прокат 6 с нанесенным концентратором напряжений подается до упора (не показан) и зажимается в зажимных втулках 7 с помощью клина 8. После этого под действием силы привода боек 5 движется вниз, расклинивая втулки 2,3, которые поворачиваются относительно оси 4. При этом происходит изгиб и холодная ломка изгибом проката. Отломанная заготовка проталкивается и попадает в тару. Цикл работы установки возобновляется.

Вторая группа разработок связана с использованием повышенных скоростей нагружения. Например, в результате модернизации устройства прижима гидравлические ножницы статического действия работают в динамическом режиме, что повышает качество разделяемых заготовок (рис. 4.20) [142].

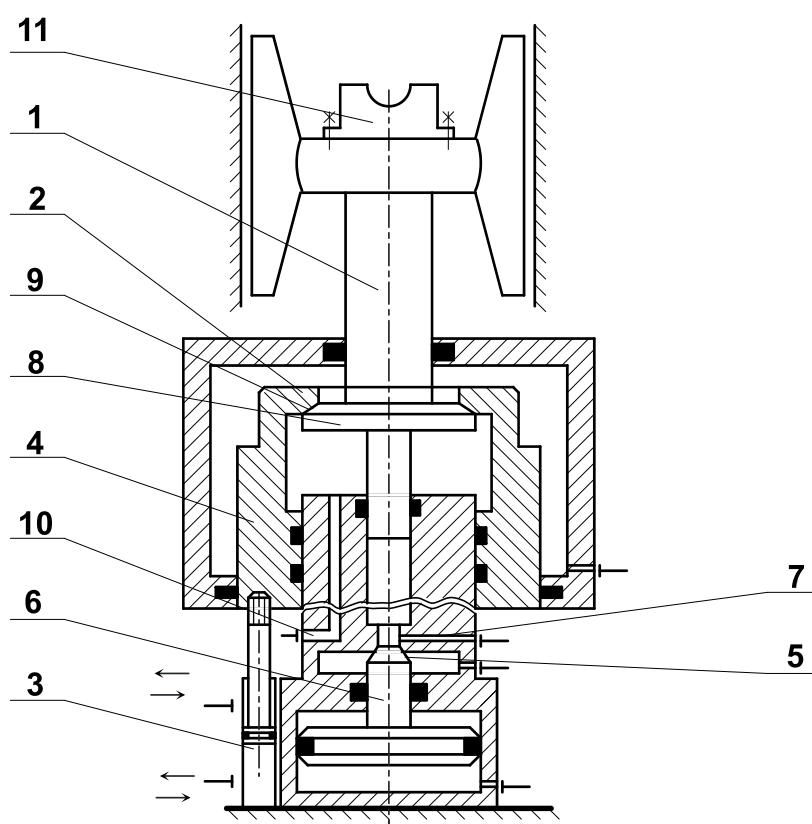


Рисунок 4.20 – Устройство прижима ножниц [142]

Устройство прижимаработает следующим образом. В исходном состоянии шток 1 находится в крайней нижней точке. Подвижный цилиндр 2 находится в промежуточном положении, которое определяется ходом штока цилиндра управления 3, и не доходит до крайнего верхнего положения на величину, большую глубины концентратора напряжений, получаемого встречным сдвигом отрезаемой части относительно проката. Подпорный клапан закрывает полость неподвижного цилиндра 4 за счет образования герметичного соединения между кольцевой фаской 5 штока

би седлом цилиндра 4. По каналу 7 в полость цилиндра 4 подают жидкость под давлением. При этом шток 1 движется вверх и, не доходя до верхнего положения, кольцевым выступом 8 с конической фаской 9 упирается в дно подвижного цилиндра 2. Происходит герметизация внутренней полости подвижного цилиндра 2. Затем по каналу 10 в полость цилиндра 2 подается жидкость под давлением. Происходит смещение штока 1 вместе с подвижным цилиндром 2, осуществляется прижим и надрез проката на величину ΔH , соответствующую глубине концентратора напряжений.

Дальнейшая работа прижимного устройства зависит от типа ножниц. Для гидравлических ножниц статического действия сила, создаваемая рабочим цилиндром, больше силы отрезки сдвигом и уравнивается силой прижима или силой прижима и прокатом. Управляющим цилиндром 3 производится смещение подвижного цилиндра 2 вверх, при этом седло смещается относительно кольцевого выступа 8 и нарушается герметичность внутренней полости подвижного цилиндра 2, жидкость из которого сбрасывается в неподвижный цилиндр 4. Сила прижима резко падает, и система становится динамически неуравновешенной, происходит резкое смещение плунжера рабочего цилиндра ножниц, отрезаемой заготовки и штока 1 вниз. При этом сила прижима обеспечивается также инерционностью штока 1 и прижимной части штампа 11. Таким образом, ножницы статического действия работают в динамическом режиме, что повышает качество разделяемых заготовок. Установка дополнительного подвижного цилиндра концентрично штоку позволяет разделить силу прижима и надрезки заготовки между цилиндром прижима и подвижным цилиндром. Предлагаемая конструкция цилиндра прижима позволяет осуществить кинематическую связь перемещения штока с силой подпора, создаваемой цилиндром прижима с встроенным клапаном, обеспечить возможность регулирования силы прижима, повышает надежность работы и расширяет технологические возможности оборудования.

Разработана конструкция молота [143], в которой конструктивное исполнение рабочих цилиндров и новая связь элементов позволяет уменьшить величину гидравлического удара в гидросистеме молота.

В рабочий цилиндр молота (рис. 4.21) подается рабочая жидкость высокого давления, которая воздействует на кольцевую площадь поршня штока 1 и прижимает последний к седлу 2. При этом шток 1 импульсного цилиндра вместе с нижней траверсой 3 и кольцевым поршнем 4 занимает крайнее нижнее положение. Одновременно жидкость высокого давления воздействует на надпоршневые площади цилиндров 5, штоки 6 которых вместе с верхней траверсой 7 занимают крайнее верхнее положение, соответствующее положению равновесия.

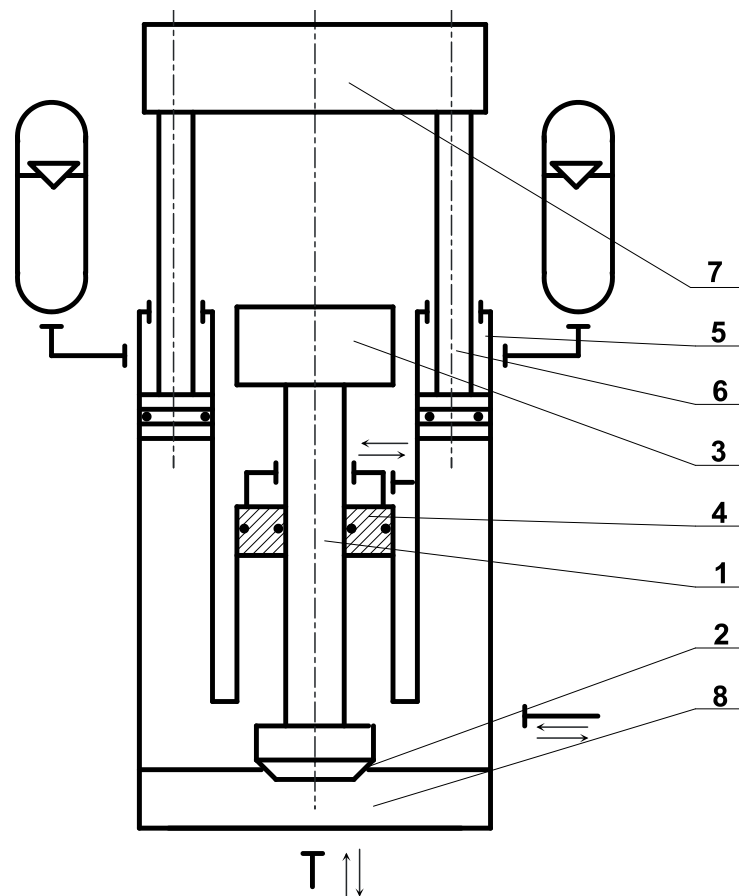


Рисунок 4.21 – Гидравлический молот [143]

Рабочий ход молота происходит следующим образом. При помощи распределительной арматуры соединяем магистраль высокого давления с управляющей полостью 8 импульсного цилиндра. Жидкость высокого давления воздействует на торец штока 1, в результате чего за счет разницы площадей шток 1 вместе с нижней траверсой 3 отрывается от седла 2 и ускоренно движется вверх. При этом давление рабочей жидкости в полости импульсного цилиндра падает. Поскольку полость импульсного цилиндра и подпоршневые полости цилиндров 5 выполнены сообщающимися, то одновременно при этом штоки 6 совместно с траверсой 7 выводятся из положения равновесия и под действием давления жидкости и собственного веса ускоренно движутся вниз, навстречу нижней траверсе 3.

Происходит удар и деформация заготовки. После совершения полезной работы систему возвращают в исходное положение.

