

Донбасская государственная машиностроительная академия

На правах рукописи

СЕЛЕЗНЁВ МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

УДК 621.967 : 621.98.04

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА  
НОЖНИЦАХ

Специальность 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Боровик Павел Владимирович

Краматорск – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА).....	11
1.1 Технологические схемы производства толстолиствого проката..	11
1.2 Состав и конструктивные особенности ножниц для резки листов на толстолистных станах.....	17
1.3 Существующие методики расчёта энергосиловых параметров процессов резки листового металлопроката.....	22
1.3.1 Методики расчёта энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом.....	22
1.3.2 Методики расчёта энергосиловых параметров продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах.....	27
1.4 Перспективы развития технологии и оборудования процессов резки толстолиствого металлопроката на ножницах.....	37
ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 1.....	42
РАЗДЕЛ 2. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	43
2.1 Повышение качества листов разрезаемых на ножницах за счёт совершенствования технологии и оборудования процессов резки как основное направление исследований.....	43
2.2 Выбор и обоснование методов теоретических исследований процессов резки листового металлопроката на ножницах.....	44
2.3 Выбор методов и оборудования для экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката на ножницах.....	47

2.4 Выбор методов и оборудования для экспериментальных исследований энергосиловых и кинематических параметров процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах.....	53
ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 2.....	60
РАЗДЕЛ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ РАСЧЁТУ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА НОЖНИЦАХ.....	62
3.1 Математическое моделирование процесса поперечной резки листового металлопроката шевронными ножами со сложной формой режущей кромки на базе метода конечных элементов.....	62
3.2 Методика и алгоритм к автоматизированному расчету максимального значения силы достигаемого при поперечной резке листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.....	68
3.3 Методика и алгоритм автоматизированного расчёта энергосиловых параметров процесса резки толстолистого металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.....	79
3.4 Имитационное математическое моделирование спектра рабочих нагрузок процессов резки листового металлопроката.....	90
3.4.1 Моделирование спектра рабочих нагрузок процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.....	90
3.4.2 Моделирование спектра рабочих нагрузок процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.....	96
3.5 Теоретический анализ влияния внешних сил сопротивления на скорость движения листового металлопроката при резке на дисковых ножницах.....	100
ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 3.....	106

РАЗДЕЛ 4. Экспериментальные исследования технологии и оборудования процессов резки листового металлопроката.....	108
4.1 Исследование энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом.....	108
4.2 Экспериментальная оценка влияния геометрических характеристик режущей кромки шевронного ножа со скруглением на качество листового металлопроката.....	116
4.3 Исследование энергосиловых параметров процесса резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.....	123
4.4 Экспериментальная оценка влияния внешних сил сопротивления на скорость движения листового металлопроката при резке на дисковых ножницах.....	129
ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 4.....	131
РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА НОЖНИЦАХ.....	133
5.1 Совершенствование конструкции шевронного ножа, применяемого для поперечной резки листового металлопроката.....	133
5.2 Автоматизированный расчет основных технологических параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.....	135
5.3 Совершенствование процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах.....	141
5.4 Автоматизированный расчет основных технологических параметров процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.....	145
ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 5.....	151
ВЫВОДЫ.....	152



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	154
Приложение А Программные средства к математическому моделированию процессов резки листового металлопроката на ножницах..	176
А.1 Программа к математическому моделированию процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.....	176
А.2 Программа к математическому моделированию процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.....	178
А.3 Программа к имитационному математическому моделированию процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.....	181
А.4 Программа к имитационному математическому моделированию процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.....	183
А.5 Подпрограммы.....	185
Приложение Б Акты и справки по внедрению результатов диссертационной работы.....	202

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Металлургическая промышленность Украины на данном этапе претерпевает качественные изменения, связанные с особенностями рынка и повышением требований к продукции. В частности, наблюдается рост спроса на листовую и полосовую металлопрокат, что приводит к необходимости совершенствования существующего и создания нового оборудования, задействованного в его производстве, с целью увеличения производительности и повышения качества листа. При этом процесс производства листового металлопроката, как правило, включает операции продольной и поперечной резки, применяемые для получения листов заданных размеров. С этой целью на участках резки прокатных станов широко используются ножницы различных типов, которые позволяют достичь необходимого качества листа при обеспечении высокой производительности операций резки в целом. В частности, для поперечной резки листового металлопроката широко используются ножницы с шевронным ножом, однако, практика применения классического шевронного ножа показала наличие дефекта в виде остаточной деформации готового листа. В свою очередь для обрезки боковых кромок листа и придания ему заданной ширины широко используются высокопроизводительные дисковые ножницы, среди особенностей работы которых, следует отметить возможное появление серповидности разрезаемого листа. Наличие данных дефектов при применении указанных способов резки существенно снижает качество прокатной продукции. Это приводит к необходимости разработки новых технических решений, направленных на повышение качества листового металлопроката. Эффективное практическое применение данных решений возможно только при наличии четких рекомендаций относительно их технологических параметров, разработка которых может быть проведена на базе теоретических и экспериментальных исследований энергосиловых и кинематических показателей указанных разделительных операций, что и определяет актуальность данной диссертационной работы.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Тема диссертации соответствует научному направлению «Создание новых и совершенствование действующих технологий, оборудования и средств автоматизации в прокатном производстве» одной из ведущих научных школ Донбасской государственной машиностроительной академии. Диссертация выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ, предусмотренных планами Министерства образования и науки Украины (№ гос. регистрации 0113U003979, № гос. регистрации 0114U002537 приказ № 1611 от 22.11.2013). В этих работах автор принимал участие в качестве исполнителя.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является повышение качества листового металлопроката путем совершенствования технологии и оборудования процессов продольной и поперечной резки, на основе развития математических моделей по определению энергосиловых и кинематических параметров данных технологических процессов и разработки научно обоснованных рекомендаций по их реализации.

Для достижения указанной цели в рамках диссертационной работы были поставлены и решены следующие задачи:

- провести анализ состояния вопроса, определить основные проблемы, характерные для процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах, а также наметить пути их решения;
- установить закономерности влияния параметров режущего инструмента на энергосиловые показатели процесса резки и качество листового металлопроката;
- разработать методики и программные средства для автоматизированного расчета энергосиловых и кинематических параметров процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах;
- провести экспериментальную оценку адекватности используемых методик расчета энергосиловых и кинематических параметров процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах;
- разработать практические рекомендации по совершенствованию технологии и оборудования процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах.

**Объект исследования.** Процессы продольной и поперечной резки листового металлопроката и оборудование для их реализации.

**Предмет исследования.** Основные закономерности и методы расчета геометрических характеристик, энергосиловых и кинематических параметров процессов продольной и поперечной резки толстолистого металлопроката на ножницах.

**Методы исследования.** Основу теоретических исследований составили метод численного рекуррентного решения конечно-разностной формы статического равновесия выделенных элементарных объемов очага резки, а также метод конечных элементов. Экспериментальные исследования включали физическое моделирование исследуемых процессов с применением методов тензометрии. Реализация экспериментальных исследований проводилась с применением подходов к планированию эксперимента, а при обработке их результатов были использованы методы математической статистики.

**Научная новизна полученных результатов.** Научную новизну диссертационной работы составляют следующие основные результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований:

- впервые установлено влияние технологических параметров процесса резки и формы режущей кромки шевронного ножа со скруглением на величину остаточной деформации разрезаемого листа и энергосиловые параметры разделительного процесса;

- впервые установлены граничные условия реализации процесса продольной резки толстолистого металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары при несимметричном внедрении ножей, а также влияние технологических параметров данного разделительного процесса на величину момента резки;

- впервые установлена зависимость скорости перемещения листа при резке на дисковых ножницах от действия сил внешнего сопротивления, что необходимо для синхронизации комбинированных процессов правки и продольной резки.

**Практическое значение полученных результатов.** Практическую ценность диссертационной работы представляют следующие результаты:

– методики и программные средства по определению энергосиловых и кинематических показателей процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах;

– рекомендации относительно реализации процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением, а также комбинирования процессов правки и продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах;

– технические решения, направленные на совершенствование процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката, позволяющие повысить качество готовой продукции с учетом минимизации энергозатрат процессов резки, признанные изобретениями.

Результаты диссертационной работы в виде программных средств, а также рекомендаций по совершенствованию технологических режимов и конструктивных параметров ножниц использованы на ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод».

Отдельные положения диссертации используются на кафедре «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета в рамках преподавания ряда специальных дисциплин, а также при выполнении научно-исследовательских работ, курсовых и дипломных проектов.

**Личный вклад соискателя.** Автор провел анализ состояния вопроса, разработал технические решения, направленные на совершенствование процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката. Разработал методики и математические модели к автоматизированному расчету энергосиловых и кинематических параметров процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах. Принял участие в создании двух лабораторных установок, а также провел экспериментальные исследования, обработку и анализ полученных результатов. Личный вклад соискателя в работах, опубликованных в соавторстве, приведен в аннотации к списку опубликованных работ.

**Апробация результатов диссертации.** Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» г. Краматорск, Украина, 2013, 2015, , «Актуальные вопросы современной техники и технологии» г. Липецк, Россия, 2013, «Металургійні процеси та обладнання» г. Донецк, Украина, 2013, «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия», г. Новосибирск, Россия, 2015, «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», г. Харьков, Украина, 2013, 2015.

**Публикации.** Материалы диссертационной работы опубликованы в 15 работах по научной тематике, из них 13 статей в специализированных изданиях из которых 1 в библиографической реферативной базе «Scopus». Получены 2 патента на полезную модель.

Представленные ниже результаты получены при содействии преподавателей и сотрудников кафедр «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» ДГМА, «Механика и пластическое формование» ДГМА, «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» ДонГТУ, которым автор искренне признателен за неоценимую помощь в организации работ, а также за весьма полезные советы и замечания, высказанные на всех этапах выполнения диссертационной работы.

## РАЗДЕЛ 1

### ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА)

#### 1.1 Технологические схемы производства толстолистого проката

Основной задачей технологического процесса производства толстолистого металлопроката является получение готового листа толщиной до 50 мм высокого качества с минимальными затратами и максимальной производительностью. При этом развитие производства толстого листа обусловлено потребностью отраслей промышленности, производящих трубы большого диаметра, крупные суда, ядерные реакторы и др. В настоящее время в мире эксплуатируется свыше 170 толстолистных станов [1–17].

При производстве толстолистого металлопроката используются прокатные станы разнообразных конструкций, при этом, для реализации данной задачи получили распространение двух и трехклетевые станы большой единичной мощности, оборудованные клетями кварто в черновой и чистовой линиях на которых катают листы толщиной от 5 до 50 мм, шириной от 600 до 3800 мм и плиты толщиной до 200 мм. К таким станам относятся стан 3000 Мариупольского комбината и стан 3600 комбината "Азовсталь" производительностью 1,7 млн. т. в год [18]. При этом в зависимости от различных условий (например, марки стали) технологический процесс производства толстолистого металлопроката может существенно различаться (рис. 1.1), включая в себя различные дополнительные операции по отделке и повышению качества готовой металлопродукции. В то же время независимо от выбранной технологической схемы производства толстого листа, она, как правило, включает операции резки, входящие в основную часть технологического процесса и проводимые с целью придания готовому листу установленных формы и размеров.

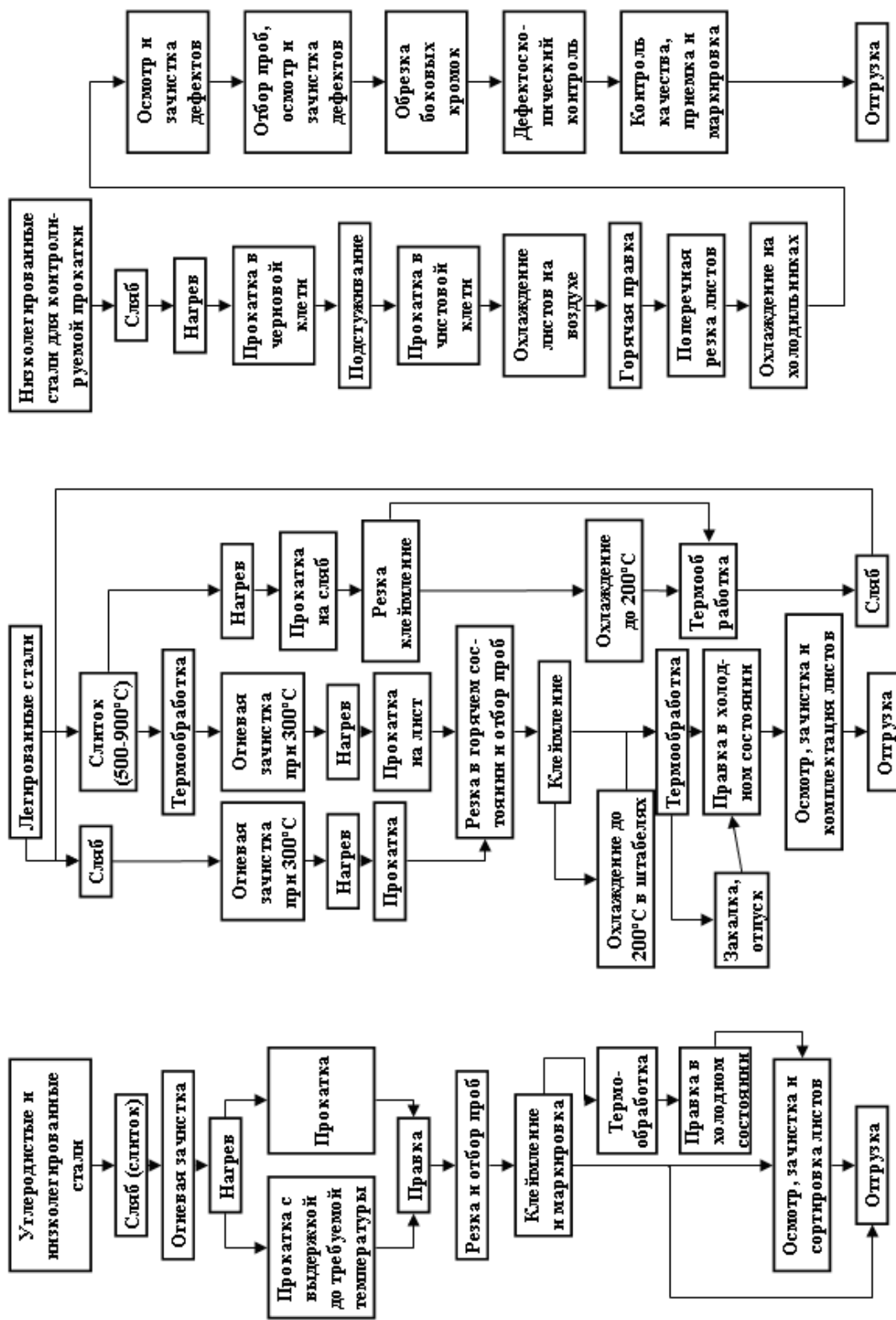


Рисунок 1.1 – Схемы технологических процессов производства толстых листов [2]



В частности при производстве толстолистого металлопроката разделительные операции применяют для обрезки переднего (рис. 1.2, а) и заднего (рис. 1.2, б) концов листового раската, которые после прокатки в горизонтальных валках имеют веерообразную форму (см. рис. 1.2), что вызвано течением металла в направлениях наименьшего сопротивления [18; 19]. Кроме того данные операции применяются для обрезки боковых кромок толстого листа (на которых может образовываться «закат», связанный с неравномерным проникновением деформации по высоте раската), а также для порезки на мерные длины и продольного роспуска полос.

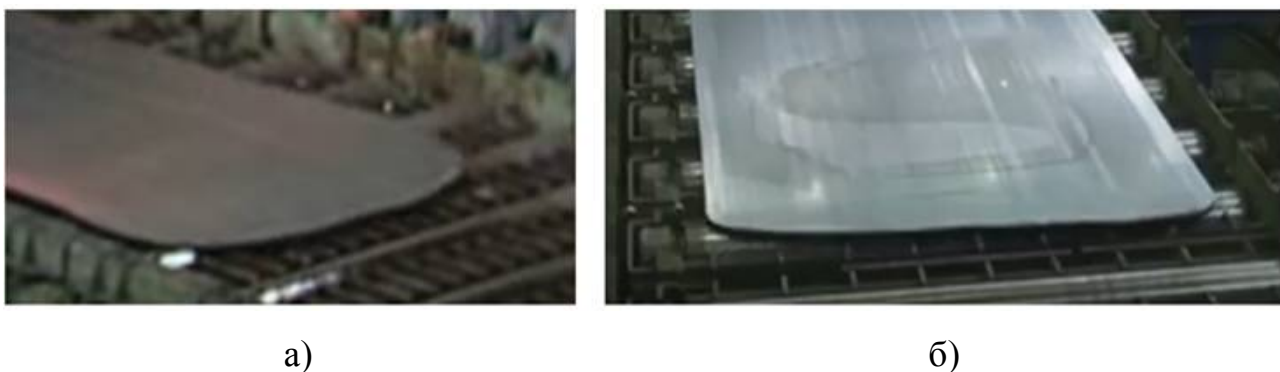


Рисунок 1.2 – Фото переднего (а) и заднего (б) концов листового раската

Для реализации операций резки, в состав современных прокатных станов включают разнообразное оборудование, при этом разделительный процесс может производиться следующими способами: механическим без снятия стружки (разделение осуществляется путем сдвига, растяжения, излома или скручивания одной части листа относительно другой); механическим со снятием стружки (разделение происходит за счет удаления режущим инструментом части металла между разделяемыми частями) и термическим (разделение реализуется путем плавления металла по заданной линии за счёт его локального нагрева).

При этом наиболее перспективным среди перечисленных представляется механический способ разделения без снятия стружки, поскольку позволяет получать готовую металлопродукцию высокого качества с максимальной производительностью и минимальными потерями металла, кроме того применение

данного способа реализации разделительной операции позволяет исключить неравномерность механических свойств листа, которая имеет место при применении термического способа разделения.

Для реализации механического способа разделения без снятия стружки как правило применяют ножницы различного типа, которые в свою очередь, являются одними из наиболее сложных по кинематике и конструкции машинами, входящими в комплекс оборудования прокатных станков. Так, к примеру, схема расположения оборудования толстолистового стана 3600 «Азовсталь», имеющего в своём составе две четырехвалковых клетки и вертикальную двухвалковую клетку, предусматривает прокатку листов и плит толщиной 5...200 мм, шириной до 3200 мм, при этом листы толщиной 5...50 мм после прокатки в черновой и чистовой клетках, правки и контроля качества поверхности поступают на две линии резки, оборудованные дисковыми ножницами, сдвоенными кромкообрезными ножницами и ножницами поперечной резки.

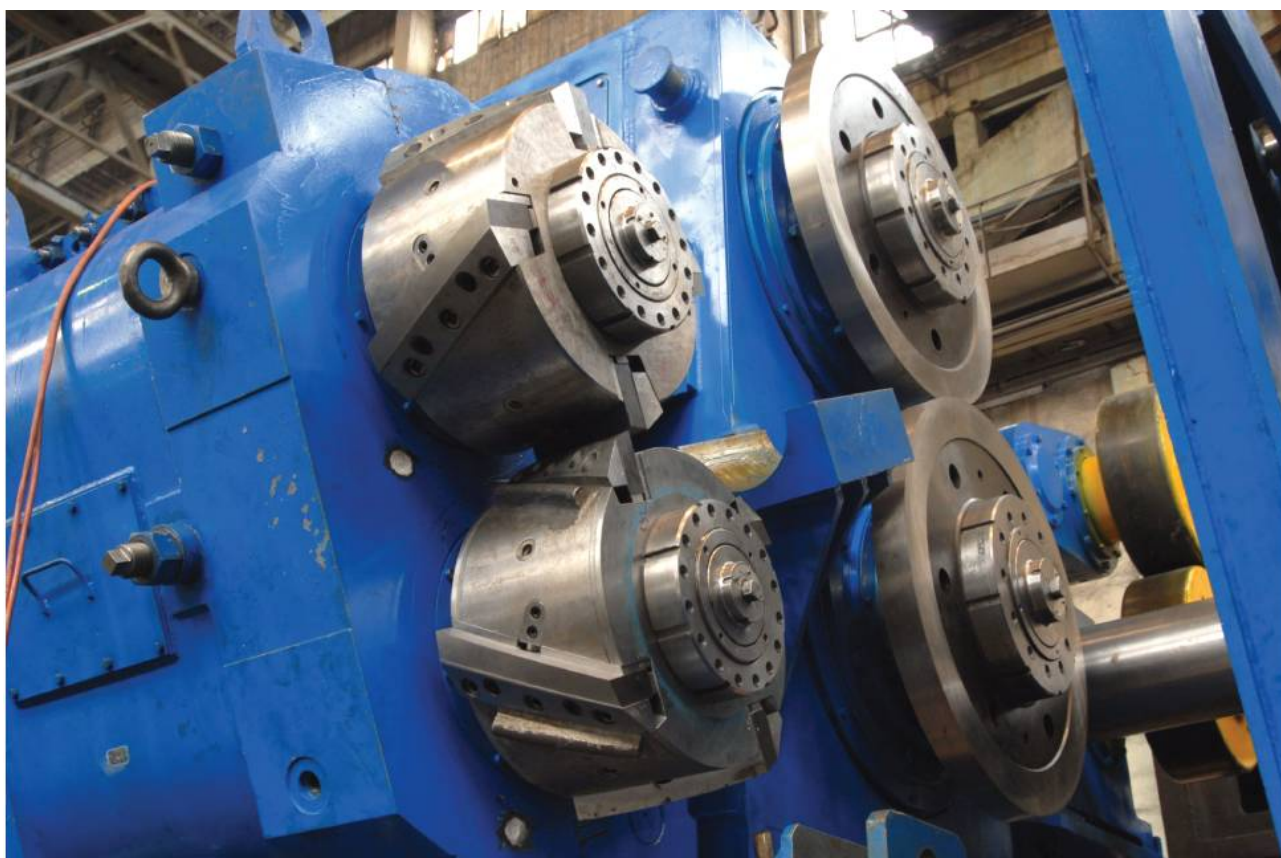
В то же время механическое оборудование для производства толстых листов совершенствуется в направлении увеличения мощности и производительности агрегатов с целью получения листов с высоким качеством поверхности и точностью размеров [18–27]. Так для реконструкции стана 2500 горячей прокатки, а также нового агрегата поперечной резки ОАО «ММК», (г. Магнитогорск, Россия) с целью расширения сортамента выпускаемой продукции (полос и листов), сотрудниками «НКМЗ» (г. Краматорск, Украина) был спроектирован и изготовлен комплекс оборудования, включающий в себя современные барабанные летучие, гильотинные гидравлические (рис. 1.3, а), гильотинные летучие ножницы (рис. 1.3, б), а также дисковые кромкообрезные ножницы с кромкокрошителем (рис. 1.3, в), которые предназначены для обрезки кромок с получением полосы мерной ширины и дробления обрезанных кромок в скрап. Отличительной особенностью данных кромкообрезных ножниц является наличие режущего механизма, выполненного одним блоком с механизмом для дробления кромок, что позволяет максимально приблизить кромкокрошительные барабаны к ножам и значительно сократить длину проводок [28].



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 – Ножницы конструкции ПАО «НКМЗ» установленные при модернизации стана 2500 ОАО «ММК» (гильотинные гидравлические (а), летучие гильотинные (б), дисковые кромкообрезные с кромкокрошителем (в)) [28]

В свою очередь, применение дисковых кромкообрезных ножниц позволяет обеспечить высокую производительность участка резки, а также высокое качество боковой поверхности листа, однако сортамент листов, разрезаемых на дисковых ножницах в холодном состоянии, существенно ограничен, при этом на толстолистовых станах Алчевского и Орсоко-Халиловского металлургических комбинатов сортамент листов, допускаемых к порезке на дисковых ножницах расширен за счёт реализации процесса обрезки кромок толстолистовых раскатов в горячем состоянии [29–32]. В таблице 1.1 для примера приведена толщина листов, допускаемая к резке в горячем состоянии на дисковых ножницах стана 3000 Алчевского металлургического комбината.

Таблица 1.1 – Максимальная толщина листов разрезаемых в горячем состоянии на дисковых ножницах стана 3000 Алчевского металлургического комбината

Марка стали	Температура листов, °С			
	450...500	550...600	650...700	≥700
Зсп, ЗГСП, 15К, 20К, А, В, Д, ЗПС, 5ПС, 8...20, 14ХГС	30 (мм)	32 (мм)	40 (мм)	40 (мм)
25...35, 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2, 16ГС, 10Г2С1Д, 14Г2АФ, 16Г2АФ, 40...50, 30Г...40Г	25 (мм)	30 (мм)	38 (мм)	38 (мм)
55...70, 50Г...70Г	22 (мм)	25 (мм)	32 (мм)	34 (мм)

Таким образом, можно утверждать, что операция резки является одной из наиболее важных составляющих технологического процесса производства толстолистового металлопроката, а от состава и технологических возможностей оборудования участка резки напрямую зависит производительность стана.

## 1.2 Состав и конструктивные особенности ножниц для резки листов на толстолистовых станах

Ножницы, применяемые для резки толстолистового проката, различают по назначению, конструкции и принципу действия. Так по назначению существуют ножницы для поперечной и продольной резки, к первой группе относятся ножницы с параллельными и наклонными ножами, а также ножницы с катящимся резом, ко второй дисковые и сдвоенные кромкообрезные ножницы.

Ножницы с наклонным ножом (гильотинные) применяются для поперечной резки листов в холодном, полуостывшем или горячем состоянии. Конструктивно они бывают двух типов: открытого (рис. 1.4, а) и закрытого (1.4 б) [33–37].

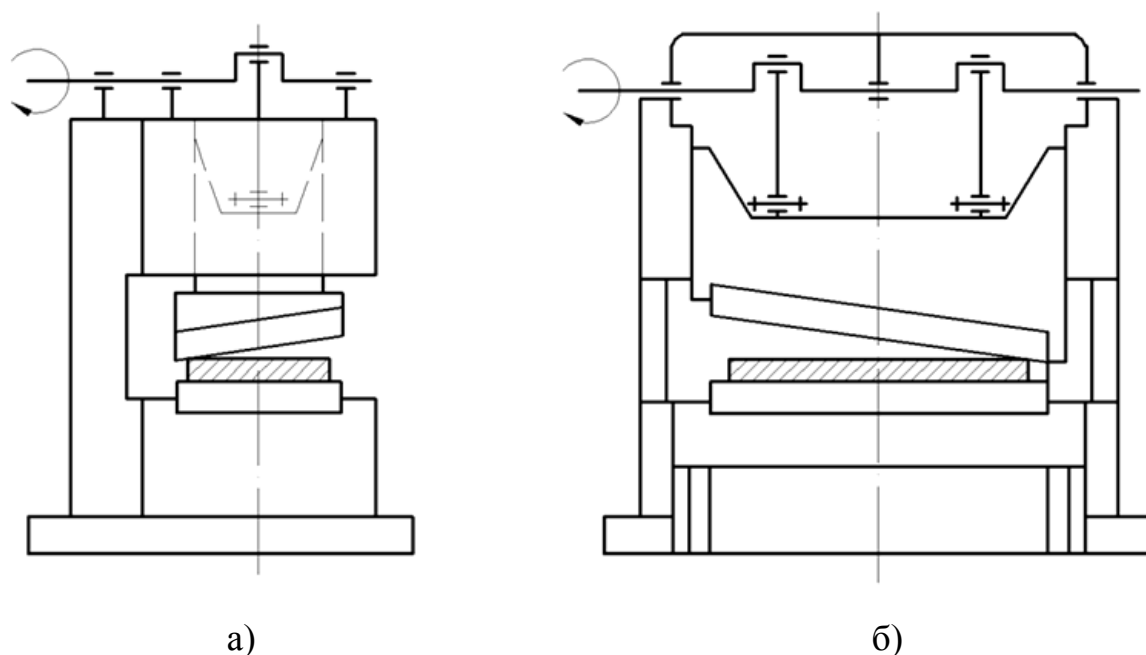


Рисунок 1.4 – Схемы гильотинных ножниц открытого (а) и закрытого (б) типов

На участках резки толстолистовых станов применяют, преимущественно, ножницы второго типа, они имеют две станины, соединенные снизу траверсой. В просвете между станинами перемещается суппорт с ножом, при этом подвижным может быть как верхний, так и нижний нож.



В ножницах с верхним подвижным ножом нижний нож, неподвижно закрепленный в станине, расположен горизонтально, а верхний наклонно. В случае применения конструкции с нижним подвижным ножом этот нож устанавливают наклонно, таким образом, при резке лист прижимается к верхнему прямому ножу и рез получается более прямым (перпендикулярным) [38].

Угол наклона ножа  $\alpha$  (рис. 1.5, а) принимается равным  $1^\circ \dots 6^\circ$  (в зависимости от толщины листа), благодаря чему резка происходит не по всей площади разрезаемого листа одновременно, а только по некоторой части  $abcd$ .

В некоторых случаях предпочитают применять более сложный в изготовлении двухнаклонный (шеvronный) нож (рис. 1.5, б). При резке таким ножом лист занимает более устойчивое положение вследствие уравнивания горизонтальных составляющих силы резки, что позволяет увеличить угол наклона режущих кромок [1; 33].

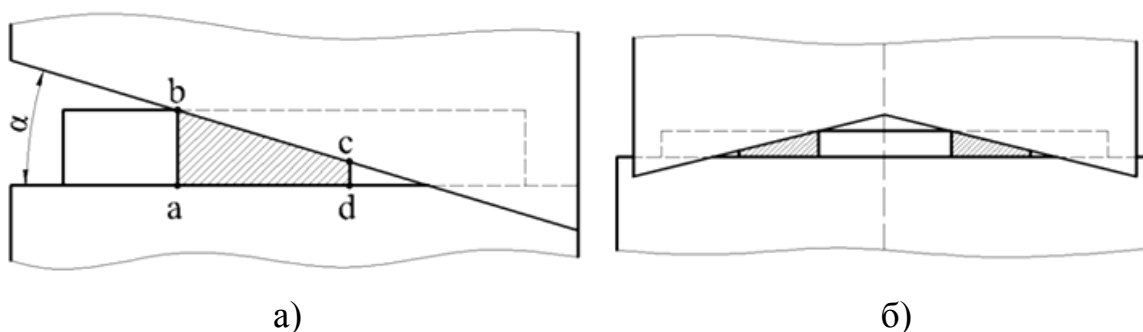


Рисунок 1.5 – Схема порезки гильотинным (а) и шевронным (б) ножом

На современных толстолистовых станах поперечную резку листов также осуществляют на ножницах с катящимся резом [39–53]. Преимущества ножниц данного типа, по сравнению с гильотинными, заключаются в малом угле резки, а также минимальном перекрытии ножей по всей длине реза, что приводит к уменьшению деформации отрезаемого листа.

Обычно на линиях резки толстолистовых станов устанавливаются ножницы с двухкривошипным приводом (рис. 1.6, а), недостаток которых заключается в сложной кинематике [44–47]. В то же время перспективной, на сегодняшний день, является конструкция однокривошипных ножниц

КО ВНИИМЕТМАШ [48–53] (рис. 1.6, б), которые имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с двухкривошипными ножницами, а именно:

- работают реверсивно;
- имеют один вал, установленный на две опоры, что позволяет использовать в качестве опор подшипники качения, а не скольжения;
- оснащены механизмом уравнивания суппорта с верхним ножом, что обеспечивает выборку зазоров в направлении действия силы резки и тем самым снижает динамические нагрузки на подшипниковые опоры и станину.

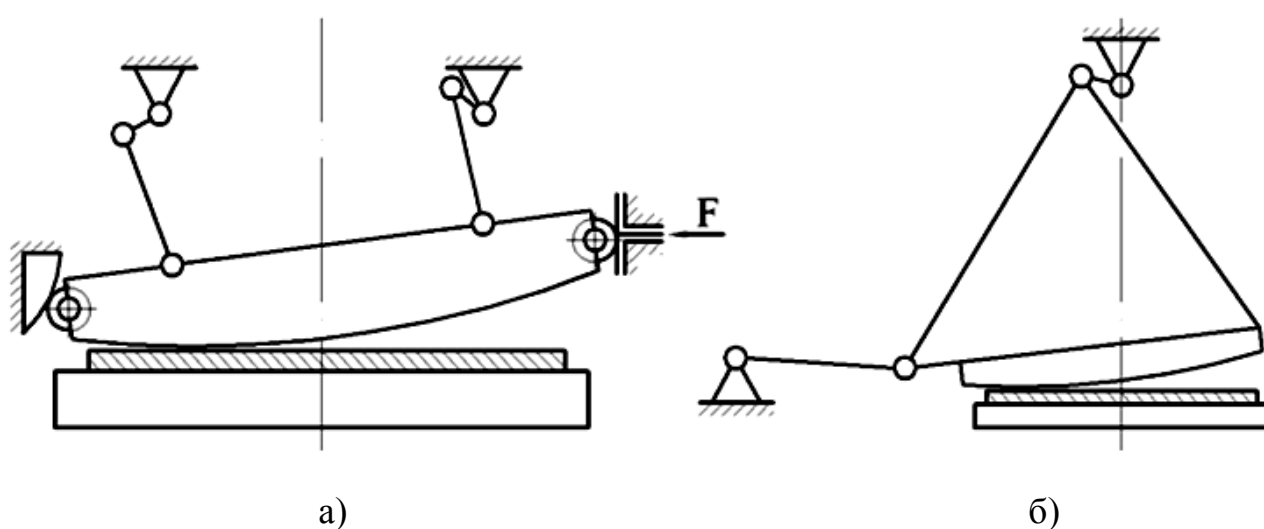
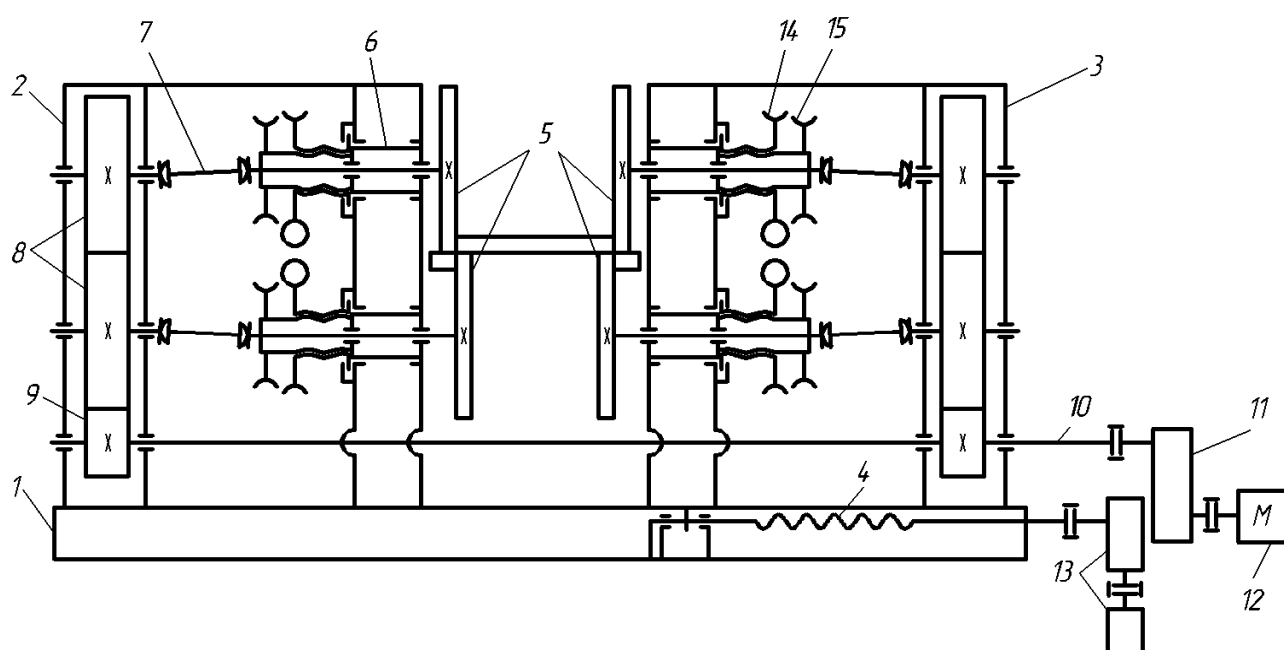


Рисунок 1.6 – Кинематическая схема ножниц с катящимся резом:  
двухкривошипных (а) и однокривошипных (б)

Для обрезки боковых кромок толстолистового металлопроката, а также роспуска полос, широкое распространение получили дисковые ножницы (рис. 1.7), которые позволяют обеспечить высокую скорость резки (до 120 м/мин), без снижения качества боковой поверхности готового листа [1; 33; 54–74]. При этом для обрезки кромок толстолистового металлопроката, получила распространение схема установки дисковых ножей, которая в отличие от классической (рис. 1.8, а), предусматривает смещение верхнего ножа относительно нижнего по направлению движения раската (рис. 1.8, б), что необходимо для обеспечения горизонтального выхода листа из ножниц, а также интенсивного отгибания отрезаемой кромки [33; 74].



1 – рама; 2, 3 – режущие блоки; 4 – винтовой механизм; 5 – дисковые ножи; 6 – эксцентриковые втулки; 7 – шпиндели; 8 – зубчатые передачи (аналоги шестеренной клетки); 9 – приводные шестерни; 10 – трансмиссионный вал; 11 – цилиндрический редуктор; 12 – электродвигатель; 13 – привод механизма перемещения режущего блока; 14 – механизм регулировки бокового зазора между ножами; 15 – механизм регулировки перекрытия ножей

Рисунок 1.7 – Кинематическая схема двухпарных кромкообрезных дисковых

#### НОЖНИЦ

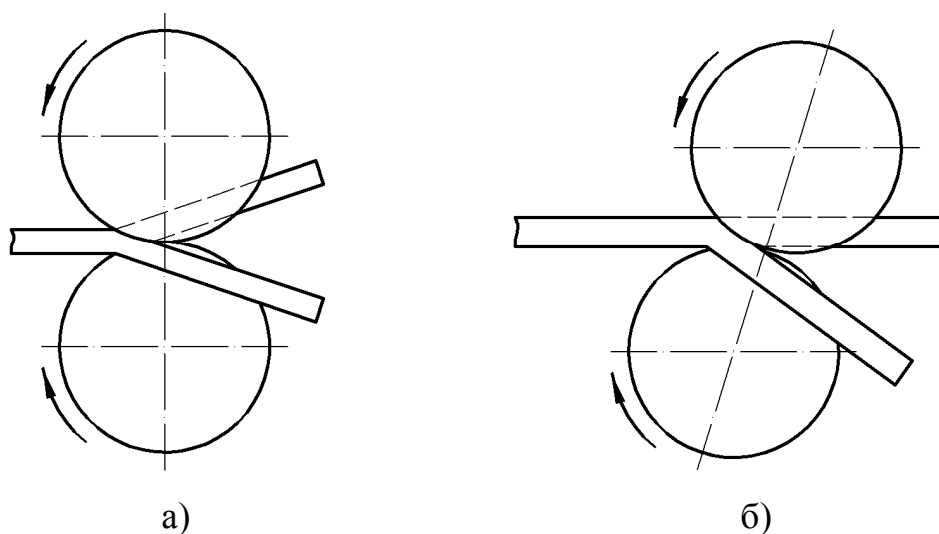


Рисунок 1.8 – Схемы установки дисковых ножей: в одной (вертикальной) плоскости (а) и со смещением верхнего ножа (б)



К резке на дисковых ножницах допускают листы толщиной от 5 до 25 мм в холодном состоянии. В то же время, как указывалось в предыдущем подразделе, на некоторых станах сортament разрезаемых листов, расширен до 40 мм за счет применения процесса горячей резки [73], при этом в работе [74] рассмотрена возможность увеличения максимальной толщины листов, допускаемых к резке, до 50 мм за счет совершенствования конструкции дискового ножа. Однако данное решение ограничено температурным состоянием листа при резке, в итоге для некоторых марок сталей предельная толщина составляет менее 50 мм.

Для обрезки боковых кромок толстолистовых раскатов также применяют сдвоенные кромкообрезные ножницы (СКОН), которые являются альтернативой дисковым. Принцип порезки листовых раскатов на СКОНах заключается том, что отделение боковых кромок по всей длине листа, обычно, происходит за несколько резов, которые производятся двумя парами ножей, установленными параллельно с обеих сторон разрезаемого листа. При этом в зависимости от конструкции СКОНов может применяться различная форма ножа: наклонный или дугообразный, в последнем случае реализуется катящийся рез. На рисунке 1.9 в качестве примера приведен общий вид сдвоенных кромкообрезных ножниц с катящимся резом фирмы «Danieli» (см. рис. 1.9, а) и их механизма резки (см. рис. 1.9, б).

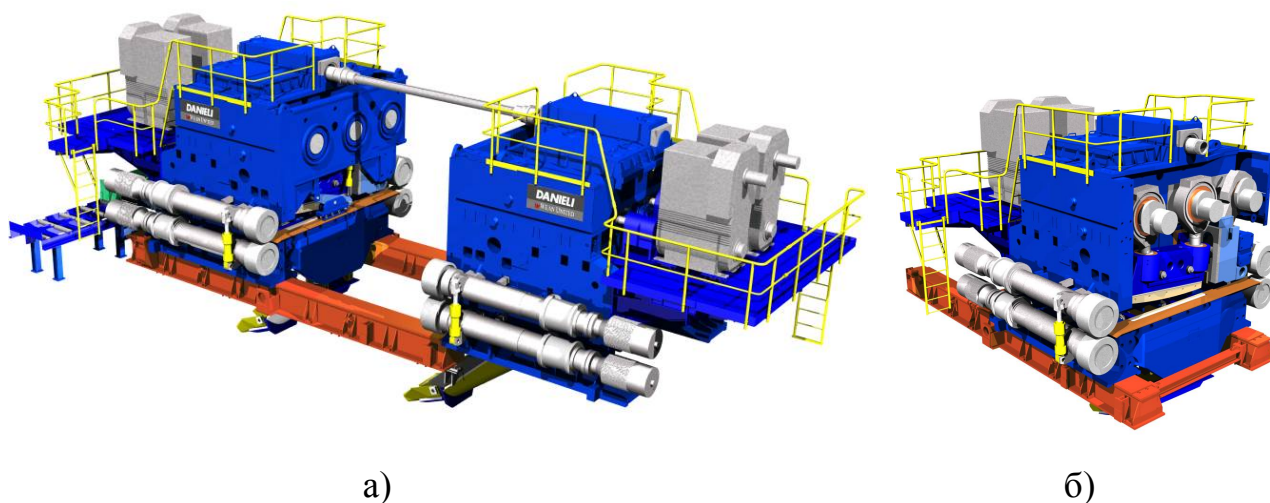


Рисунок 1.9 – Общий вид сдвоенных кромкообрезных ножниц с катящимся резом фирмы «Danieli» (а) и их механизма резки (б)

Преимущества ножниц типа СКОНов, по сравнению с дисковыми, заключаются в большей максимальной толщине раскатов, допускаемых к порезке (до 50 мм) при одновременном обеспечении высокого качества боковой поверхности листа. В то же время основным недостатком СКОНов является сложная конструкция, большие габариты и высокая стоимость [75–77].

Недостатки ножниц существующих конструкций, а также повышение интенсивности производства толстого листа при одновременном расширении его сортамента требуют совершенствования уже эксплуатируемых и вновь создаваемых ножниц, а также технологии и способов резки при одновременном развитии методов расчёта энергосиловых параметров процесса в целом.

### 1.3 Существующие методики расчёта энергосиловых параметров процессов резки листового металлопроката

#### 1.3.1 Методики расчёта энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом

Существенный вклад в развитие методов расчёта энергосиловых параметров процессов резки металлопроката внесли: Н. Г. Бойденко, П. В. Боровик, В. И. Дунаевский, А. А. Ищенко, А. А. Королев, Н. И. Крылов, В. В. Носаль, С. М. Носенко, Е. В. Пальмов, А. М. Сабуров, А. В. Сатонин, В. В. Смирнов, А. И. Целиков и ряд других учёных.

При проектировании оборудования для резки толстолистового металлопроката целесообразно знать максимальное значение силы резки, которое на этапе проектирования может быть получено расчётным путём. В случае резки толстолистового проката полная сила резки может включать в себя несколько составляющих таких как: сила, затрачиваемая непосредственно на разделение материала и сила изгиба отрезаемой части листа [33; 72; 74].

Также согласно работам [33; 72] на величину силы резки оказывают существенное влияние следующие технологические и конструкционные параметры разделительного процесса: механические свойства разрезаемого материала, скорость резки, толщина проката, ширина отрезаемой части, зазор между ножами, форма ножей и степень их притупления.

Для случая поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом основным энергосиловым показателем разделительной операции является величина силы резки. При этом методы её расчёта аналогичны применяемым при поперечной резке гильотинным ножом с тем отличием, что получаемые значения необходимо удваивать вследствие наличия у режущей кромки шевронного ножа двух наклонных прямолинейных плоскостей, образующих, соответственно два идентичных очага резки.

При применении гильотинного ножа для случая резки листового металлопроката в холодном состоянии величину силы резки достаточно полно описывает выражение Целикова-Носаля [72; 78]:

$$P = \frac{0,6\sigma_b\delta h^2}{\operatorname{tg}\alpha} \cdot \left( 1 + z \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{0,6 \cdot \delta} + \frac{1}{1 + \frac{10 \cdot \delta}{\sigma_b \cdot \left(\frac{\Delta}{h}\right)^2 \cdot \left(\frac{c}{h}\right)}} \right), \quad (1.1)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности при растяжении;

$\delta$  – относительное удлинение при испытании на разрыв;

$\Delta$  – боковой зазор между ножами (рис. 1.10, а);

$c$  – расстояние от плоскости реза до прижима (см. рис. 1.10, а);

$h$  – толщина листа (см. рис. 1.10, б);

$\alpha$  – угол наклона режущей кромки (см. рис. 1.10, б);

$z$  – коэффициент, учитывающий изгиб отрезаемой кромки, зависящий от её ширины, пластичности разрезаемого материала и угла наклона ножа.

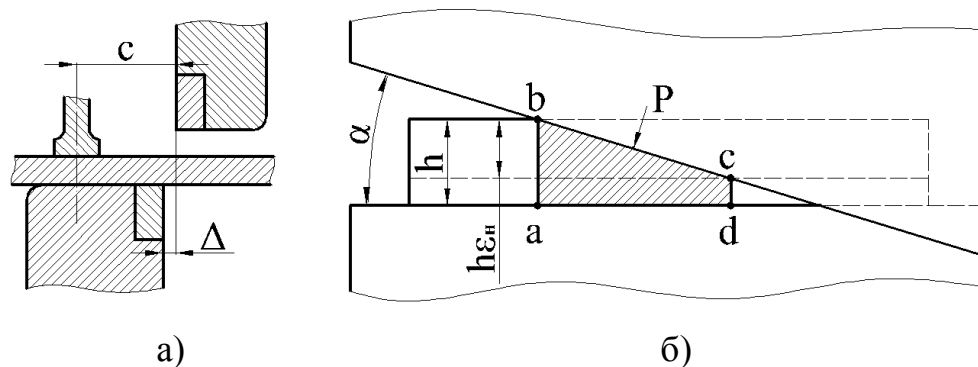


Рисунок 1.10 – Схемы к расчёту силы резки наклонным ножом

При этом следует указать, что выражение (1.1) помимо силы, затрачиваемой на изгиб отрезаемой части листа, учитывает также силу изгиба металла в зоне резки соответственно тому, что в этой зоне примерно по периметру дуги  $AB$  (рис. 1.11), давлением верхнего ножа образуется лунка (местный чашеобразный изгиб).

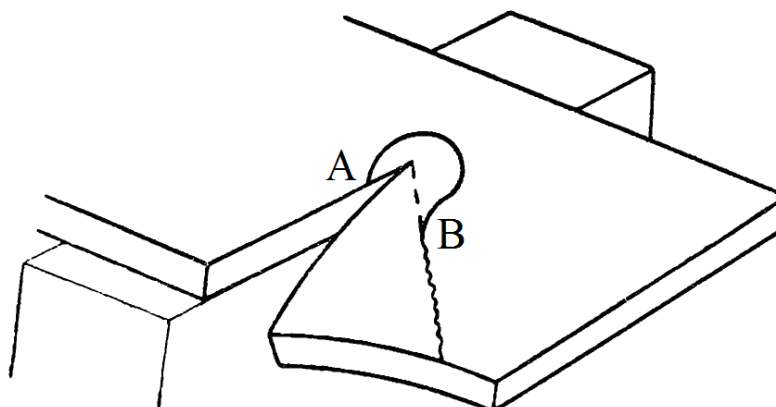


Рисунок 1.11 – Схематичное изображение листа, надрезанного наклонным  
НОЖОМ

Существует и более упрощённая формула А.А. Королёва [33]:

$$P = k_1 k_2 k_3 \sigma_b \frac{2 - \varepsilon_n}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_n h^2, \quad (1.2)$$

где  $\varepsilon_n$  – относительная глубина надреза до скола (см. рис. 1.10, б);

$k_1$  – коэффициент перехода от предела прочности при растяжении  $\sigma_b$  к пределу прочности при срезе  $\tau$ ;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий притупление ножей;

$k_3$  – коэффициент влияния бокового зазора между ножами.

Также максимальное значение полной силы резки для случая наклонного ножа можно получить из формулы Крылова-Тарасова [79]:

$$P = K_{эн} K_{отр} \frac{h^2 \varepsilon_n}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{\frac{\sigma_T \sigma_b}{K_\tau}} + zh^2 \sigma_b, \quad (1.3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести разрезаемого материала;

$K_{эн}$  – коэффициент эпюры, зависящий от угла наклона ножа  $\alpha$  (рис. 1.12);

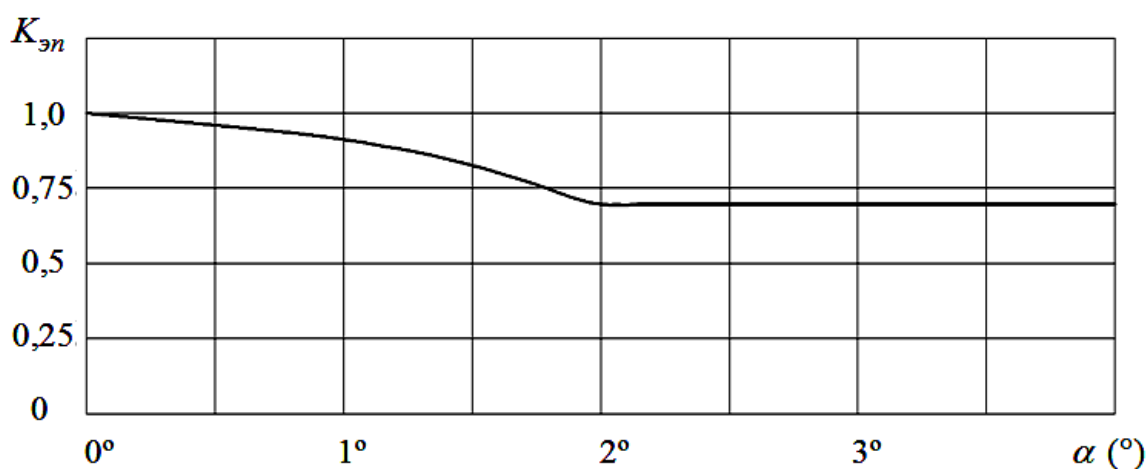


Рисунок 1.12 – Зависимость коэффициента эпюры  $K_{эн}$  от угла наклона ножа  $\alpha$  [79]

$K_{отр}$  – коэффициент отрыва, зависящий от величины  $\varepsilon_n$  (рис. 1.13, а);

$K_\tau$  – коэффициент механических свойств разрезаемого материала, который определяется графически в зависимости от величины отношения предела текучести материала к пределу его прочности при растяжении (рис. 1.13, б).

Из представленного обзора существующих методик по определению прикладываемой силы для случая поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом следует, что данная величина зависит от комплекса факторов, корректный учёт которых существенно влияет на точность вычислений, при этом существующие методики значительно отличаются в подходе к данному вопросу, однако выражение Целикова-Носаля позволяет учесть наибольшее их количество и может быть принято в качестве основы при математическом моделировании.

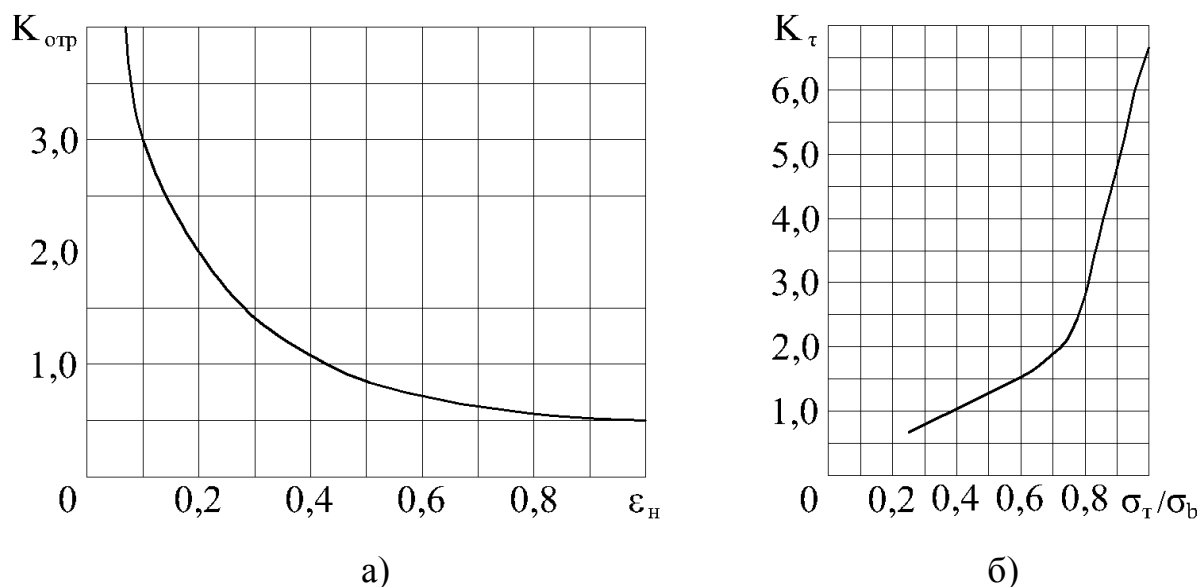


Рисунок 1.13 – Зависимости коэффициента отрыва  $K_{отр}$  от величины относительного внедрения до скола  $\varepsilon_H$  (а) и коэффициента механических свойств разрезаемого материала  $K_\tau$  от величины отношения предела текучести  $\sigma_T$  материала к пределу его прочности при растяжении  $\sigma_b$  (б)

Учитывая современные тенденции [80; 81] к повышению качества готового листа за счёт применения шевронных ножей со сложной формой режущей кромки, существенно отличной от классической, общим недостатком рассмотренных методик является невозможность их применения при определении энергосиловых параметров процесса резки в этом случае, однако данная задача может быть решена путём их развития, адаптации и уточнения.

### 1.3.2 Методики расчёта энергосиловых параметров продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах

Расчёт энергосиловых показателей процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах в целом сводится к определению силы и момента резки, для определения которых широко используются методики П. В. Боровика, А. А. Королева, В. В. Носаля, С. М. Носенко, А. И. Целикова.

А. А. Королевым, исходя из расчётной схемы, представленной на рисунке 1.14, для расчета значения силы резки предложена следующая формула [33]:

$$P = k_1 k_2 k_3 \frac{2 - \varepsilon_n}{4 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_n h^2 \sigma_b, \quad (1.4)$$

где  $k_1 = 0,6 \dots 0,75$  – для мягких и твердых материалов соответственно;

$k_2 = 1,2 \dots 1,3$  – коэффициент, учитывающий притупление ножей;

$k_3 = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент, учитывающий повышение силы при увеличении бокового зазора между ножами при длительном их использовании;

$\sigma_b$  – предел прочности материала;

$\varepsilon_n$  – относительное внедрение ножей в металл до скола;

$h$  – толщина разрезаемого металла.

А. И. Целиковым [72] предлагается определять силу резки путем интегрирования уравнения равновесия установившегося процесса резки:

$$P = \frac{h^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \int_0^{\varepsilon_n} \tau d\varepsilon = \frac{h^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} a, \quad (1.5)$$

где  $\alpha$  – угол приложения равнодействующей силы резки;

$\tau$  – удельное сопротивление резке;

$\varepsilon$  – относительная глубина надреза;  
 $a$  – удельная работа резки, которая определяется по экспериментальным данным или приближенно в зависимости от средней величины сопротивления резке и глубины относительного надреза до скола.