Конструкция молота предполагает накопление потенциальной энергии непосредственно в рабочем импульсном цилиндре за счет сжатия рабочей жидкости и деформации металлических частей машины. Поскольку импульсный клапан срабатывает практически мгновенно (давление в импульсном цилиндре падает от максимального до атмосферного), максимальному значению технологической нагрузки будет соответствовать

меньшее значение давления в импульсном цилиндре, по сравнению с традиционными молотами. Соответственно меньше будет величина гидравлического удара в гидросистеме молота.

К третьей группе относятся разработки с использованием предложенного способа разделения «сдвиг – ломка» (см. подраздел 2.2). При этом одним из направлений повышения качества заготовок является совершенствование способов нанесения концентратора напряжений. Поставленная задача решается в ряде работ [85; 86; 103].

В устройстве для разделения проката холодной ломкой изгибом [85] (рис. 4.22) нанесение концентратора напряжений и холодная ломка проката изгибом осуществляются за один ход машины. Реализуемая схема ломки – трехточечная консоль. Усилием рольганга прокат 1 подается до упора 2. В дальнейшем происходит зажим проката с помощью механизма зажима.

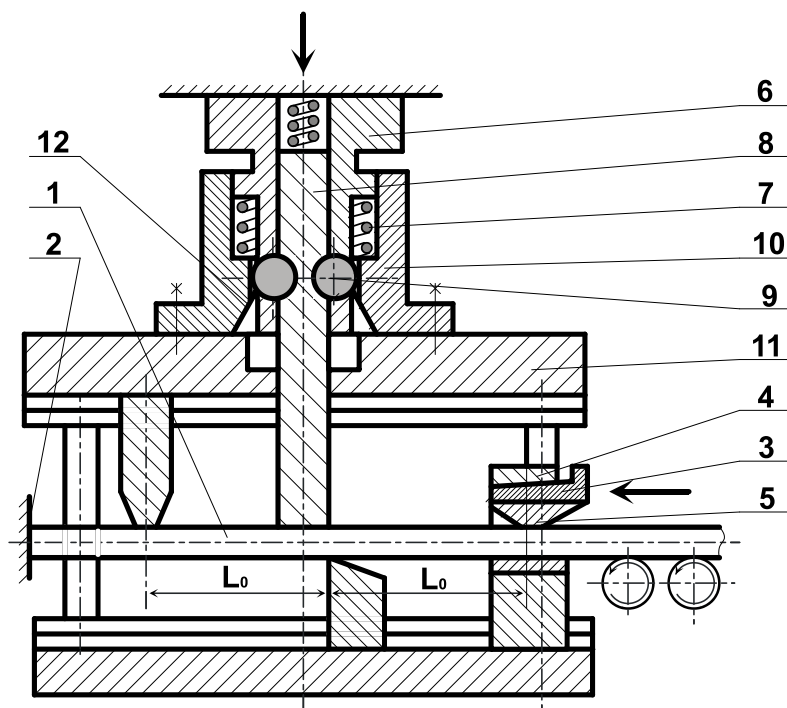


Рисунок 4.22 – Устройство для разделения проката [85]

Под действием силы привода клин 3 движется и расклинивает систему «опора 4 – зажимная втулка 5». Под действием ползуна (не показан), подпружиненная подвижная втулка 6, преодолевая сопротивление пружины 7, движется вниз совместно с подпружиненным ножом 8, который зафиксирован на ней с помощью роликов 9. При этом происходит сдвиг одной части проката относительно другой на величину ΔH , т. е. наносится эффективный концентратор напряжений, величина которого зависит от механических характеристик материала и размеров поперечного сече-

ния. Подвижная втулка 6 сопрягается с втулкой 10 по цилиндрической поверхности и крепится на подвижной плите 11. Под действием силы сдвига ролики 9 выжимаются из сопрягаемых с ними поверхностей, выполненных в ноже 8, и прижимаются к внутренней поверхности втулки 10. Поскольку внутренняя поверхность втулки 10 выполнена так, что цилиндрическая поверхность переходит в коническую 12, то ролики 9 прижимаются к конической поверхности 12 и при дальнейшем движении подвижной втулки 6 выходят из зацепления с поверхностями, выполненными в ноже 8. Таким образом, нож 8 и подвижная втулка 6 разъединяются, после чего происходит холодная ломка проката изгибом в плоскости концентратора напряжений. Цикл работы устройства возобновляется.

На рис. 4.23 представлен другой конструктивный вариант установки для разделения проката холодной ломкой изгибом [86]. Реализуемая схема – трехточечная консоль. Заготовка подается до упора 1. Под действием силы гидроцилиндра клин 2 движется горизонтально, расклинивая систему «опора 3 – зажимная втулка 4» и осуществляя зажим проката.

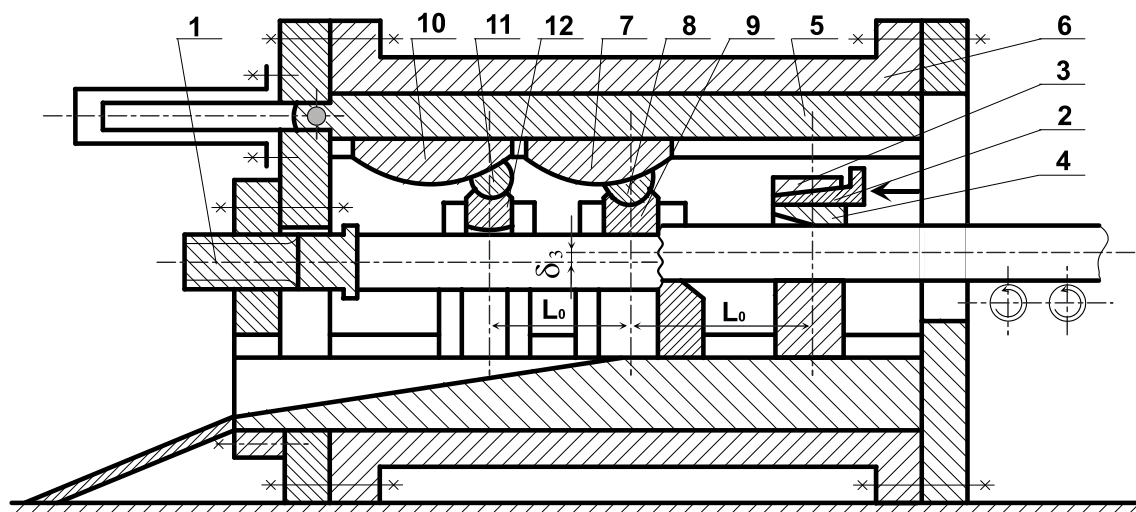


Рисунок 4.23 – Установка для раскря проката [86]

Под действием силы со стороны привода подвижная плита 5 перемещается по направляющим станины 6, выполненной в виде трубы. При этом клин 7 с выпуклой цилиндрической поверхностью воздействует на шарнир 8, который поворачивается относительно оси. Таким образом, горизонтальное движение клина 7 переходит в вертикальное движение ползуна 9. Ползун 9 совершает возвратно-поступательное движение, нанося на прокат концентратор напряжений. При дальнейшем движении клина 7 ползун 9 движется вверх и уходит из зоны реза. При этом клин 10 клиношарнирного механизма ломателя (который также установлен на подвижной плите 5) воздействует на шарнир 11, который, поворачиваясь от-

носителю оси ползуна 12, превращает горизонтальное движение клина 10 в вертикальное движение ползуна 12. Таким образом, когда ползун 9 механизма нанесения концентратора напряжений начинает движение вверх, ползун 12 ломателя воздействует на прокат, изгибая и ломая последний в плоскости концентратора напряжений. Цикл работы устройства возобновляется.

Выполнение станины 6 в виде трубы обеспечивает высокую прочность и жесткость конструкции устройства. Использование клиношарнирного механизма обеспечивает выигрыш в силе привода, необходимой для нанесения концентратора напряжений и холодной ломки проката изгибом.

В работе [144] предложен способ отрезки проката во втулочных ножах, в котором в процессе разделения полностью исключается поперечный зазор между ножом и прокатом, что обеспечивает получение заготовок высокого качества. Рассмотрим реализацию предлагаемого способа отрезки проката и вариант конструктивного исполнения втулочных ножей для его осуществления (рис. 4.24).