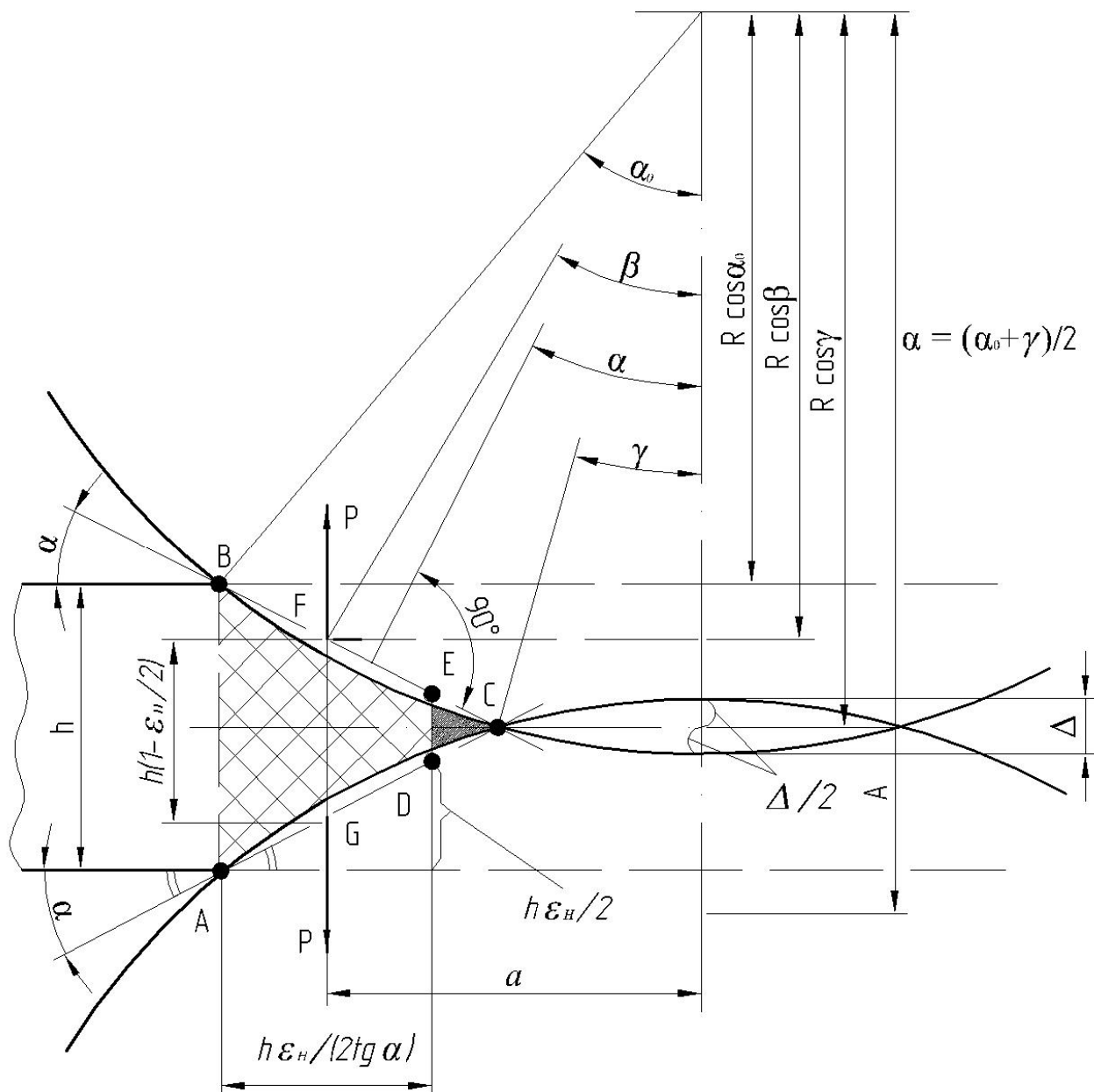


Рисунок 1.14 – Расчетная схема резки дисковыми ножами при симметричном внедрении

Полную силу резки предлагается определять исходя из выражения В. В. Носаля, позволяющего кроме силы резки, учитывать дополнительно еще и



силу изгиба отрезаемой кромки. В частности, предлагается учитывать данную величину путем ввода коэффициента изгиба  $z_1$ , зависящего от отношения ширины отрезаемой полосы к толщине разрезаемого листа [72]:

$$P = P_1 + P_2 = P_1 \left( 1 + z_1 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\delta} \right), \quad (1.6)$$

где  $P_1$  – сила собственно резки, определяется по формуле (1.5);

$P_2$  – сила изгиба отрезаемой части полосы;

$z_1$  – коэффициент изгиба, определяемый графически в зависимости от отношения ширины отрезаемой кромки  $a$  к толщине листа  $h$ ;

$\delta$  – относительное удлинение при испытании на разрыв.

А. М. Сабуровым предложено следующее выражение для определения значения силы резки дисковыми ножами [74; 82–84]:

$$P = r_0 \left[ r_1 \sigma_b h \sqrt{\frac{Dh}{2}} \left( \sqrt{1 + \frac{\Delta}{h}} - \sqrt{1 + \frac{\Delta}{h} - \varepsilon_n} \right) + zh^2 \sigma_b \right], \quad (1.7)$$

где  $r_0$  – коэффициент, учитывающий влияние бокового зазора на силу резки;

$r_1 = 0,45$  – экспериментальный коэффициент пропорциональности;

$D$  – диаметр диска ножа;

$\Delta$  – величина абсолютного перекрытия ножей;

$z$  – коэффициент изгиба, полученный по экспериментальным данным, при этом его характер отличен от используемого В. В. Носалем [72].

Также, в рамках данной методики, предлагается уточнённое выражение для определения величины относительного внедрения ножей в металл до скола применительно к резке дисковыми ножами:

$$\varepsilon_n = (1,6 \div 1,8) \delta. \quad (1.8)$$

Общим для упомянутых методик является конечное выражение для момента резки одной парой ножей:

$$M = P \cdot D \sin \beta. \quad (1.9)$$

Стоит, указать, что в рамках рассмотренных методик значения силы резки рассчитывают исходя из аппроксимации контактных поверхностей хордами, что позволяет провести аналогии с процессом резки гильотинным ножом, однако такой подход приводит к наличию значительной погрешности [74].

В работе [85], предложен подход, позволяющий при расчёте силы резки более конкретно учитывать реальную форму ножа:

$$P = k_1 k_2 k_3 \sigma_b F_{ABCD} = k_1 k_2 k_3 \sigma_b \left[ \frac{(h + \Delta)(l_o^3 - l_{omp}^3)}{3l_o^2} - \Delta(l_o - l_{omp}) \right], \quad (1.10)$$

где  $F_{ABCD}$  – площадь среза;

$l_o$  – общая протяженность очага деформации;

$l_{omp}$  – общая протяженность зоны отрыва.

При этом плечо приложения силы резки предлагается определять следующим образом:

$$l_P = \frac{3(l_o^2 - l_{omp}^2) \left[ (h + \Delta)(l_o^2 + l_{omp}^2) - 2\Delta l_o^2 \right]}{4(h + \Delta)(l_o^3 + l_{omp}^3) - 12\Delta l_o^2 (l_o - l_{omp})}. \quad (1.11)$$

Величина момента резки, приходящегося на одну пару дисков, в данном случае определяется выражением:

$$M = 2Pl_P. \quad (1.12)$$

Особый вклад в понимание процесса продольной резки листового металла проката дисковыми ножами внёс С. М. Носенко, проводивший исследования на дисковых ножницах со смещенным верхним ножом по направлению движения листа линии резки толстых листов стана 2800 [86–88]. В частности, указывается на наличие некоторой точки  $S$  (рис. 1.15), которая делит нейтральным углом  $\gamma$  дугу контакта верхнего ножа с кромкой на две части: реактивную – «отставания», где окружная скорость ножа  $V_n$  больше скорости кромки, и активную – «опережения», где она меньше скорости кромки. Данное явление приводит к тому, что сила трения в зоне «отставания» препятствует резке, а в зоне «опережения» увлекает раскат в ножи и именно этим объясняется неравномерное распределение момента резки между верхним и нижним ножами.

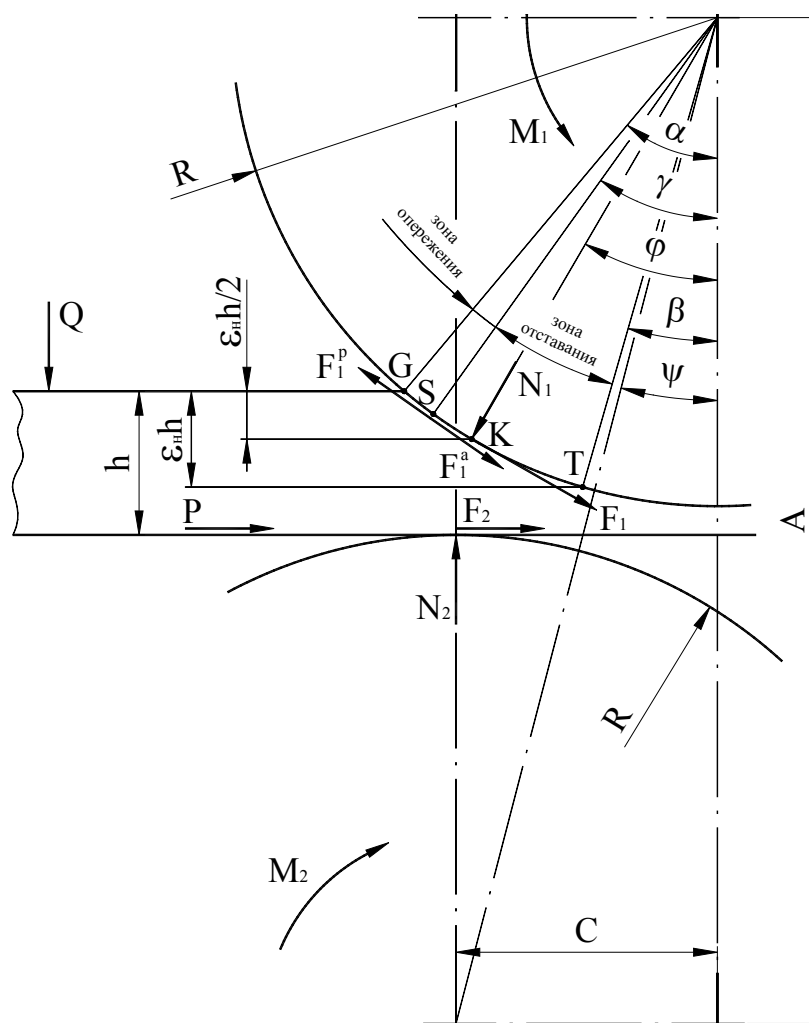


Рисунок 1.15 – Расчетная схема резки дисковыми ножами при несимметричном внедрении

В результате данный подход позволил получить зависимость величины  $N_1$  (см. рис. 1.15), для ножниц толстолистовых станов при условии, что коэффициент трения между ножом и металлом составляет  $0,15 \leq f \leq 0,4$ , а угол резки  $10^\circ \leq \varphi \leq 25^\circ$ :

$$N_1 = \frac{0,41h^2\sigma_b}{\sin 2\varphi} \left[ 1 + \cos \varphi (1,58C_1\beta^2 + 0,139) \right], \quad (1.13)$$

где  $C_1$  – экспериментальный коэффициент, учитывающий влияние отношения ширины отрезаемой кромки к толщине листа, на силу резки;

$\beta$  – угол скола.

Момент резки парой дисков в данном случае определяется следующим выражением:

$$M = 0,955 N_1 \frac{D}{2} \operatorname{tg} \varphi. \quad (1.14)$$

По результатам экспериментальных исследований, проведенных в работе [88], величину относительного внедрения ножей в металл до скола, при резке листов с температурой в интервале  $T = 400 \dots 900^\circ\text{C}$  рекомендуется определять следующим образом:

$$\varepsilon_n = 0,3 + 0,7 \frac{T - 400}{500} \quad \text{при} \quad 400 \leq T \leq 900^\circ\text{C}. \quad (1.15)$$

Учитывая физику протекания процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах, очевидно, что на энергосиловые параметры в данном случае существенное влияние оказывает величина коэффициента трения, которая, исходя из данных, приведенных в работе [89], зависит от ряда факторов и определяется следующими аналитическими зависимостями:

$$f = k_n k_m k_v (0,55 - 0,00024T) \quad \text{при } T \geq 700^\circ\text{C}; \quad (1.16)$$

$$f = k_n k_m k_v (0,5319 - 0,00115T + 1,337 \cdot 10^{-6} T^2) \quad \text{при } T < 700^\circ\text{C}, \quad (1.17)$$

где  $T$  – температура протекания процесса;

$k_n$  – коэффициент, учитывающий состояние поверхности инструмента [89];

$k_m$  – коэффициент, учитывающий процентное содержание углерода в стали (табл. 1.2);

$k_v$  – коэффициент, учитывающий скорость протекания процесса (табл. 1.3).

Таблица 1.2 – Зависимость коэффициента материала  $k_m$  от содержания углерода в стали [89]

Содержание С, %	0,05...0,2	0,2...0,3	0,3...0,5	0,5...0,8	0,8...1,2
$k_m$	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9

Таблица 1.3 – Зависимость коэффициента  $k_v$  от скорости протекания процесса [89]

Скорость, м/с	0...1	2	2,5	3	4	$\geq 5$
$k_v$	1,0	0,9	0,75	0,65	0,55	0,5

В работе [74] разработана методика, в основу которой положено численное рекуррентное решение конечноразностной формы статического равновесия по определению геометрических характеристик и энергосиловых параметров в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объема очага резки.

Согласно данной методики вертикальная составляющая полной силы резки определяется с учетом величины силы изгиба отрезаемой кромки:

$$N_{1y} = \sum_{i=1}^{K_R} N_{1yi}^p \left( 1 + z_1 \frac{2h^2}{(l_n - l_o)(h_{xi1} + h_{xi2})} \right), \quad (1.18)$$

где  $K_R$  количество элементарных объемов  $abcd$  в очаге резки  $ABCD$  (рис. 1.16);

$h$  – толщина листа;

$h_{xi1}, h_{xi2}$  – толщины полосы для начального и конечного граничных сечений каждого отдельно выделенного элементарного объема очага резки, соответственно;

$l_n$  – расстояние между входным сечением и вертикальной осью верхнего дискового ножа;

$l_o$  – расстояние между сечением скола и вертикальной осью верхнего дискового ножа;

$z_1$  – коэффициент изгиба отрезаемой кромки;

$N_{1yi}^p$  – величина вертикальной силы резки, действующей на дисковый нож в рамках выделенного элементарного объёма:

$$N_{1yi}^p = \tau_{xi} F_{xi}; \quad (1.19)$$

$\tau_{xi}$  – текущее значение напряжения сопротивления срезу для выделенного элементарного объема;

$F_{xi}$  – площадь выделенного элементарного объема.

Момент резки верхним ножом:

$$M_1 = \sum_{i=1}^{K_R} \frac{N_{1yi}}{\cos(\alpha_i)} R f_1 \text{sign}(\alpha_i - \gamma) = \sum_{i=1}^{K_R} \frac{\tau_{xi}}{\cos(\alpha_i)} \frac{h_{xi1} + h_{xi2}}{2} \Delta x R f_1 \text{sign}(\alpha_i - \gamma), \quad (1.20)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения между верхним диском и кромкой;

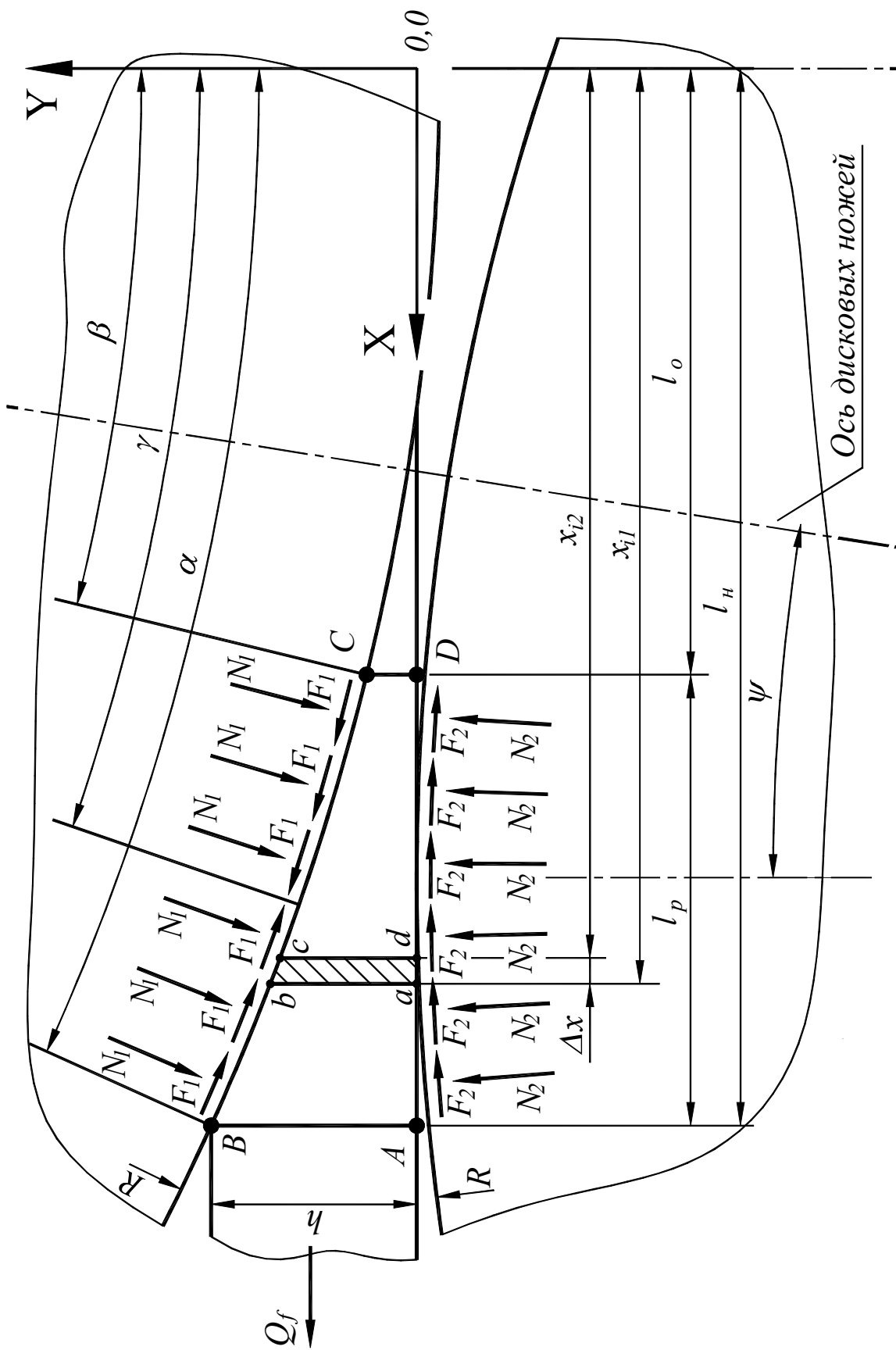


Рисунок 1.16 – Расчетная схема интегрального очага контакта ножей с полосой [74]

$sign(\alpha_i - \gamma)$  – функция знака, учитывающая направление силы трения, а соответственно, и момента резки, на контактной площадке выделенного элементарного объема и принимающая значения:

$$sign(\alpha_i - \gamma) = \begin{cases} 1 & (\alpha_i - \gamma) > 0 \\ 0 & \text{при } (\alpha_i - \gamma) = 0. \\ -1 & (\alpha_i - \gamma) < 0 \end{cases} \quad (1.21)$$

Момент резки нижним ножом:

$$\begin{aligned} M_2 &= \sum_{i=1}^{K_R} N_{2i} R f_2 = \sum_{i=1}^{K_R} N_{1yi} R (f_2 + f_1 f_2 \operatorname{tg}(\alpha_i) \operatorname{sign}(\alpha_i - \gamma)) = \\ &= \sum_{i=1}^{K_R} \tau_{xi} \frac{h_{xi1} + h_{xi2}}{2} \Delta x R (f_2 + f_1 f_2 \operatorname{tg}(\alpha_i) \operatorname{sign}(\alpha_i - \gamma)), \end{aligned} \quad (1.22)$$

где  $f_2$  – коэффициент трения между нижним диском и листом.

Окончательно, суммарный момент резки парой дисков будет равен:

$$M = M_1 + M_2. \quad (1.23)$$

Стоит отметить, что данная методика, среди рассмотренных, наиболее полно описывает процесс продольной резки листовых раскатов дисковыми ножами в горячем состоянии, поскольку положенный в её основу метод позволяет учитывать реальную форму ножа, а также направление сил трения на контактной поверхности, это делает возможным получение распределения моментов между верхним и нижним дисковыми ножами.

Проведенный обзор существующих методик по определению энергосиловых параметров рассмотренных процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката свидетельствует о наличии различных подходов к



решению данной задачи. Однако наиболее точных результатов позволяют добиться методики, учитывающие реальную форму режущего инструмента, а также ряд дополнительных технологических параметров, таких как: изгиб отрезаемой части листа, зазор между ножами и др., в различной степени влияющих на энергосиловые показатели процесса резки.

#### 1.4 Перспективы развития технологии и оборудования процессов резки толстолиствого металлопроката на ножницах

В условиях современного рынка металлопродукции постоянно растёт спрос на листовую металлопрокат, также повышаются требования к качеству готового листа [90–95], что требует как развития технологии его производства в целом, так и отдельно взятых операций. В то же время работа ножниц существующих конструкций [28; 94] характеризуется периодическим или постоянным проявлением различных дефектов готового листа.

В частности практика применения для поперечной резки листовых раскатов шевронного ножа с классической формой режущей кромки показала наличие остаточной деформации части листа, находящейся под ножом в момент резки. В основном, данный дефект не превышает требований к плоскостности готового листа, однако существенно портит его товарный вид и, в ряде случаев, требует дополнительной обработки (рис. 1.17, а, б) [91].

Существует несколько технических решений [80; 81], направленных на снижение данного дефекта. Так сотрудниками НКМЗ [80] предлагается снизить величину остаточной деформации листа путём выполнения ступенчатых снижений в центральной части режущей кромки относительно её вертикальной оси симметрии (рис. 1.18), однако, в виду отсутствия конкретных рекомендаций относительно параметров предложенных конструктивных элементов, не представляется возможным оценить эффективность данного решения.



а)

б)

Рисунок 1.17 – Вид торцевой поверхности листов, порезанных классическим шевронным ножом: общий (а) и в области смыкания режущих кромок (б)

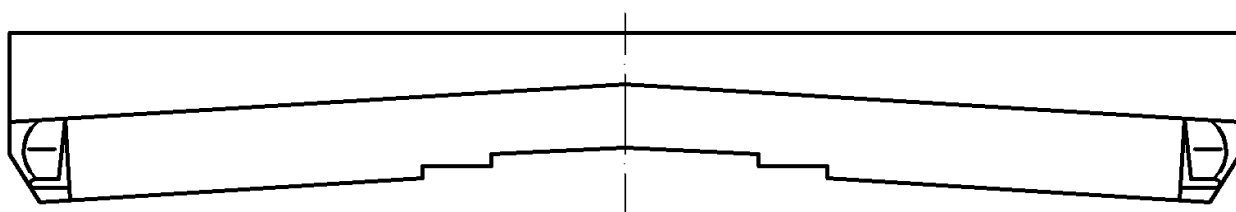


Рисунок 1.18 – Шевронный нож со сложной формой режущей кромки конструкции «НКМЗ» [80]

В работе [81] предполагается выполнение горизонтальной площадки, в вершине схождения режущих кромок (рис. 1.19), длина которой  $l$  определяется из следующего выражения:

$$l = \frac{1,973 \cdot \sigma_T \cdot b}{\sigma_b \cdot \cos(\alpha)}, \quad (1.24)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести разрезаемого материала, МПа;

$b$  – толщина ножедержателя с режущей пластиной, мм;

$\sigma_b$  – предел прочности разрезаемого материала, МПа;

$\alpha$  – угол наклона прямолинейных плоскостей торцевой поверхности пластины к горизонтальной плоскости.

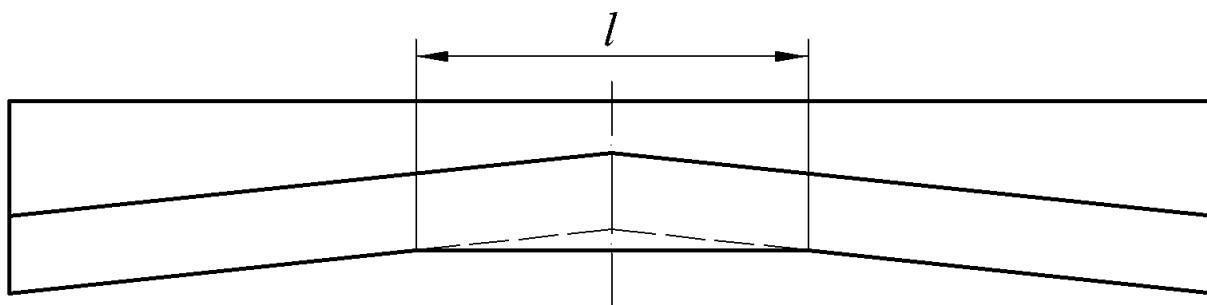


Рисунок 1.19 – Шевронный нож со сложной формой режущей кромки конструкции «Северсталь» [81]

Известно, что применение ножа конструкции «Северсталь» сопровождается существенным увеличением прикладываемой силы на завершающей стадии резки [91]. В то же время теоретическая оценка данной величины, для ножей рассмотренных конструкций на данном этапе возможна только путём математического моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ), что требует значительных временных и трудовых затрат, а также высокой вычислительной мощности применяемых ЭВМ.

Таким образом, одним из перспективных направлений для дальнейшего развития процесса поперечной резки листового металлопроката может послужить разработка новой конструкции ножа, позволяющей снизить величину остаточной деформации отрезаемой части листа, при этом данная задача может быть решена, только при соответствующем развитии методик по определению энергосиловых показателей данной разделительной операции.

Относительно процесса продольной резки листового металлопроката на ножницах, в частности, процесса обрезки боковых кромок готового листа, стоит отметить возможность появления серповидности (рис. 1.20), что существенно портит товарный вид продукции и может послужить причиной выбраковки, в виду несоответствия предъявляемым нормам (ГОСТ 13345-85). При этом появление данного дефекта, очевидно, связано с неточностью в настройке дисковых ножниц, а также различием условий контакта на противоположных парах дисковых ножей, что может быть обусловлено поверхностными дефектами листа.

В то же время, очевидно, что величина данного дефекта может быть значительно уменьшена путём ограничения при резке свободы листа в горизонтальной плоскости, т.е. фактически исключения его поворота. При этом стоит учитывать современные тенденции развития процесса производства листового проката [96–98], которые, кроме прочего, выражаются в совмещении различных технологических процессов с целью расширения их возможностей, повышения качества продукции и снижения энергозатрат на их реализацию при обеспечении возможности использования неприводных устройств [99–101].

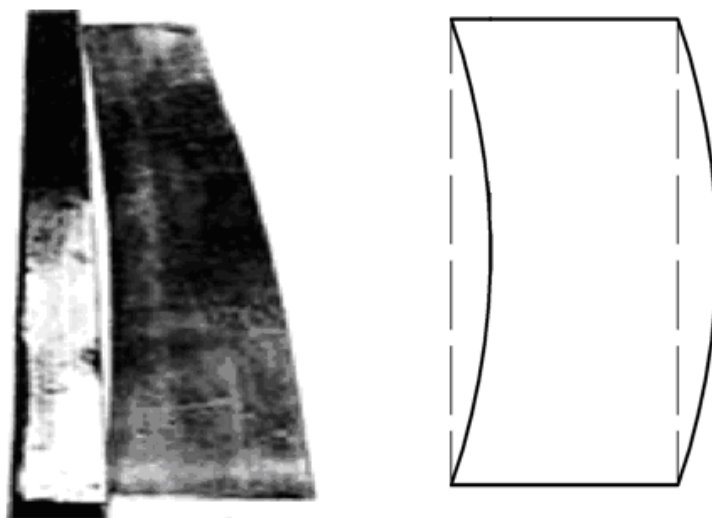


Рисунок 1.20 – Серповидность листа, возникающая при резке на дисковых ножницах

Кроме серповидности характерной особенностью процесса резки листового металлопроката на ножницах в горячем состоянии является появление прикромочного утонения [74; 102–105], характеризуемое величиной утонения  $m$  на протяжении  $n$  у кромки готового листа (рис. 1.21). В результате не удовлетворяются требования по минусовому допуску, что приводит к понижению качества готовой продукции. При этом в работах [74; 106–110] предложено техническое решение (рис. 1.22), направленное на повышение качества готового листа, разрезаемого в горячем состоянии, за счёт локализации границ пластической деформации в зоне реза металла путём использования для резки листовых раскатов дисковых ножей с конструктивным элементом, что позволяет

уменьшить величину указанного дефекта. Также применение данного технического решения позволяет расширить сортамент листов, разрезаемых на дисковых ножницах в горячем состоянии.

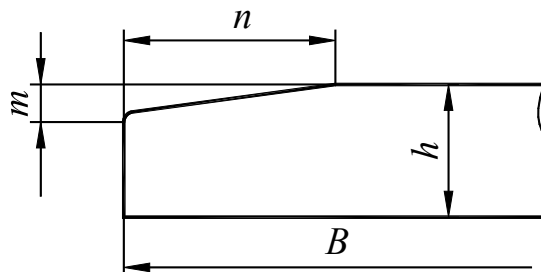
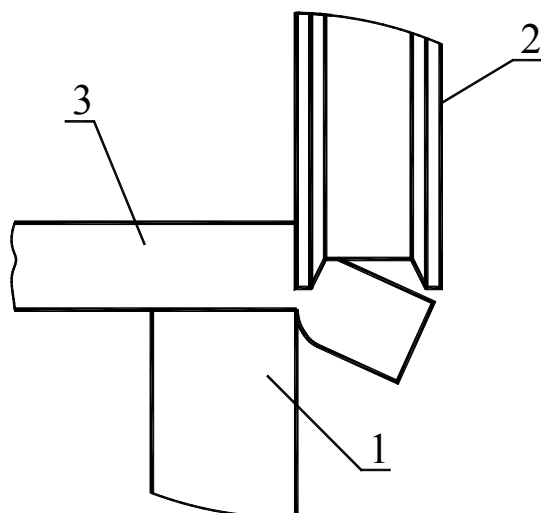


Рисунок 1.21 – Явление прикромочного утонения



1 – нижний дисковый нож; 2 – верхний дисковый нож с конструктивным элементом; 3 – разрезаемый материал [74; 106–110]

Рисунок 1.22 – Конструктивная схема дисковых ножниц

Исходя из перечисленных недостатков процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах, в качестве возможного направления для дальнейшего совершенствования данной технологической операции следует рассматривать повышение качества готового листа, в частности, путём совмещения нескольких технологических процессов, а также совершенствования конструкции применяемых дисковых ножниц с целью повышения их технико-технологических и эксплуатационных показателей.

## ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 1

1. Дальнейшее развитие производства толстых листов обусловлено тенденцией, направленной на повышение качества готовой металлопродукции, в частности путём расширения возможностей существующего и вновь проектируемого оборудования, применяемого для продольной и поперечной резки листового металлопроката, а также совершенствования данных технологических операций в целом при условии минимизации энергозатрат на их реализацию.

2. Одним из перспективных направлений для дальнейшего развития процесса поперечной резки листового металлопроката может послужить разработка новой конструкции ножа, позволяющей снизить величину остаточной деформации отрезаемой части листа, при этом данная задача может быть решена, только при соответствующем развитии методик по определению энергосиловых показателей данной технологической операции.

3. В качестве направления для дальнейшего совершенствования процесса обрезки боковых кромок на дисковых ножницах следует рассматривать повышение качества готового листа вследствие исключения серповидности, что может быть достигнуто за счёт ограничения при резке свободы перемещения листа в горизонтальной плоскости путём совершенствования конструкции применяемых дисковых ножниц, а также технологической операции продольной резки в целом.

## РАЗДЕЛ 2

### ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Повышение качества листов разрезаемых на ножницах за счёт совершенствования технологии и оборудования процессов резки как основное направление исследований

Исходя из анализа, проведенного в разделе 1, очевидно, что производство толстолиствого проката сопряжено с рядом проблем, касающихся процессов продольной и поперечной резки листа, среди которых можно выделить:

- остаточную деформацию листа при применении для поперечной резки шевронного ножа классической конструкции;
- ограничение сортамента листов, разрезаемых на дисковых ножницах;
- возможная серповидность листа после резки на дисковых ножницах;
- явление прикромочного утонения листа при резке в горячем состоянии.

Кроме того, несовершенство существующих методов расчёта энергосиловых параметров процесса резки листового металлопроката может повлиять на точность вычислений, а также они могут оказаться неприменимы для новых способов реализации данной операции. Указанные проблемы, в рамках данной работы, могут быть решены путем выполнения следующих задач:

- провести анализ состояния вопроса, определить основные проблемы, характерные для процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах, а также наметить пути их решения;
- установить закономерности влияния параметров режущего инструмента на энергосиловые показатели процесса резки и качество листового металлопроката;
- разработать методики и программные средства для автоматизированного расчета энергосиловых и кинематических параметров процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах;

- провести экспериментальную оценку адекватности используемых методов расчета энергосиловых и кинематических параметров процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах;

- разработать практические рекомендации по совершенствованию технологии и оборудования процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах.

Применение математического моделирования при определении энергосиловых параметров позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на вычисления, а также даёт возможность предварительной оценки принимаемых проектно-конструкторских решений. Однако необходимо проведение экспериментальных исследований с целью оценки степени достоверности полученных результатов при этом следует использовать максимально доступные средства, позволяющие получать необходимые результаты при минимальных затратах.

## 2.2 Выбор и обоснование методов теоретических исследований процессов резки листового металлопроката на ножницах

Разработка комплекса теоретических методов исследования, сочетание которых даст возможность с наибольшей достоверностью оценивать эффективность принимаемых решений, а также всесторонне изучить исследуемую проблему, является одной из наиболее важных задач.

Основной целью теоретического исследования процессов резки листового металлопроката на ножницах является оценка влияния основных технологических и конструкционных параметров разделительного процесса на его качественные и энергосиловые показатели. При этом, с учётом современного уровня развития вычислительной техники, достижение указанной цели может быть выполнено при помощи математического моделирования, в частности, с применением метода конечных элементов (МКЭ), который широко используется для решения задач обработки металла давлением [111–116], что обусловлено



развитием его теоретических основ и достаточной мощностью современных ЭВМ. Суть данного метода заключается в дискретизации исследуемой области путем её разбиения на конечное число элементов, причём для моделирования процессов обработки металлов давлением наиболее применимы конечные элементы, моделирующие поведение сплошной деформируемой среды [111].

Одним из преимуществ применения МКЭ для моделирования процессов обработки металлов давлением является возможность определения энергосиловых показателей процесса разделения металла в случае применения новых способов реализации данной операции, для которых не подходят существующие методики. Также данный подход позволяет существенно расширить число учитываемых факторов. При этом адекватность результатов моделирования может быть обеспечена только в случае правильного выбора способа, учитывающего истощение материалом способности к деформированию и наступления начала разрушения, а также корректного описания условий контакта между инструментом и материалом при условии адекватного подхода к численной реализации. Выполнение указанных условий производилось на основании результатов проводимых ранее исследований процессов разделения металла на ножницах [117–169]. При этом данные задачи, как правило, решаются с применением формулировки Лагранжа-Эйлера [112], в которой обеспечивается возможность непрерывного перестроения (адаптации) сетки. Процесс разрушения металла рассматривается как вязкое разрушение – необратимое нарушение сплошности металла, сопровождаемое заметной пластической деформацией и значительным расходом энергии, при котором происходит разделение деформируемого твердого тела на части вследствие распространения в теле макроскопических трещин. При этом в материале наблюдается накопление повреждений – нарушение пластического равновесия, обусловленное разрыхлением материала, которое ведет к локализации деформации и последующему разрушению, моделируемому методом исключения элементов из расчета, после истощения ресурса пластичности [112; 113]. При этом для описания условий контакта между инструментом и материалом может быть использован закон трения Амонтона-Кулона, на основе известных аналитических описаний [3; 89].

С учётом специфики рассматриваемых процессов разделения при разработке модели с применением МКЭ целесообразно использовать трехмерный подход, при этом с целью сокращения объемов вычисления, в рассмотрении может находиться только одна симметричная часть модели. В качестве среды для моделирования с применением МКЭ может быть использован программный комплекс ABAQUS в виду достаточного количества справочной информации относительно его применения [112–115].

Однако стоит указать, что практическое применение МКЭ сопряжено с определёнными трудностями, связанными с необходимостью использования ЭВМ высокой вычислительной мощности, а также достаточной квалификацией пользователей, что приводит к необходимости разработки альтернативных методик расчёта, позволяющих отказаться от МКЭ в пользу более доступных средств математического моделирования, которые более подходят к применению в условиях производства.

Учитывая опыт предыдущих исследований [74] при выборе методик и подходов к двумерному математическому моделированию с целью повышения точности расчёта энергосиловых параметров придерживались следующих основных тенденций: учет реальной формы используемого инструмента и адекватное описание изменения механических свойств разрезаемого металла по мере внедрения ножа в зависимости от исходных параметров процесса разделения. Данный подход, применительно к процессам резки листового металлопроката на ножницах, подразумевает использование (в качестве основного метода описания напряженно-деформированного состояния металла) численного рекуррентного решения конечноразностной формы условия статического равновесия выделенных элементарных объемов очага резки путём его разбиения на конечное множество данных элементарных объемов [74; 161; 170].

В качестве среды для создания математических моделей рассматриваемых процессов продольной и поперечной резки был выбран программный комплекс MATLAB в виду его доступности и наличия достаточного функционала для решения поставленных задач [171–173].

### 2.3 Выбор методов и оборудования для экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката на ножницах

Оценка адекватности результатов теоретических исследований, как правило, проводится экспериментальным путём с применением методов планирования эксперимента [112; 174–176]. Сравнение экспериментальных данных и соответствующих им, полученных расчётным путём (с применением разработанных математических моделей) может быть выполнена базе корреляционного и регрессионного анализа [177–180] при этом степень их достоверности устанавливается с применением тестов Фишера и Стьюдента [178; 180], а также по величине средней относительной ошибки аппроксимации [180]. Полученные результаты в дальнейшем могут служить базой для принятия инженерно-технических решений и разработки рекомендаций относительно совершенствования технологии и оборудования процессов резки листового металлопроката на ножницах с целью повышения качества готовой продукции и расширения возможностей рассматриваемых технологических операций в целом.

В рамках данной работы лабораторные исследования процесса поперечной резки листового металлопроката проводились на установке пресс-ножниц кафедры «Механика и пластическое формование» Донбасской государственной машиностроительной академии (рис. 2.1). Реализация процесса резки пресс-ножницами осуществлялась при помощи лабораторного гидравлического прессы с максимальной нагрузкой 5 МН. Разделительная операция на данных пресс-ножницах производится путём смыкания верхнего 1 и нижнего 2 суппортов с закрепленными в них ножами 3, при этом предусмотрена возможность фиксации листа в процессе резки прижимом 4. После окончания процесса резки верхний суппорт возвращается в начальное положение пружинами 5.

Для оценки энергосиловых параметров процесса резки применяли измерительную систему, представленную на рисунке 2.2, включающую в себя две

симметрично расположенные месдозы 1, 2, построенные по мостовой схеме, с пределом измерения  $\leq 200$  кН, при этом использовались тензорезисторы 3 с номинальным сопротивлением  $R = 75$  Ом, сигнал с которых поступал на тензометрический усилитель 4 («Топаз-3»), с последующей обработкой аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) 5 (фирмы L-card, модель E-154 (рис. 2.3, а)) и вводом в ЭВМ 6 с использованием штатного программного обеспечения.

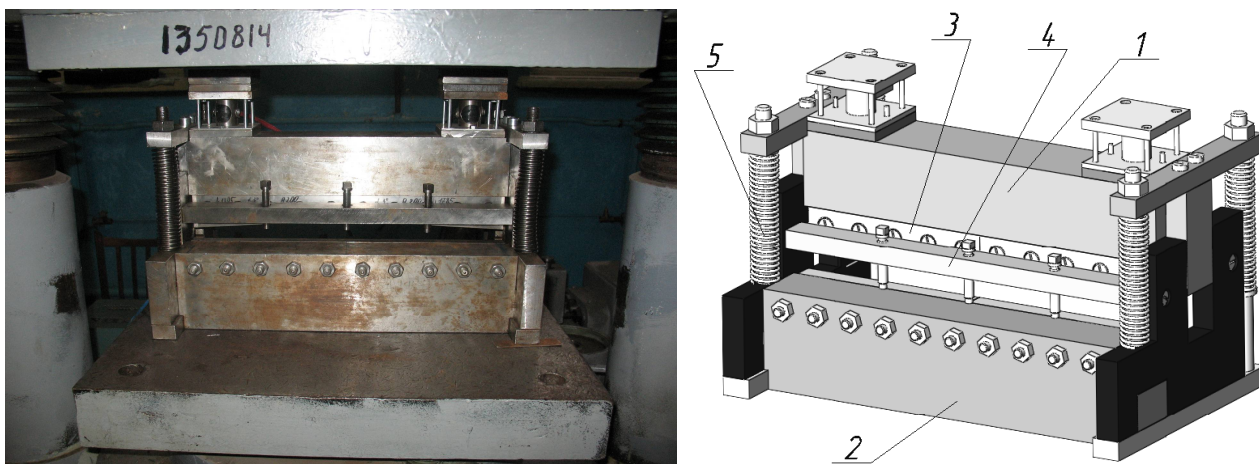


Рисунок 2.1 – Общий вид пресс-ножниц кафедры «Механика и пластическое формование» Донбасской государственной машиностроительной академии

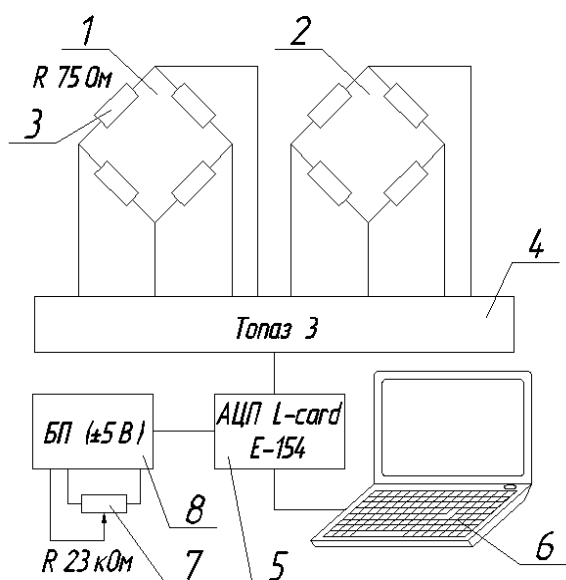


Рисунок 2.2 – Измерительная система лабораторных пресс-ножниц кафедры «Механика и пластическое формование» Донбасской государственной машиностроительной академии

Также контролировали перемещение ножа при резке путём установки соответствующего датчика, построенного на базе переменного резистора (см. рис. 2.2, поз. 7) ползункового типа с максимальным сопротивлением  $R = 23$  (кОм) (рис. 2.3, б). В основу датчика перемещения был положен принцип делителя напряжения с независимым питанием от дополнительного источника напряжения (см. рис. 2.2, поз. 8).



а)

б)

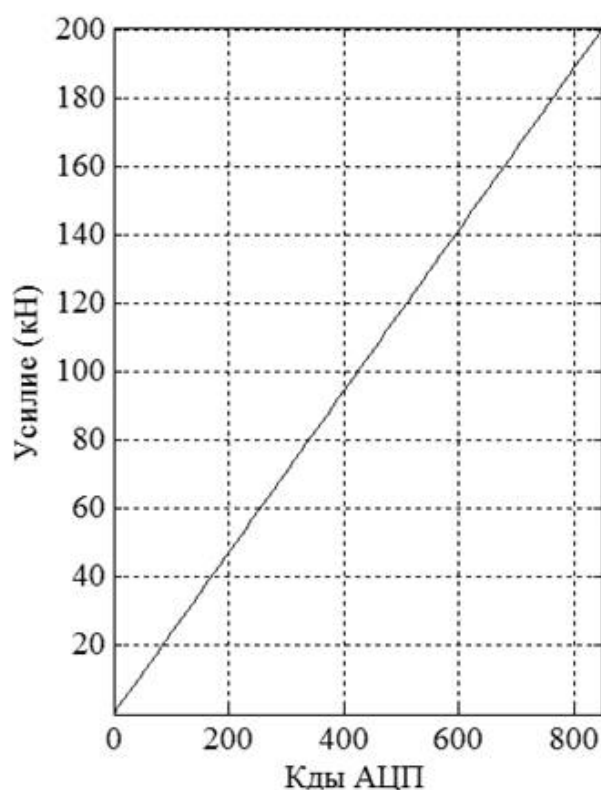
Рисунок 2.3 – Аналогово-цифровой преобразователь E-154 (а) и датчик перемещения суппорта пресс-ножниц (б)

Перед проведением опытов производили тарировку используемых месдоз на гидравлическом прессе, максимальная нагрузка которого составляет 500 кН, посредством последовательного ступенчатого нагружения с заданным интервалом. Также тарировали датчик перемещения при помощи электронного штангенциркуля путём перемещения суппорта с заданным шагом с последующей фиксацией показаний. На рисунке 2.4 представлено фото процесса тарировки месдоз, а также полученная тарировочная зависимость, обобщённый анализ которой указывает на линейную связь между сопоставляемыми величинами, следовательно возможно применение фиксированного тарировочного коэффициента для количественной оценки данных, получаемых после оцифровки сигнала.





а)

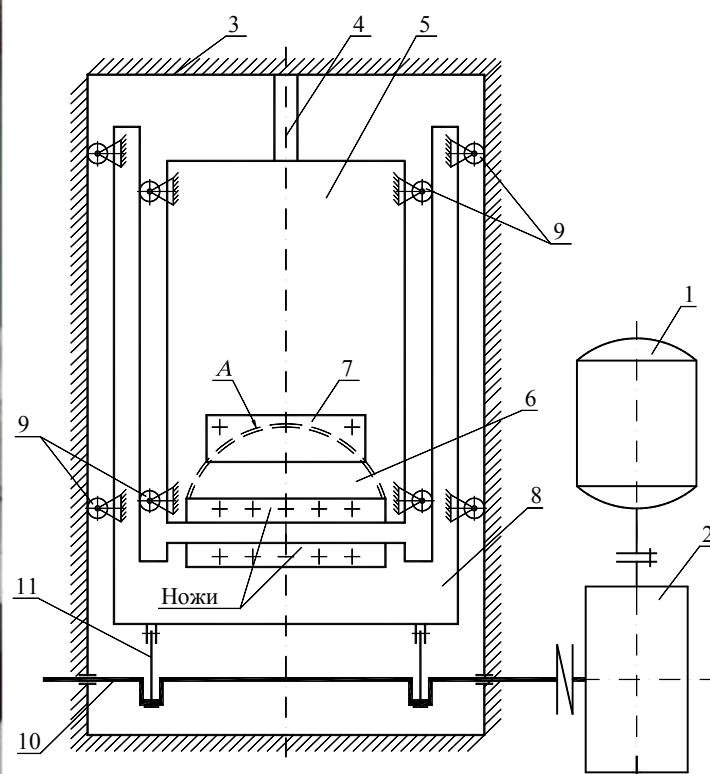


б)

Рисунок 2.4 – Фото процесса тарировки месдоз (а) и тарировочная зависимость (б)

Также с целью расширения представления о протекании процесса поперечной резки в рамках данного исследования проводились эксперименты на лабораторных ножницах с параллельным расположением суппортов кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета, конструкция которых представлена на рисунке 2.5 [74; 181]. Ножницы выполнены с подвижным нижним суппортом и рассчитаны на разрезание стальных полос шириной до 200 мм и максимальной силой резки 200 кН. Максимальный ход нижнего ножа составляет 35 мм. Угол наклона верхнего (неподвижного) ножа изменяется дискретно через  $3^\circ$  в интервале от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ .

Привод ножниц осуществляется от электродвигателя 1 типа МА-203-2-6 ( $N = 18 \text{ кВт}$ ,  $n = 960 \text{ мин}^{-1}$ ) через одноступенчатый червячный редуктор 2 с глобоидным червяком ( $u = 59$ ).



а)

б)

1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – рама; 4 – месдоза; 5 – верхний суппорт;  
 6 – зубчатый сектор; 7 – крепежная планка; 8 – нижний суппорт;  
 9 – подшипники; 10 – эксцентриковый вал; 11 – шатун

Рисунок 2.5 – Общий вид лабораторных гильотинных ножниц (а) и их конструкция (б) [74; 181]

Режущий механизм ножниц смонтирован на раме 3, которая воспринимает силу резки через месдозу 4 от верхнего неподвижного суппорта 5. В суппорте фиксируется зубчатый сектор 6 с закрепленным в нем ножом. Угол наклона ножа изменяется путем поворота зубчатого сектора. Контакт сектора 6 с верхним суппортом 5 осуществляется по поверхности *A* зубчатой обоймы, выполненной по сегменту окружности. Зубчатое зацепление сектора и обоймы обеспечивает фиксацию угла наклона ножа и предотвращает поворот сектора в процессе работы. После установки сектора в обойму осуществляется крепление сектора к суппорту при помощи крепежной планки 7 и болтов.

Перемещение нижнего суппорта 8 осуществляется в направляющих пазах рамы 3 и верхнего суппорта 5 при помощи подшипников 9, выполняющих функцию роликов, поскольку наружные кольца подшипников перекатываются по направляющим пазам. Возвратно-поступательное движение нижнему суппорту сообщается от червячного редуктора 2 посредством эксцентрикового вала 10 ( $e = 25 \text{ мм}$ ) через шатуны 11 [74; 181].

Для измерения силы резки была использована измерительная система, схема которой аналогична описанной выше (см. рис. 2.2) с тем отличием, что в данном случае применялась одна мездоза кольцевого типа с пределом измерения  $\leq 50 \text{ кН}$  (рис. 2.6, а) тарировку которой осуществляли по образцовому динамометру, путем их последовательной установки в силовую цепь с шаровым элементом между контактными поверхностями и последующим совместным нагружением (рис. 2.6, б).

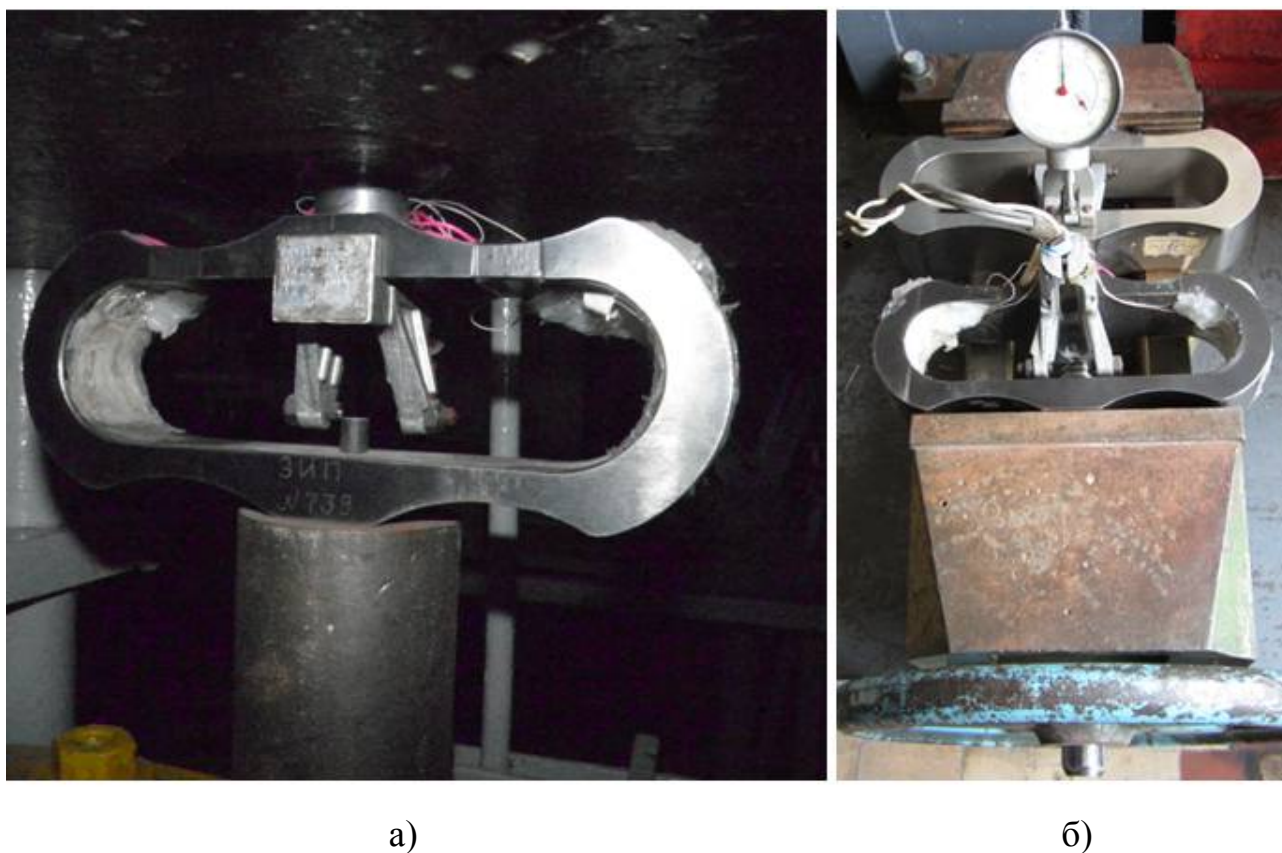


Рисунок 2.6 – Фото используемой мездозы кольцевого типа (а) и процесса её тарировки (б)



Так же, как и в предыдущем случае, при проведении опытов фиксировали перемещение суппорта при резке при помощи соответствующего датчика, построенного на базе переменного резистора со шкивом, установленным на ручку регулировки (рис. 2.7). Тарировку датчика, как и в предыдущем случае, проводили при помощи штангенциркуля, последовательно смещая суппорт с фиксированным шагом.

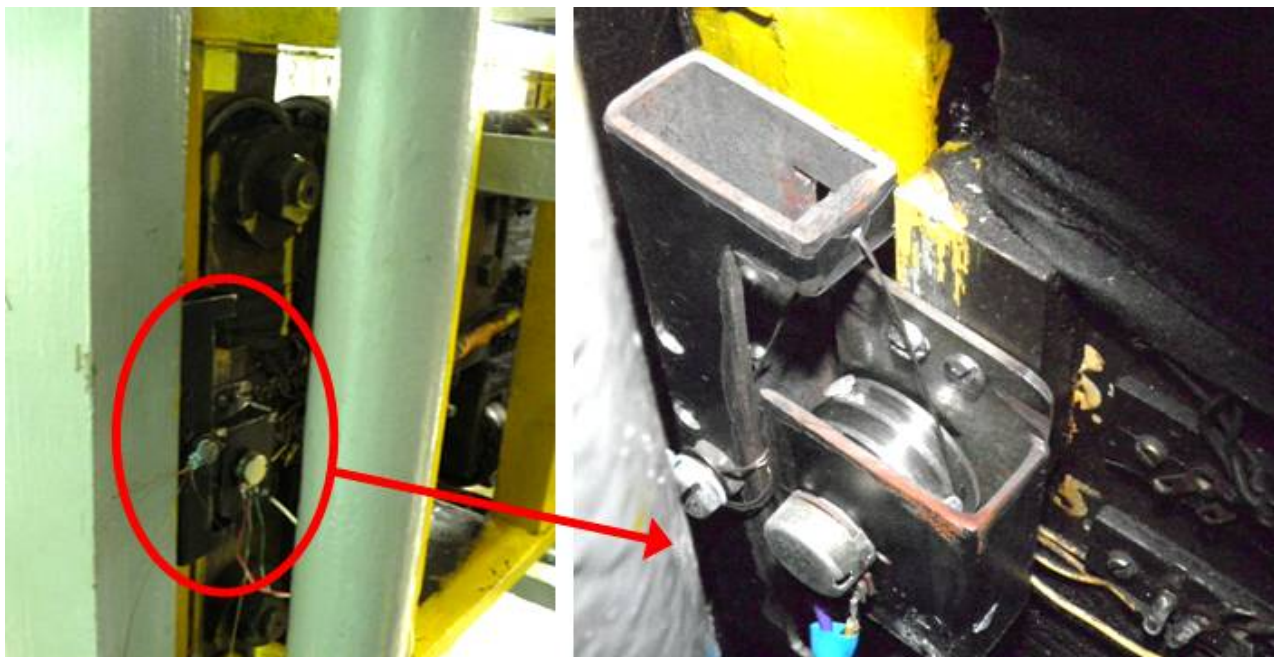
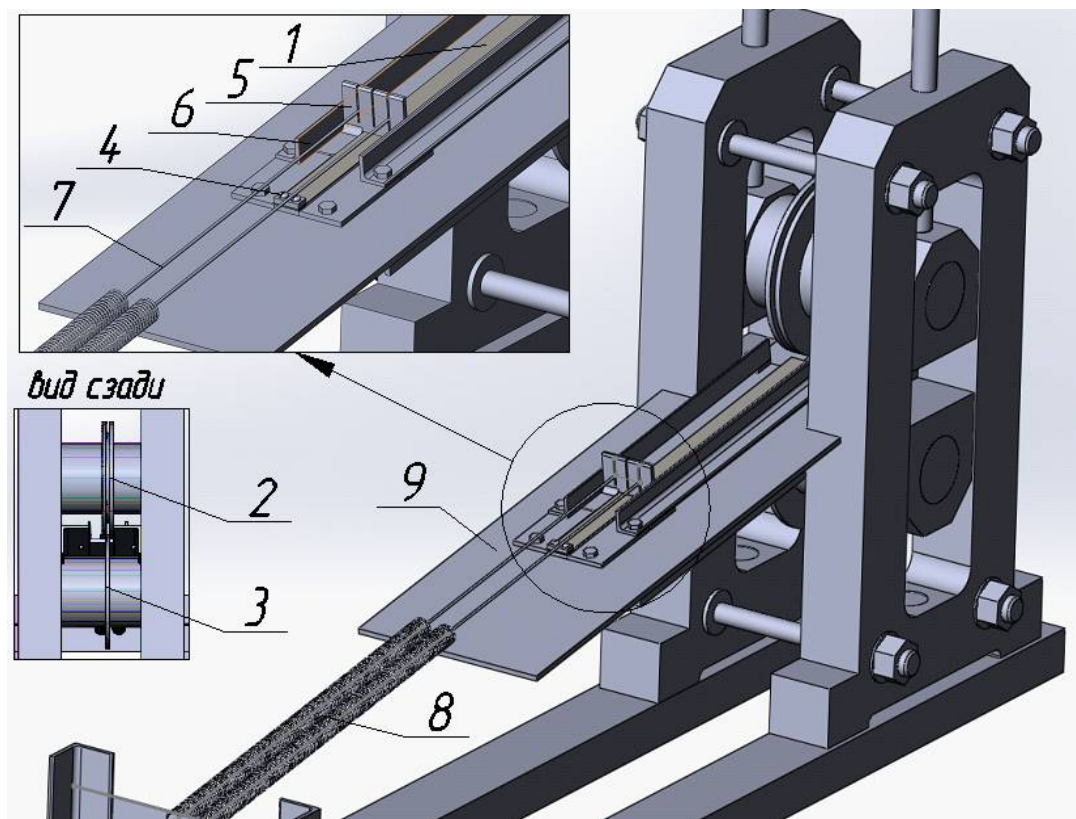


Рисунок 2.7 – Датчик перемещения суппорта лабораторных гильотинных ножниц

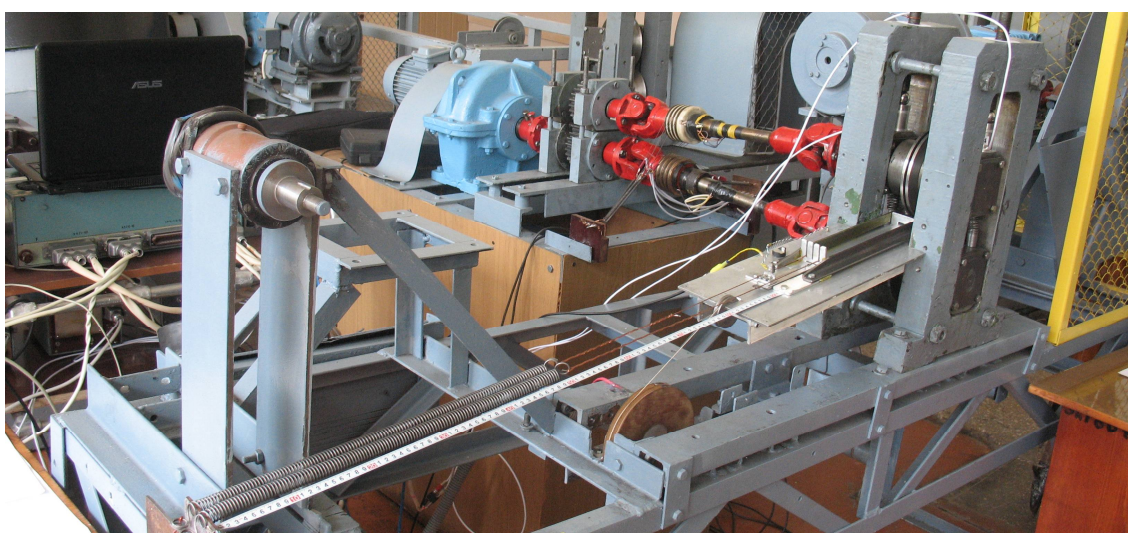
2.4 Выбор методов и оборудования для экспериментальных исследований энергосиловых и кинематических параметров процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах

Одним из направлений экспериментальных исследований, проводимых в рамках данной работы, являлась оценка энергосиловых и кинематических параметров процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах. С этой целью на базе лабораторной прокатной клетки кафедры «Ав-

томатизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии, была создана установка двухпарных дисковых ножниц (рис. 2.8).



а)



б)

Рисунок 2.8 – Схема (а) и фото (б) установки дисковых ножниц кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии

Данная установка работает следующим образом: разрезаемая полоса 1 за­даётся между верхними 2 и нижним 3 ножами, затем происходит надрез полосы до момента касания фиксатором 4 ползунка 5, ограниченного направляющими 6, при этом к нему, при помощи стяжек 7, прикреплены пружины 8, посредством деформации которых моделируется «натяг» полосы при резке. При этом стол 9 был установлен под углом к горизонтальной плоскости, что эквивалентно наклону оси дисков, применяемому в известных конструкциях дисковых ножниц [74; 86] с целью интенсивного отгиба отрезаемой кромки, с последующей подачей её на кромкокрошители.

Резка на данных ножницах производится при следующих настройках:

- диаметр дисков 155 мм;
- перекрытие между дисками 0,5 мм;
- угол наклона стола  $9^\circ$ ;
- максимальная сила, создаваемая пружинами 0,4 кН;
- зазор между дисками 0,05 мм;

Привод установки (рис. 2.9) осуществлялся от мотор-редуктора 1 типа МЦ2С-63 ( $N = 0,55 \text{ кВт}$ ,  $n = 40 \text{ мин}^{-1}$ ) через одноступенчатый цилиндрический редуктор 2 типа 1ЦУ-160 ( $u = 4$ ), далее на шестеренную клетку 3, с которой посредством универсальных шпинделей 4 на рабочие валки 5 с установленным на них комплектом дисковых ножей.

Для оценки энергосиловых и кинематических параметров процесса резки в данном случае применяли более сложную измерительную систему, представленную на рисунке 2.10. В данной измерительной системе использованы три измерительных моста, из которых два установлены на верхнем 1 и нижнем 2 валах ножей и применяются для измерения моментов резки, а мост 3 составляют две симметрично расположенные месдозы, которые применяются для измерения силы резки. Сигнал с измерительных мостов, аналогично предыдущей схеме, поступает на тензометрический усилитель 4 (Топаз-3), с последующей обработкой аналогово-цифровым преобразователем 5 и вводом в ЭВМ 6 с использованием штатного программного обеспечения.



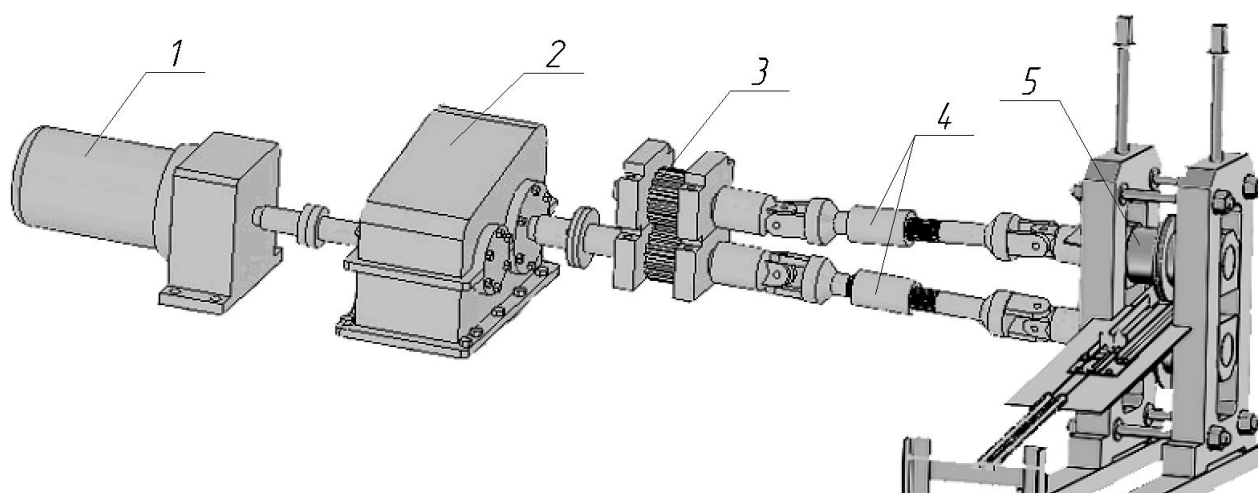


Рисунок 2.9 – Схема привода лабораторной установки дисковых ножниц кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии

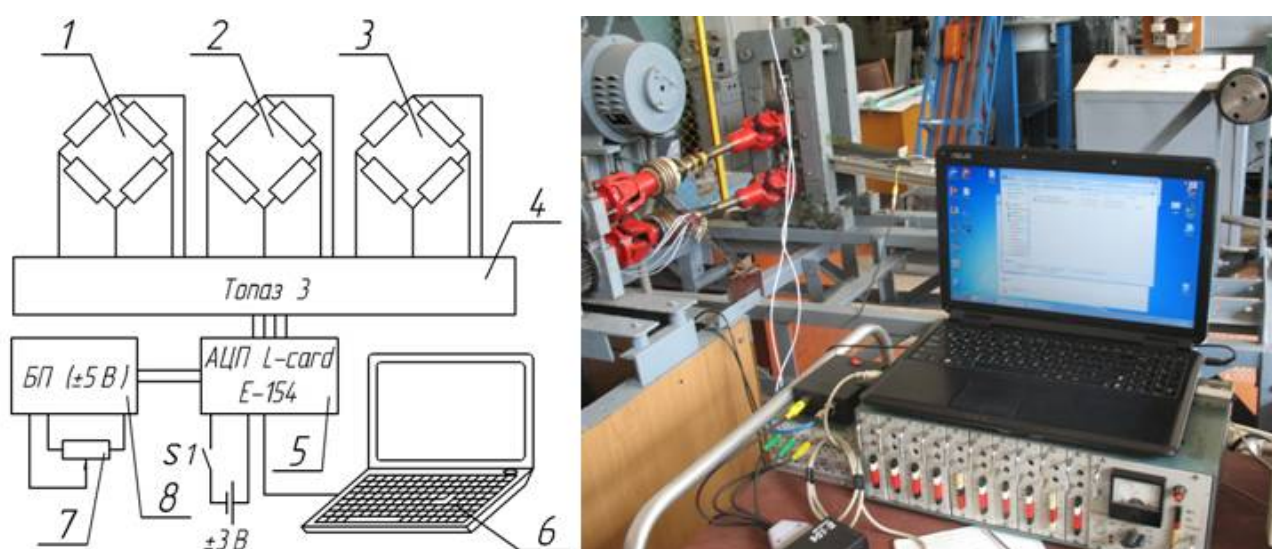


Рисунок 2.10 – Измерительная система лабораторной установки дисковых ножниц кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии

Также данная схема позволяет фиксировать момент начала деформации пружин благодаря наличию в ней нормально-разомкнутой кнопки S1 (отдельно представлена на рисунке 2.11, а), которая срабатывает в момент контакта фиксатора с ползунком и, замыкая цепь, позволяет чётко идентифицировать момент начала приложения «натяга» полосы, что в последующем необходимо для корректной обработки данных.

С целью фиксирования скорости полосы в процессе резки, а также определения силы «натяга» был установлен датчик перемещения 7 (отдельно представлен на рисунке 2.11, б), построенный как и в предыдущем случае на базе переменного резистора, по принципу делителя напряжения с питанием от дополнительного источника 8 (см. рис. 2.10).



а)

б)

Рисунок 2.11 – Индикатор начала деформации пружин (а) и датчик перемещения полосы (б)

Перед проведением опытов проводили тарировку, при этом датчики на валах тарировали путём нагружения их фиксированным моментом, для чего производили заклинивание шестерённой клетки и при помощи специального рычага установленной длины с комплектом грузов (рис. 2.12) производили последовательное нагружение с установленным шагом. Тарировку месдоз проводили при помощи ручного масляного прессы с максимальной допустимой нагрузкой 50 кН, а тарировку датчика перемещения, как и в предыдущем случае, выполняли при помощи электронного штангенциркуля.

Часть опытов по продольной резке листового материала проводилась на лабораторной установке однопарных дисковых ножниц кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (рис. 2.13).



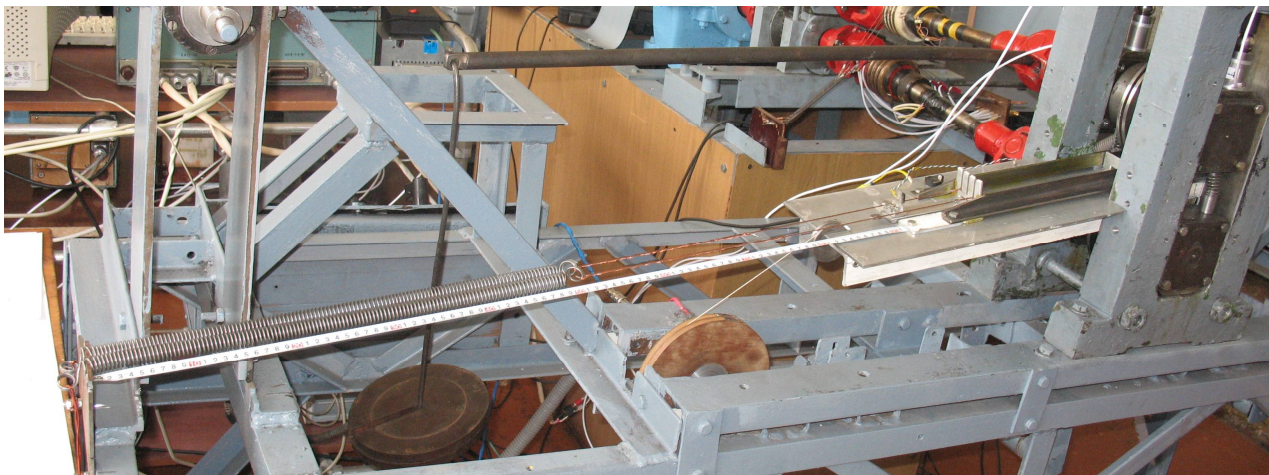


Рисунок 2.12 – Фото тарировки приводных валов лабораторной установки дисковых ножниц кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии

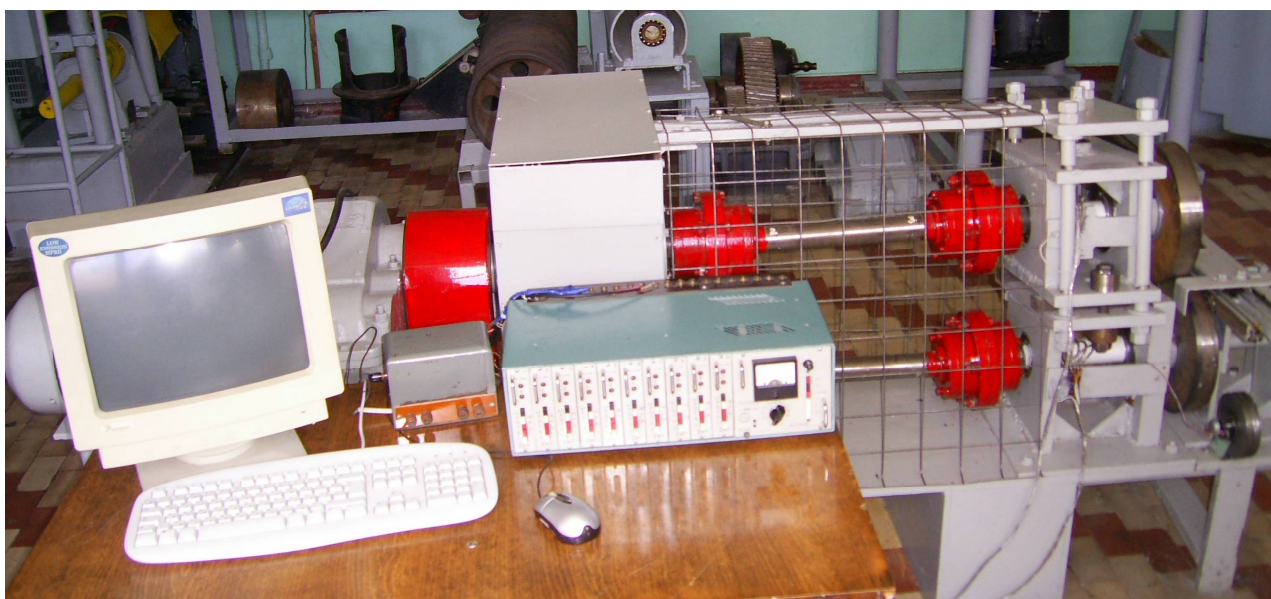


Рисунок 2.13 – Общий вид лабораторной установки однопарных дисковых ножниц кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета

Установка (рис. 2.14) включает в себя механизм резки 1, направляющий стол 2, промежуточные валы 3 с зубчатыми муфтами 4, шестеренную клетку 5, соединительную втулочно-пальцевую муфту 6, редуктор 7 ( $u = 24,9$ ,  $M_{вых} = 465 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ), моторную муфту 8 и электродвигатель 9 переменного тока

типа 4A1006УЗ ( $N = 2,2 \text{ кВт}$ ,  $n = 950 \text{ мин}^{-1}$ ). Шестеренная клетка имеет понижающую ступень  $u = 3,8$ . Окружная скорость дисковых ножей, при диаметре  $D = 250 \text{ мм}$  составляет  $V_o = 0,132 \text{ м/с}$  [74].

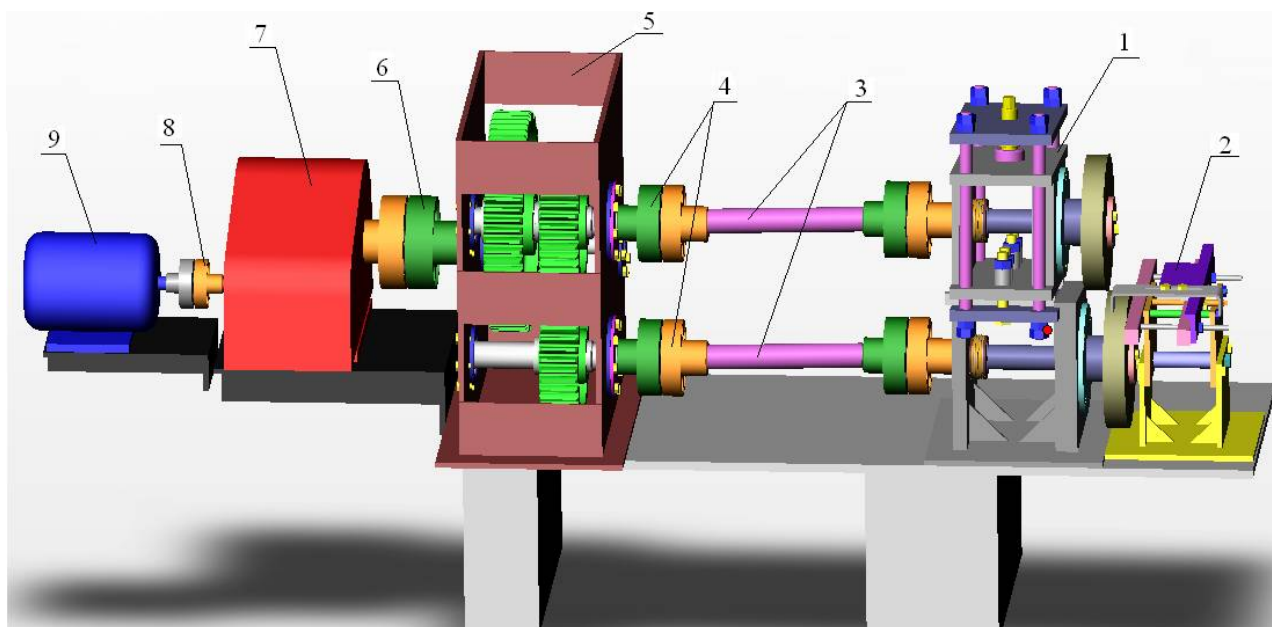


Рисунок 2.14 – Конструкция лабораторной установки однопарных дисковых ножниц кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета [74]

Измерительная система данной установки включает два комплекта тензодатчиков ( $R = 100 \text{ Ом}$ ), расположенных на ножевых валах, включенных по мостовой схеме и предназначенных для измерения крутящих моментов. Сигнал с датчиков поступает на вход усилителя («Топаз-3», см. рисунок 2.13), после чего выводится на вход аналогово-цифрового преобразователя (фирмы L-card, модель L-154A), установленного на шине IBM-совместимого компьютера.

Тарировку датчиков производили путём поочерёдной установки рычага фиксированной длины вместо верхнего и нижнего дисковых ножей, с последующим ступенчатым нагружением ножевых валов при помощи комплекта грузов. На рисунке 2.15 представлено фото процесса тарировки верхнего ножевого вала данных дисковых ножниц.





Рисунок 2.15 – Фото тарировки верхнего ножевого вала лабораторной установки однопарных дисковых ножниц кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета

## ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. Основным направлением для дальнейших исследований процессов резки листового металлопроката на ножницах следует считать повышение качества готовой продукции и расширение технологических возможностей применяемого оборудования, что подразумевает комплексный подход, включающий теоретические и экспериментальные исследования процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах, основываясь на результатах которых представляется возможным предложение новых технических решений, направленных на совершенствование данных разделительных операций, а также разработка конкретных рекомендаций по их применению.

2. Проведение всесторонних теоретических исследований процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах подразумевает применение современных методик расчёта энергосиловых параметров данных разделительных операций, при этом эффективное их применение зачас-



тую фактически сопряжено с созданием математических моделей описываемых процессов. При этом наиболее современными подходами к математическому моделированию процессов резки листового металлопроката на ножницах является применение метода конечных элементов, а также численного рекуррентного решения конечно-разностной формы условия статического равновесия выделенных элементарных объемов очага резки, однако существующие методики, использующие данный подход не всегда применимы для корректного описания случаев применения новых способов резки и, следовательно, требуют доработки с целью адаптации и уточнения.

3. Проведение экспериментальных исследований процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката на ножницах предполагает использование современных подходов к постановке эксперимента и дальнейшей обработке получаемых данных, которые в свою очередь необходимо подвергать корреляционному и регрессионному анализу при сравнении с соответствующими результатами, полученными расчётным путём, при этом степень их достоверности может быть определена с применением методов математической статистики.

**РАЗДЕЛ 3**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНЫЕ  
СРЕДСТВА К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ РАСЧЁТУ  
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ  
ТОЛСТОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА НОЖНИЦАХ**

3.1 Математическое моделирование процесса поперечной резки листового металлопроката шевронными ножами со сложной формой режущей кромки на базе метода конечных элементов

Как указывалось в подразделе 1.4, применение шевронного ножа с классической формой режущей кромки сопровождается наличием остаточной деформации части листа, находящейся под ножом в момент резки. При этом можно предположить, что применение ножей со сложной формой режущей кромки (см. подразд. 1.4) действительно позволяет снизить величину остаточной деформации, однако наличие конструктивного элемента в виде площадки в ноже конструкции «Северсталь» (см. рис. 1.19), очевидно, приведёт к существенному увеличению значения силы резки в завершающей стадии разделительного процесса. Поэтому в рамках данной работы было решено рассмотреть альтернативную конструкцию шевронного ножа, характерной особенностью которого является наличие скругления в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей режущей кромки (рис. 3.1).

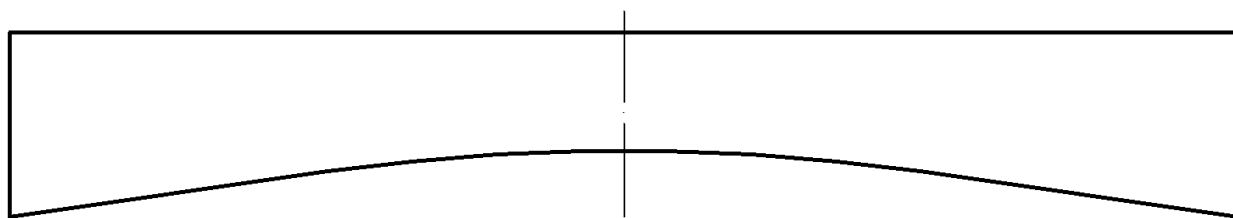


Рисунок 3.1 – Конструкция шевронного ножа со скруглением в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей режущей кромки

Однако обоснованный выбор в пользу какой-либо из упомянутых конструкций шевронных ножей, на начальных этапах представляется затруднительным в виду отсутствия достаточных сведений, для проведения сравнительного анализа. В частности теоретическая оценка энергосиловых параметров процесса резки в этих случаях на данном этапе возможна путём математического моделирования с применением метода конечных элементов.

На основании вышесказанного целью данного теоретического исследования являлось проведение сравнительного теоретического анализа эффективности применения двух различных конструкций шевронных ножей со сложной формой режущей кромки для определения наиболее перспективной с точки зрения качества готового листа и энергосиловых параметров процесса резки.

Для достижения указанной цели, на базе программного комплекса ABAQUS, в рамках данного исследования была разработана трехмерная конечно-элементная математическая модель (с использованием подхода Лагранжа [113] и учётом силы тяжести), процесса поперечной резки листов шевронными ножами. Данная модель (рис. 3.2) состоит из деформируемого бруса 1 (моделирующего разрезаемый лист) и четырех абсолютно жестких недеформируемых тел: верхний 2 и нижний 3 ножи, прижим 4 и стол 5. Рез осуществляется путём перемещения в вертикальной плоскости нижнего ножа и прижима, по отношению к неподвижному верхнему ножу [91; 182; 183].

Деформируемый брус (рис. 3.3), представляет собой неравномерную (сгущающуюся в области реза) сетку из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды [113].

В качестве разрезаемого материала моделировалась сталь Ст2пс ( $\sigma_{0,2} = 215$  МПа,  $\sigma_b = 330$  МПа), при этом кривую текучести  $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$  строили по известной аппроксимации [184]:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{0,2} (\bar{\varepsilon}_p / 0.002)^{m_0}, \quad (3.1)$$

где  $m_0$  – показатель упрочнения:

$$m_0 = \begin{cases} \frac{\ln(\sigma_b/\sigma_{0.2}) + 0.058}{3.44} & \text{при } \sigma_b/\sigma_{0.2} \leq 1.32; \\ \frac{\ln(\sigma_b/\sigma_{0.2}) + 0.216}{4.78} & \text{при } \sigma_b/\sigma_{0.2} > 1.32. \end{cases} \quad (3.2)$$

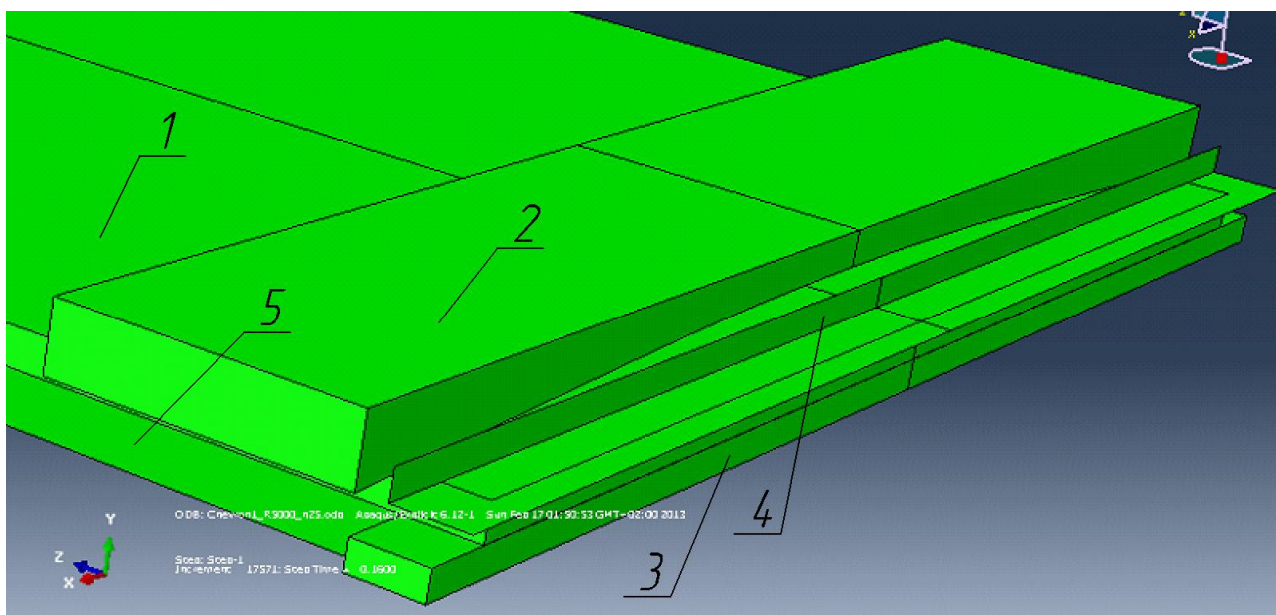


Рисунок 3.2 – Общий вид трёхмерной модели резки шевронным ножом

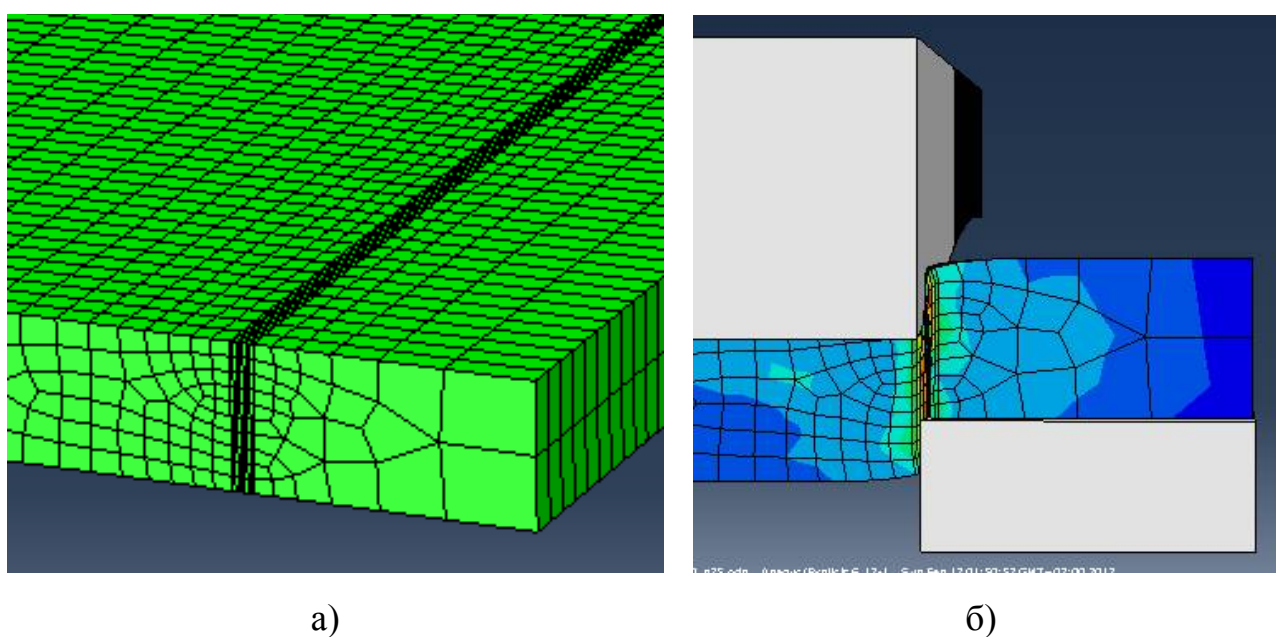


Рисунок 3.3 – Конфигурация сетки листа в начальной стадии (а) и при резке (б)

Для проведения сравнительной оценки ножей рассматриваемых конструкций реализовывалось моделирование соответствующих процессов резки, при этом длина горизонтальной площадки ножа конструкции «Северсталь» принималась, исходя из выражения (1.24), применительно к ножницам конструкции НКМЗ и составляла  $l = 283$  мм. В свою очередь радиус скругления шевронного ножа альтернативной конструкции подбирался экспериментально исходя из условия равенства максимального значения силы резки для обоих случаев и составил для данных условий  $R = 5000$  мм. Ширина ножей в обоих случаях составляла 50 мм. Общий вид моделируемых ножей представлен на рисунке 3.4.

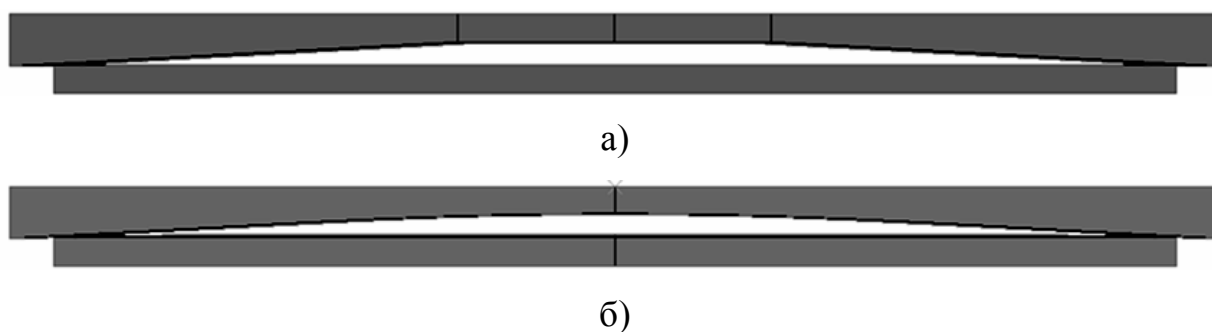
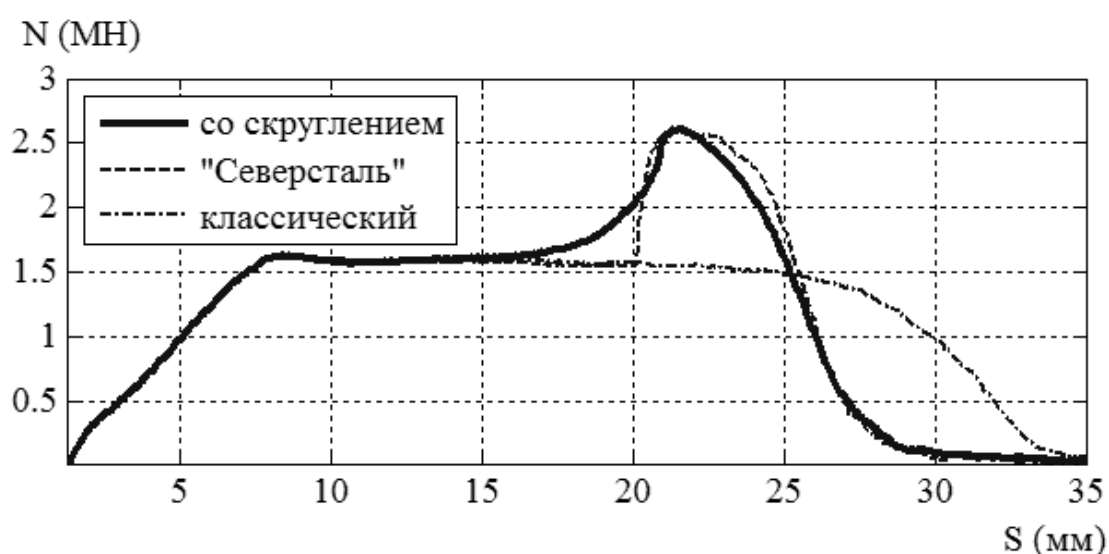


Рисунок 3.4 – Общий вид моделируемых ножей (конструкции «Северсталь» (а) и со скруглением (б))

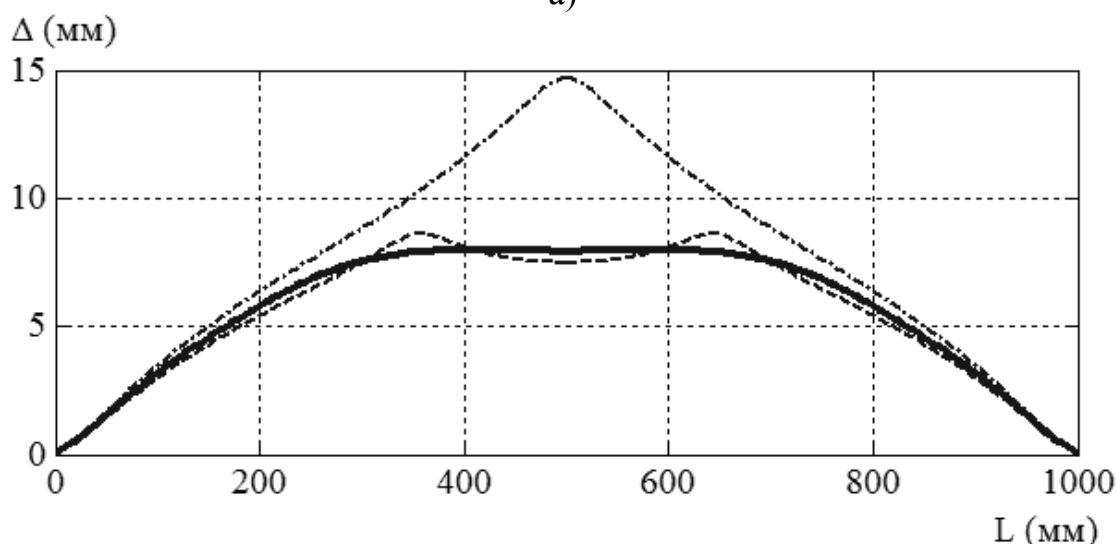
Также в рамках данного исследования моделировался процесс резки шевронным ножом классической конструкции, при этом угол наклона прямолинейных плоскостей режущих кромок для всех ножей принимался равным  $3^\circ$ , толщина листа составляла  $h = 25$  мм. Скорость перемещения ножа принималась  $70$  мм/с. На рисунке 3.5 представлены результаты моделирования рассматриваемых разделительных процессов, в частности, показаны распределения значений силы резки  $N$  в зависимости от перемещения ножа  $S$  (рис. 3.5, а) и соответствующие распределения величины остаточной деформации  $\Delta$  по ширине листа  $L$ , которая составляла  $1000$  мм (рис. 3.5, б).

Из полученных распределений видно, что для обоих рассмотренных случаев применения шевронного ножа со сложной формой режущей кромки, на-

блюдается характерное увеличение значения силы резки в завершающей стадии разделительного процесса ( $> 50\%$ ), при этом, действительно, достигается существенное снижение величины остаточной деформации листа ( $> 40\%$ ). Однако стоит отметить, что в сравнении с ножом конструкции «Северсталь», при равном значении максимальной силы резки, применение шевронного ножа со скруглением позволяет добиться большего (на  $7,4\%$ ) снижения величины остаточной деформации в виду отсутствия локализаций дефекта, что делает данную конструкцию ножа более перспективной.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Расчётные распределения значений силы резки  $N$  в зависимости от перемещения ножа  $S$  (а) и соответствующие распределения величины остаточной деформации  $\Delta$  по ширине листа  $L$  (б)

С целью оценки влияния величины радиуса скругления на качество готового листа и энергосиловые параметры процесса резки в рамках данного исследования, были получены распределения величины остаточной деформации листа  $\Delta$ , представленной в отношении к её максимальному значению  $\Delta_{\max}$ , достигаемому при резке классическим шевронным ножом (рис. 3.6), а также соответствующие распределения величины отношения максимальной силы резки  $N_{\max}$  к её величине при установившемся процессе  $N_{steady}$  (рис. 3.7). Данные распределения представлены в зависимости от величины отношения радиуса скругления  $R$  к толщине разрезаемого листа  $h$ .

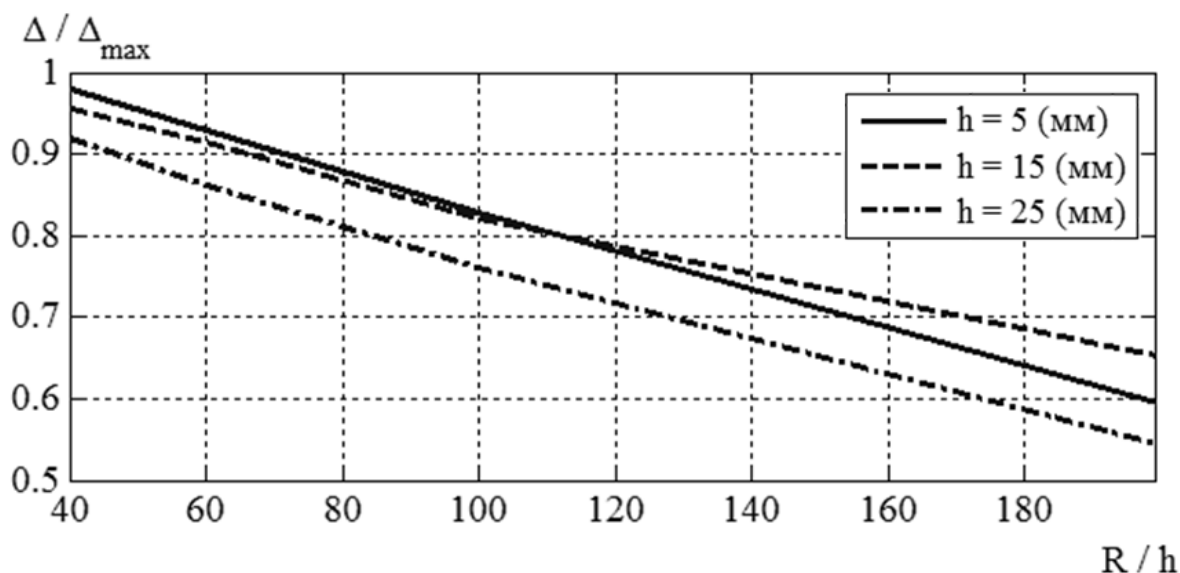


Рисунок 3.6 – Расчётные распределения величины  $\Delta / \Delta_{\max}$  от величины отношения радиуса скругления  $R$  к толщине разрезаемого листа  $h$

На основании полученных зависимостей можно утверждать, что увеличение радиуса скругления до  $200h$  для указанных толщин позволяет добиться снижения величины остаточной деформации на 35...55 %, однако способствует существенному увеличению силы резки в завершающих стадиях разделительного процесса (< 65 %), следовательно, величина радиуса скругления должна подбираться исходя из условия допустимой перегрузки применительно к конкретным ножницам.

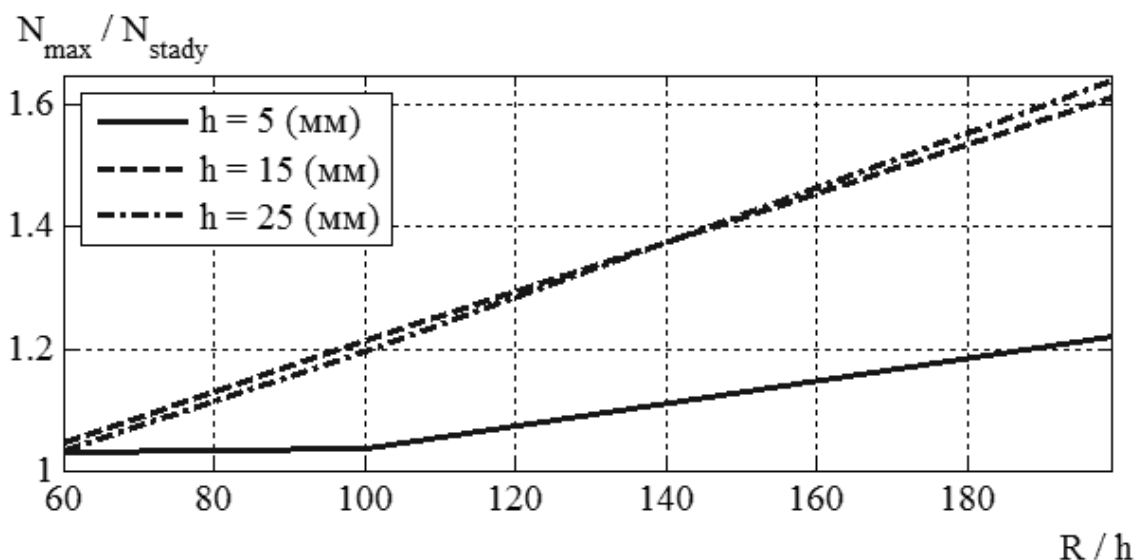


Рисунок 3.7 – Расчётные распределения величины  $N_{max} / N_{steady}$  от величины отношения радиуса скругления  $R$  к толщине разрезаемого листа  $h$

3.2 Методика и алгоритм к автоматизированному расчету максимального значения силы достигаемого при поперечной резке листового металлопроката шевронным ножом со скруглением

Исходя из результатов конечно-элементного моделирования, приведенных в предыдущем подразделе, применение для поперечной резки листового металлопроката шевронного ножа со сложной формой режущей кромки сопровождается существенным увеличением силы на завершающей стадии разделительного процесса. При этом наиболее эффективным с точки зрения качества готового листа является применение шевронного ножа со скруглением. В то же время теоретическая оценка энергосиловых параметров процесса резки на данном этапе возможна только путём математического моделирования с применением МКЭ, что требует значительных временных и трудовых затрат, а также применения ЭВМ высокой вычислительной мощности. Таким образом, существует необходимость разработки методики и алгоритма автоматизированного расчета энергосиловых параметров процесса резки листового металлопроката шеврон-



ным ножом со скруглением, которая могла бы стать альтернативой МКЭ, позволяя использовать менее затратные методы математического моделирования, что и послужило целью данного теоретического исследования.

В основу полученной одномерной математической модели процесса поперечной резки толстолистного металлопроката шевронным ножом со скруглением было положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы статического равновесия по определению геометрических характеристик и энергосиловых параметров в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объема очага резки. При этом использование рекуррентной схемы решения данной задачи предполагало направление разбиения, соответствующее перемещению ножа, на основании чего начальному положению ножа соответствовали точки  $ABC$  (рис. 3.8, а). Далее, с учётом выбранного подхода, необходимо принять в рассмотрение  $m$  положений ножа в направлении его перемещения при резке с некоторым дискретным шагом:

$$ds = \frac{S}{m}. \quad (3.3)$$

Величину полного хода ножа  $S$  до разделения заготовки, исходя из данной расчётной схемы, можно определить как:

$$S = h_n + h \cdot \varepsilon_n, \quad (3.4)$$

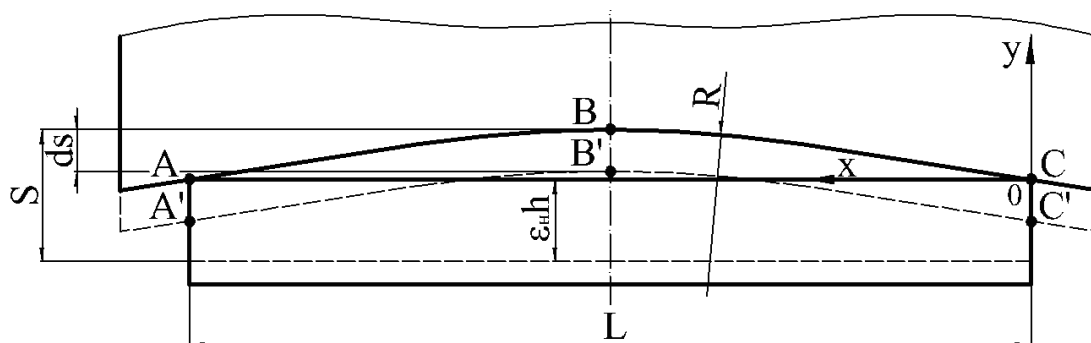
где  $h$  – толщина разрезаемого листа;

$h_n$  – расстояние от поверхности листа до верхней точки профиля ножа непосредственно перед внедрением;

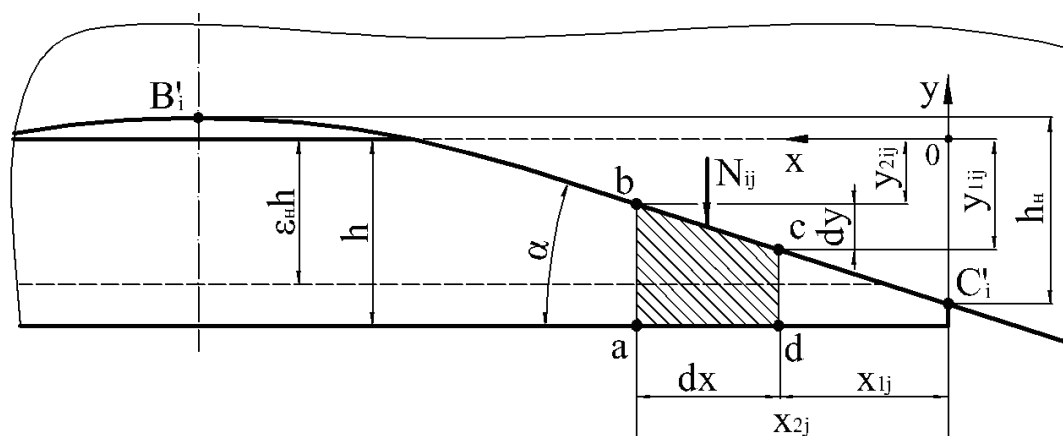
$\varepsilon_n$  – величина относительного внедрения до скола, которая согласно данным работ [185–187], зависит от толщины разрезаемого листа  $h$ , а также угла наклона к горизонтали  $\alpha$  прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа и может быть определена из следующего выражения:

$$\varepsilon_H = 1 - \frac{1 - e^{-A \left( \frac{h}{h_{\max}} \right)^B}}{1 - e^{-A}} \cdot \left( 1 - \varepsilon_{\min} \left( \cos \frac{\alpha}{2} \right)^2 \right), \quad (3.5)$$

где  $A$ ,  $B$  – эмпирические коэффициенты, значения которых зависят от свойств разрезаемого материала [186; 187];



а)



б)

Рисунок 3.8 – Расчётные схемы по определению геометрических и энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением

$h_{\max}$  – толщина заготовки, при которой значения относительного внедрения до скола  $\varepsilon_H$  асимптотически приближаются к своему минимуму;

$\varepsilon_{\min}$  – минимальная относительная глубина надреза до скола, соответствующая толщине листа  $h_{\max}$  (для случая резки листов из конструкционной ста-

ли толщиной до 25 мм в холодном состоянии на базе проводимых ранее исследований [185–187] можно принять:  $A = 2,7$ ;  $B = 0,65$ ;  $h_{\max} = 25$ ;  $\varepsilon_{\min} = 0,31$ ).

Применение численного рекуррентного решения конечно-разностной формы статического равновесия по определению геометрических характеристик и энергосиловых параметров в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объема предполагает разбиение площади сечения листа по оси  $x$  (см. рис. 3.8, б) на конечное множество  $k$  элементарных объёмов, при этом в силу симметричности расчётной схемы, имеет смысл рассматривать её половину. Таким образом, координаты  $j$ -того элементарного объёма  $x_{1j}$ ,  $x_{2j}$ , учитывая, что  $x_{1j=1} = 0$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{1j} &= x_{2j-1}, \\ x_{2j} &= x_{1j} + dx. \end{aligned} \quad (3.6)$$

При этом:

$$dx = \frac{L}{2k}, \quad (3.7)$$

где  $L$  – ширина разрезаемого листа.

Далее целесообразно определить высотные координаты  $y_{1j}$ ,  $y_{2j}$  (см. рис. 3.8, б) ножа перед началом резки, соответствующие рассматриваемым выделенным элементарным объёмам, при этом для данной схемы необходимо учитывать наличие скругления, таким образом, учитывая, что  $y_{1j=1} = 0$ , для прямолинейного участка режущей кромки имеем следующие выражения:

$$\begin{aligned} y_{1j} &= y_{2j-1}; \\ y_{2j} &= y_{1j} + dy; \\ dy &= dx \cdot \operatorname{tg}\alpha. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Для участка со скруглением:

$$y_{1j} = y_{2j-1};$$

$$y_{2j} = h_n - \left( R - \sqrt{R^2 - \left( \frac{L}{2} - x_{2j} \right)^2} \right), \quad (3.9)$$

где  $h_n$  – высота рабочей поверхности режущей кромки;

$R$  – радиус скругления.

Пересчёт координат при  $i$ -том положении ножа осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} y_{1ij} &= y_{1j} - i \cdot ds; \\ y_{2ij} &= y_{2j} - i \cdot ds; \\ x_{1ij} &= x_{1j} = const; \\ x_{2ij} &= x_{2j} = const. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для определения величины силы резки  $N_i$  при  $i$ -том положении ножа используем выражение Целикова-Носаля [72; 78], которое после преобразований и уточнения имеет следующий вид:

$$N_i = \sum_{j=1}^n 2\tau_{ij} \cdot F_{ij} \left( 1 + z \frac{tg\alpha}{0,6\delta} + \frac{\Delta_n^2 \sigma_b c}{\Delta_n^2 \sigma_b c + 10\delta h^3} \right), \quad (3.11)$$

где  $\tau_{ij}$  – сопротивление срезу в рамках каждого  $j$ -того выделенного элементарного объёма  $abcd$  площадью  $F_{ij}$  при  $i$ -том положении ножа;

$n$  – количество элементарных объёмов, составляющих срезаемую площадь при  $i$ -том положении ножа ( $n \leq k$ );

$\sigma_b$  – предел прочности разрезаемого материала;

$\delta$  – относительное удлинение при испытании на растяжение;

$\Delta_n$  – боковой зазор между ножами;

$c$  – расстояние от плоскости реза до прижима;

$z$  – коэффициент, учитывающий изгиб отрезаемой части листа, который можно определить графически (см. рис. 3.9) [72], при этом с целью автоматизации вычислений была получена следующая аппроксимация:

$$\begin{aligned} z &= 0,951 \cdot \left(1 - e^{(-0.436\lambda)}\right) \quad \text{при } \lambda < 15; \\ z &= 0,95 \quad \text{при } \lambda \geq 15, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где  $\lambda$  – безразмерная величина [72], которая определяется из выражения:

$$\lambda = \frac{a \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta h}, \quad (3.13)$$

где  $a$  – ширина отрезаемой части листа.