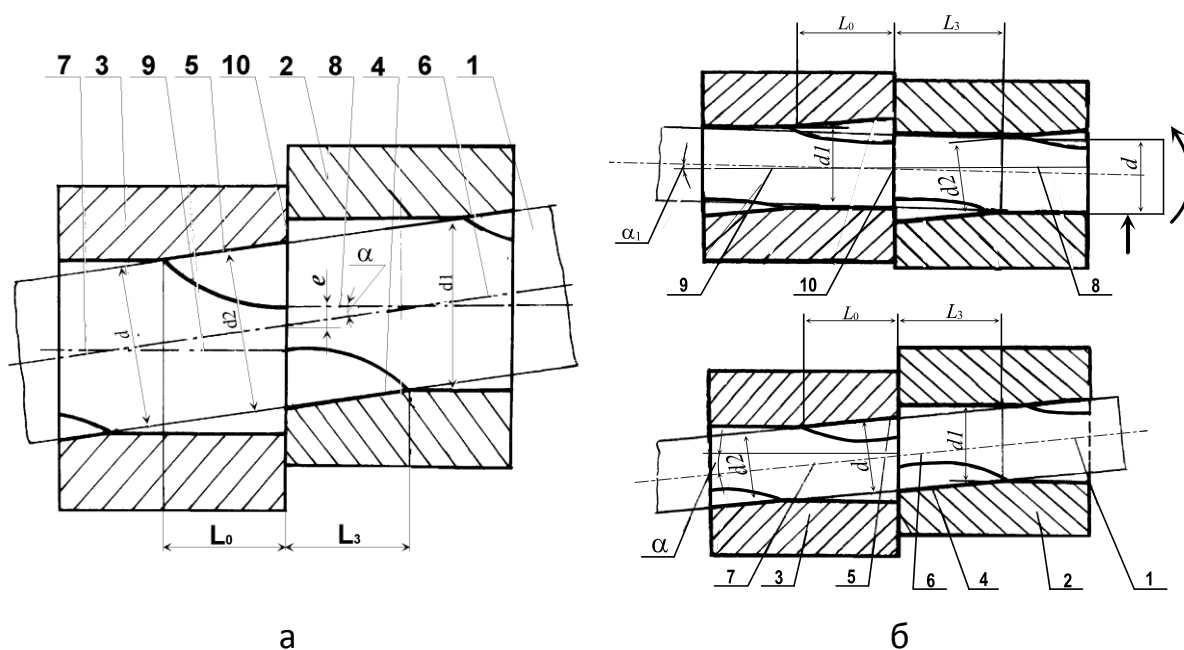


Рисунок 4.24 – Способ отрезки проката во втулочных ножах и устройство втулочного ножа для его реализации [144]

На первой стадии разделения длиномерного проката на мерные заготовки прокат 1 вводят в отверстие втулочных ножей (зажимного 2 и отрезного 3) до упора под произвольным углом α_1 (см. рис. 4.24, а). При этом диаметр основного отверстия d_1 , выполненного в ножах 2 и 3, больше диаметра проката d .

В дальнейшем под действием силы со стороны привода производят относительный поворот проката 1 или ножей 2,3 до момента контакта (см. рис. 4. 24, б) проката 1 и опорных поверхностей ножей 4,5.

Опорные поверхности 4,5 длиной L_0, L_3 образованы при пересечении основного и дополнительного отверстий, выполненных в ножах 2, 3. С целью увеличения площади контакта оси 6,7 дополнительного отверстия смещены относительно осей 8,9 основного отверстия в сторону, противоположную режущим кромкам 10 ножей 2,3, и наклонены под углом α .

Таким образом, конечный угол поворота проката 1 равен углу α и выбирается из рекомендаций в зависимости от механических свойств разрезаемого материала. Поскольку при этом диаметр дополнительного отверстия d_2 равен диаметру проката d , то исключается поперечный зазор между ножами 2,3 и прокатом 1.

В случае, если $L_0 = L_3$, имеем только активный поперечный зажим проката и отрезаемой заготовки. При условии, что $L_0 > L_3$, одновременно с операцией активного поперечного зажима осуществляется операция нанесения концентратора напряжений на прокат 1.

В дальнейшем под действием силы привода происходит параллельное перемещение отрезного ножа 3 относительно зажимного 2 и окончательное разделение проката 1. Отрезанная заготовка падает в тару. После чего производят обратный поворот проката 1 или ножей 2,3 на конечный угол α , соответствующий исходному положению. Цикл работы возобновляется.

Для уменьшения величины овальности торца (величины поперечной вмятины) при контакте опорных поверхностей с прокатом необходимо ограничить величину напряжений смятия. За счет смещения точки пересечения осей отверстий (основного и дополнительного) относительно оси основного отверстия ножа в сторону, противоположную режущей кромке, можно увеличить длину опорных поверхностей 4 и 5, что позволяет уменьшить напряжения смятия у плоскости среза и повысить геометрическую точность получаемых заготовок.

Предлагаемый способ отрезки проката имеет широкие технологические возможности, так как применим в значительном диапазоне скоростей нагружения. Наибольшая эффективность его применения имеет место при отрезке сдвигом с повышенными и высокими скоростями нагружения, т. е. в тех случаях, когда конструктивное усложнение штамповой оснастки резко снижает ее надежность. Предлагаемый способ реализуется на сравнительно простом по конструкции оборудовании и оснастке, что обуславливает его высокую надежность, по сравнению с более сложным оборудованием, обеспечивающим сравнимое качество разделяемых заготовок.

Полное исключение поперечного зазора возможно при использовании способа отрезки заготовок, в котором сочетается отрезка с редуцированием прутка в неподвижном ноже. Однако, несмотря на очевидные преимущества, способ отрезки с редуцированием прутка в отрезном штампе практически не применяется на производстве. Это объясняется тем, что имеются значительные трудности, связанные с подготовкой прутков (очистка, травление, фосфатирование) и отсутствует надежное оборудование, способное выдерживать высокие удельные силы редуцирования.

Одним из направлений совершенствования производства заготовок из сортового проката является использование комплексных заготовительно-разделительных процессов, в которых последовательно выполняются технологические операции отрезки сдвигом и пластического формоизменения [23].

На рис. 4.25 показан штамп для комплексного заготовительно-разделительного процесса «отрезка сдвигом – закрытая продольная осадка» [145].

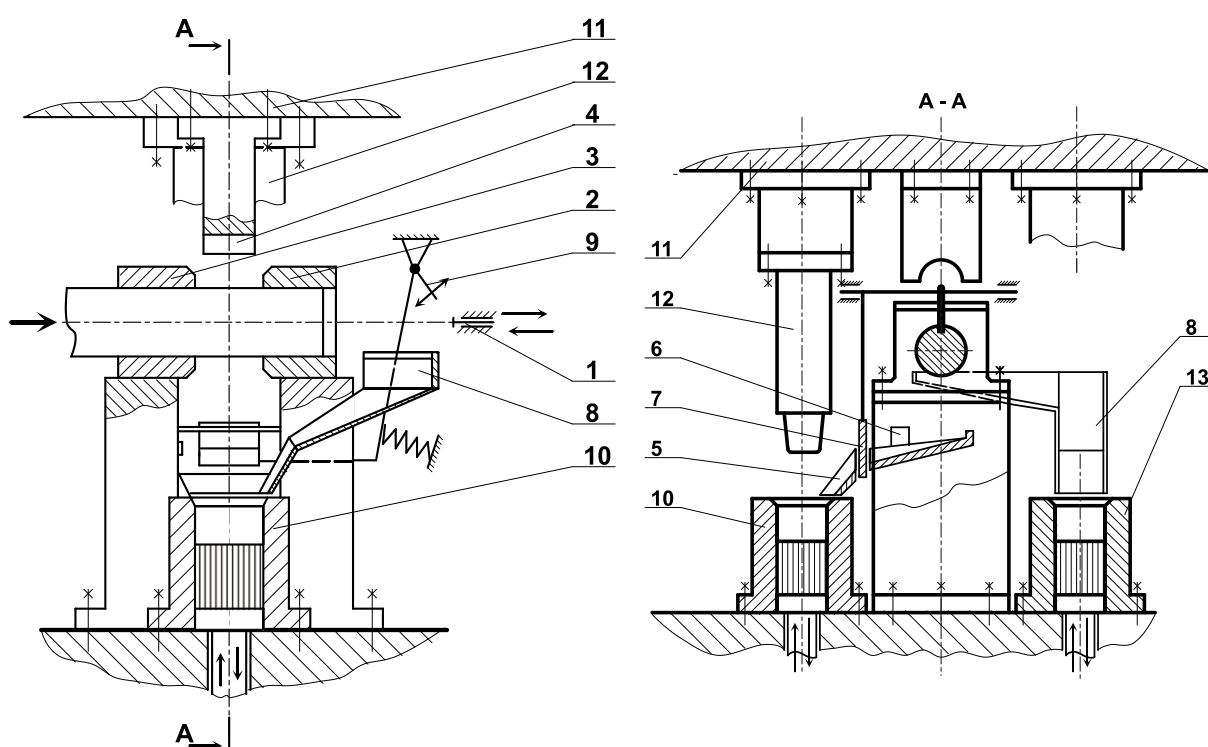


Рисунок 4.25 – Штамп для комплексного заготовительно-разделительного процесса [145]

Пруток подается в осевом направлении до соприкосновения с упором 1. При этом длина части прутка, расположенной между упором 1 и внутренним торцом зажимного ножа 2, равна длине части прутка между внутренними поверхностями зажимных ножей 2, 3. Осуществляется

первый цикл отрезки отрезным ножом 4 сразу двух заготовок. Первая отрезанная заготовка скатывается по склизу 5 и набегают на упор 6, который ее ориентирует, а затем упирается в шиббер 7. Вторая отрезанная заготовка остается в зажимном ноже 2. Упор 1 отходит в исходное положение. После этого прутки под действием силы подачи выталкивают вторую отрезанную заготовку, которая скатывается по склизу 8 и поворачивает рычаг 9. При этом шиббер 7 утапливается в прорезь на склизу 5, освобождая первую заготовку, которая, ориентируясь в пространстве, попадает в матрицу 10. Происходит следующий рабочий ход молота, включающий операции отрезки сдвигом и продольной осадки. Энергия молота выбирается равной сумме энергий отрезки сдвигом и осадки, поэтому после отрезки верхняя плита 11 вместе с пуансонами 12 продолжает движение и осуществляет деформирование металла в матрицах 10,13. Деформированные заготовки удаляются из зоны обработки.