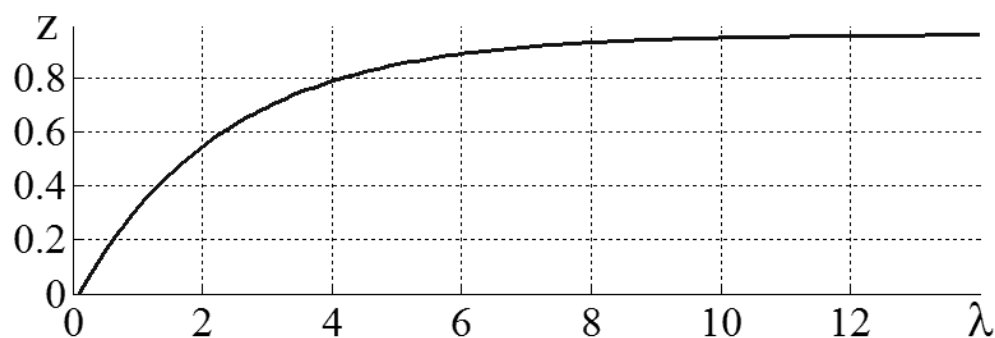


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента  $z$  от величины  $\lambda$  [72]

Площадь  $j$ -того выделенного объёма для  $i$ -того положения ножа при известных соответствующих координатах  $y_{1ij}$ ,  $y_{2ij}$ :

$$F_{ij} = \frac{(h - |y_{1ij}|) + (h - |y_{2ij}|)}{2} \cdot dx. \quad (3.14)$$

Величину истинного сопротивления срезу в рамках каждого выделенного элементарного объёма определяли, исходя из данных работ [74; 187] с учётом выражения (1.3) следующим образом:

$$\tau_{ij} = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_n} \cdot K_{эн}(X_{ij})^{\alpha_\tau \exp\left(\frac{X_{ij}^K}{K^{2K}}\right)}, \quad (3.15)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности разрезаемого материала;

$X_{ij}$  – отношение величины относительного внедрения для  $j$ -того элементарного объёма  $abcd$  (см. рис. 3.8, б) при  $i$ -том положении ножа к относительной величине надреза до скола  $\varepsilon_n$ ;

$\alpha_\tau$  – степенной показатель, характеризующий форму распределения сопротивления срезу [74];

$K$  – эмпирический коэффициент, значение которого на основании проводимых ранее исследований [74; 186; 187] может быть определено следующим образом:

$$K = \frac{1}{\varepsilon_n}; \quad (3.16)$$

$K_{эн}$  – коэффициент эпюры, учитывающий неравномерность распределения удельного сопротивления срезу по длине «режущего клина» в зависимости от угла наклона ножа  $\alpha$  (см. рис. 1.12) [79], значение этого коэффициента с целью автоматизации расчётов в рамках данной работы рекомендуется определять из следующей математической аппроксимации:

$$\begin{aligned} K_{эн} &= (\alpha + 1)^{-0,002(\alpha^{1,1} + 2,8)^{3,19}} \quad \text{при } \alpha < 2^\circ; \\ K_{эн} &= 0,7 \quad \text{при } \alpha \geq 2^\circ. \end{aligned} \quad (3.17)$$

В целом, выражения (3.3)–(3.17) описывают полный алгоритм одномерного математического моделирования процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением, численная реализация которого позволяет получать распределения значений силы резки в зависимости от перемещения ножа, на базе которых представляется возможным определить максимальное значение данной величины.

На рисунке 3.10 представлены расчётные распределения значений силы резки  $N$  в зависимости от перемещения ножа  $S$  (рис. 3.10, а), а также максимального значения данной величины  $N_{\max}$  в зависимости от угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа  $\alpha$  (рис. 3.10, б), толщины разрезаемого листа  $h$  (рис. 3.10, в) и радиуса скругления  $R$ , представленного в отношении к  $h$  (рис. 3.10, г). Данные распределения получены применительно к процессу поперечной резки шевронным ножом со скруглением, листов из трёх марок стали: Ст2пс, 35Г2 и 65Г, путём численного математического моделирования, с применением разработанного алгоритма, в среде программного комплекса MATLAB.

Анализ полученных распределений позволил установить, что применение шевронного ножа со скруглением сопровождается существенным ростом силы резки на завершающих стадиях разделительного процесса. Так, при радиусе скругления в  $100h$  прирост силы составляет  $\approx 25\%$ , в то же время, исходя из зависимостей, представленных на рисунке 3.10, б, следует, что максимальная величина силы  $N_{\max}$ , достигаемая при резке наиболее «мягкой» из рассмотренных марок стали ножом с углом наклона режущих кромок  $1^\circ$ , сравнима со значением этой величины, достигаемом при резке листов из более «твёрдых» марок ножом с углом наклона режущих кромок  $3^\circ$  (при равных прочих параметрах), следовательно, возможно применение ножа с меньшим углом наклона режущих кромок для резки более «мягких» марок, что теоретически позволит повысить качество готового листа без риска перегрузки применяемых ножниц за счёт меньшей деформации листа, при этом отношение его толщины к половине разрезаемой ширины должно быть меньше тангенса угла наклона кромок.

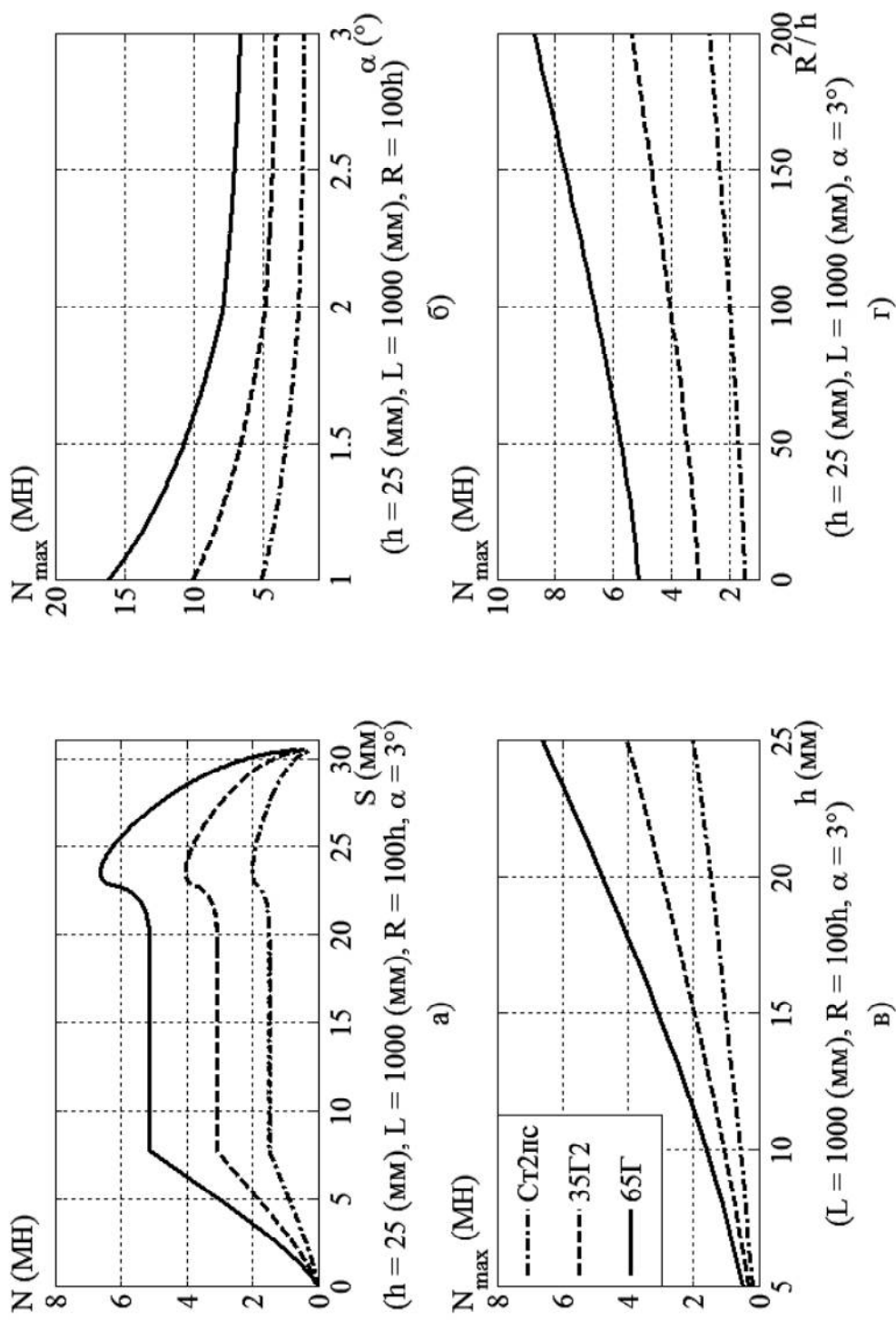
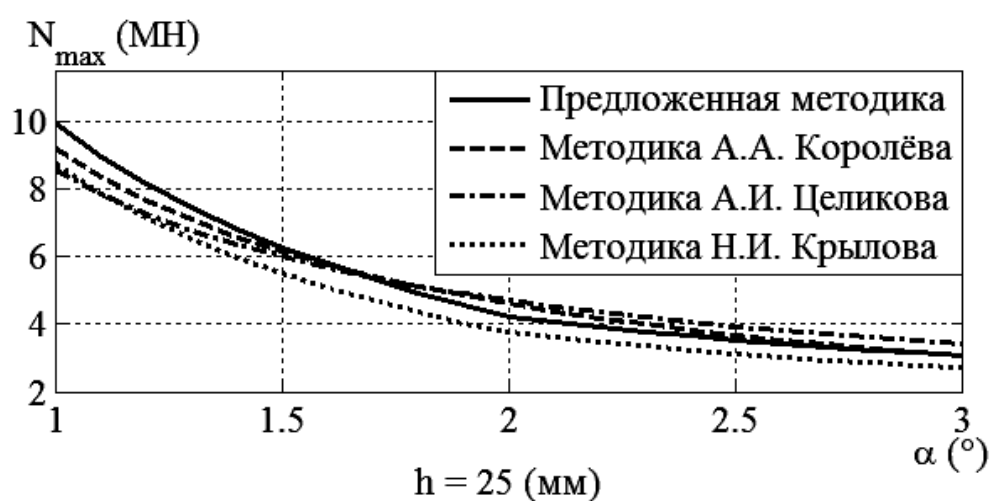


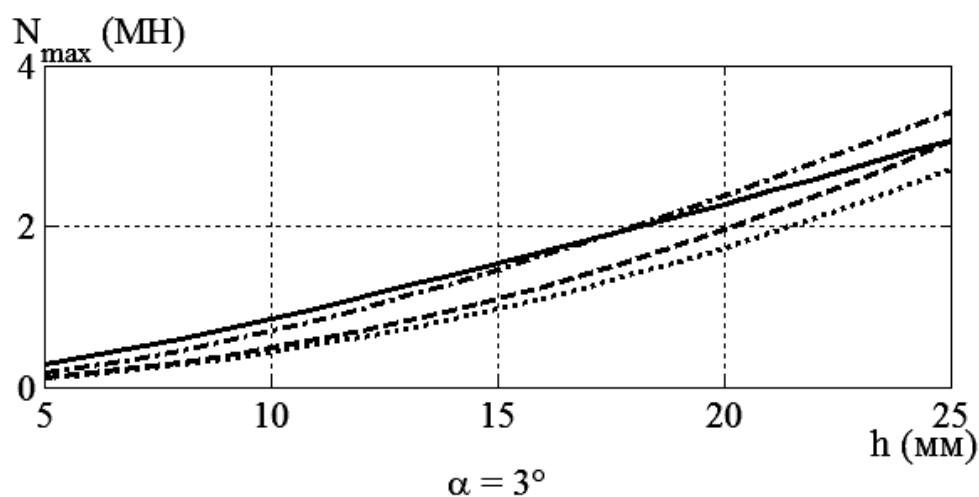
Рисунок 3.10 – Расчётные распределения значений силы резки  $N$ , полученные для некоторых марок стали в зависимости от перемещения ножа  $S$  (а) и её максимального значения  $N_{\max}$  от: угла  $\alpha$  (б), толщины разрезаемого листа  $h$  (в) и отношения радиуса скругления  $R$  к  $h$  (г)



Также проводили сравнительный анализ разработанной методики с существующими для предварительной оценки адекватности полученных результатов. С этой целью моделировали процесс поперечной резки классическим шевронным ножом, варьируя величиной угла наклона плоскостей режущей кромки  $\alpha$  (рис. 3.11, а) и толщины листа  $h$  (рис. 3.11, б), с применением описанной методики, а также существующих методик А. А. Королёва, А. И. Целикова и Н. И. Крылова. Расчёт проводился применительно к процессу резки листа шириной  $L = 1000$  мм из стали марки 35Г2 ( $\sigma_b = 530$  МПа).



а)



б)

Рисунок 3.11 – Сравнительные теоретические зависимости максимальных значений силы резки  $N_{\max}$  от угла наклона режущих кромок шевронного ножа  $\alpha$  (а) и толщины разрезаемого листа  $h$  (б)

Исходя из представленных зависимостей следует, что предложенная методика хорошо согласуется с существующими, однако позволяет более широко описать рассматриваемую разделительную операцию, позволяя моделировать процессы резки как ножом со скруглением, так и классическим шевронным ножом (в этом случае необходимо принимать  $R$  близким к нулю).

Далее проводили сравнительный анализ разработанной методики с результатами конечно-элементного моделирования, представленными в подразделе 3.1. На рисунке 3.12 приведены сравнительные теоретические распределения значений силы резки  $N$  в зависимости от перемещения ножа  $S$  (см. рис. 3.12, а) и её максимального значения  $N_{\max}$  в зависимости величины радиуса скругления  $R$ , представленной в отношении к толщине листа  $h$  (см. рис. 3.12, б).

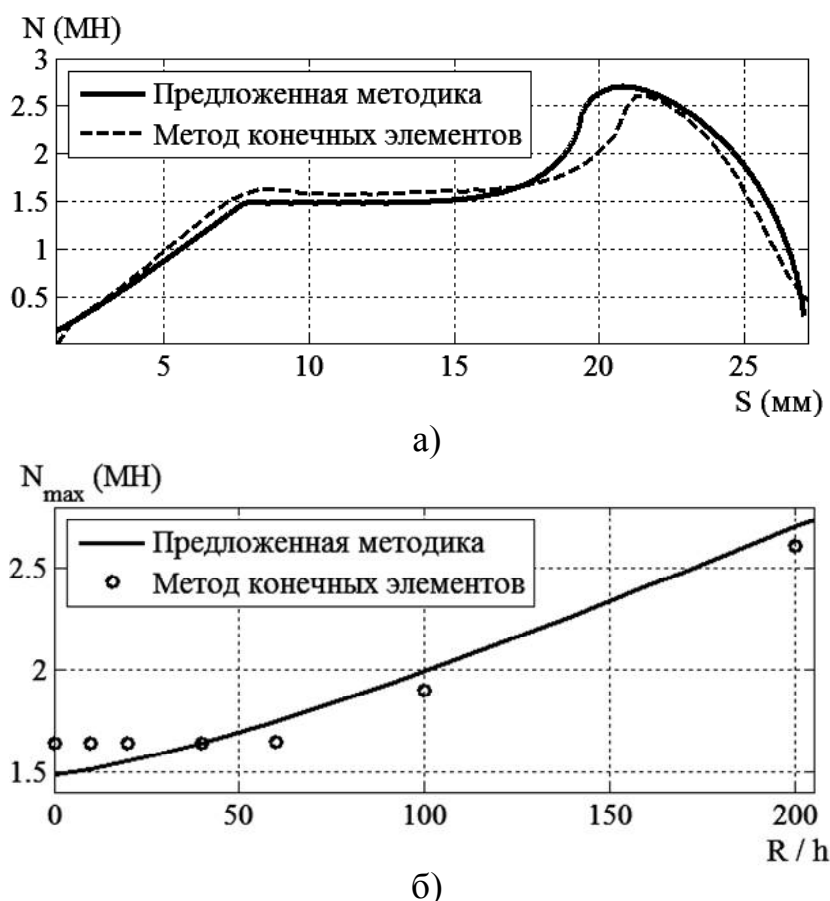


Рисунок 3.12 – Сравнительные теоретические распределения значений силы резки  $N$  в зависимости от перемещения ножа  $S$  (а) и её максимального значения  $N_{\max}$  в зависимости от величины радиуса скругления  $R$ , представленной в отношении к толщине листа  $h$  (б)

Данные зависимости получены теоретически с применением метода конечных элементов, а также разработанной методики, применительно к процессу резки листового металлопроката толщиной  $h = 25$  мм, шириной  $L = 1000$  мм, из стали Ст2пс ( $\sigma_b = 330$  МПа) шевронным ножом со скруглением.

Обобщённый анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что результаты моделирования, полученные с применением предложенной методики, хорошо согласуются с полученными ранее при конечно-элементном моделировании, отличие значений при этом составляет менее 5%, следовательно, разработанная двумерная математическая модель может быть использована как альтернатива применению МКЭ при определении энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей режущей кромки.

### 3.3 Методика и алгоритм автоматизированного расчёта энергосиловых параметров процесса резки толстолистового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары

На основании материалов, представленных в подразделе 1.4, можно установить, что одним из характерных дефектов листового проката, разрезаемого на высокопроизводительных дисковых ножницах, является серповидность готового листа (см. рис. 1.20), наличие которой существенно портит товарный вид продукции и может послужить причиной выбраковки. При этом очевидно, что величина данного дефекта может быть значительно снижена путём ограничения свободы перемещения листа при резке в горизонтальной плоскости. В связи с этим в рамках данной работы, учитывая современные тенденции [97] и опыт проведенных исследований [188–190], было решено рассмотреть возможность совмещения процессов правки и продольной резки листовых раскатов

дисковыми ножами, что позволило бы повысить качество готового проката за счёт фактического исключения его поворота в горизонтальной плоскости. При этом реализация данного совмещённого процесса гипотетически позволит контролировать силу подачи листа в дисковые ножницы. В то же время управление силой подачи листа в дисковые ножи влияет на распределение момента между ножами, вплоть до обеспечения генераторного режима [74]. В связи с этим, теоретически, существует возможность (при обеспечении «подпора» листа) производить резку одним приводным ножом, однако реализация такой операции требует точного представления об энергосиловых параметрах данного разделительного процесса, что приводит к необходимости разработки соответствующих методик расчёта, что и стало целью данного исследования.

По аналогии с работой [74], в основу полученной в рамках этой работы одномерной математической модели процесса резки дисковыми ножами было положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы статического равновесия по определению геометрических характеристик и энергосиловых параметров в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объёма очага резки. При этом геометрические параметры очага резки, координаты каждого отдельно выделенного объёма, а также сила резки со стороны верхнего  $N_1$  и нижнего  $N_2$  ножа определялись по методике, описанной в работе [74] (при этом сопротивление срезу в рамках отдельно выделенного элементарного объёма для случая резки металла в холодном состоянии определяли из выражения (3.15)). С этой целью аналогично выполняли разбиение всего очага резки на конечное множество  $K$  элементарных объёмов  $abcd$ .

Далее, для определения момента резки одним верхним  $M_1$  приводным ножом из пары использовали схему, представленную на рисунке 3.13. Исходя из представленной расчетной схемы, момент резки в данном случае может быть определён следующим образом:

$$M_1 = \sum_{i=1}^K R \cdot N_{Ti} \cdot \text{sign}(\alpha_i - \gamma), \quad (3.18)$$

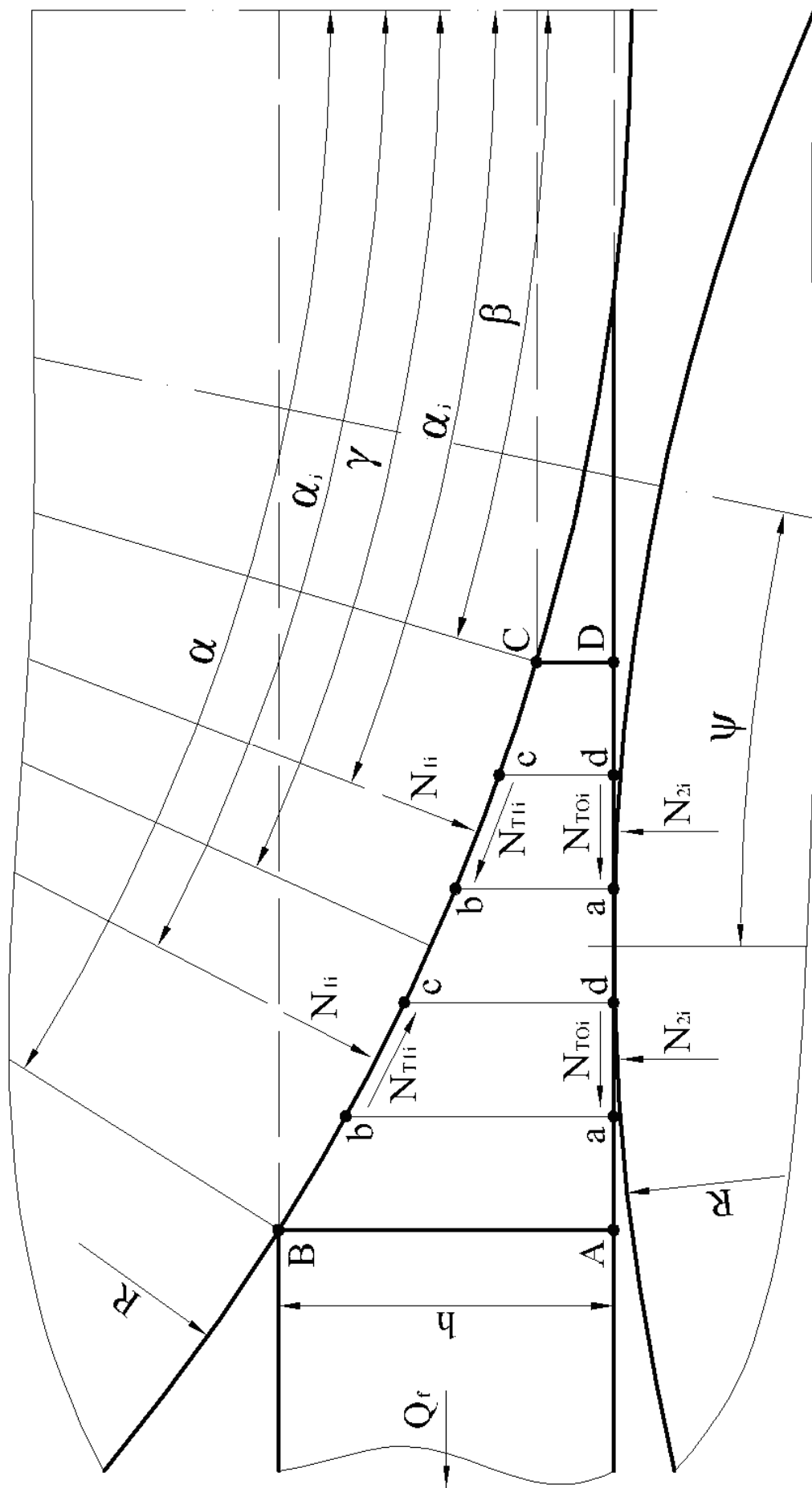


Рисунок 3.13 – Расчетная схема очага контакта ножей с листом при резке дисковыми ножницами с одним (верхним) приводным ножом из пары

где  $N_{Ti}$  – сила трения между верхним ножом и отрезаемой кромкой, действующая в рамках выделенного объема очага резки;

$\alpha_i$  – угловая координата выделенного объема;

$R$  – радиус ножей;

$\gamma$  – величина нейтрального угла;

$sign(\alpha_i - \gamma)$  – функция знака, учитывающая направление силы трения на контактной поверхности выделенного элементарного объема, при этом значения данной функции определяются выражением (1.21) [74; 86; 88].

Величина силы трения между верхним ножом и отрезаемой кромкой, действующей в рамках выделенного объема очага резки, может быть определена на следующем образом:

$$N_{T1i} = N_{1i} \cdot f_1, \quad (3.19)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения между верхним ножом и кромкой;

$N_{1i}$  – составляющая полной силы резки, действующая со стороны верхнего ножа в рамках выделенного объема [74].

Также на энергосиловые показатели процесса разделения в случае резки одним верхним приводным ножом из пары влияет сила трения в опорах ножей, которая, может быть определена следующим образом:

$$N_{TO} = \sum_{i=1}^K f_{TO} N_{1i} (\cos \alpha_i + f_1 \sin \alpha_i \cdot sign(\alpha_i - \gamma)), \quad (3.20)$$

где  $f_{TO}$  – коэффициент трения в опорах ножей.

Исходя из выражения (3.18) значения момента резки  $M_1$  на верхнем ноже зависит от величины нейтрального угла  $\gamma$ , в основу определения значения которого, опираясь на методику, разработанную в работе [74], положим энергетический метод.

С учетом дискретности выбранного подхода получим уравнение энергетического равновесия очага резки в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^K N_{li} (-\sin\alpha_i - f_{TO} \cos\alpha_i) + \sum_{i=1}^{K_\gamma-1} N_{li} f_1 (\cos\alpha_i - f_{TO} \sin\alpha_i) + N_{li} f_1 \times \\ & \times \frac{2\alpha_{xi1} - 2\gamma}{\alpha_{xi1} - \alpha_{xi2}} (\cos\alpha_i - f_{TO} \sin\alpha_i) - \sum_{i=K_\gamma+1}^K N_{li} f_1 (\cos\alpha_i - f_{TO} \sin\alpha_i) - Q_f = 0, \end{aligned} \quad (3.21)$$

где  $Q_f$  – результирующая от действия внешних сил сопротивления, действующая в горизонтальном направлении [74; 191].

Выражение (3.21) можно представить, заменив соответствующие суммы обозначениями  $Q$ ,  $Q_a$ ,  $Q_\gamma$ ,  $Q_r$  в следующем виде [74]:

$$Q + Q_a + \frac{2\gamma - 2\alpha_{K_\gamma}}{\alpha_{xK_\gamma 1} - \alpha_{xK_\gamma 2}} Q_\gamma - Q_r - Q_f = 0, \quad (3.22)$$

откуда определим значение нейтрального угла:

$$\gamma = \alpha_{K_\gamma} + \frac{(Q + Q_a - Q_r - Q_f)}{2Q_\gamma} (\alpha_{xK_\gamma 1} - \alpha_{xK_\gamma 2}). \quad (3.23)$$

Из выше изложенного следует, что значение нейтрального угла  $\gamma$  должно удовлетворять уравнению (3.22), для решения которого необходимо знать порядковый номер  $K_\gamma$  элементарного объема, через который проходит этот угол, кроме того, согласно кинематике процесса, существует требование [74]:

$$\alpha \geq \gamma \geq \beta, \quad (3.24)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – углы захвата и скола соответственно (см. рис. 3.13).

Для вычисления нейтрального угла  $\gamma$  применяем итерационную схему решения уравнения (3.22). Так с учётом выбранного подхода в первом приближении можно принять:

$$\gamma_0 = (\alpha + \beta)/2. \quad (3.25)$$

Потом, на  $j$ -той итерации, из неравенства:  $\alpha_{xi1} \geq \gamma_{j-1} \geq \alpha_{xi2}$ , определяем порядковый номер  $K_{R_{\gamma j}}$  и рассчитываем погрешность [74]:

$$err_j = \left| Q_j + Q_{aj} - Q_{rj} - Q_f + \frac{2\alpha_{K_{\gamma j}} - 2\gamma_{j-1}}{\alpha_{xK_{\gamma 1}} - \alpha_{xK_{\gamma 2}}} Q_{\gamma j} \right|. \quad (3.26)$$

В качестве критерия сходимости следует принимать условие:

$$err_j \leq \varepsilon, \quad (3.27)$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность вычислений.

В случае невыполнения условия (3.27) вычисляем расчетное значение нейтрального угла  $\gamma_r$  на текущей итерации [74]:

$$\gamma_r = \alpha_{K_{R_{\gamma j}}} + \frac{(Q_j + Q_{aj} - Q_{rj} - Q_f)}{2Q_{\gamma j}} (\alpha_{xK_{\gamma 1}} - \alpha_{xK_{\gamma 2}}), \quad (3.28)$$

а потом определяем новое значение нейтрального угла:

$$\gamma_i = (\gamma_{i-1} + \gamma_r)/2. \quad (3.29)$$



Итерационная процедура повторяется путем последовательного решения уравнений (3.22)–(3.29) до выполнения условия (3.27).

Для определения момента резки одним нижним приводным ножом  $M_2$  из пары рассмотрим схему, представленную на рисунке 3.14, исходя из которой, с учётом выбранного подхода, значение момента резки может быть описано выражением:

$$M_2 = R \cdot \sum_{i=1}^K N_{T2i}, \quad (3.30)$$

где  $N_{T2i}$  – сила трения между нижним ножом и листом приходящаяся на  $i$ -тый выделенный объём, значение которой может быть определено исходя из условия равновесия с учётом силы трения в опоре верхнего ножа следующим образом:

$$N_{T2i} = Q_f + \sum_{i=1}^K N_{1i} \cdot \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^K N_{TOi} \cdot \cos \alpha_i, \quad (3.31)$$

где  $N_{TOi}$  – составляющая силы трения в опоре верхнего ножа, приходящаяся на  $i$ -тый выделенный объём, которая может быть определена следующим выражением:

$$N_{TOi} = N_{1i} \cdot f_{TO}. \quad (3.32)$$

Окончательно после подстановки получим выражение для определения момента резки одним нижним приводным ножом из пары в виде:

$$M_2 = R \cdot \left( Q_f + \sum_{i=1}^K N_{1i} \cdot \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^K N_{1i} \cdot f_{TO} \cdot \cos \alpha_i \right). \quad (3.33)$$

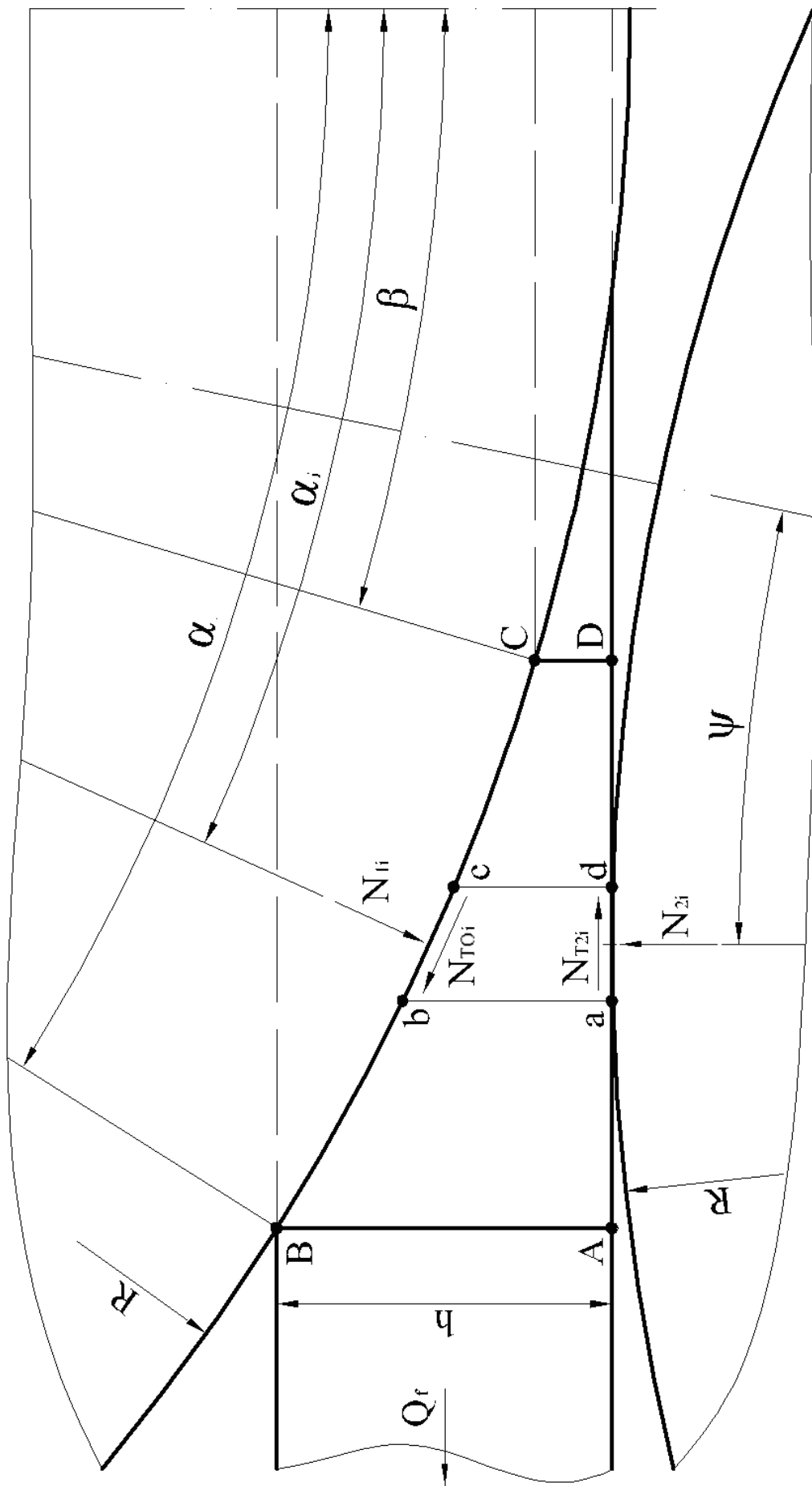


Рисунок 3.14 – Расчетная схема очага контакта ножей с листом при резке дисковыми ножницами с одним (нижним) приводным ножом из пары

Кроме того для реализации установившегося процесса резки в случае одного приводного ножа из пары должны выполняться следующие условия:

– для верхнего приводного ножа:

$$Q_f + \sum_{i=1}^K N_{1i} \cdot \sin \alpha_i + \sum_{K_\gamma}^K N_{1i} \cdot f_1 \cdot \cos \alpha_i + N_{TO2} < \sum_{i=1}^{K_\gamma} N_{1i} \cdot f_1 \cdot \cos \alpha_i; \quad (3.34)$$

– для нижнего приводного ножа:

$$Q_f + \sum_{i=1}^K N_{1i} \cdot \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^K N_{1i} \cdot f_{TO} \cdot \cos \alpha_i < N_2 \cdot f_2, \quad (3.35)$$

где  $f_2$  – коэффициент трения между нижним ножом и листом.

Необходимо указать, что при выполнении практических расчетов получаемые согласно выражениям (3.18), (3.30) величины моментов резки следует умножать на коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ , которые учитывают соответственно, влияние затупления ножей и величины бокового зазора между ними [33; 72; 74].

Программная реализация решения осуществлялась в среде системы автоматизации математических расчетов MATLAB. Расчет проводили для случаев резки листов из стали марки СтЗсп при следующих схемах привода:

- с приводным верхним ножом из пары;
- с приводным нижним ножом из пары;
- с приводными двумя ножами в паре.

На рисунке 3.15, представлены расчётные распределения суммарного момента  $M$  для случаев холодной (см. рис. 3.15 а, б) и горячей (см. рис. 3.15 в, г) резки листового металлопроката, полученные для рассмотренных схем привода, в зависимости от толщины разрезаемого листа  $h$  (см. рис. 3.15 а, в), и результирующей действия сил внешнего сопротивления  $Q_f$  (см. рис. 3.15 б, г), представленной в отношении к величине силы резки  $N_1$ .

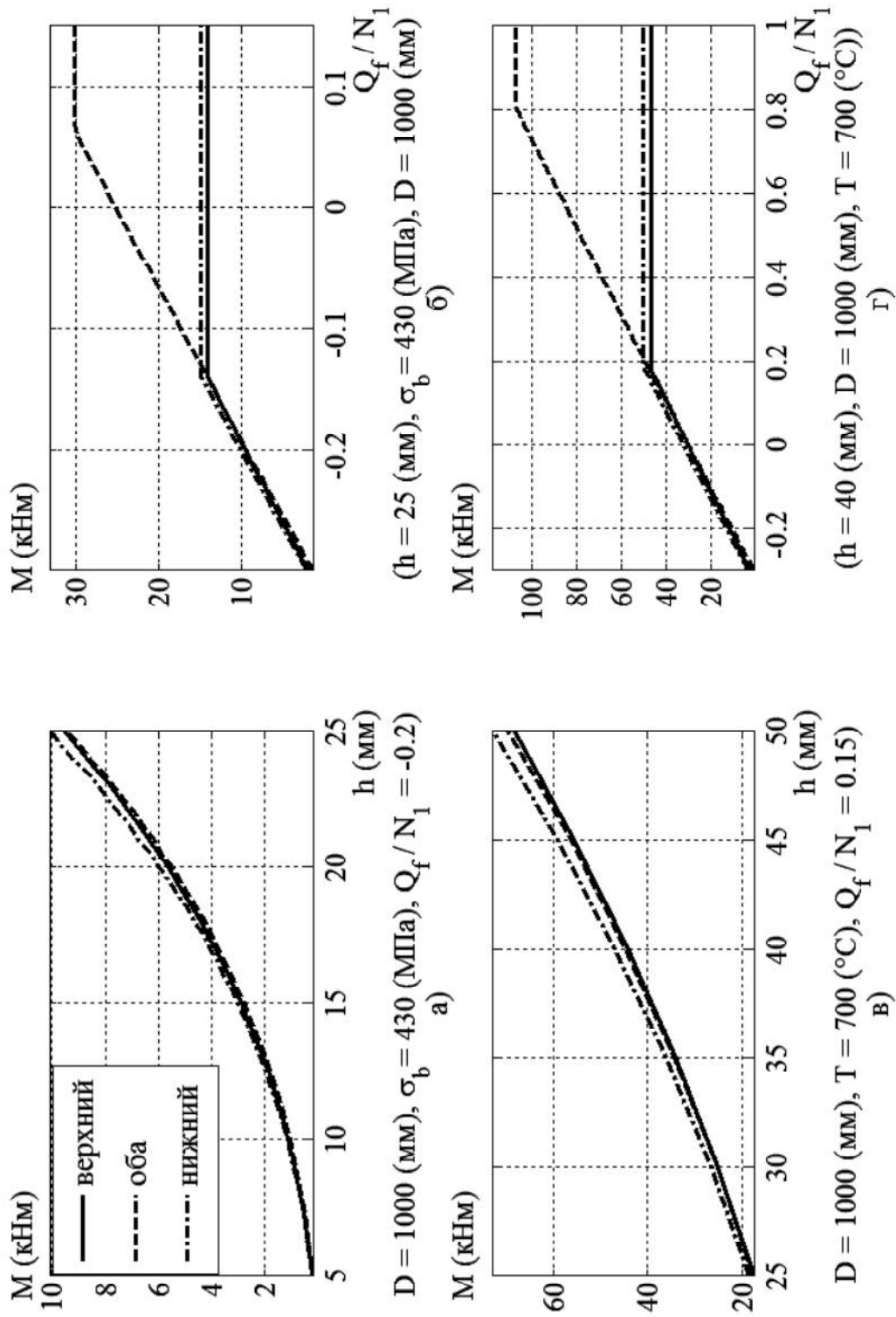


Рисунок 3.15 – Расчётные распределения суммарного момента  $M$  в зависимости от толщины разрезаемого листа  $h$  (а, в), и отношения  $Q_f/N_1$  (б, г)

Данные распределения получены для случаев резки толстолиствого металлопроката в холодном и горячем состоянии при следующих настройках дисковых ножниц: номинальный диаметр дисков  $D = 1000$  мм, температура порезки (в горячем состоянии)  $T = 700^\circ\text{C}$ , угол наклона оси дисков  $9^\circ$ , зазор между дисками в наклонной плоскости принимался  $0.2h$ , ширина отрезаемой кромки принималась  $2h$ . Кроме того, для случая резки листового металлопроката в холодном состоянии, задавали предел прочности разрезаемого материала (СтЗсп)  $\sigma_b = 430$  МПа.

Анализ представленных распределений позволил установить следующее:

- результаты моделирования хорошо согласуются с известной методикой П. В. Боровика (её применяли для моделирования процесса резки двумя приводными ножами в паре), при этом, отличительной особенностью разработанной математической модели является возможность определения энергосиловых параметров процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним (верхним или нижним) приводным ножом из пары в горячем и холодном состоянии;

- резка листового металлопроката в горячем состоянии на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары возможна в более узком диапазоне положительных значений результирующей действия сил внешнего сопротивления  $Q_f$ , чем на ножницах с двумя приводными ножами (максимально допустимым значениям  $Q_f$  соответствуют точки выхода величин моментов резки на асимптотические значения (см. рис. 3.15 б, г), полученные исходя из условий реализации установившегося процесса резки (3.34), (3.35));

- резка в холодном состоянии при рассматриваемых параметрах может быть реализована только с отрицательными значениями  $Q_f$ , что фактически свидетельствует о необходимости обеспечения «подпора» листа при реализации разделительной операции и предположительно может быть достигнуто за счёт объединения технологических процессов правки и продольной резки толстолистовых раскатов на дисковых ножницах.

### 3.4 Имитационное математическое моделирование спектра рабочих нагрузок процессов резки листового металлопроката

#### 3.4.1 Моделирование спектра рабочих нагрузок процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением

Одним из главных показателей с точки зрения, промышленного применения ножниц является их надежность, при этом для её обеспечения необходимо иметь представление относительно спектра рабочих нагрузок при реализации разделительной операции. В то же время выполнение данной задачи в промышленных условиях является весьма затруднительным, что делает целесообразным применение для её решения метода имитационного (статистического) моделирования (метод «Монте-Карло»).

В рамках данной работы на основе разработанного ранее алгоритма автоматизированного расчета максимального значения силы для случая поперечной резки листовых раскатов шевронным ножом со скруглением (см. подразд. 3.2), была получена имитационная математическая модель, численная реализация которой позволила (на базе алгоритма генерирования псевдослучайных равномерно и нормально распределенных чисел и соответствующей статистической обработки полученных данных) предварительно оценить количественные и качественные закономерности вариаций основных технологических параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением [192; 193].

Применение метода Монте-Карло предполагает «розыгрыш» различных сочетаний исходных параметров, для чего генерировали последовательность псевдослучайных равномерно распределенных чисел  $c_K$  в диапазоне  $0,0...1,0$ , используя стандартный функционал среды MATLAB. Далее, используя рекомендации, приведенные в работах [74; 192; 193], получали нормально распре-

деленные числа  $\beta_K$  в диапазоне  $-3,0 \dots 3,0$  с математическим ожиданием, равным нулю, и средним квадратичным отклонением, равным единице:

$$\beta_K = \frac{3 - \sqrt{9 - 12\pi\mu_K^2}}{\mu_K \sqrt{2\pi}} \quad \text{при } |\mu_K| \leq 0,487; \quad (3.36)$$

$$\beta_K = \frac{|\mu_K|}{\mu_K} [2,25867 + 57,0256(|\mu_K| - 0,487)] \quad \text{при } |\mu_K| > 0,487, \quad (3.37)$$

где  $\mu_K = c_K - 0,5$ .

Нормально распределенные числа  $y_K$  с заданными значениями математического ожидания  $\bar{y}$  и коэффициента вариации  $v_K$  получали по формуле:

$$y_K = \bar{y}(1 + \beta_K v_K). \quad (3.38)$$

Непосредственно моделирование спектра рабочих нагрузок процесса поперечной резки листовых раскатов шевронным ножом со скруглением реализовывалось путём многократного разыгрывания по формулам (3.36)–(3.38) величин исходных параметров разделительного процесса с последующим определением максимального значения силы резки для каждой их комбинации на базе математической модели, разработанной в подразделе 3.2.

В ходе моделирования варьировали следующие параметры исследуемого технологического процесса: толщина разрезаемого листа  $h$ , предел прочности материала  $\sigma_b$ , угол наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $\alpha$ , и зазор между ножами  $\Delta$ , при этом в процессе имитационного моделирования номинальные значения данных исходных параметров не изменяли. Такой подход по своей сути соответствует предположению об отработке оператором или системой регулирования только тех возмущений, достоверная аналитическая оценка характера возникновения которых не представляется возможной.

При разработке и численной реализации имитационной математической модели принимали нормальный закон распределения исходных параметров, а их номинальные значения и коэффициенты вариации – на основе известных рекомендаций [82–95; 186].

Последующая обработка массивов значений максимальной силы резки производилась с применением методов математической статистики [174; 177], по результатам которой была построена расчетная гистограмма распределения данного показателя. Программная реализация изложенного выше алгоритма имитационного математического моделирования была выполнена в среде системы автоматизации математических расчетов MATLAB. Моделирование проводилось применительно к процессу поперечной резки листовых раскатов шевронным ножом со скруглением радиусом  $R = 2500$  мм полос из стали СтЗсп для номинальных значений исходной толщины  $\bar{h} = 25$  мм, предела прочности  $\bar{\sigma}_b = 430$  МПа, угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $\bar{\alpha} = 3^\circ$  и величины зазора между ножами  $\bar{\Delta} = 0,5$  мм. Исходя из условий промышленной реализации процесса, были установлены следующие коэффициенты вариации исходных параметров: толщина разрезаемого листа –  $v_h = 0,004$ , предел прочности –  $v_\sigma = 0,058$ , угол наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки –  $v_\alpha = 0,017$ , величина зазора между ножами  $v_\Delta = 0,1$ .

Для каждой комбинации величин исходных параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением рассчитывалась величина максимальной силы резки с применением математической модели, разработанной в подразделе 3.2.

Оценка влияния вариации исходных параметров на коэффициент вариации максимального значения силы резки  $v_N$  осуществлялась путём численной реализации имитационной модели при условии варьирования одного из входных параметров и номинальных значениях остальных величин. Полученные расчётные распределения величины  $v_N$  представлены на рисунке 3.16. Анализ данных распределений позволил установить, что основное влияние на величину



коэффициента вариации максимального значения силы резки оказывают величины коэффициентов вариации толщины и предела прочности разрезаемого листа, при этом наименее всего на исследуемую величину влияет изменение коэффициента вариации величины зазора между ножами.

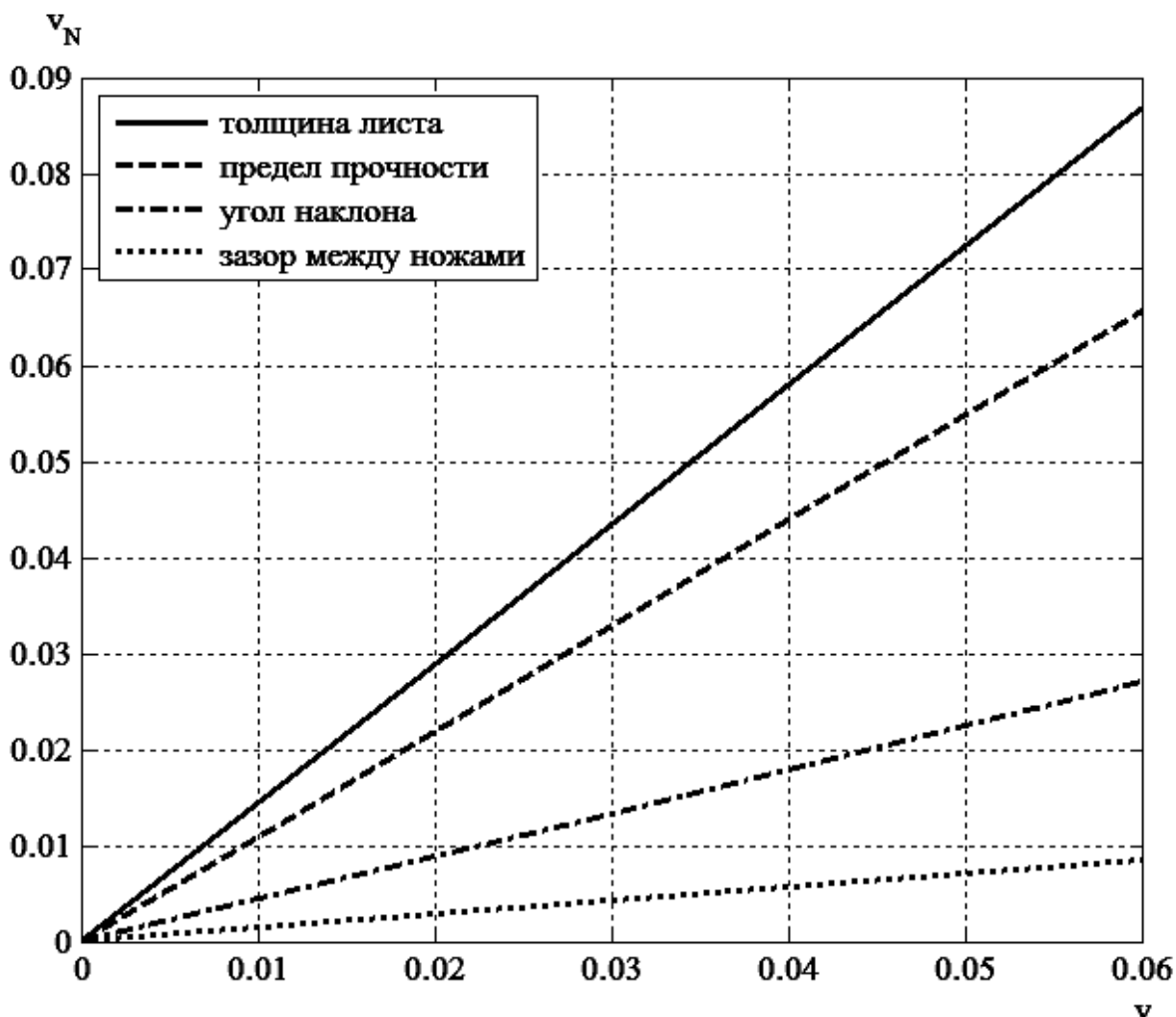


Рисунок 3.16 – Расчетные распределения коэффициента вариации значения силы резки  $v_N$  в зависимости от изменения коэффициентов вариации исходных параметров

На рисунке 3.17 представлены гистограммы распределения значений исходных параметров с соответствующими коэффициентами вариации. На основе представленных гистограмм, можно сделать вывод, что данные распределения действительно соответствуют нормальному закону, а их средние выборочные значения практически эквивалентны номинальным.

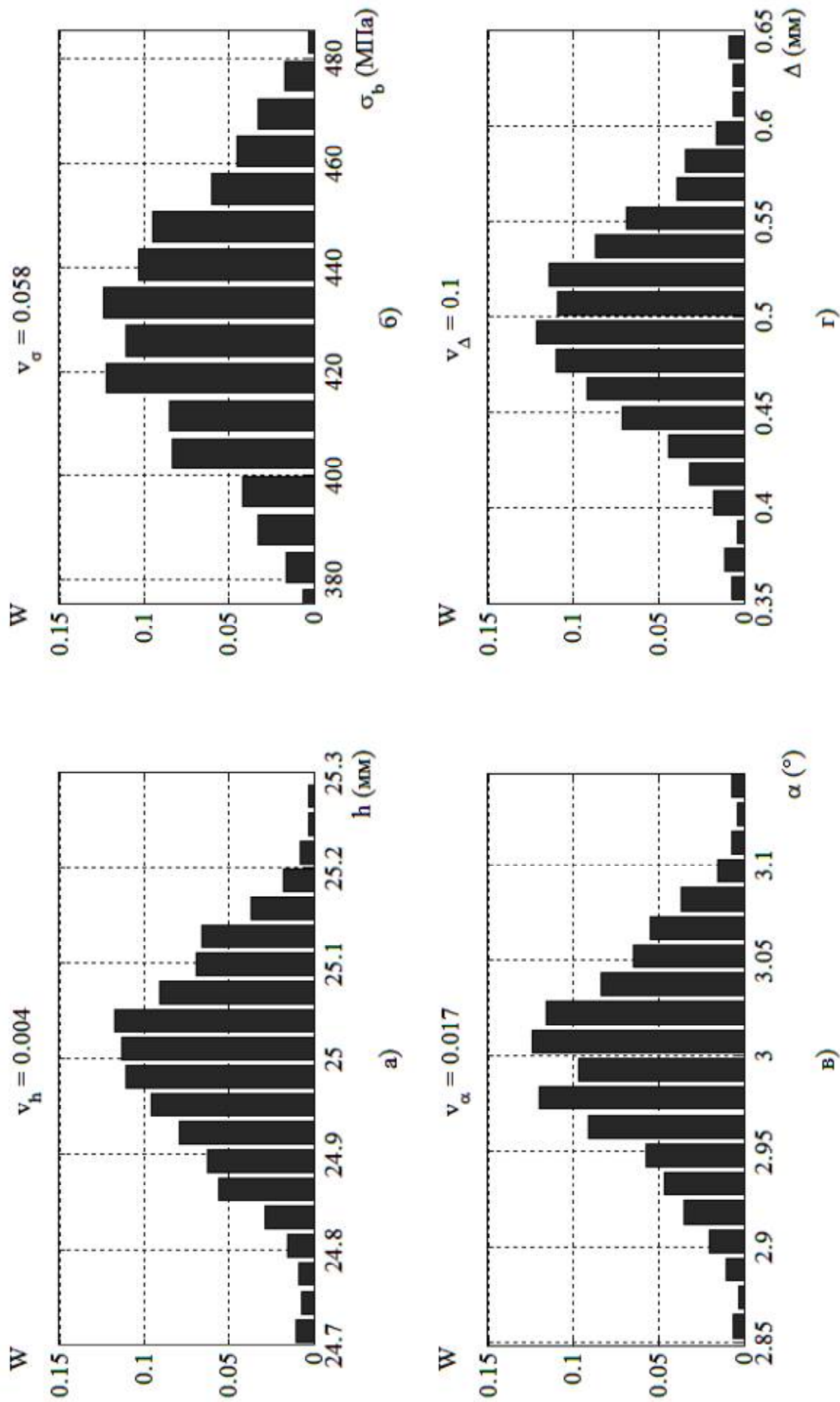


Рисунок 3.17 – Расчетные гистограммы распределения значений толщины  $h$  (а), предела прочности  $\sigma$  (б), угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $\alpha$  (в) и величины зазора между ножами  $\Delta$  (г)

На рисунке 3.18 представлена гистограмма распределения максимальных значений силы  $N_{\max}$  для случая поперечной резки толстолистного металлопроката шевронным ножом со скруглением, полученная в соответствии с принятыми распределениями основных параметров данного технологического процесса.

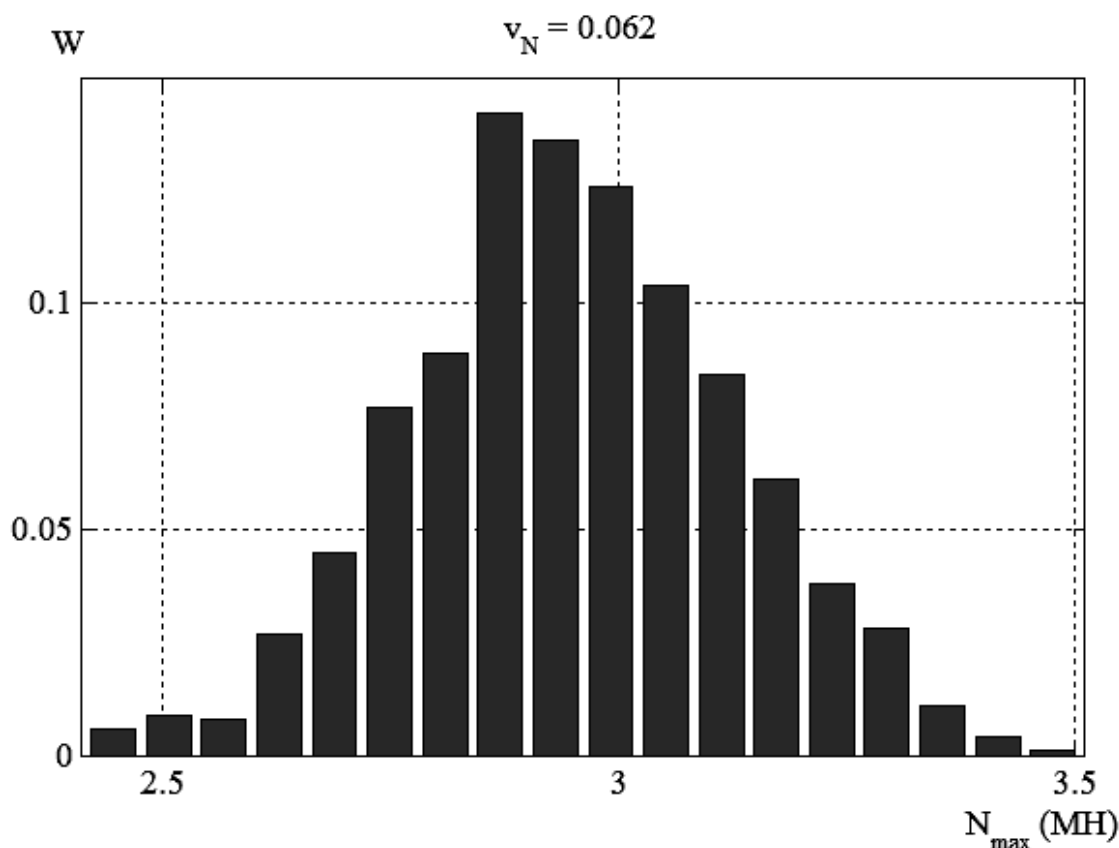


Рисунок 3.18 – Гистограмма распределения расчетных максимальных значений силы  $N_{\max}$ , для случая поперечной резки толстолистного металлопроката шевронным ножом со скруглением

Анализ полученной гистограммы свидетельствует о том, что распределение величины максимальной силы резки соответствует нормальному закону с коэффициентом вариации  $v_N = 0,062$ , при этом для практических расчётов (с учётом плотности вероятности для данного распределения) значения максимальной силы резки следует принимать не менее  $1,12\bar{N}_{\max}$ , что позволит учесть более 96 % возможных случаев отклонения основных технологических параметров рассматриваемого разделительного процесса, от их номинальных значений.

### 3.4.2 Моделирование спектра рабочих нагрузок процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары

Как и в предыдущем случае при имитационном моделировании процесса продольной резки листовых раскатов на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары, реализовывался «розыгрыш» комбинаций величин исходных параметров, для чего применяли алгоритм, аналогичный рассмотренному в предыдущем пункте. При этом учитывая схожесть распределений величин моментов (см. рис. 3.15) было решено рассмотреть схему привода ножниц с одним верхним приводным ножом из пары. Применительно к данной разделительной операции варьировали следующие параметры: толщину разрезаемого листа  $h$ , предел прочности материала  $\sigma_b$ , ширину отрезаемой кромки  $a$ , и коэффициент трения  $f$ . Имитационное моделирование рассматриваемого технологического процесса проводили на базе методики, разработанной в подразделе 3.3, для случая продольной резки листового проката в холодном состоянии с номинальной толщиной  $\bar{h} = 25$  мм, из стали марки СтЗсп с пределом прочности  $\bar{\sigma}_b = 430$  МПа, на дисковых ножницах с одним (верхним из пары) приводным ножом диаметром 1000 мм, при этом номинальное значение коэффициента трения между дисковыми ножами и листом принималось  $\bar{f} = 0,15$ , ширина отрезаемой кромки составляла  $\bar{a} = 50$  мм, угол наклона оси дисков в направлении движения листа принимался  $9^\circ$ , а зазор между дисками в наклонной плоскости составлял 5 мм. Программная реализация имитационной модели выполнялась в среде системы автоматизации математических расчетов MATLAB.

Для оценки влияния вариации исходных параметров на коэффициент вариации значения момента резки  $\nu_M$  одним (верхним) приводным ножом из пары, осуществлялся расчёт основных энергосиловых показателей процесса резки при условии варьирования одного из входных параметров и номинальных зна-

чениях остальных величин. Полученные расчётные распределения величины  $v_M$  представлены на рисунке 3.19. Анализ данных распределений позволил установить, что основное влияние на величину коэффициента вариации значения момента резки, оказывают величины коэффициентов вариации толщины и предела прочности разрезаемого листа.

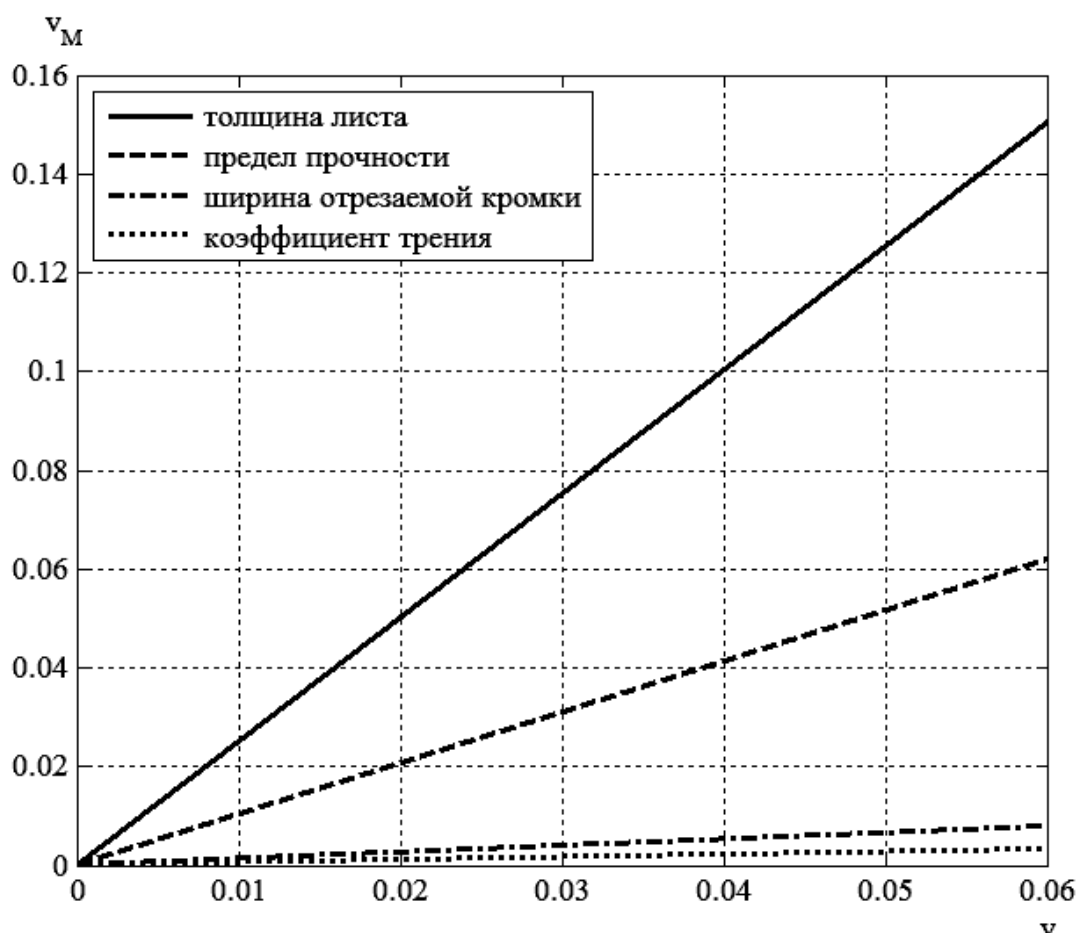


Рисунок 3.19 – Расчетные распределения коэффициента вариации момента резки  $v_M$  в зависимости от изменения коэффициентов вариации исходных параметров

Значениями коэффициентов вариации исходных параметров задавались исходя из условий промышленной реализации процесса продольной резки толстолистового проката на дисковых ножницах по известным рекомендациям [74; 86; 87]:  $v_h = 0,004$ ;  $v_\sigma = 0,058$ ;  $v_a = 0,1$ ;  $v_f = 0,15$ , при этом распределения варьируемых параметров подчинялись нормальному закону (рис. 3.20).

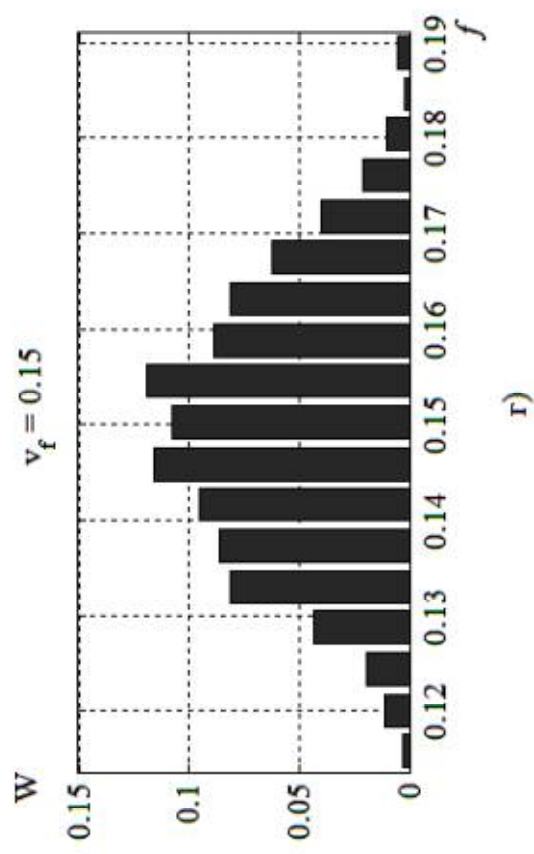
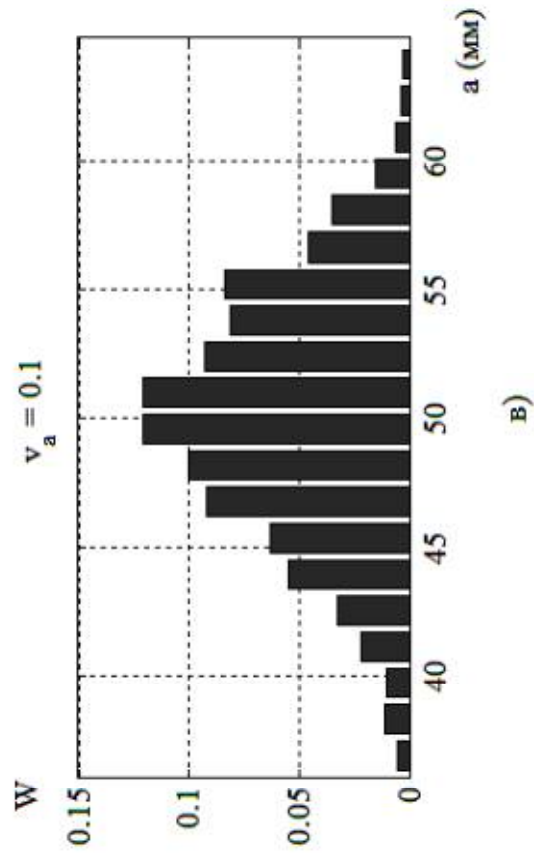
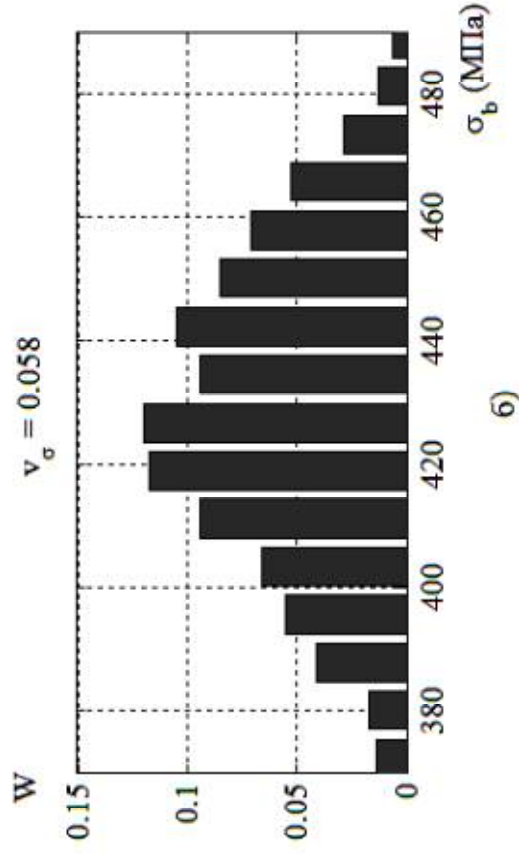
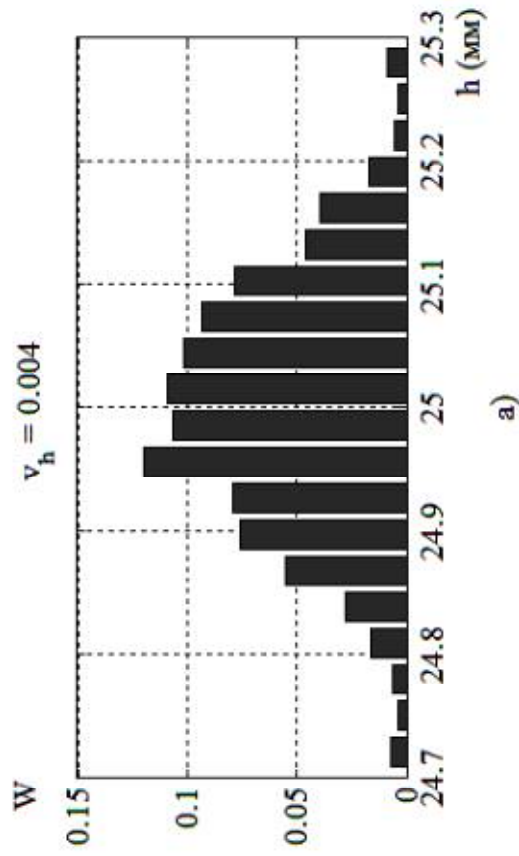


Рисунок 3.20 – Расчетные гистограммы распределения значений исходной толщины  $h$  (а), предела прочности  $\sigma$  (б), ширины отрезаемой кромки  $a$  (в) и величины коэффициента трения  $f$  (г)

На рисунке 3.21 представлена гистограмма распределения значений момента  $M$  для случая обрезки боковых кромок толстолистовых раскатов на дисковых ножницах с одним (верхним) приводным ножом из пары, полученная в соответствии с принятыми распределениями основных параметров для данного технологического процесса.

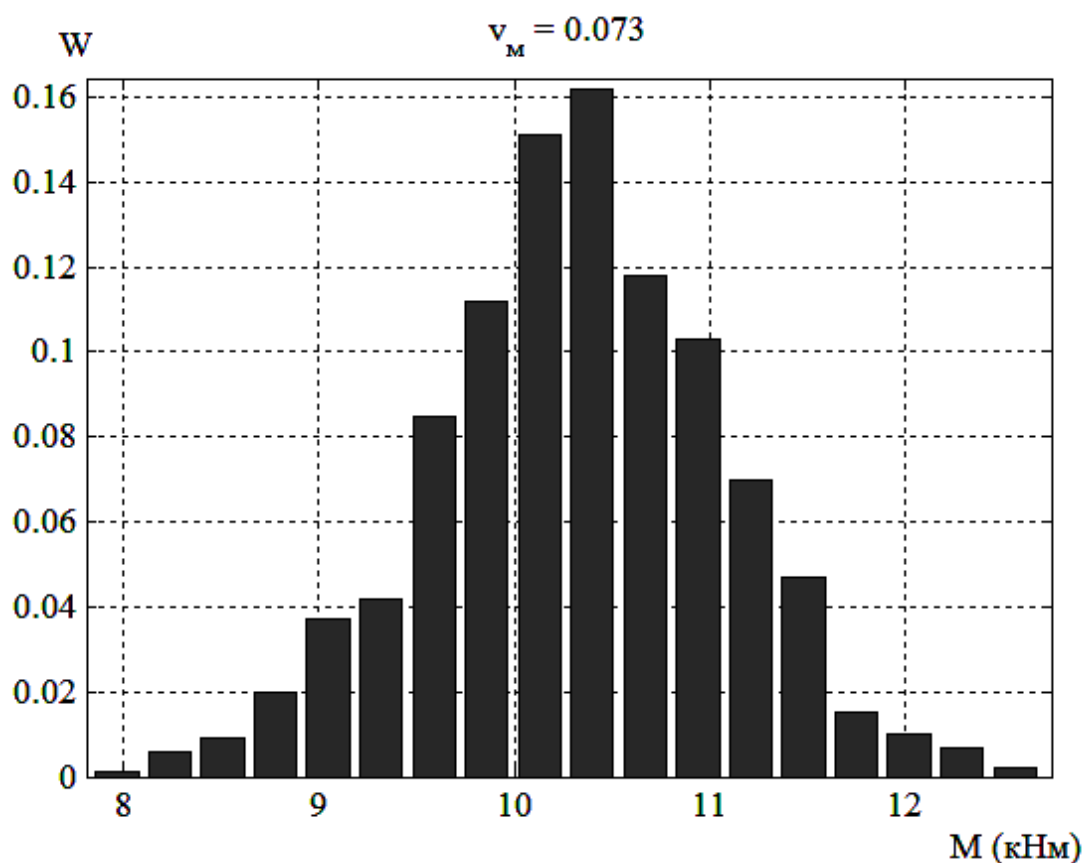


Рисунок 3.21 – Расчетная гистограмма распределения значений момента  $M$ , для случая продольной резки листовых раскатов на дисковых ножницах с одним (верхним) приводным ножом из пары

Из данной гистограммы следует, что распределение величины момента резки подчиняется нормальному закону с коэффициентом вариации  $v_M = 0,073$ , при этом для практических расчётов значения момента резки следует принимать не менее  $1,15\bar{M}$ , что позволит в данном случае учесть более 97 % возможных случаев отклонения основных технологических параметров рассматриваемого разделительного процесса, от их номинальных значений.

Проведенное в рамках данной работы имитационное математическое моделирование рассмотренных процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката позволило оценить возможный спектр рабочих нагрузок на узлы ножниц при реализации данных разделительных операций, что впоследствии, может быть использовано для повышения надёжности применяемого оборудования, а также предварительной оценки принимаемых проектно-конструкторских решений. Разработанные программные средства к определению энергосиловых параметров рассмотренных процессов продольной и поперечной резки, а также имитационному моделированию спектра их рабочих нагрузок представлены в приложении А.

### 3.5 Теоретический анализ влияния внешних сил сопротивления на скорость движения листового металлопроката при резке на дисковых ножницах

Как указывалось подразделе 1.4, одним из характерных дефектов листового проката, разрезаемого на дисковых ножницах, является серповидность. В связи с этим в рамках подраздела 3.3 было решено рассмотреть возможность совмещения процессов правки и резки листовых раскатов дисковыми ножами, что предположительно позволит повысить качество готового проката за счёт ограничения его свободы перемещения в горизонтальной плоскости, а также производить резку листа ножницами с одним приводным ножом из пары за счёт возможного «подпора» листа. В то же время для успешной реализации данного технологического процесса необходимо сформировать чёткое представление относительно кинематических параметров процесса резки листового металлопроката на дисковых ножницах и факторов, на них влияющих. При этом наиболее важным представляется согласование скорости правки и скорости резки, которая, очевидно, ниже окружной скорости дисков и, согласно данным работ [194–195], существенно зависит от действия силы внешнего сопротивления.



Целью данного исследования являлся теоретический анализ зависимости скорости движения листового металлопроката от действия внешних сил сопротивления при резке на дисковых ножницах.

Прежде всего, следует отметить, что реализация процесса резки толстых листов в дисковых ножах при несимметричном внедрении характеризуется неравномерным распределением моментов между ножами. Так на верхнем ноже момент всегда меньше, чем на нижнем, а их величина и соотношение существенно зависят от величины результирующей действия сил внешнего сопротивления  $Q_f$  [74; 196]. Это объясняется тем, что на контакте между верхним ножом и отрезаемой кромкой имеют место зоны «опережения» и «отставания», определяющие направление действия сил трения [74]. В связи с этим, будем использовать понятия приведенных значений коэффициентов трения, которые, исходя из расчётной схемы, представленной на рисунке 3.22, могут быть получены следующим образом:

$$f_1 = \frac{M_1}{R \cdot N_1} \text{ и } f_2 = \frac{M_2}{R \cdot N_2}, \quad (3.39)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – соответственно, моменты на верхнем и нижнем ноже;

$R$  – радиус дискового ножа;

$N_1$  и  $N_2$  – соответственно, радиальные силы на верхнем и нижнем ноже.

При этом мощность, расходуемую на резку и движение (втягивание) листа парой ножей можно определить из выражения:

$$W_{\Sigma} = (M_1 + M_2) \frac{V_o}{R}, \quad (3.40)$$

где  $V_o$  – окружная скорость ножа.

В то же время, рассматривая линейное движение листа при резке, суммарную мощность можно представить, в следующем виде:

$$W_{\Sigma} = W_a + W_s, \quad (3.41)$$

где  $W_a$  и  $W_s$  – мощность активных (втягивающих) сил и сил скольжения, спроецированных на горизонтальную плоскость, соответственно:

$$W_a = F_a V_l = (N_1 \cos(\gamma_1) f_1 + N_2 \cos(\gamma_2) f_2) V_l = (N_{1y} f_1 + N_{2y} f_2) V_l; \quad (3.42)$$

$$W_s = F_s V_l = N_2 \cos(\gamma_2) f_{ск} V_l = N_{2y} f_{ск} V_l, \quad (3.43)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – углы, определяющие направление радиальных сил на верхнем и нижнем ножах по отношению к вертикальной оси диска (см. рис. 3.22) соответственно;

$N_{1y}$  и  $N_{2y}$  – соответственно, вертикальные компоненты радиальных сил на верхнем и нижнем ноже;

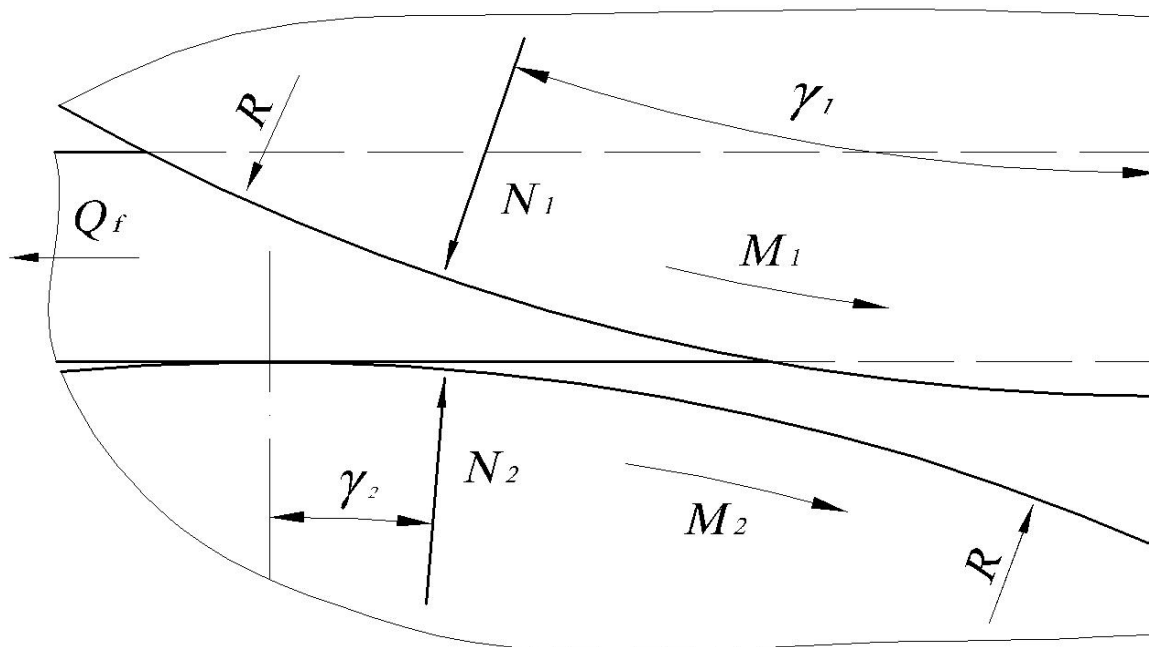


Рисунок 3.22 – Расчетная схема, используемая при анализе зависимости скорости движения листового металлопроката от действия результирующей внешних сил сопротивления  $Q_f$  при резке на дисковых ножницах

$f_{ск}$  – коэффициент скольжения:

$$f_{ск} = \frac{V_o - V_l}{V_l} f_2 (a + bf + cf^2), \quad (3.44)$$

где  $f$  – коэффициент трения;

$a, b, c$  – коэффициенты регрессии, значение которых для конструкционных сталей можно принять:  $a = 2,76$ ;  $b = -3,44$ ;  $c = 4,69$  [197].

Углы направления радиальных сил определяются следующим образом:

$$\gamma_1 = \arctan(N_{1x}/N_{1y}) \text{ и } \gamma_2 = \arctan(N_{2x}/N_{2y}), \quad (3.45)$$

где  $N_{1x}$  и  $N_{2x}$  – горизонтальные компоненты радиальных сил на верхнем и нижнем ноже соответственно.

При этом величина результирующей действия сил внешнего сопротивления (исходя из условия равновесия) может быть представлена:

$$Q_f = N_{2x} - N_{1x}. \quad (3.46)$$

Окончательно, приравняв (3.40) и (3.41) с использованием (3.42) и (3.43), после подстановки и несложных преобразований получим уравнение для скорости движения листа в следующем виде:

$$V_l = \frac{M_2 [\cos(\gamma_2)(a + bf + cf^2) - 1] - M_1}{M_2 \cos(\gamma_2) [(a + bf + cf^2) - 1] - M_1 \cos(\gamma_1)} V_o. \quad (3.47)$$

При этом значения крутящего момента  $M_1$  и  $M_2$ , а также величины силы резки  $N_1$  и  $N_2$  на верхнем и нижнем ножах, соответственно, рекомендуется определять по методике, описанной в работе [74].

На рисунке 3.23, представлены зависимости скорости движения листа, полученные по результатам численной реализации алгоритма, описанного выражениями (3.39)–(3.47), которая проводилась в среде автоматизации математических расчётов MATLAB для случая обрезки боковых кромок листов из трех марок стали: Сталь 20 (см. рис. 3.23, а), Сталь 65Г (см. рис. 3.23, б) и Сталь 75 (см. рис. 3.23, в) при температуре  $700^{\circ}\text{C}$ . Для данных марок стали процесс резки на дисковых ножницах моделировался при следующих исходных параметрах: толщина разрезаемого листа  $h = 50$  мм, ширина отрезаемой кромки  $a = 50$  мм, диаметр ножей  $D = 1000$  мм, угол наклона оси дисков в направлении движения листа  $\psi = 9^{\circ}$ , зазор между дисками в наклонной плоскости  $\delta = 10$  мм. Также моделировали процесс резки еще одной марки стали (15ХСНД) в холодном состоянии с пределом прочности  $\sigma_b = 530$  МПа, толщина разрезаемого листа в данном случае составляла  $h = 35$  мм (см. рис. 3.23, г).

Коэффициент трения для моделируемых материалов составлял: сталь 20 –  $f = 0,546$ ; сталь 65Г и 75 –  $f = 0,42$ ; сталь 15ХСНД –  $f = 0,2$ . Окружная скорость дисковых ножей для всех случаев принималась равной  $V_o = 0,4$  м/с.

Анализ полученных зависимостей позволил установить следующее:

- скорость движения листа при резке ниже окружной скорости дисковых ножей и при отсутствии сил внешнего сопротивления для случая резки двумя приводными ножами в паре составляет порядка  $(0,93 \dots 0,95)V_o$ , что фактически определяет рекомендуемые значения скорости подачи листа в дисковые ножницы с точки зрения минимизации напряжений в листе при переходе от процесса правки к процессу обрезки его боковых кромок;

- зависимость скорости листа при резке от отношения величины результирующей сил внешнего сопротивления  $Q_f$  к величине силы резки  $N_1$  носит обратный нелинейный характер, при этом с уменьшением коэффициента трения снижение скорости листа  $V_l$  происходит более интенсивно, что с учётом выбранного подхода объясняется уменьшением энергетической составляющей активных (втягивающих) сил.

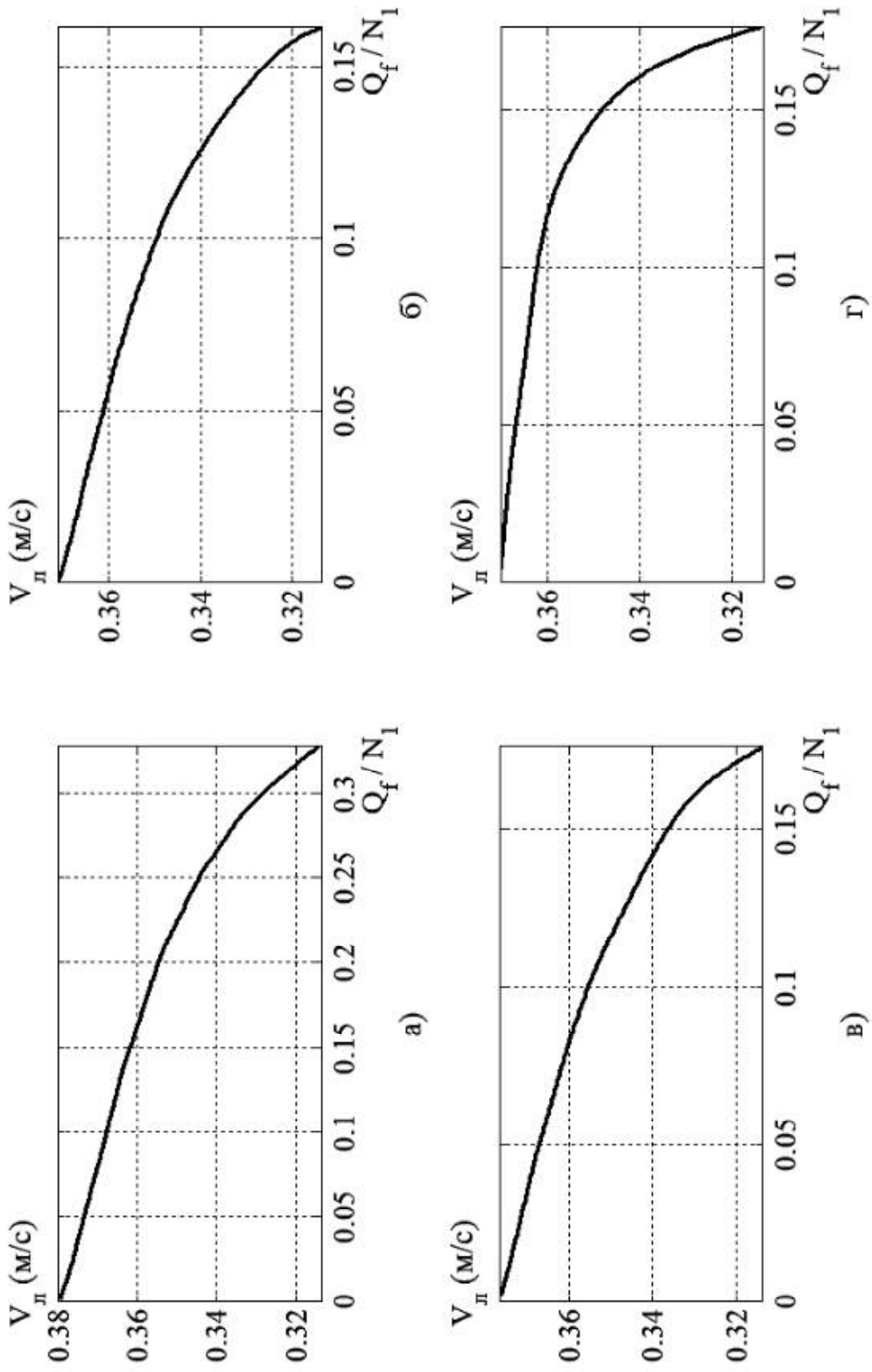


Рисунок 3.23 – Расчётные распределения значений скорости листа при резке  $V_n$  от результирующей сил внешнего сопротивления  $Q_f$ , представленной в отношении к величине силы резки  $N_f$

## ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 3

1. Повышение качества толстолистого металлопроката, разрезаемого на ножницах, возможно путём применения для поперечной резки шевронного ножа с конструктивным элементом в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей режущей кромки, применение которого сопровождается увеличением силы резки в завершающей стадии разделительного процесса. При этом наиболее перспективной представляется конструкция шевронного ножа со скруглением, применение которого, теоретически, позволяет добиться большего (на 7,4 %) снижения величины остаточной деформации листа в сравнении с шевронным ножом конструкции «Северсталь», при равном максимальном значении силы резки, теоретическая оценка которого возможна с применением разработанной в рамках данной работы методики исходя из распределения данной величины в зависимости от перемещения ножа при резке.

2. Касательно процесса обрезки боковых кромок листовых раскатов на дисковых ножницах, исходя из проведенного теоретического исследования, можно утверждать, что разделительный процесс, может производиться одним приводным ножом из пары, однако реализация данной операции возможна в ограниченном диапазоне значений результирующей действия сил внешнего сопротивления, что приводит к необходимости её компенсации силой, направленной в сторону движения листа («подпором»).

3. Из результатов проведенного имитационного моделирования спектра рабочих нагрузок процессов продольной и поперечной резки листового металлопроката следует, что получаемые с применением разработанных методик расчётные значения максимального значения силы  $N_{\max}$  и момента  $M$  резки с точки зрения надёжности проектируемого оборудования необходимо увеличивать на 12 % и 15 %, соответственно.

4. Основываясь на результатах теоретического анализа зависимости скорости движения листового металлопроката от действия внешних сил сопротив-

ления, при резке на дисковых ножницах, можно утверждать, что скорость движения листа при резке ниже окружной скорости дисковых ножей  $V_o$  и при отсутствии сил внешнего сопротивления может составлять порядка  $(0,93...0,95)V_o$ , при этом зависимость скорости листа при резке от величины результирующей сил внешнего сопротивления носит обратный нелинейный характер, а с уменьшением коэффициента трения снижение скорости листа  $V_l$  происходит более интенсивно, что объясняется уменьшением энергетической составляющей активных (втягивающих) сил.

## РАЗДЕЛ 4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

#### 4.1 Исследование энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом

Основная часть экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом проводилась в лаборатории кафедры «Механика и пластическое формование» Донбасской государственной машиностроительной академии на установке пресс-ножниц (см. подразд. 2.3). При этом основной целью данных исследований являлась оценка адекватности разработанной методики расчета значения максимальной прикладываемой силы для случая поперечной резки листовых раскатов шевронным ножом со скруглением (см. подразд. 3.2). Для реализации процесса поперечной резки в лабораторных условиях применялись как классические шевронные ножи, так и со скруглением в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей режущей кромки (конструкция и основные размеры используемых шевронных ножей представлены на рисунке 4.1). В ходе экспериментальных исследований резали стальные пластины толщиной 3, 4 и 5 мм шириной 380 мм (марки стали и механические свойства представлены в таблице 4.1) [198], от них отрезались полосы шириной 22 мм.

Таблица 4.1 – Марки стали и механические свойства разрезаемых образцов

№ п/п	Толщина листа, мм	Марка стали	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
1	3	20пс	277	399	11
2	4	20пс	351	413	14
3	5	ВСт2кп	310	397	22



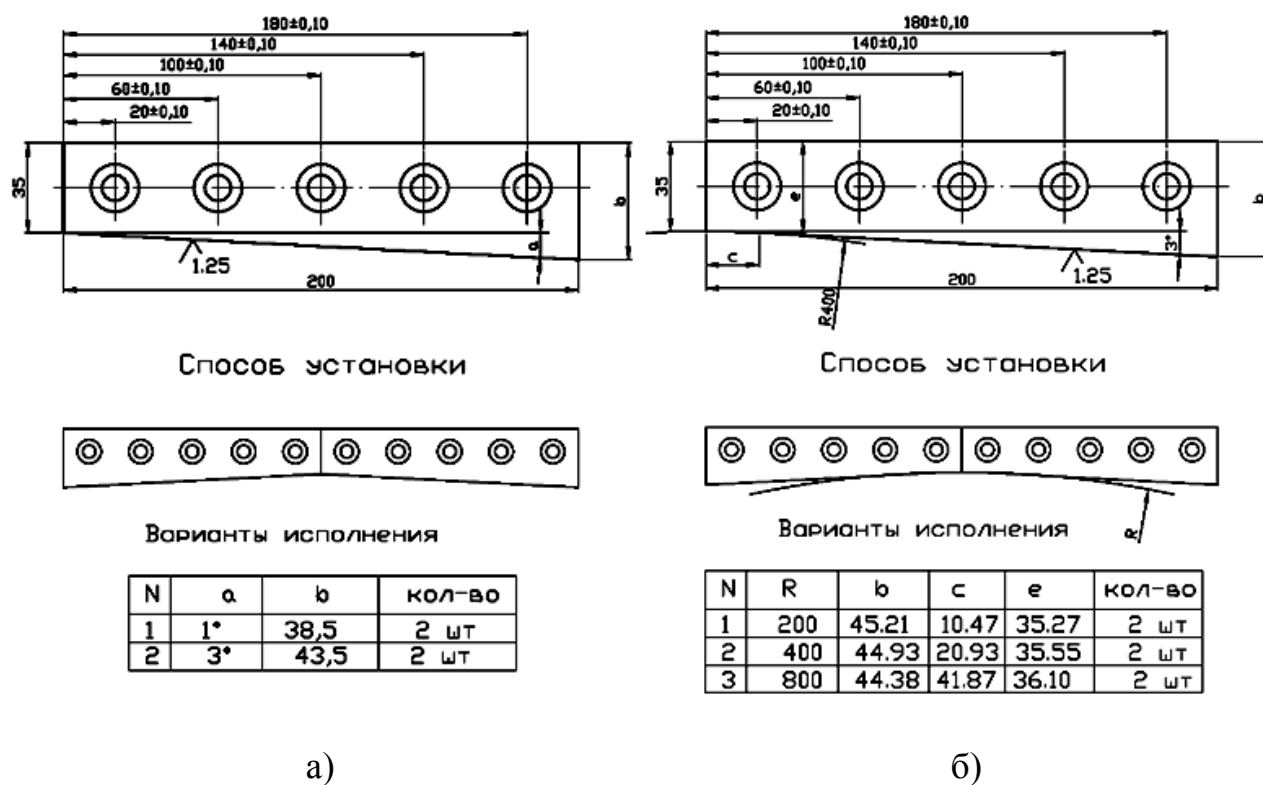


Рисунок 4.1 – Конструкция и основные размеры используемых при проведении экспериментов шевронных ножей: классический (а) и со скруглением (б)

На рисунке 4.2 представлено фото полосы толщиной  $h = 4$  мм, отрезанной шевронным ножом со скруглением радиусом  $R = 800$  мм и углом наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $\alpha = 3^\circ$ .

При реализации процесса резки в лабораторных условиях, посредством измерительной системы, описанной в подразделе 2.3 (см. рис. 2.2), контролировали силу резки и перемещение ножа.

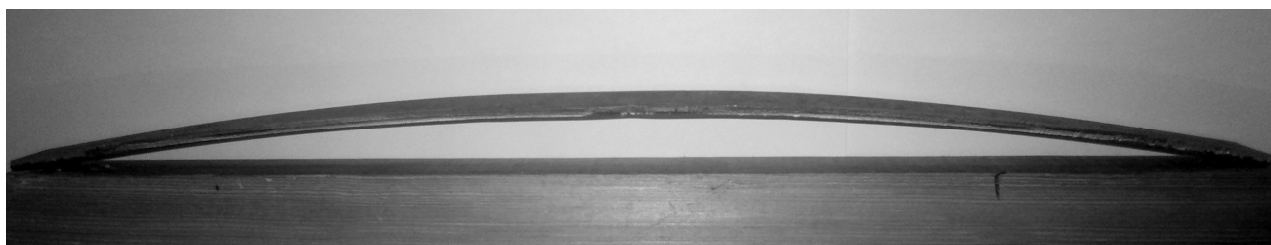
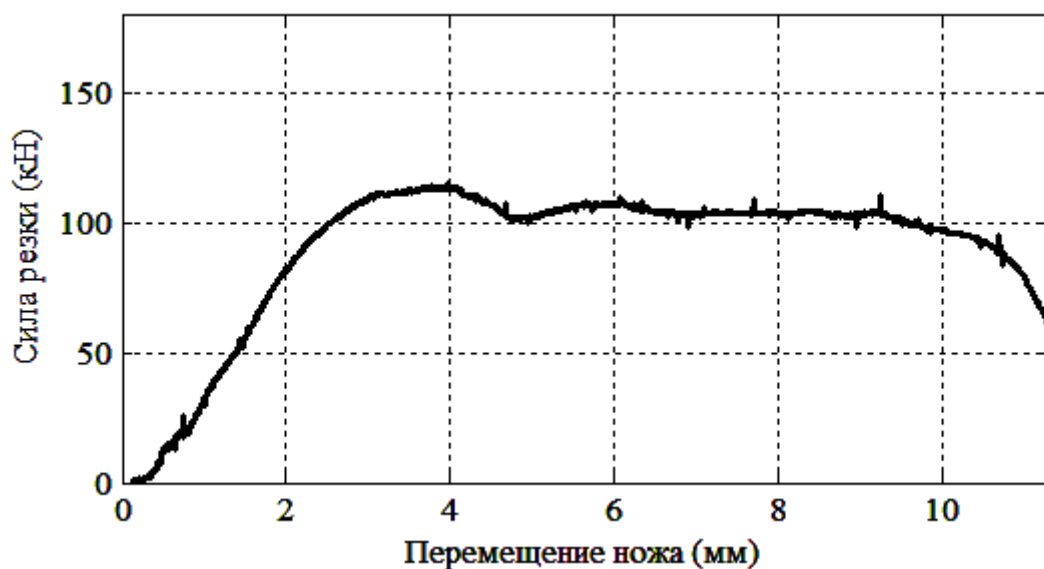
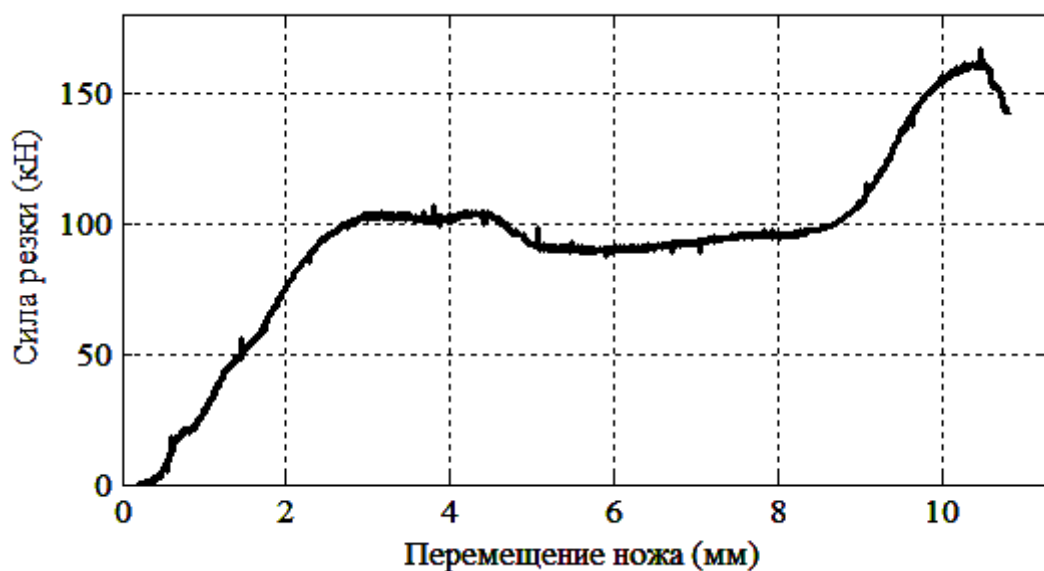


Рисунок 4.2 – Фото полосы толщиной  $h = 4$  мм, отрезанной шевронным ножом со скруглением радиусом  $R = 800$  мм и углом наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $\alpha = 3^\circ$

На рисунке 4.3 приведены типовые осциллограммы силы резки, полученные при резке пластин толщиной  $h = 4$  мм классическим шевронным ножом (см. рис. 4.3, а) и со скруглением радиусом  $R = 800$  мм (см. рис. 4.3, б) (угол наклона прямолинейных плоскостей для обоих ножей составлял  $\alpha = 3^\circ$ ).



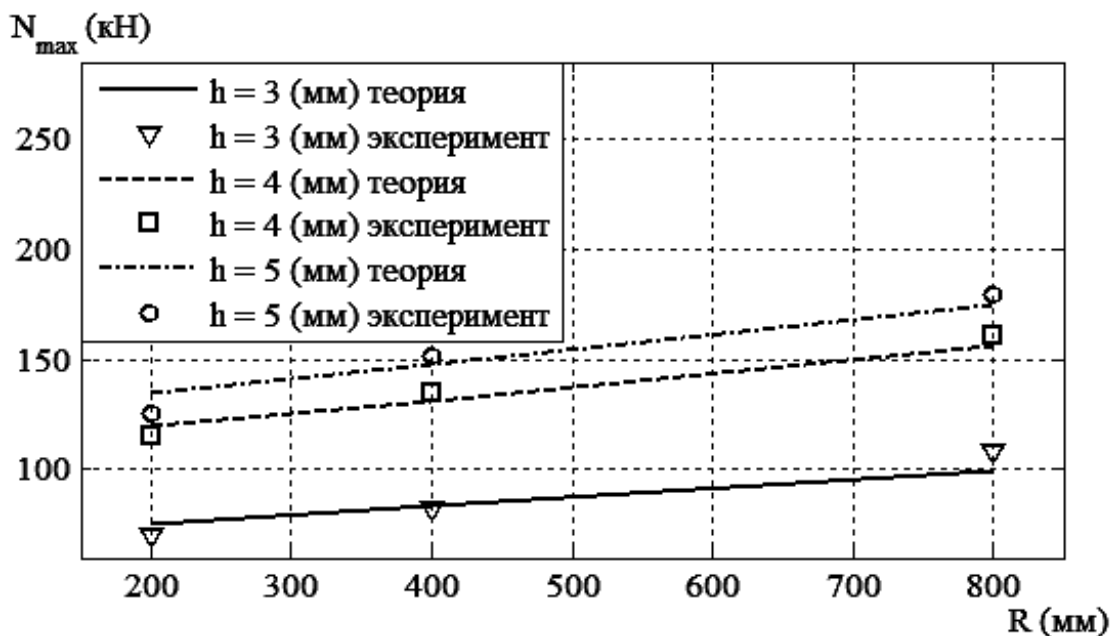
а)



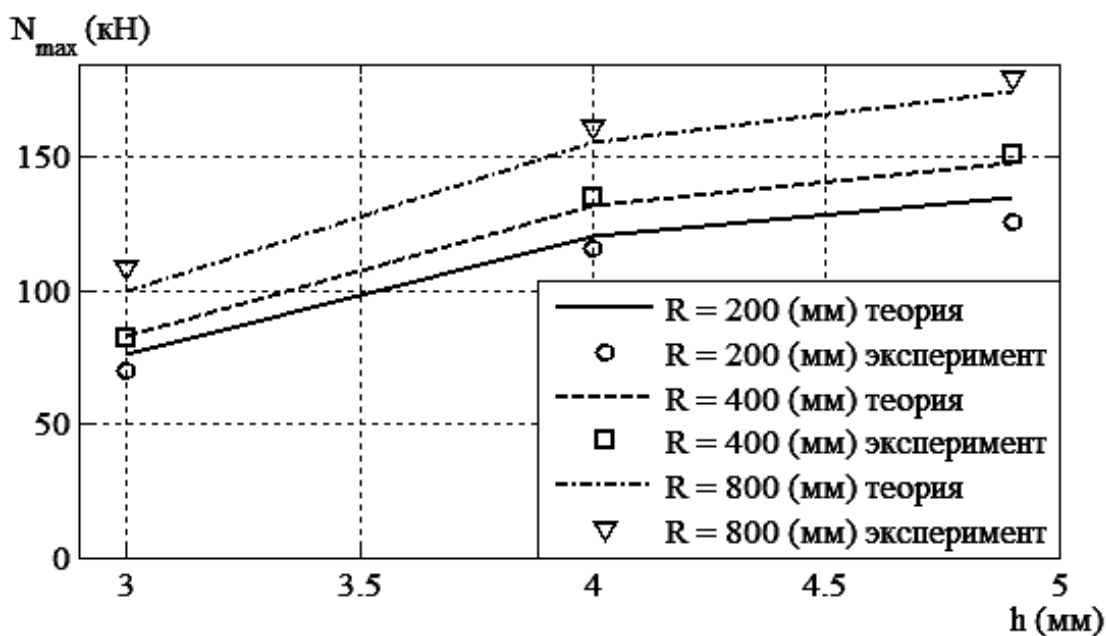
б)

Рисунок 4.3 – Типовые осциллограммы силы резки, полученные при резке пластин толщиной  $h = 4$  мм классическим шевронным ножом (а) и со скруглением радиусом  $R = 800$  мм (б) (угол наклона прямолинейных плоскостей для обоих ножей составлял  $\alpha = 3^\circ$ )

Далее проводили предварительное сравнение соответствующих теоретических и усреднённых экспериментальных значений максимального значения силы резки  $N_{\max}$ , представленных в зависимости от радиуса скругления  $R$  (рис. 4.4, а) и толщины разрезаемого листа  $h$  (рис. 4.4, б).



а)



б)

Рисунок 4.4 – Экспериментальные и теоретические зависимости максимальных значений силы резки  $N_{\max}$  от радиуса скругления  $R$  (а) и толщины разрезаемого листа  $h$  (б)

Также, с целью расширения представления о протекании процесса поперечной резки листового металлопроката, в рамках данного исследования часть опытов проводилась на лабораторных ножницах кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (см. подразд. 2.3). Резка производилась классическим шевронным ножом и со скруглением радиусом  $R = 400$  мм (угол наклона прямолинейных плоскостей для обоих ножей в данном случае составлял  $3^\circ$  и  $6^\circ$ ), резались пластины из свинцового сплава ( $\sigma_b = 28$  МПа) с размером поперечного сечения:  $5 \times 145$ ,  $10 \times 140$ ,  $15 \times 130$  и  $20 \times 125$  мм. На рисунке 4.5 представлены теоретические  $N_T$  и экспериментальные  $N_{\text{Э}}$  распределения значений силы в зависимости от перемещения ножа  $S$ , полученные для случая резки свинцовых пластин указанного сечения классическим шевронным ножом с углом наклона режущих кромок  $6^\circ$ .

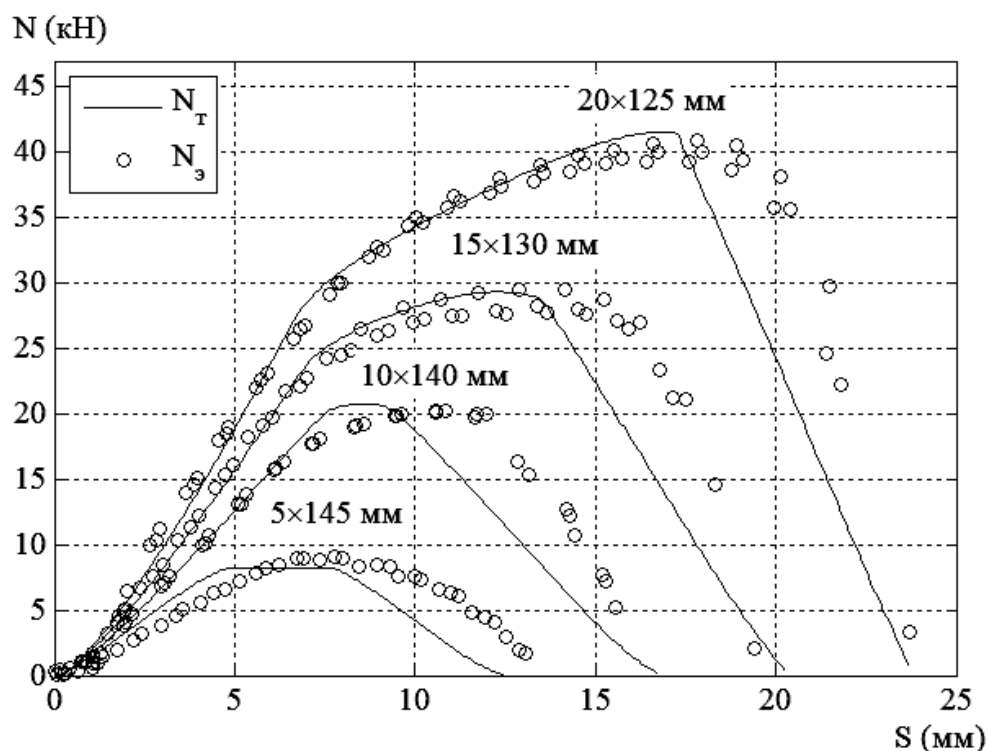
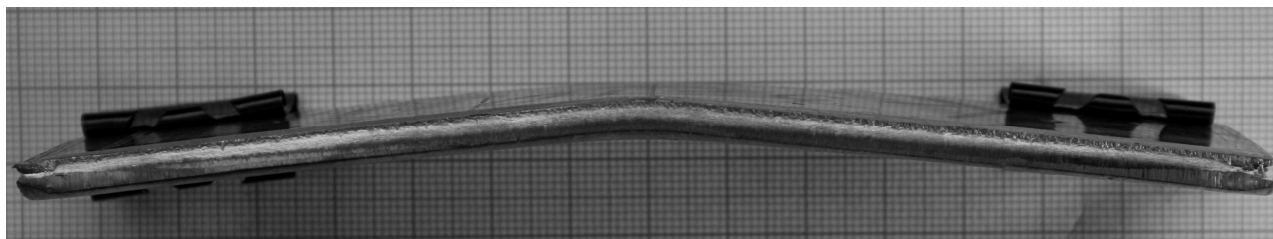
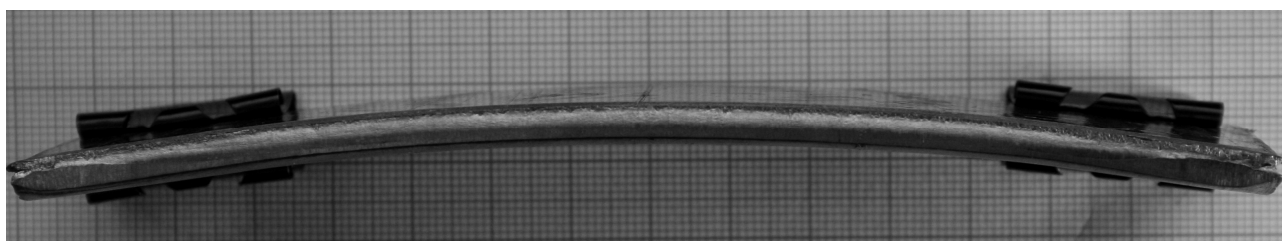


Рисунок 4.5 – Теоретические  $N_T$  и экспериментальные  $N_{\text{Э}}$  распределения значений силы в зависимости от перемещения ножа  $S$ , полученные для случаев резки свинцовых пластин классическим шевронным ножом с углом наклона режущих кромок  $6^\circ$

На рисунке 4.6 приведены фото торцевых поверхностей свинцовых пластин толщиной  $h = 5$  мм, отрезанных классическим шевронным ножом (см. рис. 4.6, а) и со скруглением радиусом  $R = 400$  мм (см. рис. 4.6, б).



а)



б)

Рисунок 4.6 – Фото торцевых поверхностей свинцовых пластин толщиной  $h = 5$  мм, отрезанных классическим шевронным ножом (а) и со скруглением радиусом  $R = 400$  мм (б)

Предварительная оценка степени соответствия между экспериментальными и теоретическими значениями максимального значения силы резки для всех рассмотренных случаев определялась по средней относительной ошибке аппроксимации  $\bar{\varepsilon}$ , значения которой приведены в соответствующей графе сводной таблицы 4.2, при этом экспериментальные значения величины максимальной силы резки представлены в виде её среднего значения  $\overline{N_{\text{Э}}}$  по повторам опытов с одинаковыми условиями.

Из данных, представленных в приведенной таблице следует, что величина средней относительной ошибки аппроксимации в большинстве случаев составляет  $\bar{\varepsilon} < 10\%$ , что на данном этапе обработки данных позволяет сделать вывод о наличии достаточно тесной связи между соответствующими экспериментальными и теоретическими значениями исследуемой величины [180].

Таблица 4.2 – Экспериментальные  $\overline{N}_Э$  и теоретические  $N_T$  значения максимальной силы резки при указанных условиях реализации разделительного процесса

№ п.п.	Сечение, мм	Угол $\alpha^\circ$	Максимальная сила резки		$\overline{\varepsilon}$ , %
			$\overline{N}_Э$ , кН	$N_T$ , кН	
<b>Шевронный нож классической формы</b>					
1	4×380	3	103,71	111,5	6,97
2	5×380	3	125,61	125,1	0,39
3	5×145	6	8,73	8,24	6,03
4	10×140	3	21,05	21,67	2,86
5	10×140	6	20,27	20,79	2,49
6	15×130	3	26,47	29,65	10,73
7	15×130	6	28,60	29,34	3,32
8	20×125	3	38,52	41,54	7,26
9	20×125	6	40,16	41,55	3,33
<b>Шевронный нож со скруглением (<math>R=200</math> мм) профиля в вершине схождения наклонных плоскостей ножа</b>					
10	3×380	3	70,17	75,69	7,29
11	4×380	3	115,70	120,1	3,66
12	5×380	3	125,50	135,0	7,04
<b>Шевронный нож со скруглением (<math>R=400</math> мм) профиля в вершине схождения наклонных плоскостей ножа</b>					
13	3×380	3	82,18	83,29	1,33
14	4×380	3	134,90	131,5	2,59
15	5×380	3	151,20	147,6	2,44
16	10×140	6	21,48	22,37	3,99
17	15×135	3	35,26	33,59	4,96
18	15×135	6	35,75	33,37	7,12
19	20×125	3	40,67	44,03	7,63
20	20×125	6	43,11	44,38	2,85
<b>Шевронный нож со скруглением (<math>R=800</math> мм) профиля в вершине схождения наклонных плоскостей ножа</b>					
21	3×380	3	108,10	99,94	8,16
22	4×380	3	160,70	155,8	3,15
23	5×380	3	179,60	175,0	2,63

Графическое представление корреляционной зависимости между теоретическими  $N_T$  и экспериментальными  $N_{\text{Э}}$  значениями максимальной силы резки, описанной соответствующим регрессионным уравнением, с коэффициентом корреляции  $R$  и доверительным интервалом  $p$  для случая поперечной резки шевронным ножом со скруглением представлено на рисунке 4.7.