Внедрение данного конструктивного решения обеспечивает высокие качество разделяемых заготовок, производительность процесса, надежность работы оборудования в целом.

5 РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СОРТОВОГО ПРОКАТА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 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 [147; 148]. Это инициировало разработку целой группы комбинированных методов обработки, внедрение которых позволило не только повысить эффективность существующих технологий, но и решить ряд новых технологических задач [149–152]. 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 [153; 154]. Второе направление предполагает привлечение различных процессов для интенсификации некоторого выбранного основного метода обработки [155; 156].

Промышленное применение комбинированных методов сдерживается практически отсутствием технологического оборудования. Можно выделить два основных 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 удается 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 [147], структура комбинированного метода обработки (КМО) представляется в виде:

$$\text{КМО} = \langle \Pi, C, O \rangle, \quad (5.1)$$

где Π – 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:

$$\text{КМО} \Leftrightarrow \langle \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n \rangle, n \in \mathbf{N}. \quad (5.2)$$

Если мощность множества Π известна и равна \mathbf{N} , то общее количество возможных комбинаций по $2, 3, \dots, \mathbf{N}$ парциальных процессов подсчитывается, как сумма соответствующих сочетаний элементов данного множества [157]. 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 [147], в табл. 5.1 представлены основные признаки и варианты реализации безотходных способов разделения сортового проката [160].

На основе анализа табл. 5.1 предложена конструкция устройства для реализации схемы отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах (рис. 5.1) [158; 159].

Таблица 5.1 – Признаки и варианты реализации безотходных способов разделения сортового проката [160]

Признак	Варианты реализации	Комбинации
Базовый набор единичных процессов	нанесение КН	нанесение концентратора напряжений; разделение сортового проката на мерные заготовки; стабилизация траектории трещины
	разделение	
	стабилизация траектории трещины	
Воздействия	механические	механические – термические – электромагнитные; механические – термические – химические; механические – электромагнитные – химические; термические – электромагнитные – химические
	термические	
	электромагнитные	
	химические	
Способ подвода	параллельный	параллельный; последовательный
	последовательный	

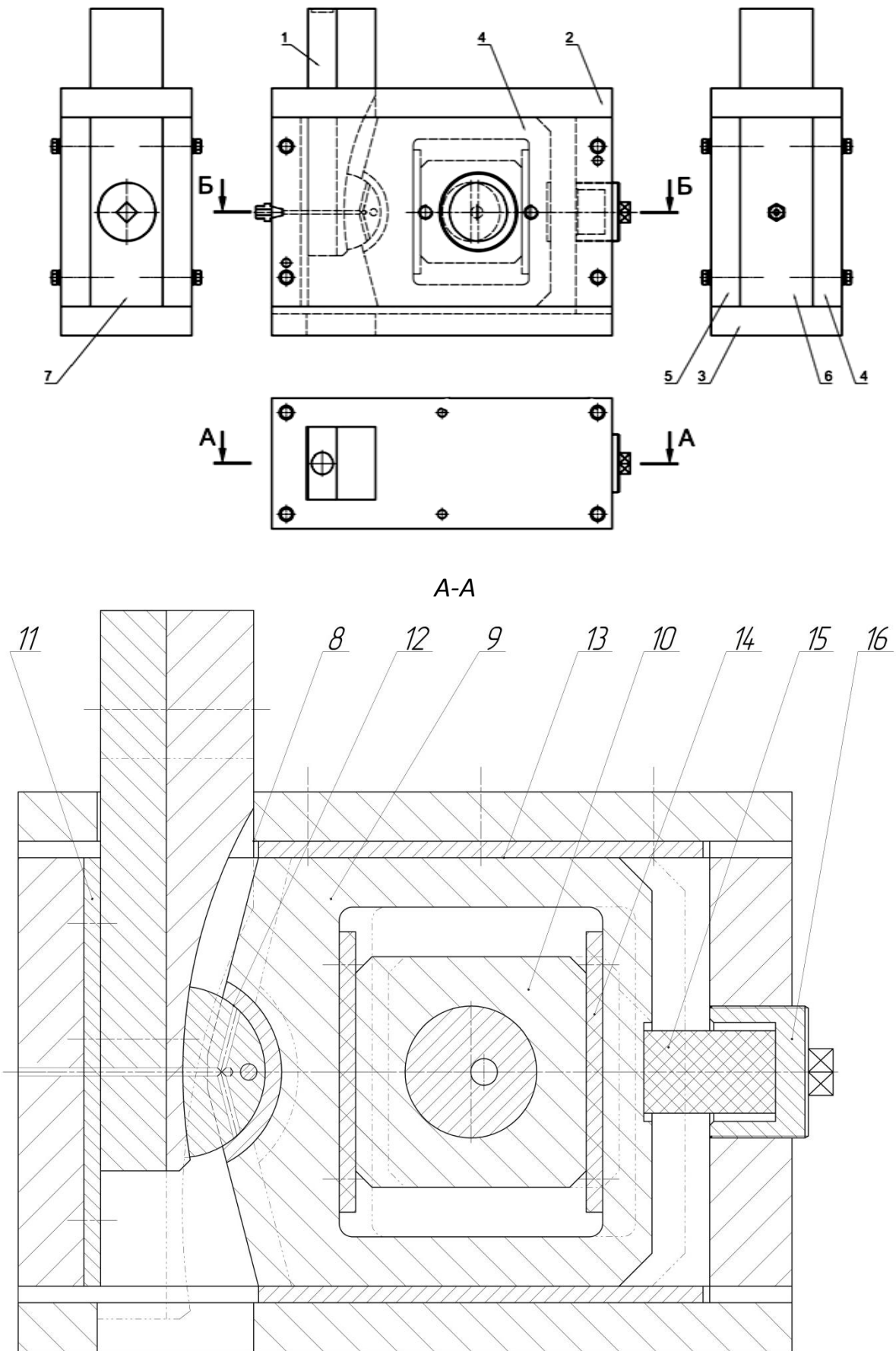
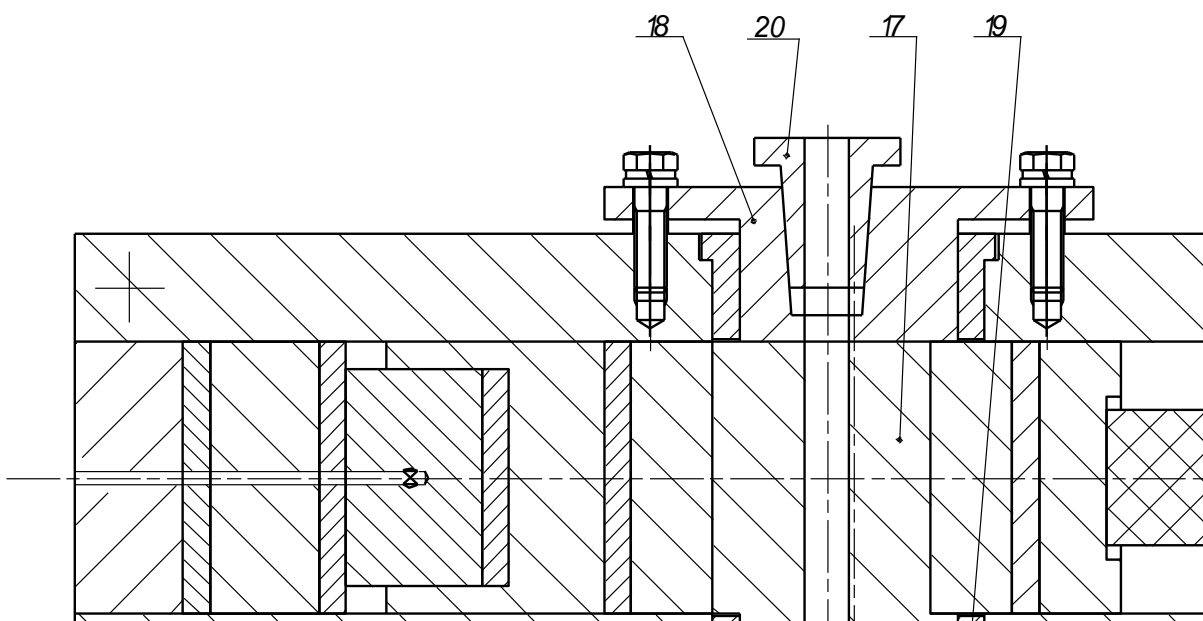