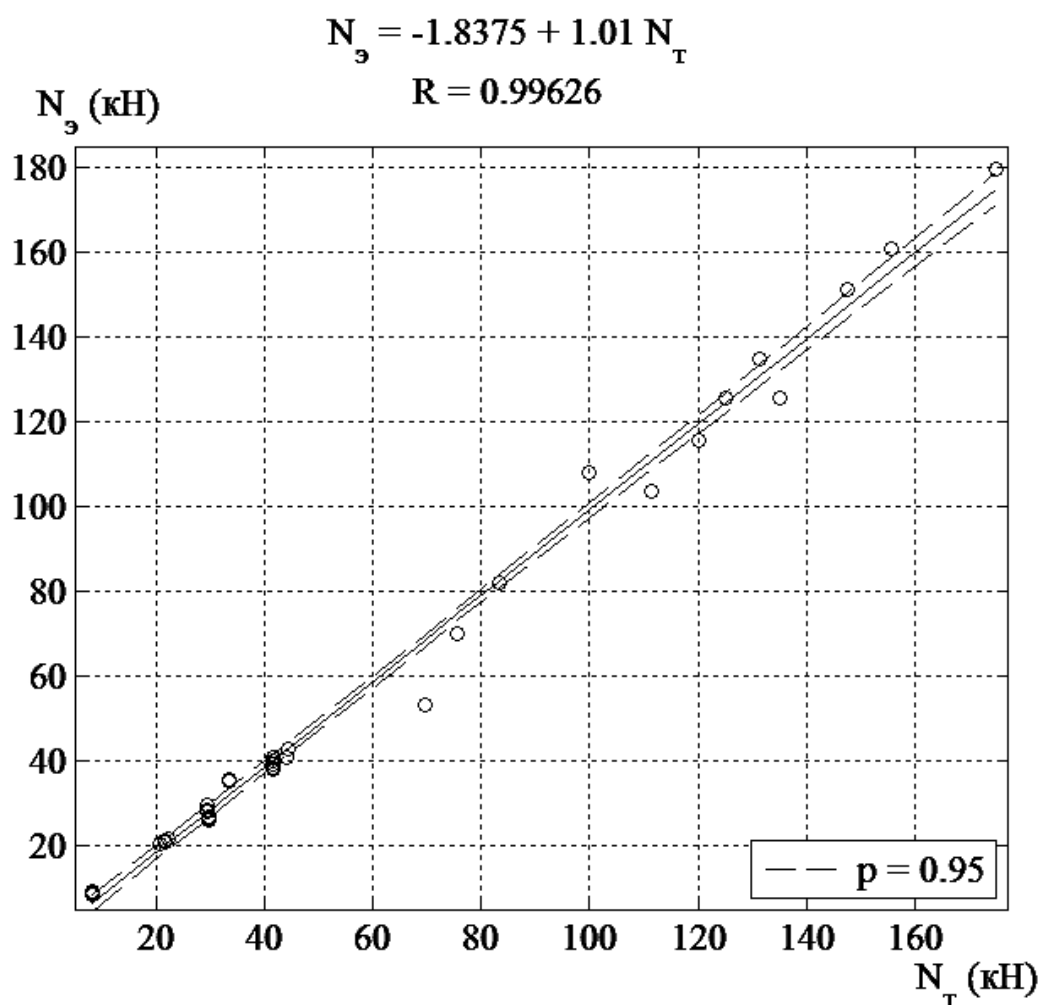


Рисунок 4.7 – Графическое представление корреляционной зависимости между теоретическими  $N_T$  и экспериментальными  $N_{\text{Э}}$  значениями максимальной силы для случая поперечной резки шевронным ножом со скруглением

Оценка адекватности результатов математического моделирования проводилась на базе дисперсионного анализа (проведенного при помощи прикладной программы STATISTICA) исходя из которого установлено, что расчётные значения силы резки соответствуют реальным с вероятностью  $p \approx 93 \%$ .

#### 4.2 Экспериментальная оценка влияния геометрических характеристик режущей кромки шевронного ножа со скруглением на качество листового металлопроката

Исходя из результатов, представленных в подразделе 3.1, следует, что применение шевронного ножа со скруглением для поперечной резки листового металлопроката позволяет снизить величину остаточной деформации готового листа. Однако на этапе проектирования принятие решения относительно геометрических параметров режущей кромки ножа со скруглением представляется затруднительным, что, в частности, обусловлено необходимостью применения МКЭ для предварительной оценки эффекта от применения ножа данной конструкции. В связи с этим целью данного исследования послужила разработка выражения, описывающего влияние геометрических параметров режущей кромки шевронного ножа со скруглением на величину остаточной деформации разрезаемого листа. Для достижения указанной цели проводили измерение величины остаточной деформации полос  $22 \times 380$  мм, толщиной 3, 4 и 5 мм, отрезанных классическим шевронным ножом и ножом со скруглением. Конструкция применяемых комплектов ножей уже рассмотрена в подразделе 4.1 (см. рис. 4.1, б). Величину остаточной деформации контролировали путём сканирования торцевой части отрезанных образцов с последующей обработкой полученных изображений при условии учёта масштабного фактора [199]. На рисунке 4.8 в качестве примера представлены сканы образцов, отрезанных шевронным ножом классической конструкции (см. рис. 4.8, а) и ножом со скруглением радиусом  $R = 400$  мм (см. рис. 4.8, б).

На рисунке 4.9 представлены экспериментальные распределения величины остаточной деформации  $\Delta_y$  от толщины листа  $h$ , полученные для случаев поперечной резки стальных пластин шевронными ножами классической формы режущей кромки, а также со скруглением радиусом  $R$  (угол наклона прямолинейных плоскостей режущих кромок ножей во всех случаях составлял  $\alpha = 3^\circ$ ).



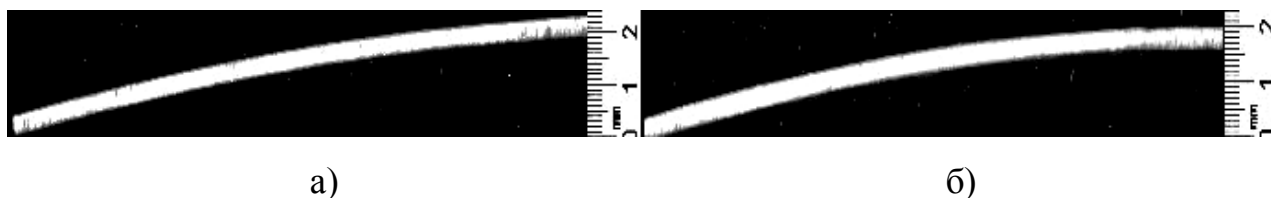


Рисунок 4.8 – Сканы торцевых поверхностей полос толщиной 4 мм, отрезанных шевронными ножами классической конструкции (а) и со скруглением радиусом  $R = 400$  мм (б)

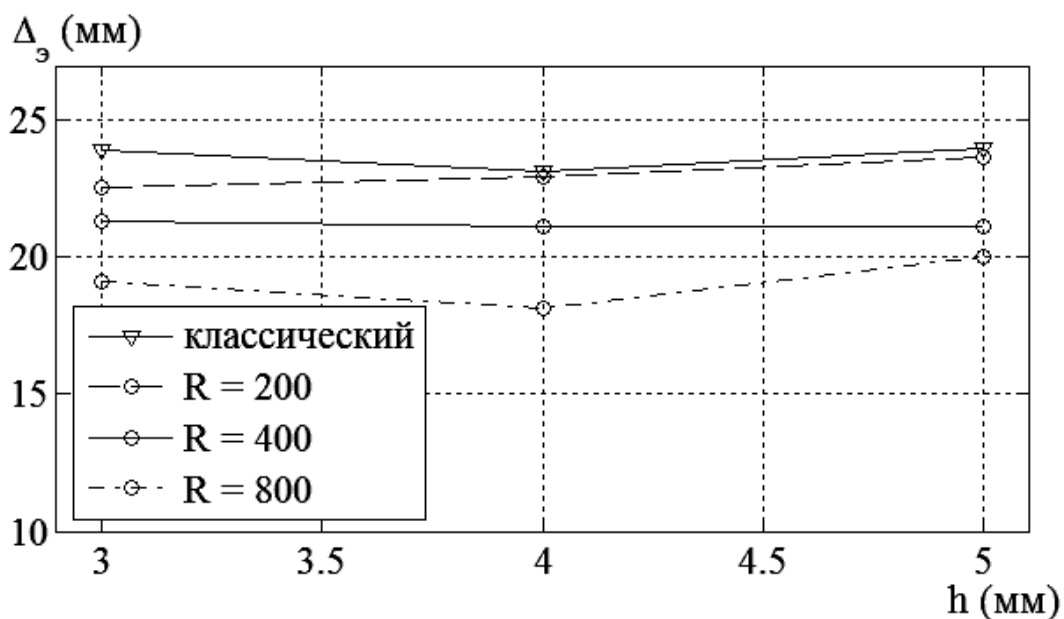


Рисунок 4.9 – Экспериментальные распределения величины остаточной деформации  $\Delta_3$  от толщины листа  $h$ , полученные для случаев поперечной резки классическим шевронным ножом и со скруглением радиусом  $R$

Исходя из данных распределений, предварительно можно сделать вывод о том, что применение шевронного ножа со скруглением в качестве альтернативы классическому действительно приводит к снижению величины остаточной деформации готового листа и, как следствие, повышению его качества.

На базе последующей статистической обработки результатов экспериментальных исследований была получена математическая аппроксимация, описывающая зависимость величины остаточной деформации  $\Delta$  от радиуса скругления  $R$ , ширины  $L$  и толщины разрезаемого листа  $h$ , которую можно записать в следующем виде:

$$\Delta = 34,433 + 0,458h - 0,033K_R - 7,125 \cdot 10^{-3}K_L - 4,125 \cdot 10^{-4}hK_R - 0,031hK_L + 1,182 \cdot 10^{-4}K_RK_L + 6,441 \cdot 10^{-6}hK_RK_L, \quad (4.1)$$

где  $K_R$  – коэффициент, определяемый величиной отношения радиуса скругления  $R$  к толщине разрезаемого листа  $h$ .

$K_L$  – коэффициент, отношения ширины  $L$  к толщине разрезаемого листа  $h$ .

Численное решение выражения (4.1) для условий эксперимента может быть описано плоскостью, представленной на рисунке 4.10.

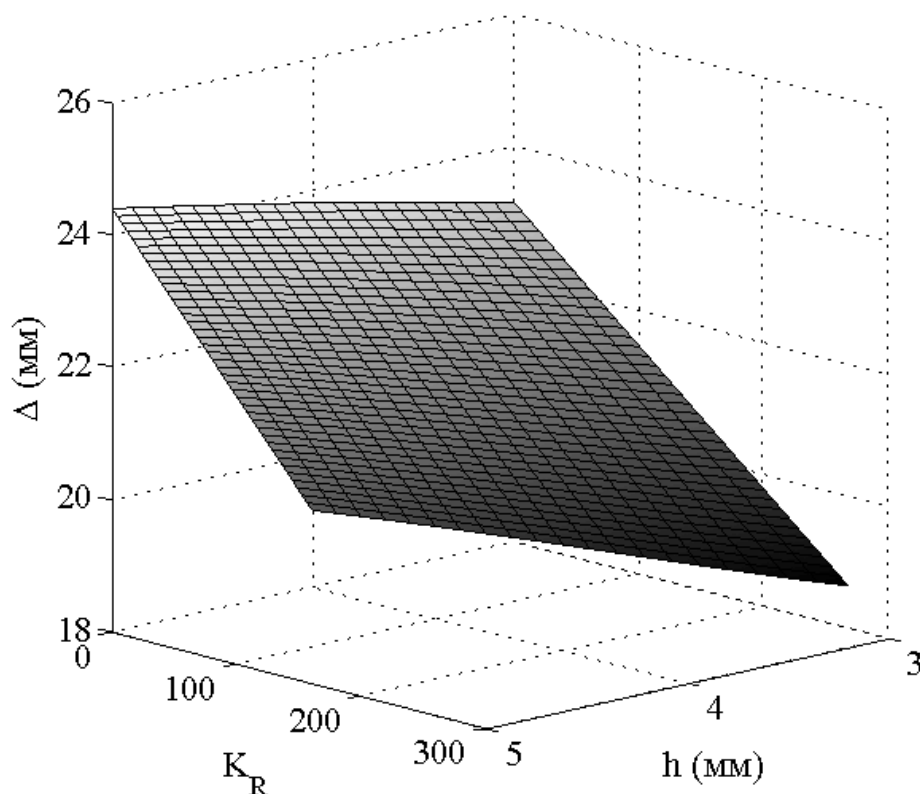


Рисунок 4.10 – Зависимость величины остаточной деформации листа  $\Delta$  от толщины разрезаемого материала  $h$  и коэффициента  $K_R$

На рисунке 4.11 представлена корреляционная зависимость между соответствующими теоретическими  $\Delta_T$  и экспериментальными значениями  $\Delta$ , величины остаточной деформации разрезаемого листа, описанная регрессионным уравнением, с коэффициентом корреляции  $R$  и доверительным интервалом  $p$  для случая поперечной резки шевронным ножом со скруглением.

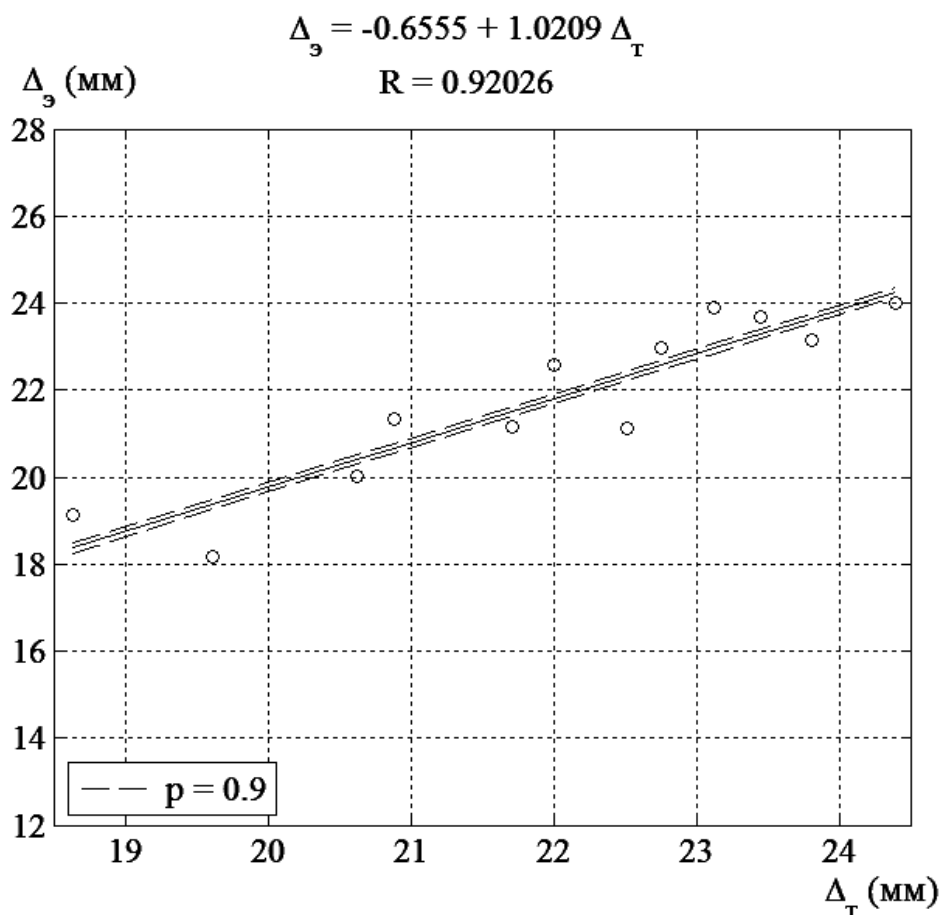


Рисунок 4.11 – Графическое представление корреляционной зависимости между теоретическими  $\Delta_T$  и экспериментальными  $\Delta_3$  значениями величины остаточной деформации разрезаемого листа для случая поперечной резки шевронным ножом со скруглением

Адекватность полученного выражения определялась путём сравнения соответствующих теоретических и экспериментальных значений по величине средней относительной ошибке аппроксимации  $\bar{\varepsilon}$ , поскольку данный статистический метод проверки сходимости является наиболее подходящим для данного случая [180]. Величина  $\bar{\varepsilon}$  описывается следующим выражением:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta_i^T - \Delta_i^3}{\Delta_i^T} \right| \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где  $\Delta_i^T$  – индивидуальные теоретические значения величины остаточной деформации;

$\Delta_i^{\text{э}}$  – соответствующие экспериментальные значения исследуемой величины.

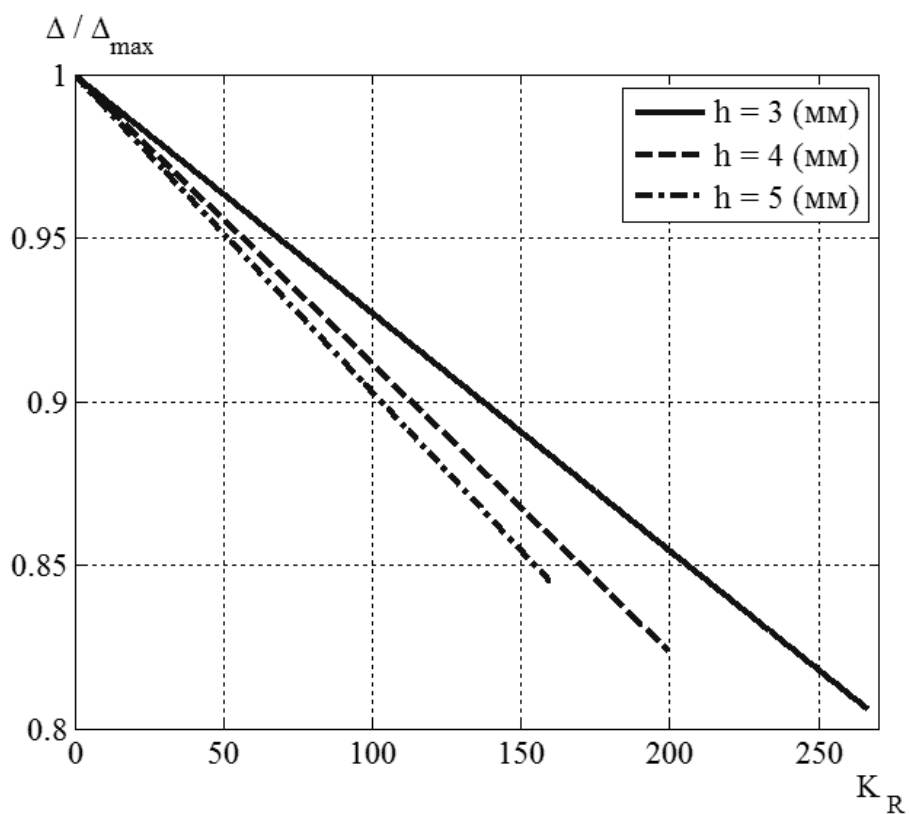
Данные, используемые при определении средней относительной ошибки аппроксимации, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Индивидуальные теоретические  $\Delta_i^T$  и экспериментальные  $\Delta_i^{\text{э}}$  значения величины остаточной деформации

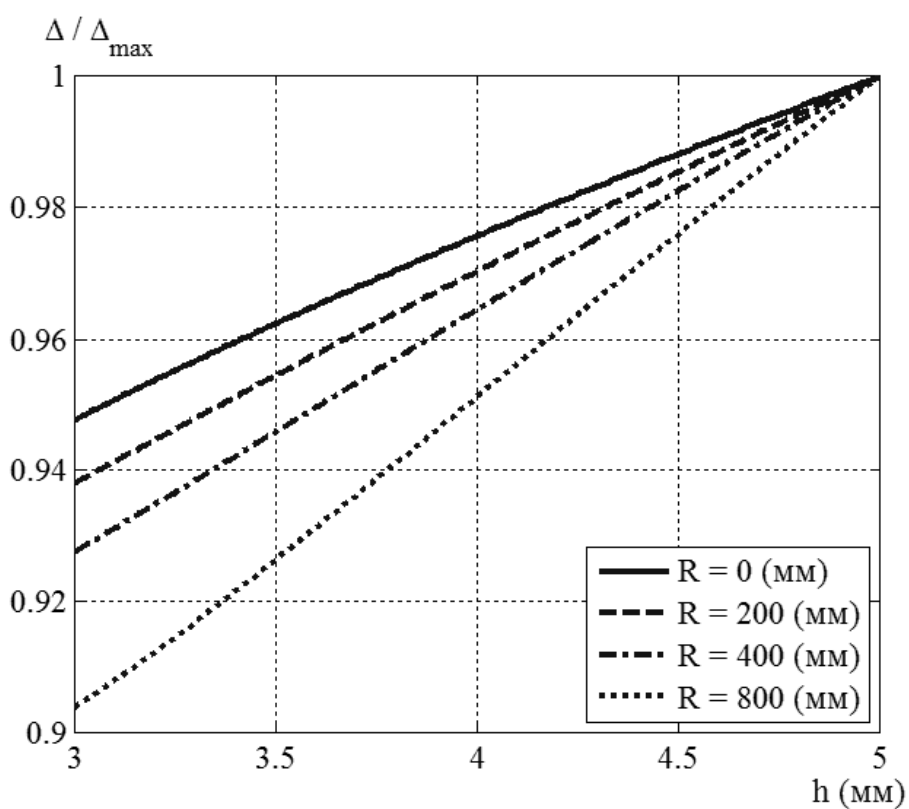
№ п/п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\bar{\varepsilon}$ (%)	
$\Delta_i^T$ (мм)	18,64	19,61	20,62	20,88	21,71	22,00	22,51	22,76	23,12	23,46	23,81	24,40		
$\Delta_i^{\text{э}}$ (мм)	19,12	18,17	20,01	21,35	21,16	22,58	21,11	22,96	23,89	23,67	23,15	24,01		
$\varepsilon_i$ (%)	2,59	7,38	2,96	2,24	2,55	2,63	6,24	0,88	3,30	0,90	2,75	1,60	3,00	

Величина средней относительной ошибки аппроксимации  $\varepsilon < 10 \%$ , что свидетельствует о высокой точности прогноза [180], следовательно, теоретические значения величины остаточной деформации листа для случая поперечной резки шевронным ножом со скруглением хорошо согласуются с экспериментальными, а выражение (4.1) имеет достаточную степень достоверности.

На рисунке 4.12 представлены зависимости величины остаточной деформации  $\Delta$ , представленной в отношении к  $\Delta_{\text{max}}$  (максимальному значению данной величины при указанных параметрах), от коэффициента  $K_R$  (отношения радиуса скругления  $R$  к толщине листа  $h$ ) (см. рис. 4.12, а), толщины разрезаемого листа  $h$  (см. рис. 4.12, б) и коэффициента  $K_L$  (отношения ширины листа  $L$  к его толщине  $h$ ) (рис. 4.13).



а)



б)

Рисунок 4.12 – Зависимости величины отношения  $\Delta$  к  $\Delta_{\max}$ , от коэффициента  $K_R$  (а) и толщины разрезаемого листа  $h$  (б)

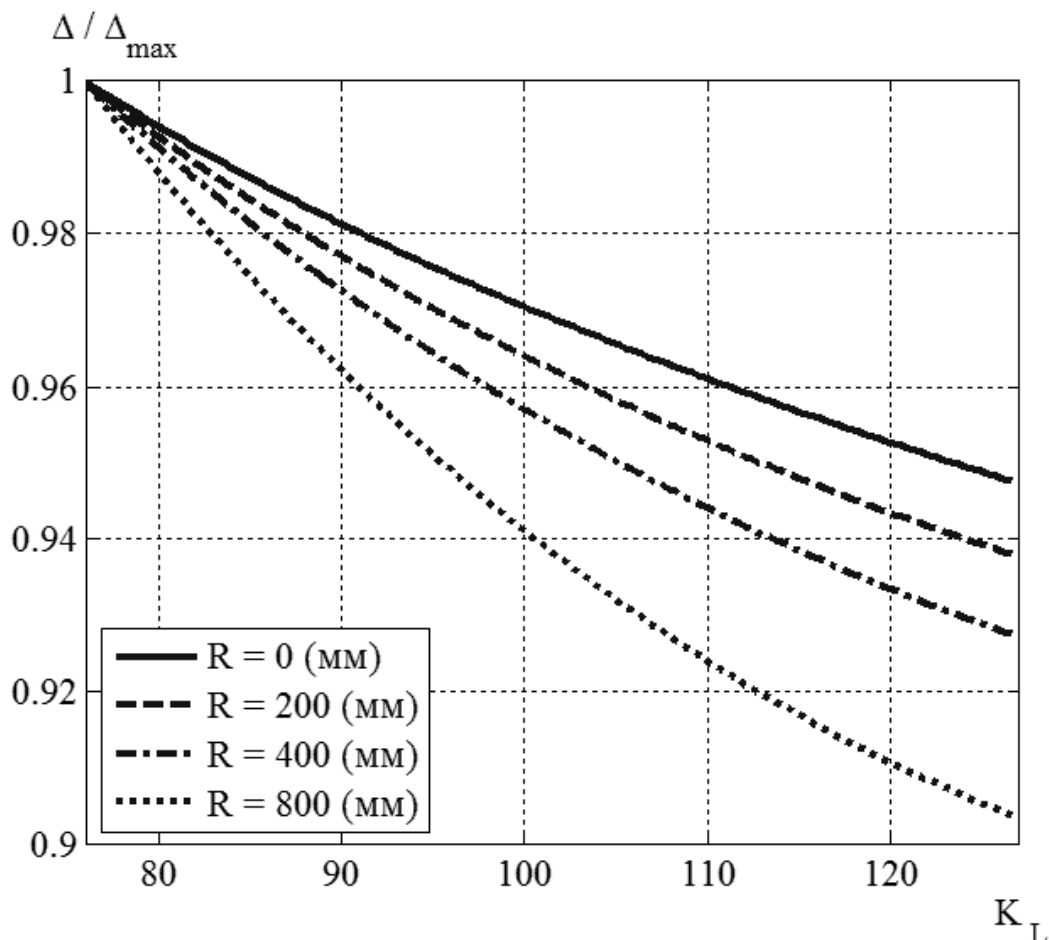


Рисунок 4.13 – Зависимости величины отношения  $\Delta$  к  $\Delta_{\max}$ , от коэффициента  $K_L$

Данные зависимости получены расчётным путём, исходя из выражения (4.1), применительно к условиям проводимых в рамках данной работы экспериментальных исследований процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что применение шевронного ножа со скруглением в условиях эксперимента приводит к уменьшению величины остаточной деформации отрезаемой части листа на 16...20 % (при максимальных значениях коэффициента  $K_R$ ) в сравнении с ножом классической конструкции. При этом толщина разрезаемого листа также оказывает влияние на значение исследуемого дефекта, в частности, с увеличением толщины разрезаемого листа (при прочих равных параметрах), наблюдается снижение

эффекта от применения шевронного ножа со скруглением. Кроме того, из зависимостей, представленных на рисунке 4.13, следует, что увеличение ширины разрезаемого листа (представленной коэффициентом  $K_L$ ) приводит к уменьшению величины остаточной деформации.

Таким образом, можно утверждать, что выражение (4.1) позволяет достаточно достоверно (в рассмотренных пределах) определять величину остаточной деформации листа, разрезаемого шевронным ножом со скруглением, в зависимости от толщины и ширины разрезаемого листа, а также радиуса скругления, что будет полезно при принятии решения относительно возможности применения ножа конкретной конструкции.

#### 4.3 Исследование энергосиловых параметров процесса резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары

Экспериментальные исследования процесса резки листового проката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары проводились на установке двупарных дисковых ножниц, созданной на базе лабораторной клетки кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии, а также на лабораторной установке однопарных дисковых ножниц кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (см. подразд. 2.4).

Целью данного экспериментального исследования являлась оценка адекватности разработанной математической модели процесса резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары.

При проведении экспериментов на установке двупарных ножниц резались полосы размером  $1 \times 20 \times 380$  мм из стали и  $2 \times 20 \times 380$  мм из алюминиевого сплава (химический состав и механические свойства разрезаемых полос указа-

ны в таблице 4.4), при этом учитывая диаметр применяемых ножей (который в данном случае составлял 155 мм) с геометрической точки зрения резка полос толщиной 1 и 2 мм практически эквивалентна резке раскатов толщиной 6 и 12 мм ножом диаметром 1000 мм, который широко применяется для резки толстого листа [32; 86–88].

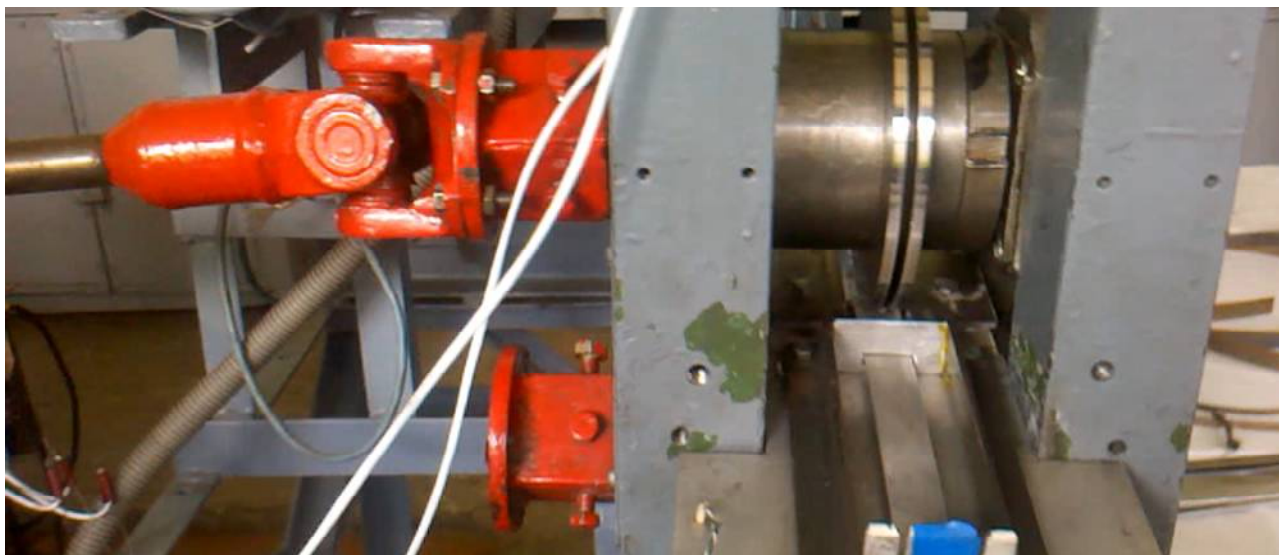
Таблица 4.4 – Химический состав и механические свойства разрезаемых полос

Толщина пластины, $h$ , мм	Химический состав, %								Механические свойства		
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %
Сталь ВСт2кп											
1	0,09	0,33	0,01	0,03	0,02	0,02	0,013	0,025	202	385	34
Алюминиевый сплав Д16Т (АА2024-Т3)											
2	5,00	0,35	0,49	0,51	93,2				346	454	15

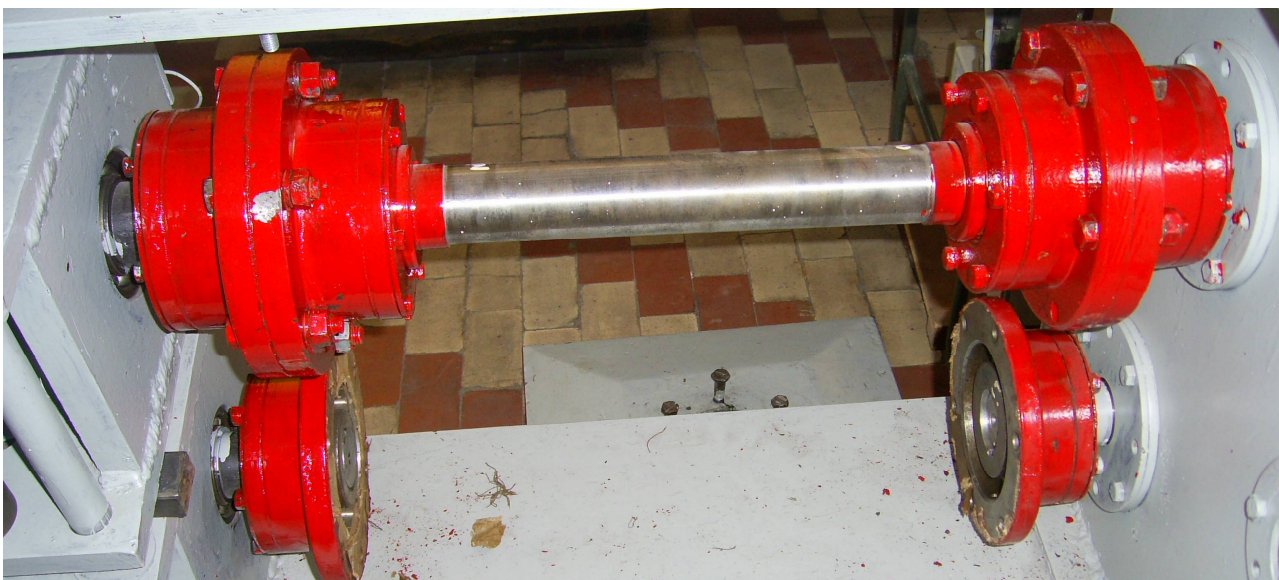
Также в рамках данного исследования производилась резка пластин из свинцового сплава ( $\sigma_b = 28$  МПа) толщиной  $h$ : 8, 10 и 12 мм. Реализация процесса резки в данном случае осуществлялась на установке однопарных дисковых ножниц (см. подразд. 2.4).

С учётом особенностей реализации разделительного процесса на дисковых ножницах при условии наклона оси дисков в направлении движения листа было решено провести исследование процесса резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары на примере схемы, предусматривающей привод только верхних ножей, которая реализовывалась на обеих установках путём отсоединения муфт нижних ножевых валов (рис. 4.14).





а)

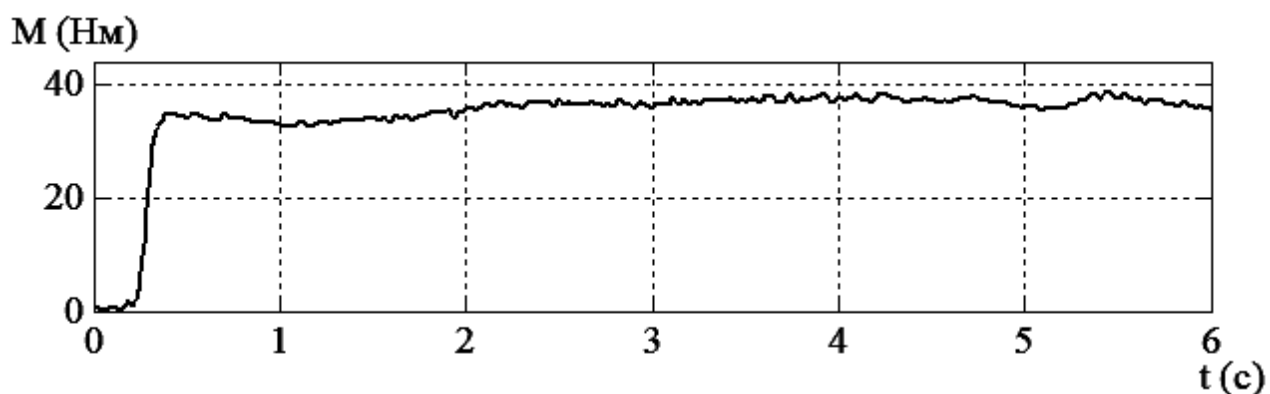


б)

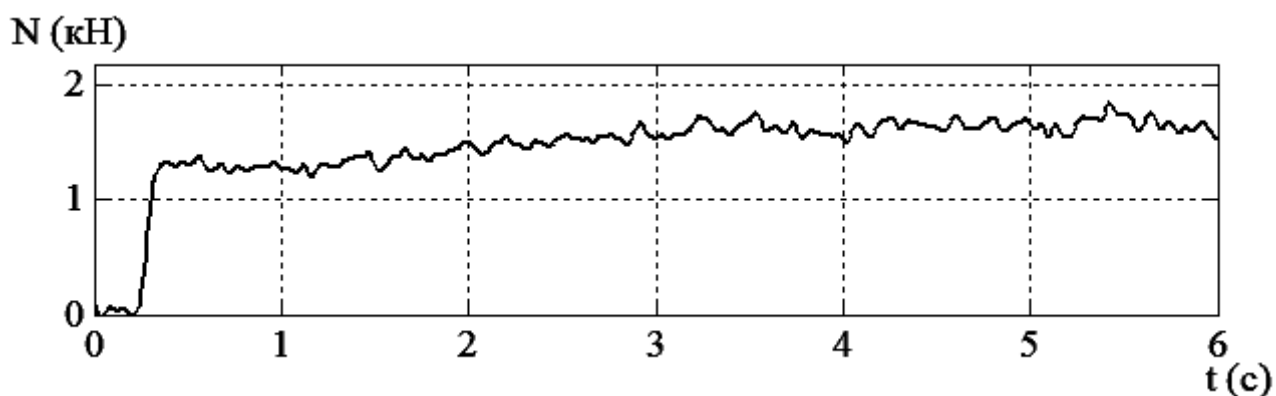
Рисунок 4.14 – Фото привода установок дупарных (а) и однопарных (б) лабораторных дисковых ножниц

На рисунке 4.15 представлены типовые осциллограммы момента  $M$  (см. рис. 4.15, а) и силы резки  $N$  (см. рис. 4.15, б) только верхними приводными ножами, полученные при резке алюминиевой полосы толщиной 2 мм.

В ходе экспериментов контролировали ряд основных параметров, оказывающих влияние на энергосиловые характеристики процесса: толщина разрезаемого образца, ширина отрезаемой кромки, радиальный зазор (или перекрытие) между ножами.



а)



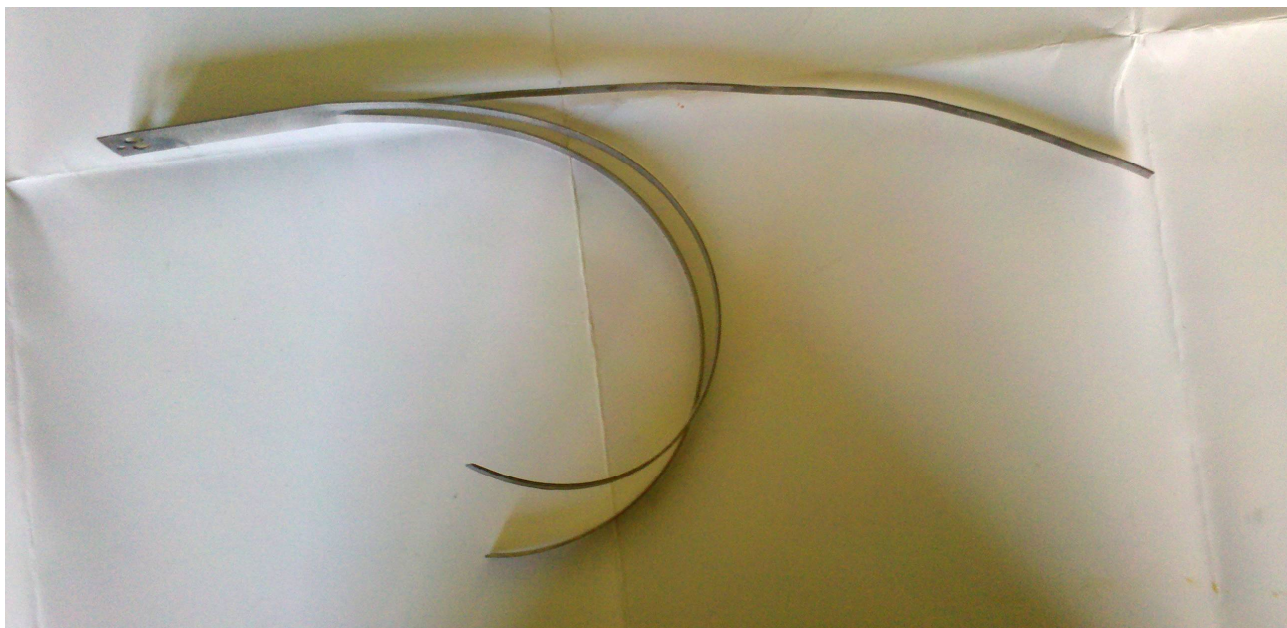
б)

Рисунок 4.15 – Типовые осциллограммы момента (а) и силы (б) резки одним верхним приводным ножом, полученные при резке алюминиевой полосы

На рисунке 4.16 представлены фото образцов разрезанных на двупарных (см. рис. 4.16, а) и однопарных дисковых ножницах (см. рис. 4.16, б).

Анализ осциллограмм момента и силы резки производился на участках установившегося реза. Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась в следующей последовательности:

- с учётом соответствующих тарифовочных коэффициентов определяли значения силы резки и момента на верхнем ноже;
- значение силы внешнего сопротивления определяли на основании данных о перемещении листа и жёсткости пружин;
- при известной величине силы внешнего сопротивления, в соответствии с разработанной методикой (см. подразд. 3.3) вычисляли соответствующие теоретические значения момента резки верхним ножом.



а)



б)

Рисунок 4.16 – Фото образцов разрезанных на двупарных (а) и однопарных (б) дисковых ножницах

Предварительно степень соответствия между экспериментальными  $M_э$  и теоретическими  $M_T$  значениями момента резки определялась на базе корреляционного анализа. Графическое представление полученной корреляционной зависимости, описанной соответствующим регрессионным уравнением, с коэффициентом корреляции  $R$  и доверительным интервалом  $p$  представлено на рисунке 4.17. Основываясь на общем анализе представленной зависимости, а также учитывая величину коэффициента корреляции ( $R = 0,9973$ ), можно утверждать, что соответствующие расчетные и экспериментальные значения момента резки достаточно тесно связаны.

Оценка адекватности математической модели в данном случае проводилась при помощи критерия Стьюдента ( $t$ -критерий, таблица 4.5).

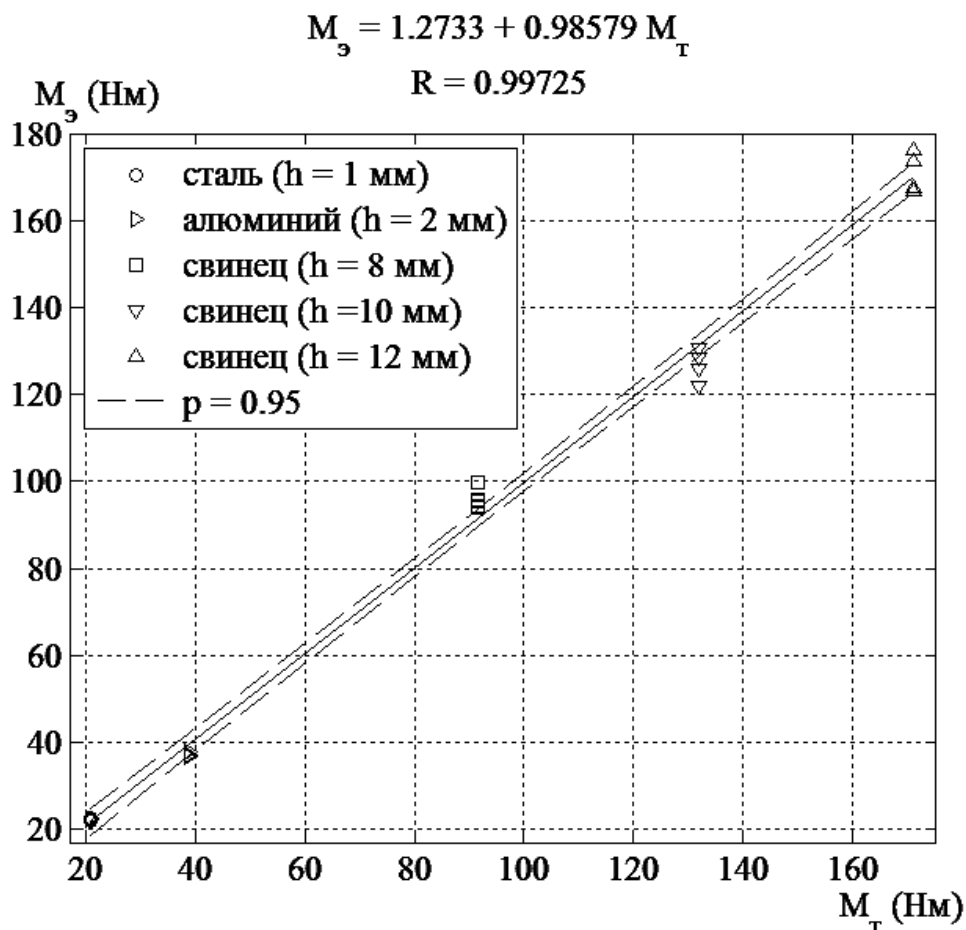


Рисунок 4.17 – Графическое представление корреляционной зависимости между соответствующими экспериментальными  $M_y$  и теоретическими  $M_T$  значениями момента резки верхним приводным ножом

Таблица 4.5 – Статистические показатели при оценке адекватности математической модели

Материал	Толщина $h$ , мм	Дисперсия $S$	Величина $t$ -критерия	Вероятность $p(t)$
Сталь	1	0,84	6,73	>95 %
Алюминий	2	0,41	6,54	>95 %
Свинец	8	1,78	0,64	<80 %
Свинец	10	2,98	17,54	>95 %
Свинец	12	3,11	61,77	>95 %

Из данных, представленных в таблице 4.5 следует, что получаемые при математическом моделировании теоретические значения момента в большинстве случаев соответствуют реальным с вероятностью  $p > 95$  %.

#### 4.4 Экспериментальная оценка влияния внешних сил сопротивления на скорость движения листового металлопроката при резке на дисковых ножницах

С целью практического обоснования результатов проведенного теоретического анализа влияния внешних сил сопротивления на скорость движения листового металлопроката при резке на дисковых ножницах (см. подразд. 3.5), в рамках данной работы на установке двупарных дисковых ножниц (см. подразд. 2.4) проводили резку полос размером  $1 \times 20 \times 380$  мм из стали, химический состав и механические свойства которой описаны в таблице 4.4.

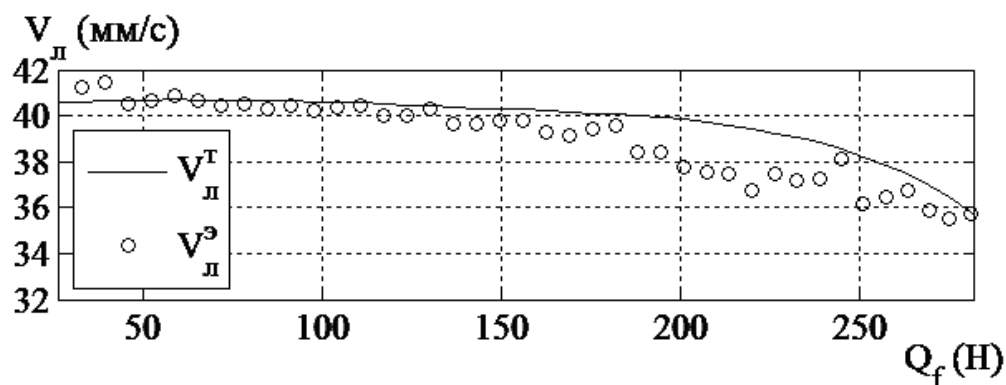
При проведении исследований с применением измерительной системы, рассмотренной в подразделе 2.4, контролировали следующие параметры: значения моментов на верхнем и нижнем ноже; силу резки; перемещение листа.

Типовые осциллограммы крутящих моментов на верхнем и нижнем ноже, а также силы резки, для данного случая аналогичны представленным на рисунке 4.15. Обработка полученных результатов осуществлялась в следующей последовательности:

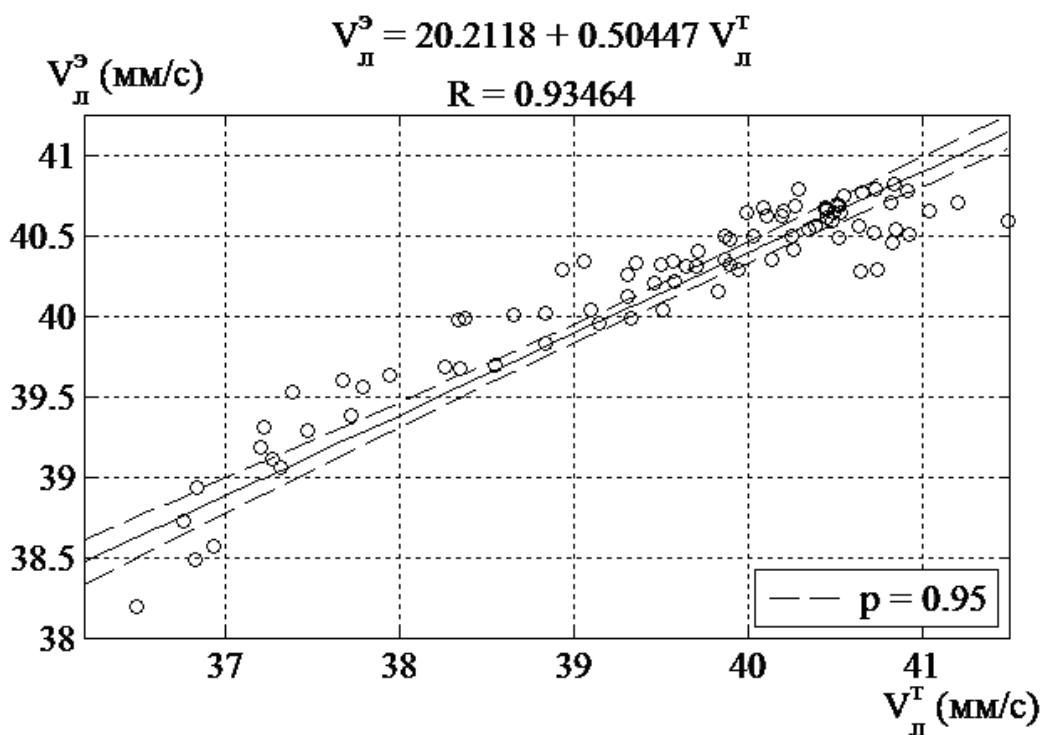
- с учётом соответствующих тарифовочных коэффициентов определяли значения силы резки и моментов резки;
- значение силы внешнего сопротивления определяли на основании данных о перемещении листа и жёсткости пружин, имитирующих действие сил внешнего сопротивления  $Q_f$ ;
- по известным значениям  $Q_f$ , и перемещению листа с течением времени строили экспериментальную зависимость скорости листа от  $Q_f$ ;
- исходя из экспериментальных значений энергосиловых параметров рассматриваемой разделительной операции, используя выражение (3.47) рассчитывали теоретические значения скорости листа.

На рисунке 4.18 представлен пример зависимости теоретических  $V_n^T$  и экспериментальных  $V_n^э$  значений скорости листа от силы внешнего сопротив-

ления  $Q_f$  (см. рис. 4.18, а), а также графическое представление корреляционной связи между соответствующими значениями данных величин описанной регрессионным уравнением, с коэффициентом корреляции  $R$ .



а)



б)

Рисунок 4.18 – Графическое представление зависимостей теоретических  $V_{\text{л}}^{\text{T}}$  и экспериментальных  $V_{\text{л}}^{\text{э}}$  значений скорости листа от силы внешнего сопротивления  $Q_f$  (а), а также корреляционной связи между соответствующими значениями данных величин описанной регрессионным уравнением с коэффициентом корреляции  $R$  (б)



Оценку адекватности результатов в данном случае проводили при помощи теста Фишера, применение которого предусматривает выполнение следующего условия:

$$\frac{S_x^2}{S_y^2} > F_T, \quad (4.3)$$

где  $S_x$  – величина большей дисперсии;

$S_y$  – величина меньшей дисперсии;

$F_T$  – табличное значение коэффициента Фишера [180].

Статистические показатели, необходимые для оценки адекватности математической модели, представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Статистические показатели, используемые при оценке адекватности математической модели

Размер выборки	$R$	$S_x$	$S_y$	$F$	$F_T(p = 0,95)$
90	0,93464	1,457	0,786	3,433	1,31

Из данных, представленных в таблице 4.6 следует, что условие (4.3) выполнено, следовательно, результаты теоретического анализа, проведенного в подразделе 3.5, адекватны.

## ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 4

1. Исходя из результатов экспериментальных исследований процесса поперечной резки листового металлопроката следует, что применение ножа со скруглением позволяет добиться меньшей величины остаточной деформации, чем при применении классического шевронного ножа (в условиях эксперимен-

та снижение дефекта составило 16...20 %), однако резка таким ножом сопровождается увеличением (>60 %) значения силы в завершающей стадии разделительного процесса, при этом данная величина может быть определена при помощи разработанной математической модели с достоверностью  $p \approx 93$  %.

2. При реализации продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах разделительный процесс может осуществляться одним приводным ножом, при этом для определения величины момента резки целесообразно применение методики, предложенной в подразделе 3.3, позволяющей достаточно точно определять данную величину.

3. Зависимость величины скорости листа от действия сил внешнего сопротивления при резке на дисковых ножницах имеет обратный нелинейный характер, при этом данная величина может быть определена с применением подхода, предложенного в подразделе 3.5.



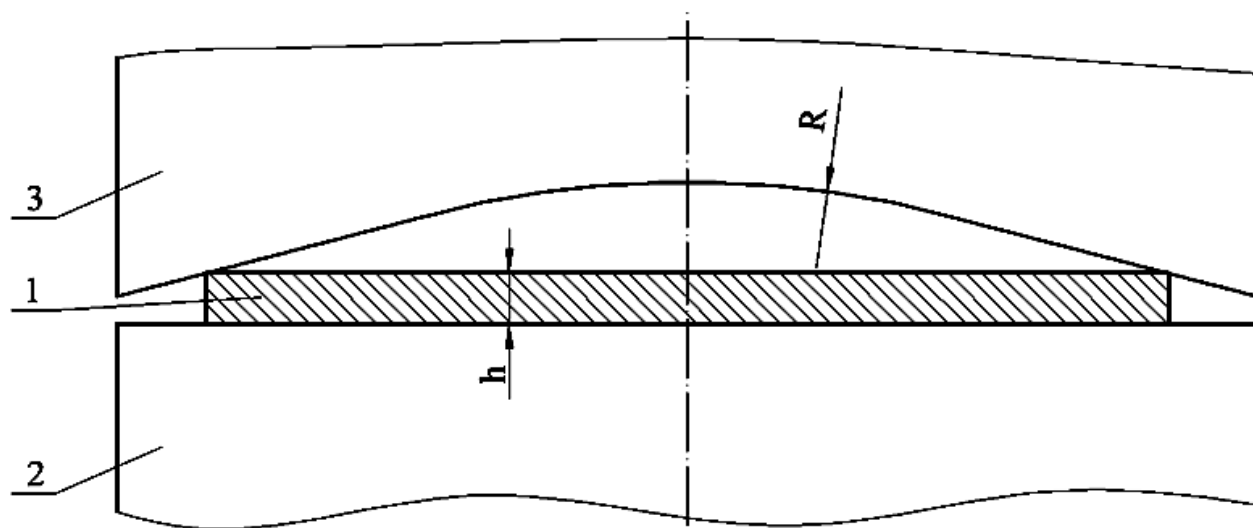
**РАЗДЕЛ 5**  
**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ**  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И МЕХАНИЧЕСКОГО**  
**ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО**  
**МЕТАЛЛОПРОКАТА НА НОЖНИЦАХ**

5.1 Совершенствование конструкции шевронного ножа, применяемого для поперечной резки листового металлопроката

Из результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом (см. разд. 3 и 4) следует, что одним из направлений для дальнейшего развития данной операции может служить разработка новой конструкции шевронного ножа, позволяющей снизить величину остаточной деформации отрезаемой части листа, что и было положено в основу при разработке рекомендаций относительно совершенствования исследуемой разделительной операции.

Проведенный анализ существующих проектно-конструкторских решений (см. подразд. 1.4), а также результаты выполненных в рамках данной работы исследований позволили разработать техническое решение [200], направленное на снижение величины остаточной деформации отрезаемой части листа в случае поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом.

Суть предложенного технического решения состоит в том, что для поперечной резки листового металлопроката применяют ножницы с установленным комплектом из двух ножей при этом один выполнен с прямолинейной, а второй с шевронной формой режущей кромки, отличающийся от классического шевронного ножа тем, что в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей его режущей кромки выполнено скругление радиусом  $R$ . Общий вид предложенного комплекта ножей представлен на рисунке 5.1.



- 1 – разрезаемый лист толщиной  $h$ ; 2 – нож с прямолинейной режущей кромкой;  
3 – шевронный нож со скруглением радиусом  $R$

Рисунок 5.1 – Комплект ножей для поперечной резки листового металлопроката, содержащий шевронный нож со скруглением

Величину радиуса скругления  $R$  в данном случае целесообразно представить в зависимости от толщины разрезаемого листа  $h$  следующим образом:

$$R = K_R \cdot h, \quad (5.1)$$

где  $K_R$  – коэффициент, значение которого определяется энергосиловыми параметрами процесса резки.

По результатам теоретических исследований, проведенных в подразделах 3.1 и 3.2, было установлено, что применение шевронного ножа со скруглением для поперечной резки листового проката характеризуется значительным увеличением значения силы в завершающей стадии разделительной операции. Следовательно, необходима разработка рекомендаций относительно величины коэффициента  $K_R$ , реализация которой возможна на базе разработанной в подразделе 3.2 математической модели, описывающей энергосиловые параметры процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением.

## 5.2 Автоматизированный расчет основных технологических параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением

Очевидно, что одним из основных технологических параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением является коэффициент  $K_R$  (см. подразд. 5.1), представляющий отношение величины радиуса скругления  $R$  к толщине  $h$  разрезаемого листа. Величина данного коэффициента оказывает существенное влияние на энергосиловые параметры разделительного процесса, в частности, она определяет величину радиуса скругления, наличие которого, как было указано, приводит к существенному увеличению значению силы резки в завершающей стадии разделительной операции. При этом критическую величину коэффициента  $K_R$ , применительно к конкретным ножницам, можно определить, исходя из условия допустимой перегрузки, представленного в следующем виде:

$$K_R = \max \quad \text{при} \quad N_{\max} = N_{steady} \cdot K_n, \quad (5.2)$$

где  $N_{\max}$  – максимальное значение силы резки при  $K_R = \max$  ;

$N_{steady}$  – значение силы при установившемся процессе, эквивалентном, по сути, процессу поперечной резки классическим шевронным ножом;

$K_n$  – допустимый коэффициент кратковременной перегрузки, значение которого определяется индивидуально для конкретных ножниц в зависимости от типа привода и их конструктивных особенностей.

В рамках данной работы, для определения рекомендуемых максимально допустимых значений коэффициента  $K_R$  при известном значении  $K_n$ , на основании разработанной математической модели процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением (см. подразд. 3.2),

была сформирована итерационная процедура, позволяющая при заданных входных параметрах выполнить условие (5.2). На рисунке 5.2 представлены расчетные зависимости рекомендуемого максимально допустимого значения коэффициента  $K_R$  от толщины разрезаемого материала  $h$ , полученные для трёх условных марок стали (с пределом прочности  $\sigma_b$  300, 500 и 1000 МПа) для следующих величин коэффициента перегрузки:  $K_n = 10$  % (см. рис. 5.2, а),  $K_n = 15$  % (см. рис. 5.2, б),  $K_n = 20$  % (см. рис. 5.2, в), угол наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки для всех случаев принимался равным  $3^\circ$ . Также с целью оценки эффективности применения шевронного ножа со скруглением целесообразно для распределений, приведенных на рисунке 5.2, определить соответствующе им величины остаточной деформации готового листа, что представляется возможным исходя из аппроксимации (4.1), полученной по результатам проводимых в рамках данной работы экспериментальных исследований (см. подразд. 4.2). На рисунке 5.3 представлены расчетные распределения величины остаточной деформации  $\Delta$  (представленной в отношении к её величине  $\Delta_0$ , достигаемой при резке классическим шевронным ножом при одинаковых прочих параметрах процесса резки), полученные, исходя из выражения (4.1), для распределений, представленных на рисунке 5.2, применительно к резке листовых раскатов шириной  $L = 1000$  мм. Численный пример по определению рекомендуемых максимально допустимых значений коэффициента  $K_R$  при  $K_n = 15$  % для указанных условий приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Рекомендуемые максимально допустимые значения коэффициента  $K_R$  при  $K_n = 15$  %

Предел прочности $\sigma_b$ (МПа)	Толщина листа $h$ (мм)			
	10	15	20	25
300	83,13	77,61	75,31	74,01
500	82,24	76,26	74,04	73,12
1000	81,47	74,95	72,30	71,04

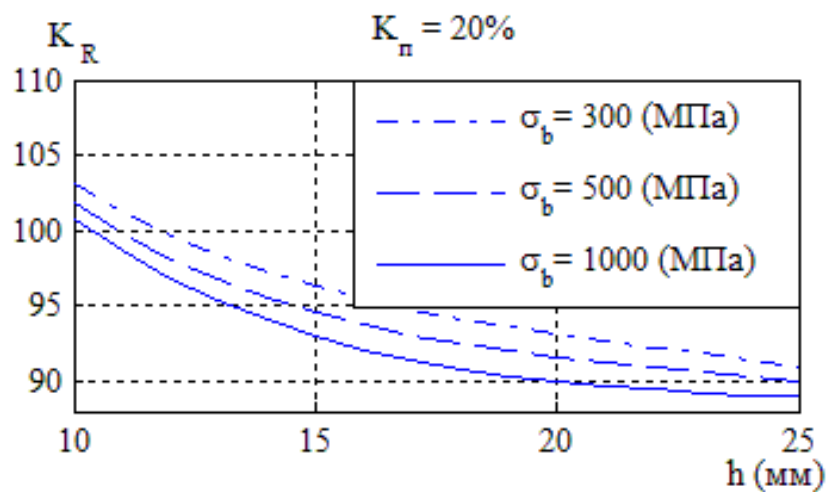
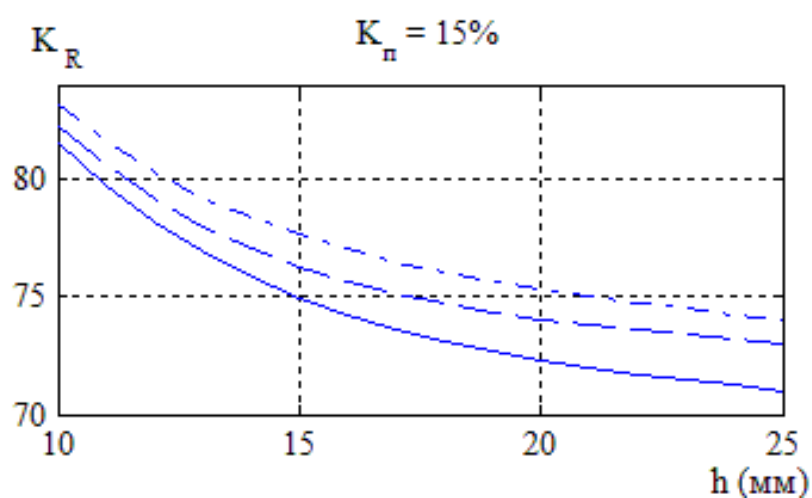
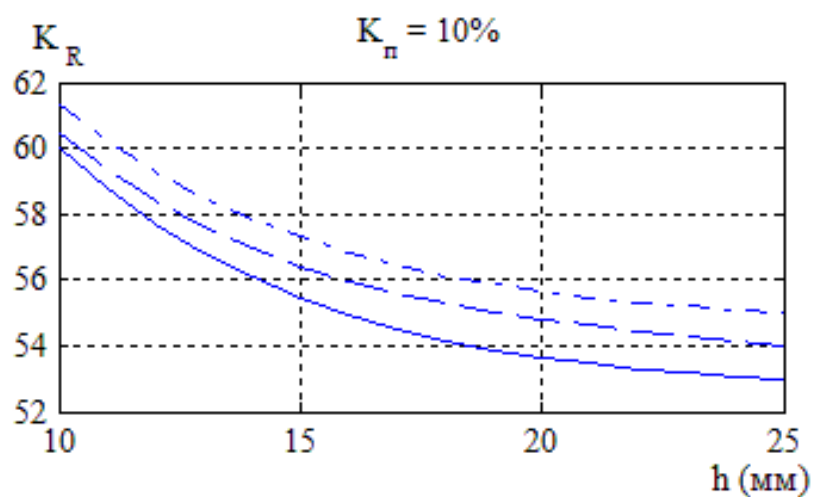
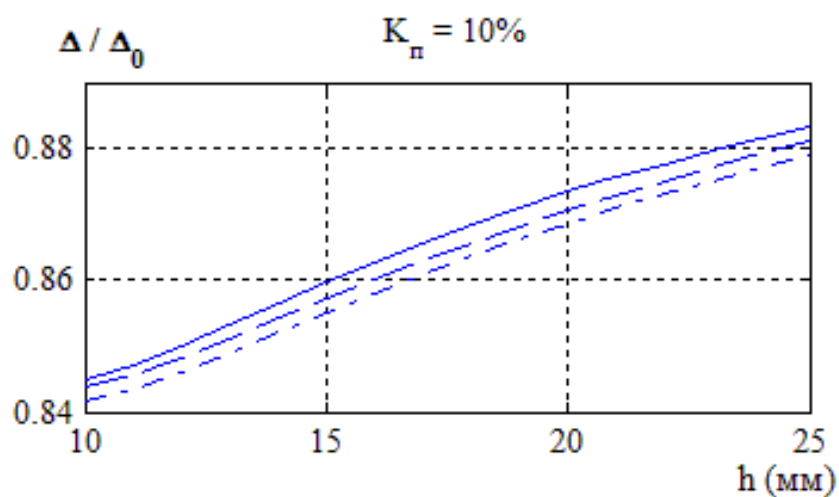
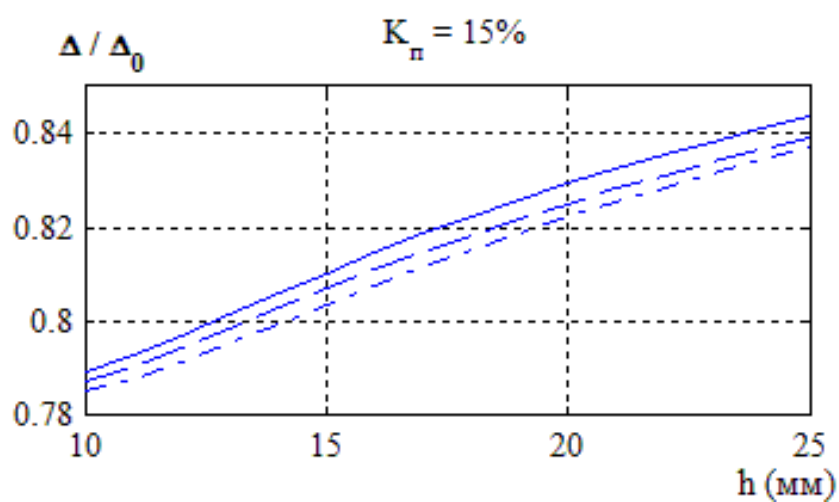


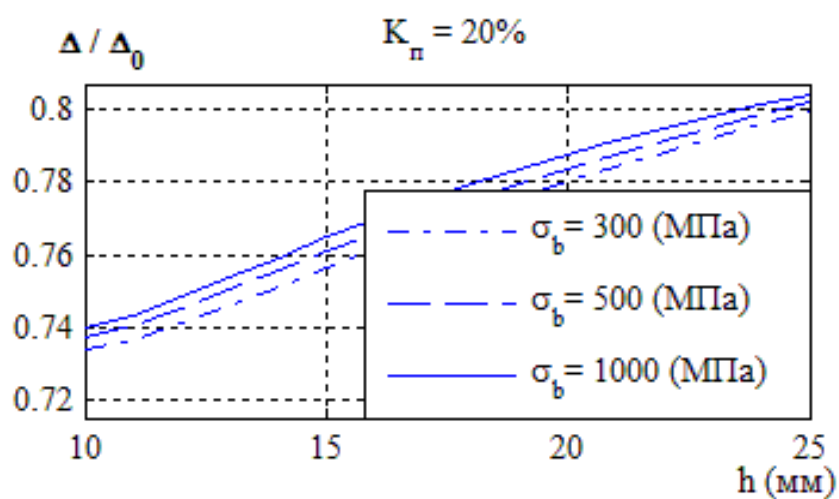
Рисунок 5.2 – Расчетные распределения рекомендуемых значений коэффициента  $K_R$  в зависимости от толщины разрезаемого материала  $h$ , полученные для трёх условных марок стали при указанных величинах коэффициента перегрузки  $K_n$



а)



б)



в)

Рисунок 5.3 – Расчетные распределения величины отношения  $\Delta / \Delta_0$  в зависимости от толщины разрезаемого материала  $h$ , полученные для трёх условных марок стали при указанных величинах коэффициента перегрузки  $K_n$

При этом, как указывалось в подразделе 3.2 для случая поперечной резки шевронным ножом листов из сравнительно «мягких» марок стали (с пределом прочности ниже максимально допустимого для конкретных ножниц при максимальной толщине разрезаемого листа) существует возможность применения шевронного ножа с меньшим углом наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки без превышения максимально допустимого (для конкретных ножниц) значения силы резки, что также позволит снизить величину остаточной деформации листа. В то же время минимально допустимое значение угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа для конкретных условий резки может быть определено из следующего условия:

$$\alpha = \min \quad \text{при} \quad N = N_{\max}, \quad (5.3)$$

где  $N_{\max}$  – максимальное значение силы, достигаемое при резке листов максимальной толщины, из наиболее «твердой» марки стали (допускаемых к резке на конкретных ножницах), при максимальном значении угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа.

В рамках данной работы исходя из условия (5.3) на базе разработанной математической модели процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом (см. подразд. 3.2), была сформирована итерационная процедура, выполнение которой позволило получить рекомендуемые (с точки зрения качества готового листа) значения величины угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного для случая поперечной резки листов из сталей с пределом прочности  $\sigma_b = 300...1000$  МПа.

На рисунке 5.4 представлено расчётное распределение рекомендуемых значений угла  $\alpha$  наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа в зависимости от предела прочности  $\sigma_b$  разрезаемого материала, полученные применительно к процессу резки листового металлопроката толщиной 25 мм классическим шевронным ножом, при этом в качестве максимально допустимой силы резки  $N_{\max}$  принимали значение данной величины,

достигаемое при резке листов с пределом прочности  $\sigma_b = 1000$  МПа, шевронным ножом с максимальным углом наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $\alpha_{\max} = 3^\circ$ .

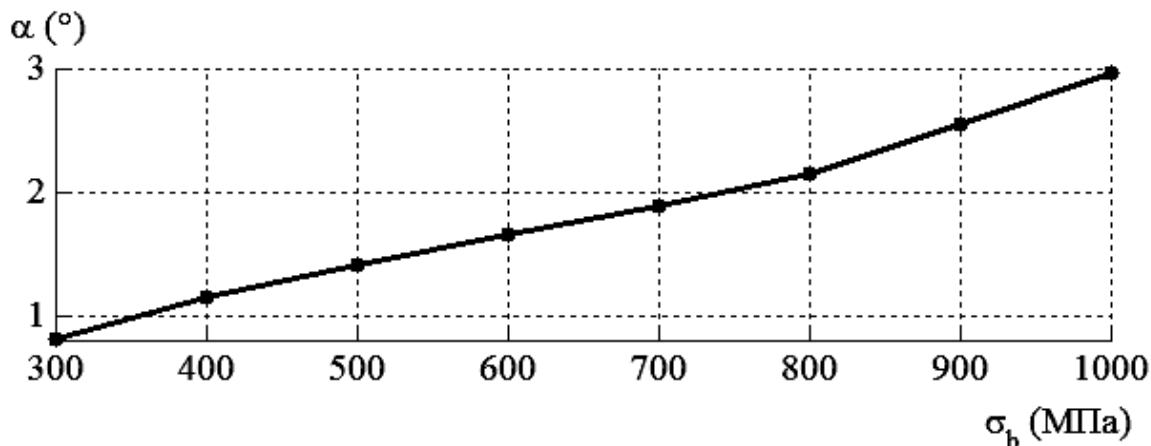


Рисунок 5.4 – Расчётное распределение рекомендуемых значений угла  $\alpha$  наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа в зависимости от предела прочности  $\sigma_b$  разрезаемого материала

Также, с целью оценки влияния снижения угла наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа на величину остаточной деформации готового листа, на базе разработанной конечно-элементной модели процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом (см. подразд. 3.1), получены распределения величины остаточной деформации листа  $\Delta$  в зависимости от угла  $\alpha$  наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа. Данные распределения (см. рис. 5.5) получены применительно к процессу поперечной резки листового металлопроката толщиной 25 мм из трёх условных марок стали с пределом прочности  $\sigma_b$  300, 500 и 1000 МПа классическим шевронным ножом с углом наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ .

Из полученных распределений следует, что для резки листов из сталей с пределом прочности  $\sigma_b < 750$  МПа при указанных условиях реализации разделительного процесса, рекомендуемый угол наклона прямолинейных плоскостей



режущей кромки применяемого шевронного ножа составляет  $\alpha < 2^\circ$ , при этом уменьшение угла наклона на один градус в данных условиях позволяет снизить величину остаточной деформации готового листа на 60...68 %.

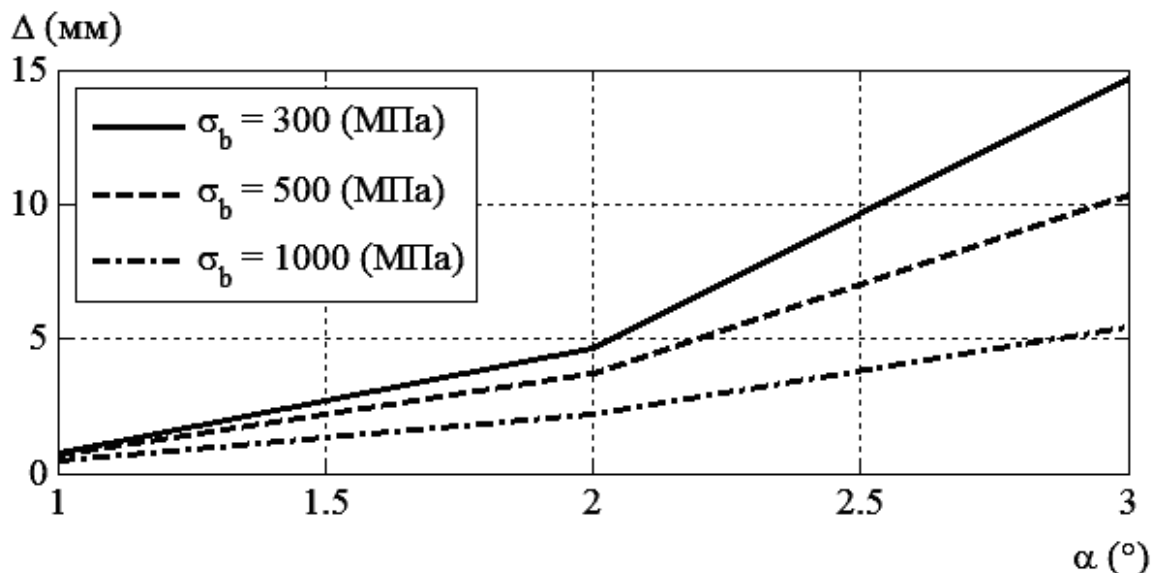


Рисунок 5.5 – Распределения величины остаточной деформации листа  $\Delta$  в зависимости от угла  $\alpha$  наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки шевронного ножа

### 5.3 Совершенствование процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах

Исходя из обзора, проведенного в рамках подраздела 1.4, следует, что одним из характерных дефектов листового металлопроката, разрезаемого на дисковых ножницах, является серповидность готового листа, наличие которой существенно портит товарный вид продукции и может послужить причиной выбраковки готового листа. При этом величина данного дефекта может быть снижена путём ограничения свободы листа в горизонтальной плоскости. В связи с этим, на базе проведенных в рамках данной работы исследований (см. подразд. 3.3, 3.5, 4.3, 4.4), а также с учётом современных тенденций [97], была рас-

смотрена возможность совмещения процессов правки и продольной резки листовых раскатов на дисковых ножницах с целью повышения качества готового листа за счёт ограничения его свободы в горизонтальной плоскости. На основе данного подхода было разработано техническое решение [201], представленное на рисунке 5.6.

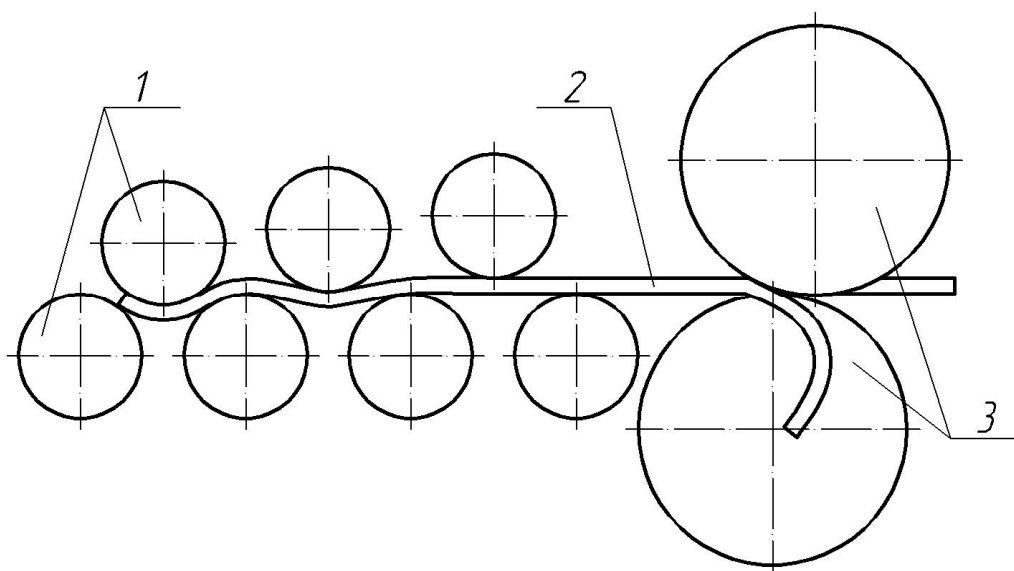


Рисунок 5.6 – Способ расположения дисковых ножниц в потоке прокатного стана

В рамках данного решения поставленная задача решается путём установки дисковых ножниц в потоке прокатного стана непосредственно за листопрямительной машиной (см. рис. 5.6), в направлении движения проката таким образом, чтобы верхние и нижние ролики 1 листопрямительной машины подавали лист 2 непосредственно в ножи 3 дисковых ножниц, во время захвата ножами листа и последующей его резки, вследствие чего процессы правки и резки объединяются в одну технологическую операцию. При этом реализация данного совмещённого технологического процесса, теоретически, позволит контролировать силу подачи листа в дисковые ножницы. В связи с этим, исходя из данных, представленных в подразделах 3.3 и 4.3, существует возможность (при обеспечении «подпора» листа) производить резку одним приводным ножом из пары. Также применение объединённого процесса правки и резки, теоретиче-

ски (исходя из выражений (3.34), (3.35)) позволит расширить сортамент разрезаемых листов вследствие улучшения условий захвата раската дисковыми ножами. Однако данное преимущество может быть достигнуто только в случае гарантированного контакта нижней поверхности листа с нижним дисковым ножом, что возможно только при соответствующем значении величины смещения уровня подающих роликов  $\delta_p$  относительно верхней точки нижнего ножа дисковых ножниц [202]. На рисунке 5.7 представлена расчетная схема к определению величины  $\delta_p$  при резке листов толщиной  $h$ , превышающей максимально возможную  $h_0$  при условии движения листа по касательной к нижнему ножу, которая определяется следующим образом:

$$h_0 = (2R + \delta)\cos(\psi) - R - \sqrt{R^2 - [(2R + \delta)\sin(\psi)]^2}, \quad (5.4)$$

где  $R$  – радиус дисковых ножей;

$\delta$  – зазор между ножами в плоскости, перпендикулярной боковой поверхности дисков и проходящей через их центры;

$\psi$  – угол наклона оси дисков в направлении движения листа.

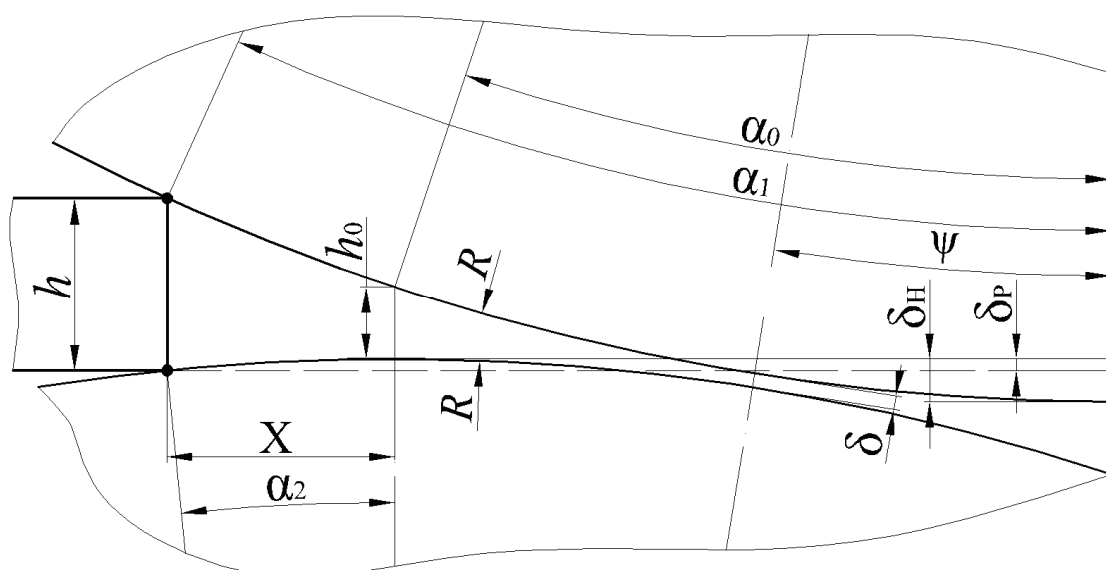


Рисунок 5.7 – Схема к определению величины смещения уровня подающих роликов  $\delta_p$  относительно верхней точки нижнего ножа дисковых ножниц

Величина смещения подающих роликов  $\delta_P$  (при резке листов толщиной  $h > h_0$ ), исходя из представленной расчётной схемы, определяется следующим выражением:

$$\delta_P = R - \sqrt{R^2 - X^2}, \quad (5.5)$$

где  $X$  – расстояние между плоскостью захвата листа толщиной  $h$  и вертикальной плоскостью, проходящей через ось нижнего ножа:

$$X = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (L-h)^2}{(L-h)^2 + R^2 \cdot \sin^2(\alpha_0)} - \frac{(L-h)^2}{4} - \frac{R \cdot \sin(\alpha_0)}{2}}, \quad (5.6)$$

где  $\alpha_0$  – значение угловой координаты точки захвата относительно центра верхнего ножа при резке листов толщиной  $h_0$ ;

$L$  – расстояние между центрами дисков в вертикальной плоскости:

$$L = 2 \cdot R + \delta_H, \quad (5.7)$$

где  $\delta_H$  – величина зазора (или перекрытия, но с минусом) дисков в вертикальной плоскости:

$$\delta_H = 2R - (2R + \delta) \cos \psi. \quad (5.8)$$

Значение угловой координаты точки захвата относительно центра верхнего ножа при резке листов толщиной  $h_0$ , исходя из рассматриваемой расчётной схемы (см. рис. 5.7), может быть определено следующим образом:

$$\alpha_0 = \arccos\left(\frac{R - (h_0 - \delta_H)}{R}\right). \quad (5.9)$$

Соблюдение рекомендации, описанной выражением (5.5) позволит обеспечить захват листа толщиной  $h > h_0$  и избежать возможного ограничения сортамента листов, допускаемых к резке на дисковых ножницах, связанного с недостаточной величиной указанного параметра. На рисунке 5.8 представлены распределения величины  $\delta_p$  в зависимости от толщины разрезаемого листа  $h$  для трёх значений диаметров  $D$  дисковых ножей (возможных с учетом переточки при номинальном 1000 мм).

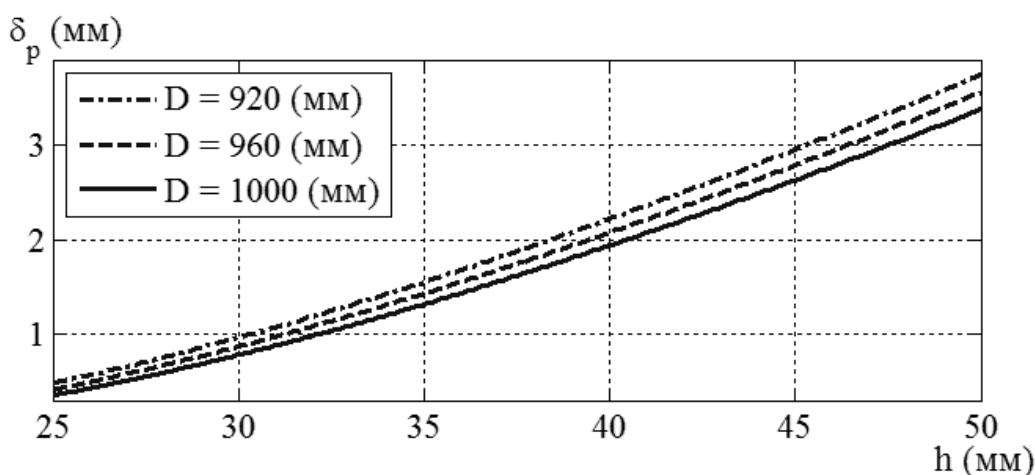


Рисунок 5.8 – Распределения величины  $\delta_p$  в зависимости от толщины разрезаемого листа  $h$  для трёх значений диаметров  $D$  дисковых ножей

5.4 Автоматизированный расчет основных технологических параметров процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары

Реализация процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары, при условии использования предложенного способа расположения ножниц в потоке прокатного стана (см. подразд. 5.3), требует четких рекомендаций относительно технологических параметров разделительного процесса, разработка которых пред-

ставляется возможной на базе полученных в рамках данной работы методик, математических моделей и программных средств по автоматизированному расчету энергосиловых и кинематических параметров для данного случая.

Очевидно, что успешная реализация предложенного совмещённого технологического процесса возможна только при согласовании скорости правки и резки листа, которая исходя из результатов анализа, проведенного в подразделе 3.5, отличается от окружной скорости дисков и может быть определена исходя из энергосиловых параметров процесса резки. При этом одним из определяющих факторов при оценке величины скорости листа в процессе резки на дисковых ножницах является величина силы внешнего сопротивления  $Q_f$ , которая препятствует движению листа и является следствием движения отрезаемой кромки по проводковой системе, направляющей ее в кромкокрошительные ножницы [74; 191]. В то же время, как указывалось в подразделе 3.3 резка одним приводным ножом возможна в более узком диапазоне значений  $Q_f$ , чем двумя, что приводит к необходимости определения максимально допустимых значений данной величины, что представляется возможным на базе методики расчёта энергосиловых параметров процесса резки для данного случая, описанной в подразделе 3.3, исходя из условия реализации установившегося процесса резки, представленного в следующем виде:

$$Q_f = \max \quad \text{при} \quad \gamma = \beta, \quad (5.10)$$

где  $Q_f$  – величина силы внешнего сопротивления;

$\gamma$  – величина нейтрального угла (см. подразд. 3.3);

$\beta$  – величина угла скола (см. подразд. 3.3).

Стоит также указать, что реализация предложенного способа расположения дисковых ножниц в потоке прокатного стана, позволит компенсировать величину  $Q_f$  за счёт возможности подачи листа в дисковые ножи с некоторой силой «подпора», что в свою очередь окажет влияние на скорость листа в про-

цессе резки. При этом с точки зрения разработки рекомендаций удобно представить величину силы внешнего сопротивления  $Q_f$  в отношении к величине силы резки  $N$  через коэффициент  $K_f$  следующим образом:

$$Q_f = K_f N. \quad (5.11)$$

Аналогично можно представить величину скорости листа  $V_l$  в отношении к окружной скорости дисков  $V_o$  через коэффициент  $K_V$ :

$$V_l = K_V V_o. \quad (5.12)$$

С целью определения рекомендуемых максимально допустимых значений коэффициента  $K_f$  в рамках данной работы на базе математической модели, разработанной в подразделе 3.3, была сформирована итерационная процедура, позволяющая при заданных начальных параметрах процесса резки определять данную величину исходя из условия (5.10). На рисунке 5.9 представлены распределения рекомендуемых максимально допустимых (при реализации установившегося процесса резки), значений коэффициента  $K_f$ , в зависимости от толщины разрезаемого листа  $h$ , полученные для случая горячей резки листовых раскатов толщиной 25...50 мм на дисковых ножницах с верхним приводным ножом диаметром 1000 мм и углом наклона оси дисков в направлении движения листа на  $9^\circ$ , при этом величина радиального зазора составляла  $0,2h$ , а ширина отрезаемой кромки принималась равной  $2h$ . Температура резки составляла:  $650^\circ\text{C}$  (см. рис. 5.9, а),  $700^\circ\text{C}$  (см. рис. 5.9, б),  $750^\circ\text{C}$  (см. рис. 5.9, в) и  $800^\circ\text{C}$  (см. рис. 5.9, г). Моделирование проводили для четырёх марок стали: Ст3, 16ГС, 45 и 65Г. Затем, исходя из данных распределений на основании результатов теоретического анализа, проведенного в подразделе 3.5 были, получены рекомендуемые значения коэффициента  $K_f$  (рис. 5.10), при этом значение окружной скорости  $V_o$  принималось равным 0,5 м/с.

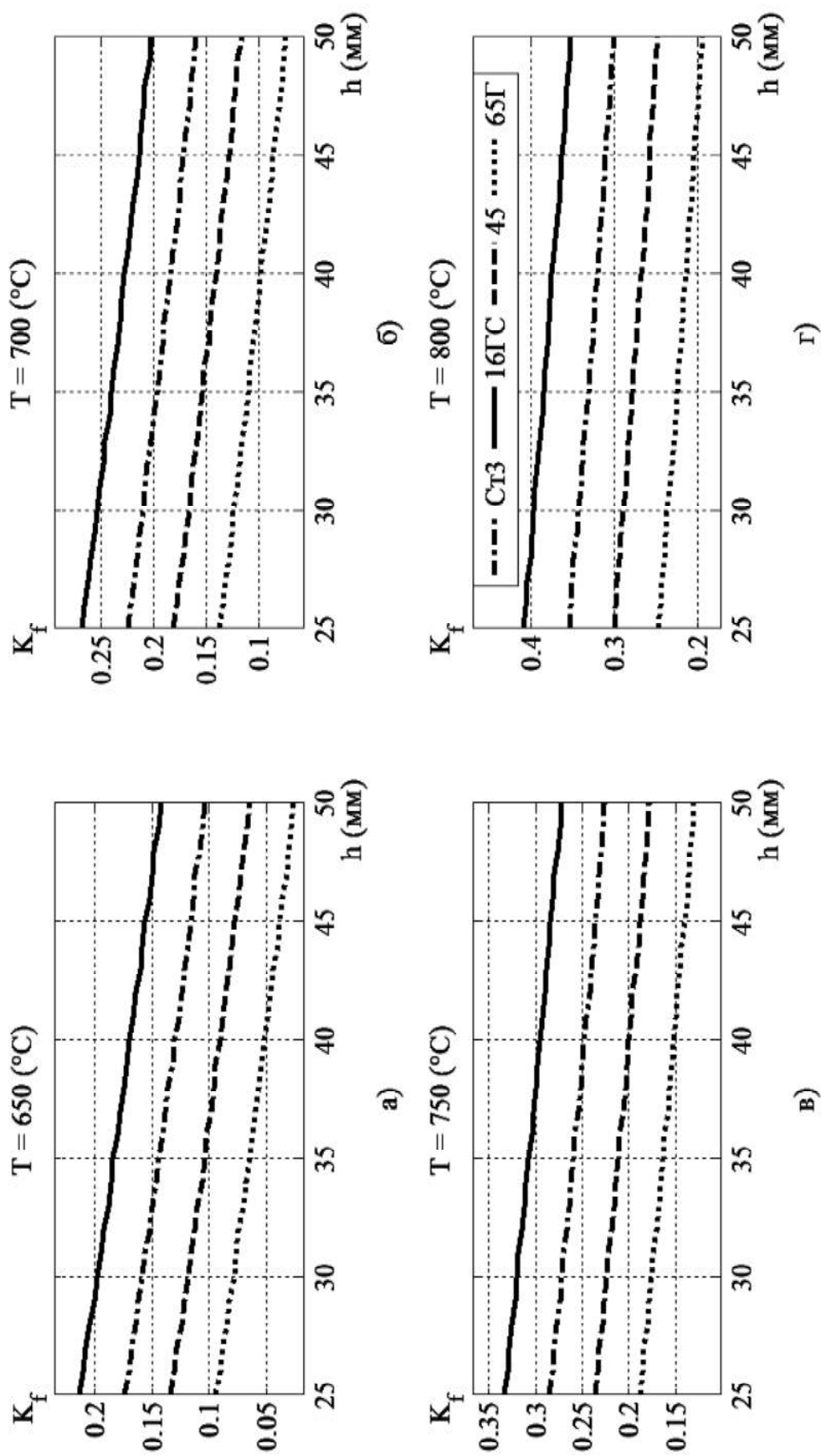


Рисунок 5.9 – Распределения максимально допустимых значений коэффициента  $K_f$  отношения силы внешнего сопротивления к величине силы резки в зависимости от толщины листа  $h$  при температуре  $T$



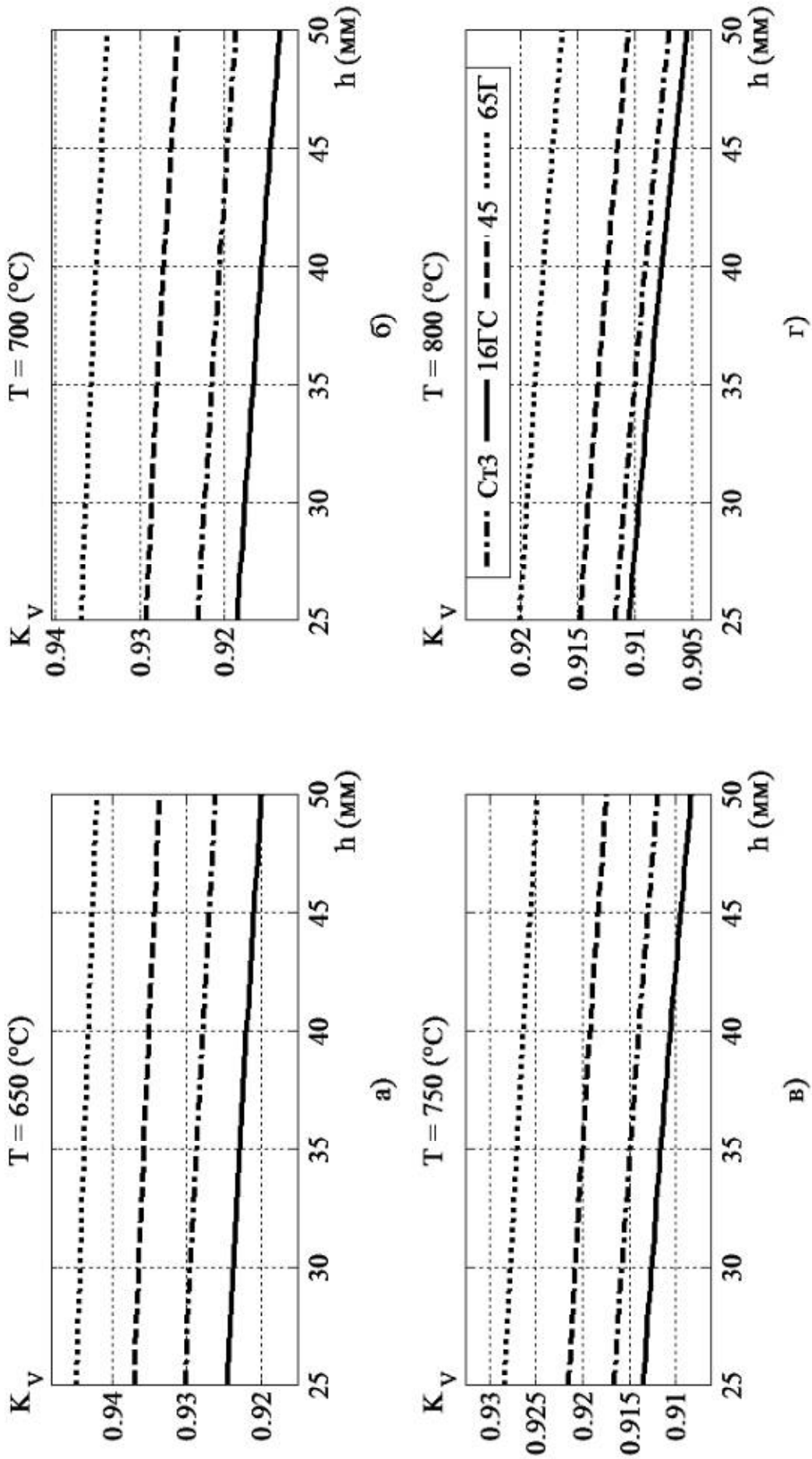


Рисунок 5.10 – Распределения рекомендуемых значений коэффициента  $K_V$  отношения скорости листа при резке к окружной скорости дисков в зависимости от толщины листа  $h$  при температуре  $T$

Численный пример по определению рекомендуемых значений коэффициентов  $K_f$  и  $K_V$  для указанных условий приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Рекомендуемые значения коэффициентов  $K_f$  и  $K_V$  для случая резки листов при температуре  $700^\circ\text{C}$

Марка стали	Толщина листа $h$ (мм)					
	25	30	35	40	45	50
коэффициент $K_f$						
16ГС	0,268	0,255	0,239	0,228	0,215	0,202
Ст3	0,224	0,211	0,197	0,184	0,172	0,159
45	0,182	0,167	0,153	0,140	0,129	0,117
65Г	0,138	0,123	0,110	0,098	0,086	0,074
коэффициент $K_V$						
16ГС	0,923	0,922	0,922	0,921	0,920	0,919
Ст3	0,919	0,918	0,917	0,916	0,915	0,913
45	0,929	0,929	0,928	0,927	0,926	0,926
65Г	0,937	0,936	0,936	0,935	0,935	0,934

Исходя из результатов проведенного автоматизированного расчета основных технологических параметров процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары следует, что реализация данного технологического процесса возможна в случае применения предложенного (см. подразд. 5.3) способа установки дисковых ножниц в потоке прокатного стана, предполагающего объединение технологических процессов правки и продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах. При этом успешная реализация данного совмещенного технологического процесса подразумевает согласование скорости правки и резки на дисковых ножницах, значение которой ниже окружной скорости ножей  $V_o$  и при предельно допустимых значениях силы внешнего сопротивления для различных условий резки может составить  $(0,91...0,95)V_o$ , что фактически соответствует рекомендуемым значениям скорости подачи листа в дисковые ножницы при выходе из правильной машины.

## ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 5

1. Исходя из факта, что применение шевронного ножа со скруглением для поперечной резки листового металлопроката характеризуется увеличением значения силы в завершающей стадии разделительной операции, очевидно, что одним из основных технологических параметров данного разделительного процесса является величина радиуса скругления, определяемая коэффициентом  $K_R$ , значение которого необходимо подбирать исходя из величины допустимого коэффициента кратковременной перегрузки  $K_n$  для конкретных ножниц, так при  $K_n = 15\%$  для моделируемых условий величина коэффициента  $K_R$  составила порядка  $K_R = 71...83$  при этом величина остаточной деформации снижается на  $16...21\%$ .

2. Для поперечной резки шевронным ножом листов из сталей с пределом прочности ниже максимально допустимого для конкретных ножниц при максимальной толщине разрезаемого листа, возможно применение шевронного ножа с меньшим углом наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки без превышения максимально допустимого значения силы резки, при этом уменьшение угла наклона на один градус в моделируемых условиях позволило снизить величину остаточной деформации готового листа на  $60...68\%$ .

3. Результаты автоматизированного расчета основных технологических параметров процесса обрезки боковых кромок листовых раскатов на дисковых ножницах указывают на то, что при применении предложенного способа установки дисковых ножниц в потоке прокатного стана, резка может осуществляться одним верхним приводным ножом из пары при условии достаточной компенсации сил внешнего сопротивления силой «подпора» вследствие согласования скорости правки и резки. При этом исходя из условия реализации установленного процесса резки при рекомендуемых максимально допустимых значениях силы внешнего сопротивления скорость подачи листа для различных условий должна составлять  $(0,91...0,95)$  от окружной скорости ножей.

## ВЫВОДЫ

1. Дальнейшее развитие производства толстолистого металлопроката обусловлено тенденцией, направленной на повышение качества готовой продукции, в частности путём расширения возможностей существующего и проектируемого оборудования, применяемого для продольной и поперечной резки листового металлопроката, а также совершенствования данных технологических операций в целом при условии минимизации их энергосиловых показателей.

2. Повышение качества листового металлопроката, разрезаемого на ножницах возможно путём применения для поперечной резки шевронного ножа со сложной формой режущей кромки, при этом наиболее перспективным представляется шевронный нож со скруглением, применение которого, позволяет добиться на 7,4 % большего снижения величины остаточной деформации листа в сравнении с шевронным ножом с горизонтальной площадкой конструкции «Северсталь», при равном значении максимальной силы резки, теоретическая оценка которого возможна на базе разработанной в рамках данной работы методики, достоверность которой подтверждена экспериментально и составляет  $p \approx 93$  %.

3. Применение шевронного ножа со скруглением для поперечной резки листового металлопроката характеризуется увеличением значения силы резки в завершающей стадии разделительной операции, обусловленного величиной радиуса скругления, значение которого также определяет величину остаточной деформации листа и для конкретных ножниц подбирается исходя из допустимого коэффициента кратковременной перегрузки  $K_n$ , так при  $K_n = 15$  % снижение величины остаточной деформации может составить 16...21 %.

4. Реализация процесса продольной резки листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары возможна при меньшем допустимом значении величины результирующей сил внешнего сопротивления, которое для случая горячей резки может составить  $\approx 25$  %, от максималь-

но допустимого значения данной величины при резке двумя приводными ножами в паре, что обусловлено уменьшением составляющей втягивающих сил и компенсируется силой подпора листа в случае установки дисковых ножниц в потоке прокатного стана непосредственно за листопрямительной машиной при условии совмещения процесса правки и продольной резки на дисковых ножницах, что также позволит повысить качество листового проката за счет исключения возможного появления серповидности листа путём ограничения его свободы при резке в горизонтальной плоскости.

5. Применение предложенного способа установки дисковых ножниц в потоке прокатного стана, при условии согласования скорости правки и резки позволит осуществлять разделительный процесс одним приводным ножом из пары, что существенно упрощает конструкцию дисковых ножниц. При этом следует учитывать, что скорость листа в дисковых ножницах ниже окружной скорости ножей  $V_o$  и для случая резки одним приводным ножом из пары может составлять  $(0,91...0,95)V_o$ .

6. Скорость листа при резке на дисковых ножницах зависит от действия сил внешнего сопротивления, при этом данная зависимость носит обратный нелинейный характер, а с уменьшением коэффициента трения снижение скорости листа, при увеличении величины результирующей сил внешнего сопротивления, происходит более интенсивно, что объясняется уменьшением энергетической составляющей активных (втягивающих) сил.

7. Результаты диссертационной работы в виде программных средств, а также рекомендаций по совершенствованию технологических режимов и технических параметров процессов резки могут быть использованы при разработке и внедрении ножниц новых конструкций, а также более совершенных способов резки листового металлопроката, и переданы для использования на ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод».

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Зотов В. Ф. Производство проката / В. Ф. Зотов. – М. : Интернет Инжиниринг, 2000. – 352 с.
2. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник для вузов / М. М. Сафьян [и др.]. – К. : Вища шк., 1988. – 351 с.
3. Грудев А. П. Технология прокатного производства / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Metallurgiya, 1994. – 656 с.
4. Иванченко Ф. К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів : навчальний посібник / Ф. К. Иванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяєв. – К. : Вища шк., 1995. – 445 с.
5. Зотов В. Ф. Холодная прокатка металла / В. Ф. Зотов, В. И. Елин. – М. : Metallurgiya, 1988. – 288 с.
6. Федосов Н. М. Проектирование прокатных цехов / Н. М. Федосов, В. Н. Бринза, И. Г. Астахов. – М. : Metallurgiya, 1983. – 303 с.
7. Прокатное производство / П. И. Полухин, Н. М. Федосов, А. А. Королев, Ю. М. Матвеев. – М. : Metallurgiya, 1988. – 668 с.
8. Технология прокатного производства : справочник. В 2 кн. Кн. 2 / М. А. Беняковский [и др.]. ; под ред. В. И. Зюзина и А. В. Третьякова. – М. : Metallurgiya, 1991. – 423 с.
9. Технология прокатного производства / В. М. Клименко, А. М. Онищенко, А. А. Минаев, В. С. Горелик. – К. : Вища шк., 1989. – 311 с.
10. Лукашин Н. Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов : учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев. – М. : ИКЦ Академкнига, 2003. – 456 с.
11. Анализ схем производства толстых листов на реверсивных станах / Ф. Е. Долженков [и др.]. // Производство толстолистовой стали : темат. отрасл. сб. – М. : Metallurgiya, 1981. – № 5. – С. 5–10.
12. Повышение качества толстых листов / Ф. Е. Долженков [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1984. – 247 с.

13. Белобров Ю. Н. Реконструкция толстолистовых станов: направление, проблемы, решения / Ю. Н. Белобров, В. А. Плотников, Ю. Г. Бондарь // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 450–453.
14. Прокатка толстых листов / П. И. Полухин [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1984. – 288 с.
15. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – К. : Вища шк., 1976. – 191 с.
16. Интенсификация производства листовой стали / Ф. Е. Долженков, В. Г. Носов, Ю. В. Фурман, А. Е. Руднев. – К. : Техника, 1990. – 136 с.
17. Рудской А. И. Теория и технология прокатного производства : учебное пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – Санкт-Петербург : Наука, 2005. – 540 с.
18. Бочков Н. Г. Экономия металла в прокатном производстве / Н. К. Бочков, В. Н. Сафонова. – М. : Metallurgiya, 1997. – 336 с.
19. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика : справочное издание. В 2 кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
20. Бочков Н. Г. Производство качественной низкоуглеродистой листовой стали / Н. Г. Бочков, Ю. В. Липухин, А. Ф. Пименов. – М. : Metallurgiya, 1983. – 183 с.
21. Стасовский Ю. Н. Проектирование современных производств обработки металлов давлением / Ю. Н. Стасовский, Ю. С. Кривченко, Г. С. Бабенко ; под ред. д-ра т. н. Ю. Н. Стасовского. – Днепропетровск : Монолит, 2009. – 745 с.
22. Гарбер Э. А. Станы холодной прокатки / Э. А. Гарбер. – М. : ОАО Черметинформация, 2004. – 416 с.
23. Дмитриев В. Д. Машиностроение и металлургия: справочник прокатчика / В. Д. Дмитриев, М. Я. Бровман. – Донецк : Донбасс, 1986. – 110 с.
24. Гулидов И. Н. Оборудование прокатных цехов (эксплуатация, надежность) : учебное пособие для студентов сред. спец. учеб. заведений / И. Н. Гулидов. – М. : Интернет Инжиниринг, 2004. – 320 с.

25. Гарбер Э. А. Производство проката : справочное издание. В 3 т. Т.1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) / Э. А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2007. – 368с.
26. Буряковский Г. А. Поверхностные дефекты легированных сталей / Г. А. Буряковский, Р. Д. Менизон. – М. : Metallurgiya, 1986. – 157 с.
27. Савранский К. Н. Пути экономии металла при производстве толстых листов / К. Н. Савранский, Э. А. Гарбер, В. Г. Ламинцев. – М. : Metallurgiya, 1983. – 118 с.
28. Суков Г. С. Современные ножницы для порезки полосового проката / Г. С. Суков, В. Н. Тиунов, Ю. Н. Белобров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1/1(43). – С. 25–26.
29. Исследование пропускной способности линии резки толстых листов стана 2800 [Текст] : отчет о НИР (заключ.) : № 1291 / Коммунарский горн.-металлург. ин-т. ; рук. Ульяницкий В. Н. ; исполн. : Мумриенко В. С. [и др.]. – Коммунарск, 1978. – 100 с. – № ГР78011901. – Инв. № Б727425.
30. Ульяницкий В. Н. Резервы снижения энергоемкости производства толстолистового проката / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик // Вестник МАНЭБ. – 2000. – № 1. – С. 137–139.
31. Боровик П. В. Исследование теплостойкости дисковых ножей при порезке горячих толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, В. Н. Ульяницкий // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 542–545.
32. Носенко С. М. Линия резки толстолистового стана / С. М. Носенко, В. Н. Ульяницкий, Е. Г. Цымбал // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 1970. – № 5. – С. 67–69.
33. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов : учебник для вузов / А. А. Королев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgiya, 1985. – 376 с.
34. А. с. 1804963 СССР, МКИЗ В23D15/08. Ножницы гильотинные для обрезки полосового материала / В. А. Могильницкий, В. Е. Балаболко и др. (СССР). – № 4783056/27 ; заявл. 05.12.89 ; опубл. 30.03.93, Бюл. № 12.



35. Пат. 49274 Україна, МПК В23D15/00. Ножиці гідравлічні гільйотинні з нижнім різом / Білобров Ю.М., Бортник В.В. та ін. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № 200911056 ; заявл. 02.11.09 ; опубл. 26.04.10, Бюл. № 8.

36. Резка толстых листов гильотинными ножницами с наклонными кромочными ножами / В. Н. Карпушкин [и др.]. // Чер. Metallургия : Бюл. НТИ :Черметинформация. – 1982. – Вып. 8(916). – С. 43–45.

37. Адамович Р. А. Расчёт гильотинных ножниц / Р. А. Адамович, А. Э. Калле // Исследование, расчёты и конструирование машин металлургического производства : сб. науч. тр. ; под ред. Дрозда В. Г. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1980. – С. 11–14.

38. Машины и агрегаты металлургических заводов / А. И. Целиков [и др.]. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. – М. : Metallургия, 1988. – 680 с.

39. Бойденко Н. Г. Определение координат подвижного суппорта ножниц с катящимся резом / Н. Г. Бойденко, В. Д. Шейнкман, В. П. Капота // Новые конструкции и исследования агрегатов и машин обработки проката : сб. науч. тр. ; под ред. Попова Б. В. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1985. – С. 78–81.

40. Бойденко Н. Г. Профилирование инструмента ножниц с катящимся резом / Н. Г. Бойденко, В. П. Капота, В. Я. Панюхно // Прогрессивные технологии и машины для обработки и отделки прокатного производства : сб. науч. тр. ; под ред. Попова Б. В., Коновалова Л. В. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1986. – С. 47–54.

41. Бойденко А. Н. Об опыте внедрения нового способа резания толстолистового проката ножницами с катящимся резом / А. Н. Бойденко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 95–96.

42. Методика расчета силы резания дугообразным ножом / В. Д. Нотченко [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 66–69.

43. Пат. 82861 Україна, МПК1 В23D15/00. Ножиці для поперечного різання товстих листів з ексцентриковим приводом / Хайтце Г., Баур Т. ; заяв-

ник і патентовласник «СМС ДЕМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЬШАФТ». – № 200507208 ; заявл. 15.12.03 ; опубл. 26.05.08, Бюл. № 10.

44. Пат. 2338633 Российская Федерация, МПК В23D 15/08, В21D 43/09. Ножницы для поперечной резки толстых листов с эксцентриковым приводом / Хайтце Г., Баур Т. ; заявитель и патентообладатель «СМС ДЕМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЬШАФТ». – № 2005122948/02 ; заявл. 15.12.2003 ; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.

45. Пат. 2420374 Российская Федерация, МПК В23D 15/04. Устройство для резки / Баур Т. ; заявитель и патентообладатель «СМС ЗИМАГ АГ». – № 2009143858/02 ; заявл. 07.04.2008 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16.

46. Пат. 77377 Україна, МПК В23D 15/00. Ножиці для різання листового матеріалу / Козлов П. М., Титаренко О. І., Калашников А. А. Резников В. І. Чижик В.В.; заявник і патентовласник ПАТ "Новокраматорський машинобудівний завод". – u201209646 ; заявл. 09.08.2012 ; опубл. 11.02.2013, Бюл № 3.

47. Жуков И. Б. Кинематический расчет двухкривошипных ножниц в задачах оптимизации электропривода комплексов резки листового проката / И. Б Жуков. – СПб. : Гос. электротехн. ун-т. – 2004. – 23 с.

48. Кульвиц А. В. Разработка ножниц сдвоенных кромкообрезных и продольной резки / А. В. Кульвиц, Н. А. Комар // Сталь. – 2006. – № 8. – С. 68–69.

49. Сдвоенные кромкообрезные ножницы с катящимся резом конструкции ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ» / В. И. Клопов, В. А. Дунаев, В. Е. Кутузов, А. В. Кульвиц // Черные металлы. – 2009. – № 9. – С. 11–13.