Рисунок 5.1 – Устройство для разделения сортового проката и труб отрезкой сдвигом [158; 159]

Исполнение 1

Б-Б



Исполнение 2

Б-Б

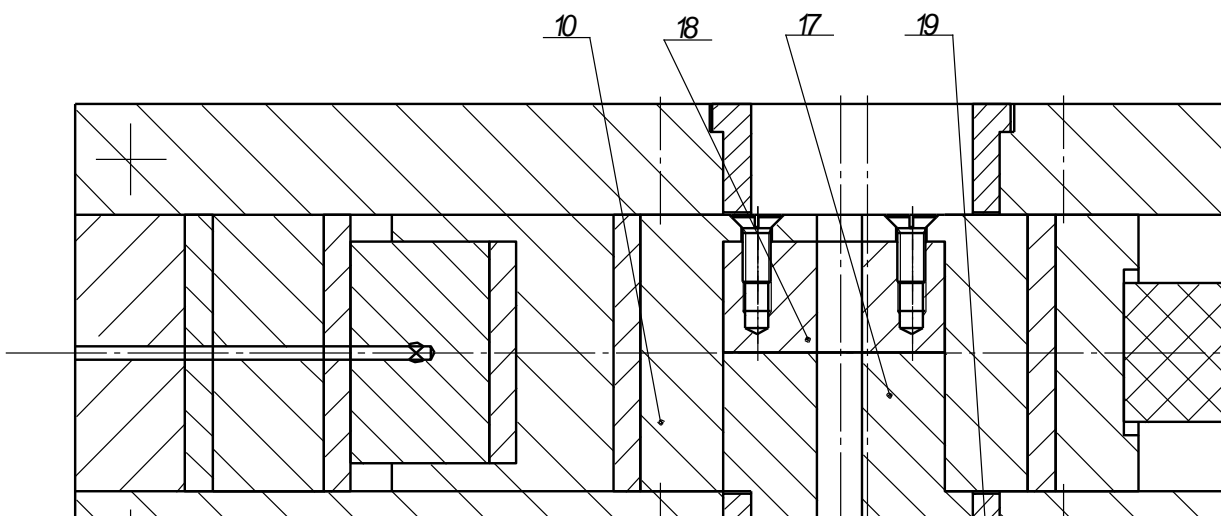


Рисунок 5.1, лист 2 [158; 159]

Устройство содержит корпус, состоящий из плит: верхней 2, нижней 3, передней 4, задней 5, поперечной левой 6 и поперечной правой 7, скрепленных 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 – 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 подшипника скольжения 19 плиты передней 4 установлен подвижный втулочный нож 17, выполненный цельным в виде двух эксцентричных цилиндров с возможностью вращательного движения относительно неподвижного втулочного ножа 18. В ножах 17,18 выполнено отверстие для размещения проката, ось которого смещена относительно оси подшипника скольжения 19 на величину эксцентриситета e . Ползун 9 подпружинен с помощью буфера 15, выполненного из полиуретана. Сила предварительного сжатия буфера регулируется за счет перемещения гайки 16. Клин 1, шарнир 8, ползун 9, камень 10 установлены в направляющих 11, 12, 13, 14.

Предложены два варианта крепления неподвижного втулочного ножа 18. В *исполнении 1* неподвижный нож 18 крепится с помощью болтов к плите задней 5. Зажим проката осуществляется с помощью зажимных полувтулок 20, выполненных в виде усеченного конуса, контактирующего по конической поверхности с ответной поверхностью отверстия в ноже неподвижном 18.

В *исполнении 2* неподвижный нож 18 крепится с помощью винтов непосредственно к камню 10, выполненному с глухим отверстием.

Установка работает следующим образом. В исходном положении прокат (труба) располагается в отверстиях втулочных ножей 17, 18 (не показано). При этом подвижный нож 17 смещен на угол 15° от верхнего крайнего положения против часовой стрелки. Под действием силы прессы клин 1 (см. рис. 5.1) 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 камень 10 перемещается вниз, а подвижный нож 17 вращается против часовой стрелки, поворачиваясь на угол 165° (до крайнего нижнего положения) и осуществляет 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 клиношарнирный механизм в сочетании с кривошипно-кулисным механизмом, состоящим из рамного ползуна, камня и подвижного втулочного ножа. 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 [161].

Рассмотрим аналитический кинематический расчет предложенной конструкции устройства для отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах [162].

На рис. 5.2 изображены структурная (а) и конструктивная (б) схемы рычажного механизма, эквивалентные рассматриваемому механизму.

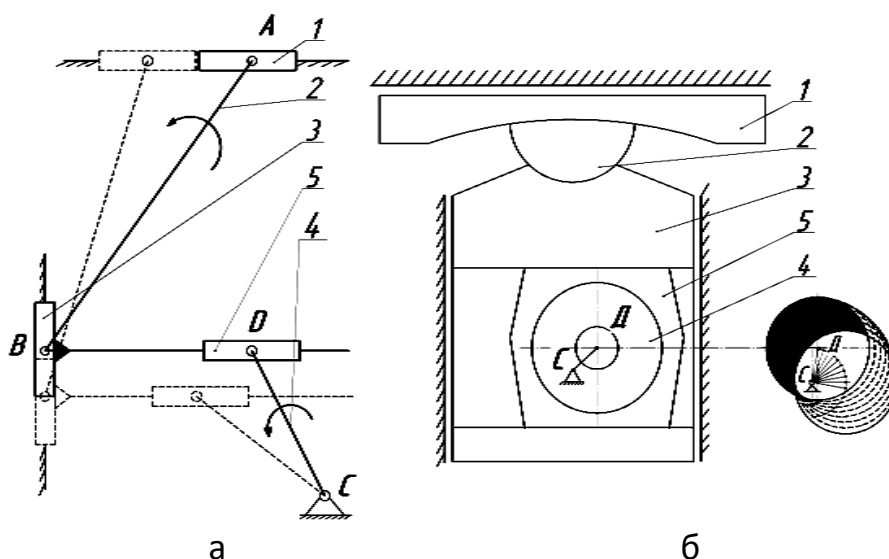


Рисунок 5.2 – Структурная схема рычажного механизма

В качестве начального звена принимаем ползун 1, который совместно стойкой образует исходный механизм I-го класса. В качестве обобщённой принимаем линейную координату, определяющую положение ползуна на направляющей.

Из рис. 5.2 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 функций элементов механизма: звеньев и характерных точек нулевого, первого и второго порядков.

Если обобщённую координату обозначить через X_1 , то передаточные функции точки А 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

$$\begin{cases} (X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 = L_{AB}^2; \\ Y_B = Y_N, \end{cases} \quad (5.3)$$

определяем координаты точки $B - X_B, Y_B$.

Передаточные функции первого порядка можно определить, дифференцируя по обобщенной координате выражения (5.3), и решая полученную систему уравнений, получим:

$$X'_B = \frac{X'_A(X_B - X_A) + Y'_A(Y_B - Y_A)}{(X_B - X_A)}; \quad (5.4)$$

$$Y'_B = \frac{Y'_A(Y_B - Y_A) + X'_A(X_B - X_A) - X'_B(X_B - X_A)}{Y_B - Y_A}. \quad (5.5)$$

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

или
$$\varphi'_{AB} = \frac{X'_A - X'_B}{L_{AB} \sin \varphi_{AB}}. \quad (5.6)$$

Для определения передаточных функций второго порядка дифференцируем выражения (5.4), (5.5), (5.6):

$$X''_B = \frac{X''_A(X_B - X_A) + X'_A(X'_B - X'_A) + Y''_A(Y_B - Y_A) + Y'_A(Y'_B - Y'_A) - X'_B(X'_B - X'_A)}{(X_B - X_A)}; \quad (5.7)$$

$$Y''_B = \frac{Y''_A(Y_B - Y_A) - (Y'_B - Y'_A)^2 - (X'_B - X'_A)^2 - (X_B - X_A)(X''_B - X''_A)}{Y_B - Y_A}; \quad (5.8)$$

$$\varphi''_{AB} = \frac{(Y''_B - Y''_A)L_{AB} \cos \varphi_{AB} - (Y'_B - Y'_A)L_{AB} \sin \varphi_{AB} \varphi'_{AB}}{(L_{AB} \cos \varphi_{AB})^2}. \quad (5.9)$$

Также могут быть определены передаточные функции звеньев 4 и 5.

Анализ проведенных расчетов позволил сделать следующие выводы:

1 Предложенная конструкция устройства для реализации схемы отрезки эксцентричным закручиванием во втулочных ножах [162] работоспособна.

2 Важным параметром, влияющим на траекторию движения ножей с целью получения заготовок высокого качества при минимальной энергоемкости процесса отрезки, является угол наклона клина.

На рис. 5.3 представлены графики зависимости угла поворота выходного звена (втулочного ножа) φ_{CD} от перемещения клина 1 (см. рис. 5.2) при различных углах его наклона: $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$, из которых видно, что незначительное изменение угла наклона клина приводит к значительному изменению угла поворота звена 5.

На рис. 5.4 – зависимость аналога угловой скорости выходного звена от обобщенной координаты при различных углах наклона клина 1.

На рис. 5.5 изображены траектории движения втулочных ножей при разных углах наклона клина. Более предпочтительным с точки зрения качества получаемых заготовок является вариант с углом наклона 5° .

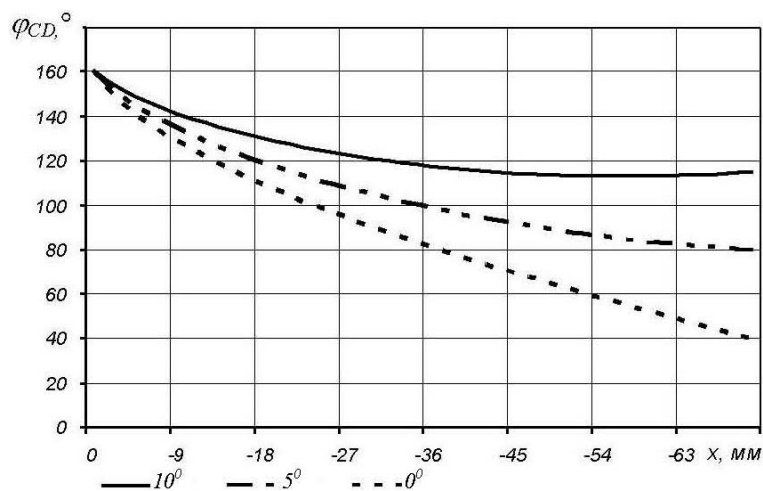


Рисунок 5.3 –Графики зависимости угла поворота втулочного ножа от обобщенной координаты

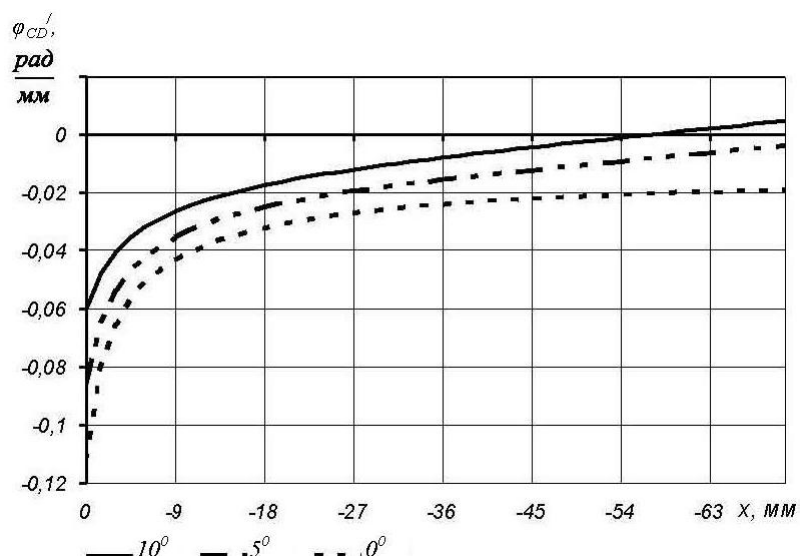


Рисунок 5.4 –Графики зависимости аналога скорости втулочного ножа от обобщенной координаты

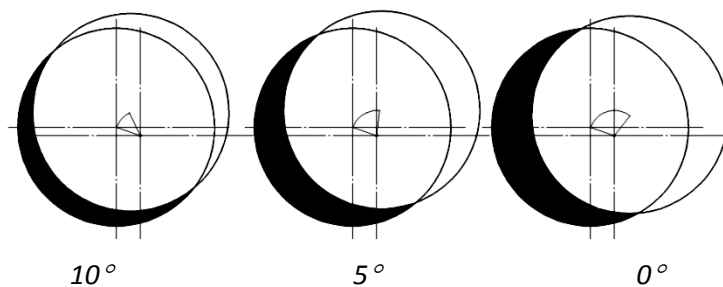


Рисунок 5.5–Траектории движения втулочных ножей при разных углах наклона клина

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1 Веселовский С. И. Разрезка материалов / С. И. Веселовский. – М. : Машиностроение, 1973. – 360 с.

2 Жуков Г. Г. Механизация и автоматизация заготовительных операций на машиностроительных заводах / Г. Г. Жуков. – М. – Л. : Машиностроение, 1966. – 112 с.

3 Основы технологии кузнечно-штамповочного производства / В. М. Аристов, Г.С. Сахаров, В.Н. Степанов, И.И. Иванов. – М.: Металлургия, 1971. – С. 27–39.

4 Мансуров М.А. Технология горячей штамповки / М. А. Мансуров. – М.: Машиностроение, 1971. – С.24–29.

5 Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1966 –С.27–59.

6 Брюханов А. Н. Ковка и объемная штамповка :учебное пособие для машиностроительных вузов / А. Н. Брюханов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 408 с.

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

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

9 Многоручьева прокатка – разделение / В. М. Клименко, С. П. Ефименко, В.Ф. Губайдулин, Г.М. Шульгин. – М.:Металлургия,1987. – 168 с.

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

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

12 Управление разрушением и резка металла трещинами /В. М. Финкель, Ю. И. Головин, Г. Б. Родюков {и др.} // сб. докл. 3-й Всесоюзной конф. «Физика хрупкого разрушения». – М., 1976. – Ч.1. – С.68–74.

13 Высоцкий Е.Н. Схемы раскрытия проката методом холодной ломки / Е. Н. Высоцкий, В. И. Косяк // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – №12. – С.37–38.

14 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).

15 Роганов Л.Л. Сдвиговая отрезка заготовок ножами с клиновыми выступами / Л. Л. Роганов, А. В. Исаев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 4. – С. 16–19.

16 Высоцкий Е.Н. Оценка затухания напряжений в разрушаемом изгибом образце с краевой трещиной / Е. Н. Высоцкий, В. В. Гришаев// Проблемы прочности. – 1988. – № 2. – С. 25–28.

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

18 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.

19 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.

20 Карнаух С. Г. Анализ безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки / С. Г. Карнаух // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Краматорськ –Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 400–403.

21 Мещерин В. Т. Параметры точной резки сортового проката в штампах при высоких скоростях деформирования / В. Т. Мещерин, С. С. Соловцов, А. И. Тимонин // Автомобильная промышленность. – 1973. – №7. – С. 27–29.

22 Соловцов С. С. Состояние и перспективы развития производства точных заготовок из сортового проката / С. С. Соловцов, Н. Л. Лисунец // Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования. – М. : МДНТП, 1990. – С. 76–81.

23 Лисунец Н. Л. Проблемы точности дозирования заготовок под объемную штамповку / Н. Л. Лисунец // Кузнечно-штамповочное производство. – 2009. – № 9. – С. 43–47.

24 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.

25 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.

26 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.

27 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

36 Партон В. З. Динамика хрупкого разрушения/В. З. Партон, В. Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

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

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

39 Роганов Л. Л. Современные подходы к реализации способа холодной ломки изгибом проката на мерные заготовки / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук.пр. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 313–322.

40 Тимощенко В. А. Влияние условий нагружения на характер пластического течения при трехточечной схеме ломки проката / В. А. Тимощенко, В. В. Кириловский // Известия вузов. – 1986. – № 2. – С. 122–126.

41 Кириловский В.В. Новые схемы ломки проката / В. В. Кириловский, В. А. Тимощенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 9. – С. 9–11.

42 А.с. 1292946 СССР, МКИ В 23 D 31/00. Устройство для разделения проката ломкой.

43 А.с. 1180186 СССР, МКИ В 23 D 31/00. Способ ломки проката.

44 А. с. 1286354 СССР, МКИ В 23 D 31/00. Концентратор напряжений для разделения проката ломкой.

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

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

47 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.

48 Разработка установки для холодной ломки проката // Сборник рефератов НИР и ОКР. – ВНИИЦ, 1989. – Сер.7(ТМ), №22. – Реф. 02890029779.

49 Медведев М. Д. Устройство для ломки круглого проката / М. Д. Медведев, Л. М. Натапов // Машиностроитель. – 1989. – № 3. – С. 36–37.

50 Роганов Л.Л. Теоретические основы разработки и внедрение эффективных кузнечно-прессовых машин на базе гидроупругого привода; дис. ...д-ра техн. наук: 05.03.05 / Роганов Л.Л. – Краматорск, 1988. – 506 с.

51 Тарасов А.Ф. Совершенствование технологических процессов штамповки на основе статико-динамического деформирования и разработки специализированных пресс-молотов: дис. ...д-ра техн. наук : 05.03.05 / Тарасов А. Ф. – Краматорск, 1996. – 492 с.

52 Круглова Е.Д. Исследование разделения сортового проката на заготовки неполной закрытой резкой с пассивным поперечным прижимом: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.03.05 / Е. Д. Круглова. – М., 1973. – 16 с.

53 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.

54 Тарасов А. Ф. Применение пресс-молотов для повышения качества заготовок, получаемых способом отрезки сдвигом / А. Ф. Тарасов, Л.Л.Роганов, С.Г. Карнаух // сб. науч. статей.– Краматорск :ДГМА, 1997. – Вып. 3. – С. 89–100.

55 Одрин В. М. Метод морфологического анализа технических систем / В. М. Одрин. – М. : ВНИИПИ, 1989. – 312 с.

56 Машина для безотходной резки металлопроката ПМН:информлисток. – Харьков : ЦНТИ. –№ 89-065.

57 Высокоскоростная отрезка в комбинации с холодным выдавливанием на многопозиционном автомате // Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. – М. :ВНИИТЭМР, 1988. – Вып. 22. – С. 4–5. – (Серия «Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства»).

58 Ромашов А.А. Отрезка коротких и точных заготовок в штампах / А. А. Ромашов, А.С Черкашев // Электронная техника. –1989. – Вып. 1 (152). – С. 34–36.– (Сер. 7).

59 Федина Т. С. Резка сортового проката на заготовки / Т. С. Федина // Сборник аналитических материалов. – М. : ЦНИИНТИКПК, 1989. – № 2. – 11 с.

60 Яшаяев С.Ш. Резка заготовок от прутка сдвигом с дифференцированным зажимом / С. Ш. Яшаяев // Технология машиностроения. – 1963. – № 5.

61 Штамп для резки сортового проката:информлисток. – Винница : ЦНТИ. –№ 89-009.

62 Штамп для резки прутковых заготовок:информлисток. – Челябинск : ЦНТИ. –№ 89-63.

63 Кобельке В. Ф. Накатка концентраторов напряжений на круглый прокат клиновидными роликами / В. Ф. Кобельке, В. В. Гришаев, Е. Н. Высоцкий // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 10. – С. 10-12.

64 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.

65 Носаль В. В. Исследование резания металлов на ножницах с наклонными ножами / В. В. Носаль // Исследование металлургических машин. – М. : Машгиз, 1949. – С. 37–43.

66 Кононенко В. Г. Исследование и внедрение импульсного деформирования металлов в металлургии и машиностроении:автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1964. – 32 с. (ДСП).

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

68 Кононенко В.Г. Технологические особенности высокоскоростной резки сортового проката сдвигом / В. Г. Кононенко, И.Ю.Валеня // Высокоскоростная обработка материалов давлением. – Харьков, 1982. – Вып. 8. – С. 3–16.

69 Кононенко В.Г. Высокоскоростное деформирование и разрушение металлов / В. Г. Кононенко. – Харьков: Вища школа, 1980. – 232 с.

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

71 Вакулин А. В. Влияние скорости приложения нагрузки и температуры на трещиностойкость конструкционных сталей / А. В. Вакулин, Ю. П. Солнцев, В. В. Скобкин // Проблемы прочности. – 1992. – № 7. – С. 30-33.

72 Новиков Н. В. О влиянии скорости нагружения и температуры на трещиностойкость твердых сплавов / Н. В. Новиков // Проблемы прочности. – 1980. – № 9. – С. 61–64.

73 Фадеев Ю. И. Влияние боковых надрезов на характеристики вязкости разрушения конструкционной стали / Ю. И. Фадеев, В. А. Основин // Заводская лаборатория. – 1978. – № 1. – С. 103–106.

74 Нейбер Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер. – М. – Л. : Гостехиздат., 1947. – 204 с.

75 Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. – М. : Мир, 1977. – 302 с.

76 Карнаухов А. А. Методика расчета упругопластических напряжений и деформаций в зонах концентрации / А. А.Карнаухов // Проблемы прочности. – 1988. – № 11. – С. 90.

77 Тарасов А.Ф. Расчет статико-динамического нагружения заготовок на пресс-молотах при одинаковом направлении статического и ударного усилия / А. Ф Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух // Сб. науч. статей. – Краматорск :ДГМА, 1994. – Вып. 2. – С. 91–99.

78 Карнаух С. Г. Дослідження процесу статико-динамічного навантаження зразків за схемою триточкового холодного ламання згином на пресс-молотах / С. Г. Карнаух, О. О. Бігунов // Машинознавство. – 2000. – №12. – С. 31–36.

79 Карнаух С. Г. Исследование процесса статико-динамического нагружения заготовок по схеме трехточечной холодной ломки изгибом на пресс-молотах / С. Г. Карнаух // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2001. – Вып. № 2. – С. 8–12.

80 К динамике процесса ударных испытаний образцов на сосредоточенный изгиб. Сообщ. 1 / А. Я. Красовский, И. В. Орыняк, А. В. Наумов [и др.] // Проблемы прочности. – 1989. – № 5. – С. 25–30.

81 К динамике процесса ударных испытаний образцов на сосредоточенный изгиб. Сообщ. 2 / А. Я. Красовский, И. В. Орыняк, А. В. Наумов [и др.] // Проблемы прочности. – 1989. – № 6. – С. 3–7.

82 Рокач И.В. О численном моделировании экспериментов по определению динамической трещиностойкости материалов / И. В. Рокач // Проблемы прочности. – 1992. – № 7. – С. 22–26.

83 Ман И. Динамическая вязкость разрушения. Метод испытаний и оценки / И. Ман, М. Гольцманн, Б. Влак. – Брно: Ин-т физ. металлургии Чехословац. АН, 1985. – 22 с.

84 Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

85 А.с. 1821298 (СССР), МКИ В 23 D 31/00. Устройство для разделения проката / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, А. В. Исаев (СССР). – № 4932088/27; заявл. 29.04.91; опубл. 15.06.93, Бюл. № 22.

86 А.с. 1775245 (СССР), МКИ В 23 D 31/00, 23/00. Установка для раскря проката / Л.Л.Роганов, С. Г. Карнаух, А. В. Исаев (СССР). – № 4932443/27; заявл. 29.04.91; опубл. 15.11.92, Бюл. № 42.

87 Роганов Л.Л. Дослідження нового способу поділу сортового прокату за схемою «зсув–ламання» / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, О. О. Бігунов // Машинознавство. – 2001. – Вип. № 6. – С. 33–35.

88 Заявка № 94096869, МКИ В 23 D 31/100. Установка для разделения проката / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 06.09.94 // Промислова власність. – 1997. – Бюл. № 4.

89 Беляев Ю.В. 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.

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

91 Калиткин Н.Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

92 Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

93 Соколовский В.В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.

94 Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.

95 Грин А.Г. Пластическое течение надрезанных полос при изгибе / А. Г. Грин // Механика. – 1955. – № 4. – С. 54–56.

96 Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гос. изд-во техн.-экон. литературы, 1956. – 408 с.

97 Шоу М.К. Новый подход к пластичности и его применение к тупым двумерным инденторам / М. К. Шоу, Ж. И. Де Сальво // Труды амер. общ-ва инж.-механиков. – М., 1970. – Вып. 2. – С. 210–221.

98 Диамантопуло К.К. Исследование процесса высокоскоростной резки движущихся профилей и труб клиновым ножом с односторонней заточкой : дис. ...канд. техн. наук: 05.03.05 / Диамантопуло К.К. – Краматорск, 1981. – 96 с.

99 Математическое моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при нанесении концентраторов напряжений путем внедрения жесткого двухстороннего клинового инструмента в прокат / А. В. Сатонин, С. Г. Карнаух, А. А. Бегунов, С. Н. Шаркова // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: зб. наук.пр. – Краматорськ :ДДМА, 1999. – С. 167–171.

100 Целиков А.И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С.Е.Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. –320 с.

101 Карнаух С. Г. Математическое моделирование процесса нанесения концентратора напряжений на гидравлическом прессе с полезным использованием энергии упругой деформации станины и привода / С. Г. Карнаух, А. А. Бегунов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук.пр. – Краматорськ :ДДМА, 1999. – С. 269–271.

102 Исследование установки для отрезки сортового проката эксцентричным закручиванием / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Э. А. Владимиров, В. Е. Шоленинов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук.пр. – Краматорськ :ДДМА, 2000. – С. 419–423.

103 Карнаух С. Г. Разработка процесса безотходной отрезки сортового проката эксцентричным закручиванием / С. Г. Карнаух, В. Е. Шоленинов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук.пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 244–246.

104 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.

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

106 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 : темат. зб. наук.пр. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 329–337.

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

108 Глова В.И. Мягкие вычисления и их приложения / В. И. Глова, И. В. Аникин, М. А. Аджели. – М.: Наука, 2000. – 312 с.

109 Терехов С.А. Нейросетевые информационные модели сложных инженерных систем / С. А. Терехов // Нейроинформатика. – Новосибирск: Наука, 1998. – С. 101–136.

110 Дебок Г. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт / Г. Дебок, Т. Кохонен. – М.: Альпина Паблишер, 2001. – 368 с.

111 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.

112 Методика измерения максимальной скорости подвижных частей высокоскоростных машин / С. Г. Карнаух, А. Е. Мучник, Л. Л. Роганов, А. Н. Обухов // Импульсная обработка металлов давлением. – Харьков, 1997. – С. 134–141.

113 Карнаух С. Г. Экспериментальные исследования силовых параметров процесса внедрения жесткого клиновидного инструмента в прокат / С. Г. Карнаух, А. А. Бегунов, М. А. Винников // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук.пр. – Краматорськ – Хмельницький, 2002. – С. 91–93.

114 Математическое моделирование и расчёт силовых параметров при совместном внедрении двух абсолютно жестких клиньев различных высот и углов при вершине / В. Ф. Потапкин, Л. Л. Роганов, А. В. Сатонин [и др.] // Захист металургійних машин від поломок: міжвуз. темат. зб. наук.пр. – Маріуполь, 2000. – С. 209–216.

115 Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях материалов / Е. А. Кондряков, В. Н. Жмака, В. В. Харченко [и др.] // Проблемы прочности. – 2005. – № 3. – С. 140–145.

116 Карнаух С.Г. Влияние скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах из разных материалов при трехточечной холодной ломке проката изгибом / С. Г. Карнаух, Д. С. Карнаух // Металлообработка. – СПб., 2009. – №3(51). – С. 44–47.

117 Экспериментальные исследования процесса трехточечной ломки проката изгибом при статическом и динамическом нагружении / С. Г. Карнаух, А. А. Бегунов, С. К. Добряк [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 334–341.

118 Карнаух С. Г. Исследование влияния скорости деформирования на силовые характеристики процесса трехточечной холодной ломки изгибом / С. Г. Карнаух, Д. С. Карнаух // Металлообработка. – СПб., 2010. – № 1(55). – С. 34–39.

119 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: темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 247–252.

120 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.

121 Заявка № 93006910, МКИ В23 D 31/00. Устройство для разделения проката ломкой / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 26.10.93 // Промислова власність. – 1995. – Бюл. № 3.

122 Заявка № 93007049, МКИ В23 D 31/00. Установка для холодной ломки изгибом проката и труб / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Е. Н. Высоцкий (Украина). – Заявл. 16.07.93 // Промислова власність. – 1995. – Бюл. № 4.

123 Анализ процесса холодной ломки проката изгибом с перераспределением зон растягивающих и сжимающих напряжений по сечению проката / С. Г. Карнаух, А. А. Бегунов, С. К. Добряк, Н. В. Чоста // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – № 1. – С. 53–56.

124 Пат. 25552 А Україна, МКИ В23D23/00. Штамп для відрізки прокату з диференційованим затиском / Тарасов А. Ф., Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. – № 97062588; заявл. 03.06.97 ; опубл. 30.10.98.

125 Пат. 25434 А Україна, МКИ В23D23/00. Штамп для відрізання прокату / Тарасов А. Ф., Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. – № 95114866; заявл. 14.11.95 ; опубл. 30.10.98.

126 Карнаух С. Г. Разработка штампов для отрезки проката с дифференцированным зажимом / С. Г. Карнаух // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – Вып. № 4. – С. 19–22.

127 Карнаух С. Г. Розробка штампів для точного відрізання зсувом / С. Г. Карнаух // Машинознавство. – 1998. – Вип. № 3. – С. 34–36.

128 Разработка системы автоматизированного проектирования штампов с дифференцированным зажимом проката / С. Г. Карнаух, А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, М. А. Кошевой // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 351–353.

129 Карнаух С.Г. Силовой расчет штампа с дифференцированным зажимом проката / С. Г. Карнаух // сб. науч. статей. – Краматорск : ДГМА, 1992. – Вып.3. – С. 101–105.

130 Карнаух С.Г. О точности заготовок, получаемых резкой в штампах с дифференцированным зажимом / С. Г. Карнаух, А.Ф.Тарасов, Л. Л. Роганов // сб. науч. статей. – Краматорск : ДГМА, 1993. – Вып.1. – С. 52–56.

131 Тарасов А.Ф. Разработка и исследование штампа для точной резки сортового проката / А. Ф. Тарасов, С. Г. Карнаух, Л.Л. Роганов // Новые технологии и организационные структуры на автомобильном транспорте : тез.докл. межд. науч.-техн. конф.– Винница, 1994.– С. 155–156.

132 Карнаух С.Г. Штамп с дифференцированным зажимом для отрезки проката / С. Г. Карнаух, Л.Л. Роганов, А.Ф.Тарасов // Социально-экономические аспекты и ресурсосберегающие технологии на автомобильном транспорте : тез.докл. респ. науч.-техн. конф. – Винница, 1992. – С. 78–79.

133 Заявка № 93006423, МКИ В 23 D 31/00. Механизм упора к штампу для отрезки проката / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 16.07.93 // Промислова власність. – 1995. – Бюл. № 4.

134 Романовский В. Я. Справочник по холодной штамповке / В. Я. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.

135 ДжампД. AutoCAD. Программирование : пер. с англ. / Д. Джамп. – М. : Радио и связь, 1992. – 336 с.

136 Исаев А. В. Штамп для точной отрезки сортового проката на заготовки / А. В. Исаев, С. Г. Карнаух // Прогрессивные технологические процессы, оборудование и оснастка в холодноштамповочном производстве : тез.докл. респ. науч.-техн. конф. – Пенза, 1992. – С. 110–112.

137 А. с. 1784472 СССР, МКИ В 30 В 1/26. Механо-гидравлический пресс / О. М. Шинкаренко, С. Г. Карнаух (СССР). – № 4779476/27 ; заявл. 09.01.90 ; опубл. 30.12.92, Бюл. № 48.

138 А. с. 1784473 СССР, МКИ В 30 В 1/26. Механо-гидравлический пресс / О. М. Шинкаренко, С. Г. Карнаух (СССР). – № 4779481/27 ; заявл. 09.01.90 ; опубл. 30.12.92, Бюл. № 48.

139 А. с. 1833770 СССР, МКИ В 30 В 1/26. Механо-гидравлический пресс / О. М. Шинкаренко, С. Г. Карнаух (СССР). – № 4801537/27 ; заявл. 15.01.90 ; опубл. 15.08.93, Бюл. № 30.

140 Заявка № 94042791, МКИ В 21J 5/08. Импульсный пресс-молот / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 29.04.94 // Промислова власність. – 1996. – Бюл. № 2.

141 Заявка № 93006886, МКИ В 30 В 1/26. Устройство статико-динамического нагружения / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 16.07.93 // Промислова власність. – 1995. – Бюл. № 3.

142 Заявка № 94062179, МКИ В 23 D 31/00. Устройство прижима заготовок на ножницах / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 01.06.94 // Промислова власність. – 1995. – Бюл. № 4.

143 Заявка № 94052916, МКИ В 21 J 7/04. Молот / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 05.05.94 // Промислова власність. – 1996. – Бюл. № 4.

144 Заявка № 95104573, МКИ В 23 D 23/00. Способ отрезки проката во втулочных ножах и устройство втулочного ножа для его реализации / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 19.10.95 // Промислова власність. – 1998. – Бюл. № 5.

145 Заявка № 95020908, МКИ В 23 D 23/00. Штамп для комплексного заготовительно-разделительного процесса / А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух (Украина). – Заявл. 27.02.95 // Промислова власність. – 1997. – Бюл. № 1.

146 Чоста Н. В. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Чоста Н. В. – Краматорск, 2009. – 188 с.

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

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

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

150 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.

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

152 Иванов Н. И. Термодинамические принципы интенсификации процессов размерного формообразования-разрушения / Н. И. Иванов //

Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : сб. науч. тр. – Тула : Изд-во ТГУ, 1994. – С. 23–29.

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

154 Усов С. В. Особенности построения комбинированных электро-технологических 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.

155 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.

156 Иванов Н. И. Методологические принципы разработки исследования интенсифицированных методов механо-электро-физикохимической размерной обработки : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н. И. Иванов. – Тула, 1996. – 43 с.

157 Волков Ю. С. Введение в теорию размерного формообразования электро-физикохимическими методами / Ю. С. Волков, А. Л. Лившиц. – К. : Вища школа, 1978. – 120 с.

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

159 Патент на корисну модель № 24635 Україна, МПК (2006) В 23 D 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.

160 Карнаух С. Г. Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием методики синтеза комбинированных методов обработки / С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук.пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1(3). – С. 105–111.

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

162 Исследование механизмов с переменной клиновидностью для технологических процессов обработки металлов давлением с максимальной начальной силой / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста, В. Е. Шоленинов // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2008. – №1 (19). – С.342–347.

Наукове видання

КАРНАУХ Сергій Григорович

**УДОСКОНАЛЕННЯ БЕЗВІДХОДНИХ СПОСОБІВ ПОДІЛУ
СОРТОВОГО ПРОКАТУЙОБЛАДНАННЯ
ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЗАГОТОВОК ВИСОКОЇ ЯКОСТІ**

Монографія

(Російською мовою)

Редактор О. М. Болкова

Комп'ютерна верстка О. С. Орда

14/2010. Підп. до друку . Формат 60 x 84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк.. Обл.-вид. арк. .
Тираж прим. Зам. №

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру
серія ДК №1633 від 24.12.2003