50. Роль ВНИИМЕТМАША в создании и освоении агрегатов поперечной резки листового проката / С. Н. Сумский, В. Г. Грачев, Ф. С. Солодовник, Ю. М. Рогачиков // Metallurg. – 2004. – № 3. – С. 45–48.

51. Пат. 2532220 Российская федерация МПК В 23 D 15/12, В 23 D 15/14. Режущее устройство с регулируемой боковой направляющей / Баур Т., Боймер К. ; заявитель и патентообладатель «СМС ЗИМАГ АГ». – № 2004127530/02 ; заявл. 15.10.2010 ; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.

52. Зырянов В. В. Опыт эксплуатации ножниц "с катящимся резом" / В. В. Зырянов, А. М. Иванов, И. Ю. Гайтанов // Metallurg. – 2004. – № 3. – С. 51–52.

53. Ножницы с катящимся резом конструкции ОАО “КО ВНИИМЕТМАШ” / В. И. Клопов, В. Г. Астахов, В. Е. Кутузов, А. В. Кульвиц // Черная металлургия : Бюл. ин-та “Черметинформация”. – 2007. – № 3. – С. 54–58.

54. Вдовин С. И. Дисковые ножницы / С. И. Вдовин, И. В. Лактионов // Механизация и автоматизация производства. – 1990. – № 2. – С. 17.

55. Совершенствование порезки толстых листов дисковыми ножницами / В. Н. Карпушкин, В. И. Роспasiенко, В. С. Мумриенко, В. Н. Ульяницкий // Металлург. – 1979. – № 8. – С. 32–34.

56. Дунаевский В. И. Конструкция дисковых ножниц для порезки тончайших полос и фольги / В. И. Дунаевский, А. Н. Бойденко, М. В. Асеева // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – С. 73–78.

57. Кукушкин О. Н. Модернизация дисковых ножниц на непрерывно-равильных агрегатах / О. Н. Кукушкин // Металлург. – 1986. – № 1. – С. 31–33.

58. Пат. 4466 Україна, МПК В 23 D 19/00. Дискові ножиці / Гриценко С. А., Петрусенко В. А., Смирнов В. Г., Рева О.В. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № 20040503665 ; заявл. 17.05.04 ; опубл. 17.01.05, Бюл. № 1.

59. А. с. 984723 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 D 19/04. Дисковые ножницы / И. И. Овшеверов, П. Н. Смирнов, В. В. Белан, А. Н. Макаров (СССР). – № 3347013/25-27 ; заявл. 06.10.81 ; опубл. 30.12.82, Бюл. № 48.

60. Пат. 67033 Україна, МПК В 23 D 19/00. Агрегат крайкообрізних ножиців / Суков Г.С., Гриценко С. А., Євгиненко І.О. та ін. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № 200805588 ; заявл. 29.04.08 ; опубл. 10.09.08, Бюл. № 17.

61. Пат. 25865 Україна, МПК В 23 D 19/00. Ножиці дискові з подавальними роликками / Гриценко С. А., Калашніков А. А., Багнов В. П. та ін. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № 200703913 ; заявл. 10.04.07 ; опубл. 27.08.08, Бюл. № 13.

62. Пат. 35365 Україна, МПК В 23 D 19/06. Ножиці дискові / Суков Г.С., Гриценко С. А., Євгиненко І.О. та ін. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Но-

вократаторський машинобудівний завод». – № 200805588 ; заявл. 29.04.08 ; опубл. 10.09.08, Бюл. № 17.

63. Пат. 35920 Україна, МПК В 23 D 19/04. Дискові кромкообрізні ножиці / Гриценко С.А., Новоселов С.В., Білобров Ю.И. та ін. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Новократаторський машинобудівний завод. – № 99041923 ; заявл. 06.04.99 ; опубл. 16.04.01, Бюл. № 3.

64. Пат. 47074 Україна, МПК В 23 D 19/04. Комбіновані дискові кромкообрізні ножиці / Реука Ю. Ю. та ін. ; заявник і патентовласник ЗАТ «Новократаторський машинобудівний завод». – № 2001075043 ; заявл. 17.07.2001 ; опубл. 17.06.2002, Бюл. № 3.

65. А. с. 1669643 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 23 D 19/04. Дисковые кромкообрезные ножницы / В. М. Фендриков, В. В. Лучанинов, С. В. Лучанинов (СССР). – № 4497350/25-27 ; заявл. 24.10.88 ; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30.

66. Пат. 2285592 Российская федерация МПК В 23 D 19/06. Способ резки толстолистовой стали дисковыми ножницами / Драпенко А. Д., Кузнецов В. Г., Долгушин В. Н. и др. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». – № 2004127530/02 ; заявл. 14.09.2004 ; опубл. 20.10.2006, Бюл. № 29.

67. А. с. 884887 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 D 19/04. Дисковые ножницы / В. В. Шварцман, В. Г. Антипанов, В. А. Хмель, В. Н. Кочубеев, В. С. Молчанов (СССР). – № 2921042/25-27 ; заявл. 08.05.80 ; опубл. 30.11.81, Бюл. № 44.

68. А. с. 854614 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 D 19/04. Дисковые ножницы / Н. В. Кшистан, Н. И. Шандыба, В. Д. Шейнкман, П. И. Маслаков, Н. И. Лежанин (СССР). – № 2790309/25-27 ; заявл. 07.05.79 ; опубл. 15.08.81, Бюл. № 30.

69. А. с. 837615 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 D 19/04. Кромкообрезные ножницы / В. П. Войнов, Е. И. Иванов, К. И. Шкабатур, Е. П. Петрунин, Ю. А. Заплаткин, В. А. Береговой, П. И. Татарин, Н. П. Ливитин, В. И. Барнаш, Е. Л. Кобелев (СССР). – № 2819109/25-27 ; заявл. 18.09.79 ; опубл. 30.05.81, Бюл. № 22.

70. А. с. 1177084 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 23 D 19/06. Устройство для обрезки кромки полосового материала и ее крошения / И. И. Бондяев, П. Н. Смирнов,

И. И. Овшеверов, В. В. Белан (СССР). – № 3728561/25-27 ; заявл. 20.04.84 ; опубл. 07.09.85, Бюл. № 33.

71. А. с. 1377171 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 23 D 19/04. Устройство для обрезки и крошения кромок полосового материала / И. И. Бондяев, П. Н. Смирнов, И. И. Овшеверов, В. М. Сергиенко (СССР). – № 4078396/31-27 ; заявл. 18.06.86 ; опубл. 29.02.88, Бюл. № 8.

72. Целиков А. И. Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 432 с.

73. Боровик П. В. Горячая порезка толстолистовых раскатов – основной резерв снижения энергоемкости процесса / П. В. Боровик, В. Н. Ульяницкий, В. С. Мумриенко // ДГМИ. – 1998. – № 7. – С. 72–76.

74. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 : защищена 20.11.2008 : утв. 28.04.2009 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с.

75. Пат. 2058859 Российская Федерация, МПК В 23 D 15/06. Кромкообрезные ножницы / Калетин И. М., Щербаков Л. П., Горелов О. В., Кутузов В. Е., Петров А. В. ; заявитель и патентообладатель Колпинское отделение Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института металлургического машиностроения им. А. И. Целикова. – № 4905279/08 ; заявл. 28.01.1991 ; опубл. 27.04.1996, Бюл. № 12.

76. Пат. 76981 Україна, МПК В 23 D 15/00. Ножиці здвоєні кромкообрізні / Коваленко В.І., Реука Ю.Ю., Калашніков А.А. та ін. ; заявник і патентовласник ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № 201207878 ; заявл. 26.06.12 ; опубл. 25.01.13, Бюл. № 2.

77. Пат. 57380 Україна, МПК В 23 D 31/04, В 23 D 15/04. Ножиці здвоєні кромкообрізні / Река Ю. Ю., Калашников А. А. ; заявник і патентовласник ЗАТ "Новокраматорський машинобудівний завод". – u2002097332 ; заявл. 10.09.2002 ; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.

78. Васильев К. И. Резка листовыми ножницами: компьютерное моделирование и экспериментальное исследование изменения зазора между ножа-

ми / К. И. Васильев, Н. А. Садеков. // Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. – 2011. – № 2. – С. 34–37.

79. Крылов Н. И. Усилия резания металлов на ножницах / Н. И. Крылов, Б. М. Тарасов // Труды ВНИИМЕТМАШ ; под ред. Королёва А. А., Дроздова В. Г. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1980. – № 27 – С. 67–76.

80. Пат. 69331 Україна, МПК В 23 D 35/00, В 23 D 25/00, В 23 D 15/00. Комплект ножиц для різання листового матеріалу / Суков Г. С., Алдохін Д. В., Калашніков А. А. та ін. ; заявник і патентовласник ПАО "Новокраматорський машинобудівний завод". – № 201112194 ; заявл. 18.10.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

81. Пат. 2212986 Российская федерация, МПК В 23 D 35/00. Нож шевронный для резки листового материала / Ю.С. Котелевец, В.А. Арашкевич, Ю.Д. Иванов и др.; Заявитель ОАО "Северсталь". – № 2001120645/02 ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.

82. Сабуров А. М. Определение усилия и момента резания на дисковых ножницах / А. М. Сабуров // Вопросы теории и совершенствования конструкций металлургического оборудования : труды ВНИИМЕТМАШ. – 1974. – № 213. – С. 71–74.

83. Сабуров А. М. Экспериментальное исследование дисковых ножиц / А. М. Сабуров, Е. В. Пальмов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1963. – № 8. – С. 181–184.

84. Сабуров А. М. Выбор диаметра ножей для разрезания толстых листов на дисковых ножницах / А. М. Сабуров, Е. В. Пальмов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1964. – № 6. – С. 213–216.

85. Дунаевский В. И. К расчету энергосиловых параметров процесса резания дисковыми ножами / В. И. Дунаевский, А. В. Сатонин, А. С. Ткаченко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 9/10. – С. 73–75.

86. Носенко С. М. Исследование дисковых ножиц толстолистовых станков : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Носенко С. М. – Днепропетровск, 1966. – 24 с.

87. Носенко С. М. Эксплуатация толстолистовых дисковых ножниц / С. М. Носенко // *Металлург.* – 1965. – № 4. – С. 27–29.
88. Исследование процесса порезки и определение условий организации обработки горячих листов в потоке стана 2800 [Текст] : отчет о НИР (заключ.) : № 108 / Коммунарский горн.-металлург. ин-т. ; рук. Носенко С. М. ; исполн.: Дубовик В. П. [и др.]. – Коммунарск, 1965. – 258 с.
89. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением : справочное издание / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : *Металлургия*, 1982. – 312 с.
90. Бодини Л. Улучшение плоскостности толстых листов благодаря прогнозированию и оптимизации производства / Л. Бодини, О. Эрих, М. Краухаузен // *Черные металлы.* – 2008. – № 11. – С. 35–38.
91. Боровик П. В. К вопросу качества резки шевронными ножами // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1(34) – С. 245–250.
92. Хартунг Х. Г. Линия резки нового вида: экономичное производство листов с малыми остаточными напряжениями / Х. Г. Хартунг, М. Дженеке, Ц. Зассе // *Черные металлы.* – 2010. – № 3. – С. 34–37.
93. Люке М. Вибрационные гильотинные ножи: высокое качество поверхности реза / М. Люке, М. Стонис // *Черные металлы.* – 2009. – № 3 – С. 43–44.
94. Белянчиков В. К. Новые режущие машины прокатных станов / В. К. Белянчиков, А. С. Буров // *Машины и агрегаты металлургического производства.* – 1984. – С. 149.
95. Новая конструкция ножниц с нижним резом / В.А. Быков, П.Б. Соколов, Ю.Д. Макаров, С.А. Микульчик // *Сталь.* – 2013. – № 9. – С. 74–76.
96. Современные тенденции развития оборудования для резки листов на примере ножниц дисковых кромкообрезных стана «Трио – Лаута – 2150» / А. А. Калашников [и др.]. // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2. – С. 349–351.
97. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы : монография / А. А. Минаев. – Донецк : Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.

98. Плахтин В. Д. Модернизация механизма привода ножей двухпарных дисковых ножниц / В. Д. Плахтин, А. Н. Саков, Б. Д. Пантюшин // Производство проката. – 2007. – № 9. – С. 45–47.

99. Процесс прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств. Теория и практика : монография / С. М. Жучков [и др.]. – М. : Пан пресс, 2007. – 285 с.

100. Жучков С. М. Совершенствование технологических схем процесса прокатки-разделения с использованием неприводных деформационно-делительных устройств / С. М. Жучков, А. А. Горбанев, Б. Н. Колосов // Наука та інновації. – 2009. – № 5. – С. 47–56.

101. Фастыковский А. Р. Продольное разделение полосы неприводными дисковыми ножами в потоке непрерывного прокатного стана / А. Р. Фастыковский, В. Н. Перетятыко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 12. – С. 25–28.

102. Боровик П. В. Явление прикромочного утонения в процессе порезки горячих толстолистовых раскатов дисковыми ножницами / П. В. Боровик, В. Н. Ульяницкий, Н. М. Хорошилов // Сборник научных трудов ДГМИ. – Алчевск, 1998. – Вып. 7. – С. 51–55.

103. Вишневский Д. А. Изучение зависимости прикромочного утонения листовых раскатов при горячей порезке на ножницах / Д. А. Вишневский, П. В. Боровик // Третья научно-практическая конференция молодых специалистов, посвященная 106 годовщине АМК. – Алчевск : ОАО АМК, 2002. – С. 82–94.

104. Боровик П. В. Исследование качества порезки горячих толстолистовых раскатов дисковыми ножницами / П. В. Боровик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 180–182.

105. Боровик П. В. Изучение прикромочной деформации листа при порезке горячих толстолистовых раскатов дисковыми ножницами / П. В. Боровик, В. Н. Ульяницкий // Вісник ДДМА. – 2007. – № 1. – С. 19–22.

106. Боровик П. В. Влияние конструкции ножа и технологических параметров процесса резания металла ножницами на величину удельной работы /



П. В. Боровик, В. А. Луценко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2007. – Вып. 25. – С. 187–193.

107. Боровик П. В. Влияние конструкции ножа на величину работы в процессе резания металла на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2007. – Вып. 24. – С. 264–270.

108. Боровик П. В. К вопросу увеличения толщины раскатов разрезаемых на дисковых ножницах в горячем состоянии / П.В. Боровик // Материалы VIII-й научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «АМК», (Алчевск, 25 мая 2007 г.). – Алчевск, 2007. – С. 33–34.

109. Боровик П. В. Исследование влияния конструкции ножа на качество и энергосиловые параметры резания толстолистовых раскатов в горячем состоянии / П. В. Боровик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 588–590.

110. Пат. 4860 Україна, МПК В 23 D 19/04. Дискові ножиці / Боровік П.В. ; заявник і патентовласник Донбаський гірничо-металургійний інститут. – № 20040503435 ; заявл. 06.05.04 ; опубл. 15.02.05, Бюл. № 2.

111. Кузьменко В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – К. : Техніка, 1990. – 136 с.

112. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навчальний посібник / П. В. Боровік. – Алчевск : ДонГТУ, 2012. – 170 с.

113. Боровик П. В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением : монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – 299 с.

114. Гуревич Л. М. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Введение в Abaqus / Л. М. Гуревич, В. М. Волчков, В. Ф. Даненко. – Волгоград : ВолгГТУ, 2015. – 96 с.

115. Золочевский А. А. Введение в ABAQUS / А. А. Золочевский, А. А. Беккер. – Харьков : Грант, 2011. – 49 с.

116. Еременко С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел / С. Ю. Еременко. – Харків : Основа, 1991. – 272 с.

117. Бер В. И. Скорость и величина деформации при резке толстолистовых материалов / В. И. Бер, Д. И. Суяров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 6. – С. 51–55.

118. Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик П. А. Петров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2013. – № 41. – С. 151–155.

119. Боровик П. В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П.В. Боровик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 2. – С. 25–29.

120. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 47. – С. 76–80.

121. Боровик П. В. Выбор аппроксимации механических свойств при математическом моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Металлургические процессы и оборудование. – Донецк, 2011. – № 2(24) – С. 5–9.

122. Боровик П. В. Анализ влияния модели использования пластичности на результаты моделирования процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Вісник НТУ України «КПІ». – К., 2012. – № 64. – С. 190–195. – (Серія: Машинобудування).

123. Боровик П. В. Особенности процесса холодной резки квадратной заготовки на сортовых ножницах / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – 2012. – № 38. – С. 190–196.

124. Боровик П. В. Развитие методов численного моделирования процессов резки металла на дисковых ножницах / П. В. Боровик // Збірник науко-

вих праць Донбаського гірничо-металургійного інституту. – Алчевськ, 2006. Вип. № 22. – С. 166–172.

125. Теоретическое исследование процесса резания непрерывнолитых слябов / О. С. Лехов, В. И. Одинокоев, Т. Г. Химич, А. В. Песков. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 2. – С. 128–131.

126. Бровман Т. В. Силовые условия при резке толстолистового проката / Т. В. Бровман // Интенсификация производства листовой стали : темат. сб. науч. тр. – 1988. – С. 109–112.

127. Васильев К. И. Деформированное состояние ножевой балки листовых ножниц / К. И. Васильев, Н. А. Садеков // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – № 7. – С. 23–26.

128. Васильев К. И. Экспериментальное исследование поперечного прогиба ножевой балки листовых ножниц / К. И. Васильев, Н. А. Садеков // Мат-лы III науч.-образоват. конф. «Машиностроение – традиции и инновации» (МТИ – 2010). (Секция «Оборудование машиностроительных производств»). – М. : МГТУ Станкин, 2010. – С. 28–34.

129. Потапенков А. П. Исследование усилий резания наклонными ножами / А. П. Потапенков. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 8. – С. 65–69.

130. Савицкий В. В. Исследование энергосиловых параметров сдвоенных кромкообрезных ножниц в среде COSMOSWorks / В. В. Савицкий, А. Е. Вольвач // Научный Вестник ДГМА. – 2009. – № 1. – С. 150–155.

131. Ручко В. Н. Получение аналитических зависимостей для определения углов поворота эксцентрикового вала механизма резания на ножницах с параллельными ножами / В. Н. Ручко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 197–201.

132. Ищенко А. А. Пилы горячей резки проката. Конструкции и расчет : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза. – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – 251 с.

133. Диамантопуло К. К. О резке полосы параллельными ножами / К. К. Диамантопуло, И. В. Левандовская, А. И. Сердюк // Удосконалення про-

цесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 129–131.

134. Развитие методов расчета, совершенствования технологий и оборудования агрегатов продольной резки холоднокатаных лент, листов и полос / В. Ф. Потапкин, Ю. К. Добронос, В. Д. Нотченко, А. Н. Бойденко. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 33–37.

135. Сафронова Т. В. Энергосиловые параметры при резке толстолистого проката на ножницах / Т. В. Сафронова // Теория и технология производства толстого листа : темат. сб. науч. труд. – М., 1986. – С. 87–92.

136. Миленин А. А. Современные методы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением / А. А. Миленин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 8. – С. 22–26.

137. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гриневич. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.

138. Разработка статистической модели разрезки рулонной стали на агрегате продольной резки / В. В. Шестаков [и др.]. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 9. – С. 39–41.

139. Разработка математической модели процесса разрезки рулонной полосы на многодисковых ножницах агрегата продольной резки / А. В. Колобов [и др.]. // Черные металлы. – 2013. – № 2. – С. 9–13.

140. Котельников В. П. Резание заготовок на ножницах с параллельными ножами / В. П. Котельников // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 8. – С. 150–152.

141. Исследование усилий резания металлических листов / А. П. Потапенков, Ю. Г. Серебренников, С. С. Пилипенко, С. М. Степанов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 11. – С. 56–59.

142. Численное математическое моделирование процесса резания листового металлопроката на ножницах с дугообразным ножом / В. Д. Нотченко [и др.]

др.]. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 454–457.

143. Дунаевский В. И. Численное математическое моделирование процесса резания дисковыми ножами / В. И. Дунаевский, Е. А. Емченко, В. В. Нотченко // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – № 2001. – С. 26–30.

144. Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса поперечной резки круглых сортовых профилей / П. А. Петров, С. М. Стриченко, И. И. Бойко, А. А. Сытник // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1. – С. 227–232.

145. Трусковский В. И. К назначению угла наклона плоских клиновых ножей для резки сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента / В.И. Трусковский, В.Г Шеркунов // Вестник Магнитогорского государственного технического ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 3. – С. 21–23.

146. Трусковский В. И. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки сортового проката / В. И. Трусковский, Р. А. Закиров // Наука и технологии : избр. тр. Российской школы. – М. : РАН, 2005. – С. 129–133. – (Серия «Технологии и машины обработки давлением»).

147. Трусковский В. И. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб / В. И. Трусковский, В. Г. Церкунов // Металлург. – 2012. – № 11. – С. 63–66.

148. Владимиров А. В. Определение параметров механизма ножниц для резки листового проката / А. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2009. – № 4. – С. 87–89. – (Серия: Технические науки).

149. Экспериментальное исследование ножниц горячей резки / Р. Ф. Денисова [и др.]. // Конструирование и совершенствование прокатного оборудования. – М., 1985. – С. 137–140.

150. Ушаков М. В. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании метал-

лов / М. В. Ушаков, С. Ю. Ильяхин, И. А. Воробев // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : ТулГУ, 2010. – № 4. – С. 89–93.

151. Поляков Б. Н. Напряженно-деформированные и термоупругие состояния суппортов ножниц заготовочных прокатных станов / Б. Н. Поляков // Оборудование. Технический альманах. – 2008. – № 4 – С. 34–39.

152. Ульяницкий В. Н. Особенности определения усилия резания толстолистовых раскатов дисковыми ножницами / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик // Вестник МАНЭБ. – СПб, 2000. – № 26. – С. 52–54.

153. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при продольной резке двухслойных биметаллических лент и полос / В.И. Дунаевский [и др.]. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 302–306.

154. Химич Т. Г. Автоматизированный расчет кинематических и динамических параметров ножниц 1250 тс / Т. Г. Химич, О. С. Техов, А. Г. Жигалин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 4. – С. 144–147.

155. Боровик П. В. Решение проблемы учета механических свойств материала при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко / Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2010. – № 32. – С. 175–181.

156. Боровик П. В. Оценка влияния жесткости станины на параметры процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2012. – № 36. – С. 269–275.

157. Жуков И. Б. Исследование динамики систем управления ножницами поперечной резки листового проката / И. Б. Жуков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – № 1. – С. 7–15. – (Серия: Электротехника).

158. Ураков В. Ф. Температурный эффект пластической деформации при резке металлов / В. Ф. Ураков // Машины и технология обработки металлов давлением. – М. : Машиностроение, 1967. – С. 205–217.

159. Диамантопуло К. К. О резке проката в штампе при сложном движении ножа / К. К. Диамантопуло, А. И. Сердюк, И. В. Левандовская // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 279–282.

160. Прилуков В. П. Определение геометрических параметров верхнего ножа листовых ножниц / В.П. Прилуков, В.И. Люленков, В.Ф. Егоров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 10. – С. 141–142.

161. Сатонин А. В. Расчет напряжений и деформаций по кромкам прокатываемых лент и полос / А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, И. С. Сухоруков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 7(53). – С. 63–66.

162. Численная методика расчета энергосиловых параметров процесса горячей поперечной резки непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, С. М. Стриченко, А. В. Завгородний, А. А. Житлова // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2. – С. 43–47.

163. Бойденко Н. Г. Исследование процесса резки листов на ножницах / Н. Г. Бойденко, В. П. Капота, И. И. Капнин // Новые конструкции и исследования агрегатов и машин обработки проката : сб. науч. тр. ; под ред. Попова Б. В. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1985. – С. 34–38.

164. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса горячей резки на ножницах / П.В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 – С. 218–222.

165. Кутышкин А. В. Оценка стойкости ножей для резки сортового проката / А. В. Кутышкин, О. А. Кутышкина // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 10 – С. 32–33.

166. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката / Е. Н. Ерёмин [и др.]. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 17–19.

167. Романцев Б. А. Исследование процесса разрезки прутков при повышенной температуре / Б. А. Романцев, В. А. Попов, С. Д. Калагин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 7. – С. 51–52.

168. Гребен А. К. Снижение усилия резания и динамических нагрузок при разделении толстолистового проката за счет применения ножей новой конструкции / А. К. Гребен, А. В. Дегтярев // Новые технологические процессы прокатки как средство интенсивного производства и повышение качества продукции : всес. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Челябинск, 1989. – С. 117–119.

169. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки : справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Metallurgiya, 1986. – 430 с.

170. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением / А. В. Сатонин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 559–564.

171. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

172. Ануфриев И. Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x / И. Е. Ануфриев. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2002. – 736 с.

173. Гульятев А. Визуальное моделирование в среде Matlab : учебный курс / А. Гульятев. – СПб. : Питер бук, 2000. – 430 с.

174. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.

175. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М. : Мир, 1972. – 381 с.

176. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковшов. – К. : Вища шк., 1982. – 210 с.

177. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Э. Фёрстер; пер. с нем. и предисловие В. М. Ивановой. – М. : Финансы и статистика, 1983 – 304 с.



178. Боровиков В. П. STATISTICA® – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows® / В. П. Боровиков, И. П. Боровиков. – М. : Информационно-издательский дом Филинь, 1997. – 608 с.
179. Калинина В. Н. Математическая статистика / В.Н. Калинина, В.Ф. Панкин. – М. : Высшая шк., 2001. – 336 с.
180. Підліпенська Л. Є. Математична статистика / Л. Є. Підліпенська. – Алчевськ : ДонДТУ, 2004. – 171 с.
181. Ульяницкий В. Н. Экспериментальная оценка стойкости инструмента при резке высокопрочных сталей / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1(40) – С. 227–230.
182. Боровик П. В. Повышение качества толстых листов за счёт применения шевронного ножа новой конструкции / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 43. – С. 41–46. – (Серія: Нові рішення у сучасних технологіях).
183. Селезнёв М. Е. Сравнительный теоретический анализ эффективности применения шевронных ножей со сложной формой режущей кромки / М. Е. Селезнёв, П. В. Боровик // Научный вестник ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2. – С. 148–154.
184. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении : справочник / Д. А. Гохфельд [ и др.]. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с.
185. Нотченко В. Д. К расчету энергосиловых параметров процесса резания листового металлопроката / В. Д. Нотченко, А. В. Сатонин, А. Н. Бойденко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 6. – С. 78.
186. Боровик П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П. В. Боровик, П. А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 5. – С. 41–44.
187. Селезнёв М. Е. Определение максимального усилия при поперечной резке толстолистовых раскатов шевронным ножом сложной формы /

М. Е. Селезнёв // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2013. – № 41. – С. 173–178.

188. Боровик П. В. Теоретическое исследование работы дисковых ножниц при увеличенном диаметре верхнего ножа / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2013. – № 39 – С. 135–140.

189. Боровик П. В. Оценка влияния схемы привода дисковых ножниц при резке боковых кромок толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Актуальные вопросы современной техники и технологии : сборник докладов X-й Юбилейной Международной научной конференции. – Липецк, 2013 – С. 18–21.

190. Боровик П. В. Технология многостадийной продольной резки горячих толстолистовых раскатов дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Сборник научных работ студентов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – № 3. – С. 25–30.

191. Боровик П. В. Влияние проводковой системы на узлы дисковых ножниц при резании толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, В. Н. Ульяницкий // Сборник научных трудов ДГМИ. – Алчевск : ДонГТУ, 1998. – Вып. 8. – С. 160–162.

192. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука, 1973. – 301 с.

193. Сатонин А. В. Методики и программные средства по имитационному математическому моделированию различных технологических схем листопрокатного производства / А. В. Сатонин ; Крамат. индустр. ин-т. – Краматорск, 1994. – Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, № 1661. – Ук 94.

194. Боровик П. В. Экспериментальная оценка влияния сил внешнего сопротивления на скорость резки толстых листов дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск, 2012. – № 3 – С. 181–184.

195. Боровик П. В. Развитие технологии обрезки боковых кромок листового проката дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Сборник

научных трудов Донбасского государственного технического университета – Алчевск : ДонГТУ, 2012. – № 37 – С. 156–163.

196. Боровик П. В. Распределение момента резания между валами верхнего и нижнего ножей дисковых ножниц при порезке толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, В. Н. Ульяницкий // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 133–137.

197. Боровик П. В. Оценка скорости резки листа дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып.: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ ХПИ, 2014. – № 44 (1087). – С. 15–21.

198. Borovik P. V. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing / P. V. Borovik, M. E. Seleznyov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 5. – С. 218–223.

199. Селезнёв М. Е. Экспериментальная оценка эффективности применения модифицированного шевронного ножа / М. Е. Селезнев // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия : материалы III междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2015. – № 4(11). – С. 99–102.

200. Пат. 90094 Україна, МПК В 23 D 35/00, В 23 D 25/00, В 23 D 15/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М. Є. ; заявники та патентовласники Боровік П. В., Селезньов М. Є. – u201314896 ; заявл. 19.12.2013 ; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

201. Пат. 72820 Україна, МПК В 23 D 19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стана / Боровік П. В., Селезньов М. Є. ; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – u201202702 ; заявл. 06.03.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16.

202. Боровик П. В. Анализ условий захвата толстолистового проката в процессе резки дисковыми ножницами / П. В. Боровик, П. А. Петров, М. Е. Селезнёв // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 – С. 227–231.

## Приложение А

### Программные средства к математическому моделированию процессов резки листового металлопроката на ножницах

#### А.1 Программа к математическому моделированию процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением

```

clear all
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName','Times New Roman');
[data_in]=data_input;
[Forse_max,Forse,S,data_in]=steel(data_in);
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('Position',[scrsz(3)/2-600 scrsz(4)/2-350 1200 720])
axes('Position',[0.13 0.64 0.34 0.28])
clear 'X_plot';
clear 'Y_plot';
X_plot(1,:)=S{1}(1,size(S{1},2),:);
Y_plot(1,:)=Forse{1}(1,size(Forse{1},2),:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold on
clear 'X_plot';
clear 'Y_plot';
X_plot(1,:)=S{1}(2,size(S{1},2),:);
Y_plot(1,:)=Forse{1}(2,size(Forse{1},2),:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','--');
hold on
clear 'X_plot';
clear 'Y_plot';
S_plot(1,:)=S{1}(3,size(S{1},2),:);
Y_plot(1,:)=Forse{1}(3,size(Forse{1},2),:);
plot(S_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold off
grid on
axis([0 31 0 8])
annotation('textbox',[0.11 0.565 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'S (мм)'});
annotation('textbox',[0.108 0.93 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'N (MH)'});
annotation('textbox',[0.09 0.535 0.42
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'(h = 25 (мм),
L = 1000 (мм), R = 100h, \alpha = 3\circ)'});
annotation('textbox',[0.11 0.487 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'a'});
axes('Position',[0.57 0.64 0.34 0.28])
clear 'X_plot';
clear 'Y_plot';

```

```

X_plot(1,:)=data_in{2}(1,2,:);
Y_plot(1,:)=Forse_max{2}(1,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold on
clear 'Y_plot';
Y_plot(1,:)=Forse_max{2}(2,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','--');
hold on
clear 'Y_plot';
Y_plot(1,:)=Forse_max{2}(3,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold off
grid on
axis([1 3 1 20])
annotation('textbox',[0.55 0.567 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'\alpha
(\circ)'});
annotation('textbox',[0.55 0.93 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'N_m_a_x
(MH)'});
annotation('textbox',[0.55 0.535 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'(h = 25 (MM),
L = 1000 (MM), R = 100h)'});
annotation('textbox',[0.55 0.487 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'\sigma'});
axes('Position',[0.13 0.17 0.34 0.28])
clear 'X_plot';
clear 'Y_plot';
X_plot(1,:)=data_in{1}(2,1,:);
Y_plot(1,:)=Forse_max{1}(1,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold on
clear 'Y_plot';
Y_plot(1,:)=Forse_max{1}(2,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','--');
hold on
clear 'Y_plot';
Y_plot(1,:)=Forse_max{1}(3,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold off
grid on
axis([5 25 0 8])
annotation('textbox',[0.11 0.095 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'h (MM)'});
annotation('textbox',[0.108 0.46 0.38
0.05],'EdgeColor','none','String',{'N_m_a_x (MH)'});
annotation('textbox',[0.11 0.065 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'(L = 1000
(MM), R = 100h, \alpha = 3\circ)'});
annotation('textbox',[0.11 0.017 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'B'});
legend('Cr2nc','35Г2','65Г');
set(legend,'Position',[0.130159722222227 0.273890173410402 0.106388888888889
0.1762]);
axes('Position',[0.57 0.17 0.34 0.28])
clear 'X_plot';
clear 'Y_plot';

```

```

X_plot(1,:)=data_in{3}(1,3,:);
Y_plot(1,:)=Forse_max{3}(1,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold on
clear 'Y_plot';
Y_plot(1,:)=Forse_max{3}(2,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','--');
hold on
clear 'Y_plot';
Y_plot(1,:)=Forse_max{3}(3,:);
plot(X_plot,Y_plot,'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold off
grid on
axis([0 200 1 10])
annotation('textbox',[0.55 0.095 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'R / h'});
annotation('textbox',[0.55 0.46 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'N_m_a_x
(MH)'});
annotation('textbox',[0.55 0.065 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'(h = 25 (мм),
L = 1000 (мм), \alpha = 3\circ)'});
annotation('textbox',[0.55 0.017 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'r'});

```

## A.2 Программа к математическому моделированию процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары

```

clear all
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName','Times New Roman');

[data_in_HOT,data_out_HOT]=f_HOT;
[data_in_COLD,data_out_COLD]=f_COLD;
scrsz = get(0,'ScreenSize');

figure('Position',[scrsz(3)/2-600 scrsz(4)/2-350 1200 720])
axes('Position',[0.13 0.64 0.34 0.28])
data_plotX(1,:)=data_in_COLD{4}(4,:);
data_plotY1(1,:)=data_out_COLD{4}(3,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY1(1,),'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold on
data_plotY2(1,:)=data_out_COLD{4}(2,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY2(1,),'LineWidth',2,'LineStyle','--');
hold on
data_plotY3(1,:)=data_out_COLD{4}(1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY3(1,),'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold off

```

```

grid on
ky=1.2;
axis([min(data_plotX) max(data_plotX)
min([min(data_plotY1),min(data_plotY2),min(data_plotY3)])
max([max(data_plotY1),max(data_plotY2),max(data_plotY3)])]);
annotation('textbox',[0.11 0.560 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'h (MM)'});
annotation('textbox',[0.108 0.925 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'M
(κHm)'});
annotation('textbox',[0.11 0.520 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'D = 1000
(MM), \sigma_b= 430 (MPa), Q_f / N_1 = -0.2}');
annotation('textbox',[0.11 0.482 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'a'});
set(legend,'Position',[0.131 0.742 0.13 0.1762]);

clear data_plotX
clear data_plotY1
clear data_plotY2
clear data_plotY3

axes('Position',[0.57 0.64 0.34 0.28])
data_plotX(1,:)=data_in_COLD{1}(1,:);
data_plotY1(1,:)=data_out_COLD{1}(3,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY1(1:,:),'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold on
data_plotY2(1,:)=data_out_COLD{1}(2,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY2(1:,:),'LineWidth',2,'LineStyle','--');
hold on
data_plotY3(1,:)=data_out_COLD{1}(1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY3(1:,:),'LineWidth',2,'LineStyle','-');
hold off
grid on
ky=1.1;
axis([min(data_plotX) max(data_plotX)
min([min(data_plotY1),min(data_plotY2),min(data_plotY3)])
max([max(data_plotY1),max(data_plotY2),max(data_plotY3)])*ky)];
annotation('textbox',[0.55 0.560 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'Q_f / N_1'});
annotation('textbox',[0.55 0.925 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'M
(κHm)'});
annotation('textbox',[0.55 0.520 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'(h = 25 (MM),
\sigma_b= 430 (MPa), D = 1000 (MM)'});
annotation('textbox',[0.55 0.482 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'G'});

clear data_plotX
clear data_plotY1
clear data_plotY2
clear data_plotY3

axes('Position',[0.13 0.17 0.34 0.28])
data_plotX(1,:)=data_in_HOT{4}(4,:);
data_plotY1(1,:)=data_out_HOT{4}(3,1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY1(1:,:),'LineWidth',2,'LineStyle','-');

```

```

hold on
data_plotY2(1,:)=data_out_HOT{4}(2,1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY2(1:,:), 'LineWidth',2, 'LineStyle','--');
hold on
data_plotY3(1,:)=data_out_HOT{4}(1,1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY3(1:,:), 'LineWidth',2, 'LineStyle','-');
hold off
grid on
ky=1.2;
axis([min(data_plotX) max(data_plotX)
min([min(data_plotY1),min(data_plotY2),min(data_plotY3)])
max([max(data_plotY1),max(data_plotY2),max(data_plotY3)])]);
annotation('textbox',[0.11 0.090 0.38
0.05], 'HorizontalAlignment', 'right', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'h (мм)'});
annotation('textbox',[0.108 0.455 0.38 0.05], 'EdgeColor', 'none', 'String', {'M
(кНм)'});
annotation('textbox',[0.11 0.050 0.38
0.05], 'HorizontalAlignment', 'center', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'D = 1000
(мм), T = 700 (\circC), Q_f / N_1 = 0.15}');
annotation('textbox',[0.11 0.012 0.38
0.05], 'HorizontalAlignment', 'center', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'B'});
legend ('верхний', 'оба', 'нижний');
set(legend, 'Position', [0.131 0.742 0.13 0.1762]);

clear data_plotX
clear data_plotY1
clear data_plotY2
clear data_plotY3

axes('Position',[0.57 0.17 0.34 0.28])
data_plotX(1,:)=data_in_HOT{1}(1,:);
data_plotY1(1,:)=data_out_HOT{1}(3,1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY1(1:,:), 'LineWidth',2, 'LineStyle','-');
hold on
data_plotY2(1,:)=data_out_HOT{1}(2,1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY2(1:,:), 'LineWidth',2, 'LineStyle','--');
hold on
data_plotY3(1,:)=data_out_HOT{1}(1,1,:)./10^3;
plot(data_plotX(1,:),data_plotY3(1:,:), 'LineWidth',2, 'LineStyle','-');
hold off
grid on
ky=1.1;
axis([min(data_plotX) max(data_plotX)
min([min(data_plotY1),min(data_plotY2),min(data_plotY3)])
max([max(data_plotY1),max(data_plotY2),max(data_plotY3)])*ky]);
annotation('textbox',[0.55 0.090 0.38
0.05], 'HorizontalAlignment', 'right', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'Q_f / N_1'});
annotation('textbox',[0.55 0.455 0.38 0.05], 'EdgeColor', 'none', 'String', {'M
(кНм)'});
annotation('textbox',[0.55 0.050 0.38
0.05], 'HorizontalAlignment', 'center', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'(h = 40 (мм),
D = 1000 (мм), T = 700 (\circC))'});
annotation('textbox',[0.55 0.012 0.38
0.05], 'HorizontalAlignment', 'center', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'r'});

```



### А.3 Программа к имитационному математическому моделированию процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением

```

clear all
set(0,'DefaultAxesFontSize',11,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',11,'DefaultTextFontName','Times New Roman');

[data_inMK] = data_inMK_chevron;

[Forse_max_out,Forse_out,S_out]=steel_MK(data_inMK);

lim_data=size(data_inMK,1)-1;

data_plotX(1,:)=data_inMK(1:lim_data,1);
data_plotX(2,:)=data_inMK(1:lim_data,2);
data_plotX(3,:)=data_inMK(1:lim_data,3);
data_plotX(4,:)=data_inMK(1:lim_data,4);
data_plotX(5,:)=Forse_max_out(1,1:lim_data);

scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('Position',[scrsz(3)/2-600 scrsz(4)/2-345 1200 650])

axes('Position',[0.13 0.64 0.34 0.28])
[Y,X]=hist(data_plotX(1,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([24.7 25.3 0 0.151])
annotation('textbox',[0.11 0.56 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'h (мм)'});
annotation('textbox',[0.108 0.935 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.11 0.53 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'a'});
title 'v_h = 0.004'

axes('Position',[0.57 0.64 0.34 0.28])
[Y,X]=hist(data_plotX(2,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([370 480 0 0.151])
annotation('textbox',[0.55 0.56 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'\sigma_b
(МПа)'});
annotation('textbox',[0.55 0.935 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});

```

```

annotation('textbox',[0.55 0.53 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'\sigma'});
title 'v_\sigma = 0.058'

axes('Position',[0.13 0.17 0.34 0.28])
[Y,X]=hist(data_plotX(3,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([2.848 3.148 0 0.151])
annotation('textbox',[0.11 0.092 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'\alpha
(\circ)'});
annotation('textbox',[0.108 0.465 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.11 0.052 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'B'});
title 'v_\alpha = 0.1'

axes('Position',[0.57 0.17 0.34 0.28])
[Y,X]=hist(data_plotX(4,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([0.35 0.65 0 0.151])
annotation('textbox',[0.55 0.092 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'\Delta
(mm)'});
annotation('textbox',[0.55 0.465 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.55 0.052 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'\Gamma'});
title 'v_\Delta = 0.1'

figure('Position',[scrsz(3)/2-325 scrsz(4)/2-295 650 600])
axes('Position',[0.09 0.13 0.85 0.75])
[Y,X]=hist(data_plotX(5,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
grid on
axis([2.4 3.5 0 0.15])
annotation('textbox',[0.05 0.9 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.11 0.037 0.87
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'N_m_a_x
(MH)'});
title 'v_N = 0.062'

sk_delta=std(data_plotX(5,:));
vFmax=sk_delta/Forse_max_out(1,lim_data+1);

disp ('vFmax')
disp (vFmax)

```

#### А.4 Программа к имитационному математическому моделированию процесса обрезки боковых кромок листового металлопроката на дисковых ножницах с одним приводным ножом из пары

```

clear all
set(0, 'DefaultAxesFontSize', 11, 'DefaultAxesFontName', 'Times New Roman');
set(0, 'DefaultTextFontSize', 11, 'DefaultTextFontName', 'Times New Roman');
[n, k, kf, D, delta, psi, data_inMK] = f_data_inMK_disk;
for i = 1:size(data_inMK, 1)
    h = data_inMK(i, 1);
    G = data_inMK(i, 2);
    b = data_inMK(i, 3);
    f = data_inMK(i, 4);
        R = 0.5 * D;
        [t_max, EH] = f_svoystva_materiala_COLD(G, R, delta, psi, h);
        f1 = f;
        f2 = f1;
[L_H, L_O, L_P, alfa, beta, deltaH_n] = f_geometricheskie_parametri_ochaga(n, R, h, EH, delta, psi);
[a1, a2, a, F, X1, X2, h1, h2] = f_geometricheskie_parametri_objoma(n, k, R, L_H, L_P, deltaH_n);
[N1_nk] = f_silovie_parametri_objoma(n, k, h, b, L_P, L_H, L_O, X1, X2, h1, h2, a, F, t_max, EH);
    M_N1 = sum(N1_nk); %Полная сила резки верхним ножом
    Qf = M_N1 * kf; %Сила внешнего сопротивления
    [gamma1, fo] = f_angle_gamma1(k, Qf, N1_nk, a1, a2, a, f1, R);
    [Mv] = f_moment_rezaniyal(k, R, N1_nk, a, a1, a2, f1, fo, gamma1);
    Mv_out(i) = Mv;
end
lim_data = size(data_inMK, 1) - 1;
data_plotX(1, :) = data_inMK(1:lim_data, 1);
data_plotX(2, :) = data_inMK(1:lim_data, 2);
data_plotX(3, :) = data_inMK(1:lim_data, 3);
data_plotX(4, :) = data_inMK(1:lim_data, 4);
data_plotX(5, :) = Mv_out(1, 1:lim_data);
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [scrsz(3)/2-600 scrsz(4)/2-345 1200 650])
axes('Position', [0.13 0.64 0.34 0.28])
[Y, X] = hist(data_plotX(1, :), 20);
bar(X, Y ./ (size(data_inMK, 1) - 1), 'FaceColor', [0.501960813999176 0.501960813999176 0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([24.7 25.3 0 0.151])
annotation('textbox', [0.11 0.56 0.38 0.05], 'HorizontalAlignment', 'right', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'h (мм)'});
annotation('textbox', [0.108 0.935 0.38 0.05], 'EdgeColor', 'none', 'String', {'W'});
annotation('textbox', [0.11 0.53 0.38 0.05], 'HorizontalAlignment', 'center', 'EdgeColor', 'none', 'String', {'a'});
title 'v_h = 0.004'
axes('Position', [0.57 0.64 0.34 0.28])

```

```

[Y,X]=hist(data_plotX(2,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([335 480 0 0.151])
annotation('textbox',[0.55 0.56 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'\sigma_b
(MПа)'});
annotation('textbox',[0.55 0.935 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.55 0.53 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'б'});
title 'v_\sigma = 0.061'
axes('Position',[0.13 0.17 0.34 0.28])
[Y,X]=hist(data_plotX(3,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([35 64.8 0 0.151])
annotation('textbox',[0.11 0.092 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'a (мм)'});
annotation('textbox',[0.108 0.465 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.11 0.052 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'Б'});
title 'v_a = 0.1'
axes('Position',[0.57 0.17 0.34 0.28])
[Y,X]=hist(data_plotX(4,:),20);
bar(X,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176 0.501960813999176
0.501960813999176])
clear 'X'
clear 'Y'
grid on
axis([0.1415 0.256 0 0.151])
annotation('textbox',[0.54 0.092 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','right','FontAngle','italic','EdgeColor','none','Str
ing',{'f'});
annotation('textbox',[0.55 0.465 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.55 0.052 0.38
0.05],'HorizontalAlignment','center','EdgeColor','none','String',{'r'});
title 'v_f = 0.1'
figure('Position',[scrsz(3)/2-325 scrsz(4)/2-295 650 600])
axes('Position',[0.09 0.13 0.85 0.75])
[Y,X]=hist(data_plotX(5,:),20);
bar(X./10^3,Y./(size(data_inMK,1)-1),'FaceColor',[0.501960813999176
0.501960813999176 0.501960813999176])
grid on
axis([8.1 11.93 0 0.1401])
annotation('textbox',[0.05 0.9 0.38 0.05],'EdgeColor','none','String',{'W'});
annotation('textbox',[0.11 0.037 0.87
0.05],'HorizontalAlignment','right','EdgeColor','none','String',{'M (кНМ)'});
title 'v_M = 0.063'
sk_delta=std(data_plotX(5,:));
v_Mv=sk_delta/Mv_out(1,lim_data+1);

```

## А.5 Подпрограммы

```

function [Forse_max_out,Forse_out,S_out,data_in]=steel(data_in)
for i1=1:size(data_in,2)
    for j1=1:size(data_in{i1},1)
        for k=1:size(data_in{i1},3)
h=data_in{i1}(j1,1,k);
alfa=data_in{i1}(j1,2,k);
R=data_in{i1}(j1,3,k)*h;
G=data_in{i1}(j1,4,k);
delta5=data_in{i1}(j1,5,k);

delta=1;
L=1000;
a=2000; %ширина отрезаемой части листа
alfa=alfa*pi/180;
C=35;%расстояние от прижима до плоскости реза
k_x=1000; %частота разбиения по оси X
N=1000; %число рассматриваемых положений ножа
delta_x=L/2/k_x; %шаг приращения по оси X
LR=L/2-R*sin(alfa);%расстояние от начала координат до точки начала скругления
h_noz=LR*tan(alfa)+(R-R*cos(alfa)); %расстояние от поверхности листа до верхней
точки профиля ножа
A=2.8;
B=0.65;
hmax=25;
en=0.31;
e=1-((1-exp(-A*(h/hmax)^B))/(1-exp(-A))*(1-en*(cos(alfa))^2));
delta_N=(h_noz+h*e)/N; %шаг перемещения ножа
k2=1;%коэффициент,учитывающий повышение усилия из-за притупления ножей
%набор массива начальных координат ножа
for i=1:k_x
    %координата 'X'
    if i==1
        x(1,i)=0;
        x(2,i)=x(1,i)+delta_x;
    else
        x(1,i)=x(2,i-1);
        x(2,i)=x(1,i)+delta_x;
    end
    %координата 'Y' и угол реза 'alfa_i'
    if (x(1,i)+x(2,i))/2<LR
        y(1,i)=x(1,i)*tan(alfa);
        y(2,i)=x(2,i)*tan(alfa);
        alfa_i(i)=alfa;
    else
        if i==1
            y(1,i)=0;
        else
            y(1,i)=y(2,i-1);
        end
        y(2,i)=h_noz-(R-sqrt(R^2-(L/2-x(2,i))^2));
    end
end

```

```

        alfa_i(i)=atan((y(2,i)-y(1,i))/delta_x);
    end
end
for j=1:N
    ch=1;
    Forse(j)=0;
    for i=1:k_x
        if (y(1,i)+y(2,i))/2<=0 && (y(1,i)+y(2,i))/2>=-h*e
            h1=h-abs(y(1,i));
            h2=h-abs(y(2,i));
            F=(h1+h2)/2*delta_x;
            e_ji=(h-(h1+h2)/2)/h;
            lamda=a*tan(alfa_i(i))/(delta5*h);
            if lamda>=6
                z=0.95;
            else
                z=0.3357*(1-exp(-0.436*lamda))/(1-exp(-0.436));
            end
            alfa_gr=alfa_i(i)*180/pi;
            Kep=(alfa_gr+1)^(-0.002*((alfa_gr)^1.1+2.8)^3.19);
            if alfa_gr>2
                Kep=0.7;
            end
            at=0.37;
            e=1-((1-exp(-A*(h/hmax)^B))/(1-exp(-A))*(1-en*(cos(alfa_i(i)))^2));
            x1=(e_ji/e);
            K=1/e;
            t_max=1.41*G/(1.74-e); %максимальное сопротивление резке
            t=t_max*Kep*x1^(at*exp(x1^K/K^(2*K)));
            Y=delta/h;
            X=C/h;
            Forse(j)=t*F*10^-
6*2*(1+(z*tan(alfa_i(i))/(0.6*delta5)+1/(1+10*delta5/(G*Y^2*X)))+Forse(j);
            Forse_chek(j)=t*F*10^-
6*2*(1+(z*tan(alfa_i(i))/(0.6*delta5)+delta^2*G*C/(delta^2*G*C+10*delta5*h^3)));
        end
    end
    S(j)=j*delta_N;
    y=y-delta_N;
end
S_out{i1}(j1,k,:)=S(:);
Forse_out{i1}(j1,k,:)=Forse(:);
Forse_max_out{i1}(j1,k)=max(Forse(:));
end
end
end

function [data_in] = data_input
%Исходные данные
h_const=25; h_min=5; h_max=25; h_delta=1;
h=h_min:h_delta:h_max;
alfa_const=3; alfa_min=1; alfa_max=3; alfa_delta=0.01;
alfa=alfa_min:alfa_delta:alfa_max;
k_R_const=100; k_R_min=0; k_R_max=200; k_R_delta=4;
k_R=k_R_min:k_R_delta:k_R_max;

```

```

G1=330;
G2=530;
G3=740;

delta5_1=0.3;
delta5_2=0.17;
delta5_3=0.12;

data_in{1}(1,1,:)=h;
data_in{1}(1,2,:)=alfa_const;
data_in{1}(1,3,:)=k_R_const;
data_in{1}(1,4,:)=G1;
data_in{1}(1,5,:)=delta5_1;

data_in{1}(2,1,:)=h;
data_in{1}(2,2,:)=alfa_const;
data_in{1}(2,3,:)=k_R_const;
data_in{1}(2,4,:)=G2;
data_in{1}(2,5,:)=delta5_2;

data_in{1}(3,1,:)=h;
data_in{1}(3,2,:)=alfa_const;
data_in{1}(3,3,:)=k_R_const;
data_in{1}(3,4,:)=G3;
data_in{1}(3,5,:)=delta5_3;

data_in{2}(1,2,:)=alfa;
data_in{2}(1,1,:)=h_const;
data_in{2}(1,3,:)=k_R_const;
data_in{2}(1,4,:)=G1;
data_in{2}(1,5,:)=delta5_1;

data_in{2}(2,2,:)=alfa;
data_in{2}(2,1,:)=h_const;
data_in{2}(2,3,:)=k_R_const;
data_in{2}(2,4,:)=G2;
data_in{2}(2,5,:)=delta5_2;

data_in{2}(3,2,:)=alfa;
data_in{2}(3,1,:)=h_const;
data_in{2}(3,3,:)=k_R_const;
data_in{2}(3,4,:)=G3;
data_in{2}(3,5,:)=delta5_3;

data_in{3}(1,3,:)=k_R;
data_in{3}(1,1,:)=h_const;
data_in{3}(1,2,:)=alfa_const;
data_in{3}(1,4,:)=G1;
data_in{3}(1,5,:)=delta5_1;

data_in{3}(2,3,:)=k_R;
data_in{3}(2,1,:)=h_const;
data_in{3}(2,2,:)=alfa_const;
data_in{3}(2,4,:)=G2;
data_in{3}(2,5,:)=delta5_2;

```

```

data_in{3}(3,3,:)=k_R;
data_in{3}(3,1,:)=h_const;
data_in{3}(3,2,:)=alfa_const;
data_in{3}(3,4,:)=G3;
data_in{3}(3,5,:)=delta5_3;
end

function [data_in,data_out]=f_HOT
[n,k,data_in] = data_input_HOT;

for i=1:size(data_in,2)
    for j=1:size(data_in{i},2)

        kf=data_in{i}(1,j);
        T=data_in{i}(2,j);
        D=data_in{i}(3,j);
        h=data_in{i}(4,j);
        b=data_in{i}(5,j);
        Vo=data_in{i}(6,j);
        delta=data_in{i}(7,j);
        psi=data_in{i}(8,j);

        for marka=1:4
            [t_max,EH,f1,f2]=f_svojstva_materiala_HOT(T,marka,Vo);
            R=0.5*D;
            [L_H,L_O,L_P,alfa,beta,deltaH_n]=f_geometricheskie_parametri_ochaga(n,R,h,EH,delta,psi);
            [a1,a2,a,F,X1,X2,h1,h2]=f_geometricheskie_parametri_objoma(n,k,R,L_H,L_P,deltaH_n);
            [N1_nk]=f_silovie_parametri_objoma_HOT(T,n,k,h,b,L_P,L_H,L_O,X1,X2,h1,h2,a,F,t_max,EH);

            M_N1=sum(N1_nk); %Полная сила резки верхним ножом
            Qf=M_N1*kf; %Сила внешнего сопротивления
            [gamma1,fo]=f_angle_gamma1(k,Qf,N1_nk,a1,a2,a,f1,R);
            [gamma2]=f_angle_gamma2(k,Qf,N1_nk,a1,a2,a,f1,f2);
            [Mv]=f_moment_rezaniya1(k,R,N1_nk,a,a1,a2,f1,fo,gamma1);
            [Md]=f_moment_rezaniya2(k,R,N1_nk,a,a1,a2,f1,f2,gamma2);
            [Mn]=f_moment_rezaniya3(Qf,R,N1_nk,a,fo,f2);
            data_out{i}(1,marka,j)=Mv;
            data_out{i}(2,marka,j)=Md;
            if Mn==0
                if j==1
                    data_out{i}(3,marka,j)=0;
                else
                    data_out{i}(3,marka,j)=data_out{i}(3,marka,j-1);
                end
            else
                if j~=1 && data_out{i}(3,marka,j-1)==0
                    data_out{i}(3,marka,1:j-1)=Mn;
                end
                data_out{i}(3,marka,j)=Mn;
            end
        end
    end
end
end
end
end

```



```

function [data_in,data_out]=f_COLD
[n,k,data_in] = data_input_COLD;

for i=1:size(data_in,2)
    for j=1:size(data_in{i},2)

        kf=data_in{i}(1,j);
        G=data_in{i}(2,j);
        D=data_in{i}(3,j);
        h=data_in{i}(4,j);
        b=data_in{i}(5,j);
        Vo=data_in{i}(6,j);
        delta=data_in{i}(7,j);
        psi=data_in{i}(8,j);
        R=0.5*D;
        [t_max,EH,f1,f2]=f_svoystva_materiala_COLD(G,R,delta,psi,h);
        [L_H,L_O,L_P,alfa,beta,deltaH_n]=f_geometricheskie_parametri_ochaga(n,R,h,EH,delta,psi);
        [a1,a2,a,F,X1,X2,h1,h2]=f_geometricheskie_parametri_objoma(n,k,R,L_H,L_P,deltaH_n);
        [N1_nk]=f_silovie_parametri_objoma_COLD(n,k,h,b,L_P,L_H,L_O,X1,X2,h1,h2,a,F,t_max,EH);

        M_N1=sum(N1_nk); %Полная сила резки верхним ножом
        Qf=M_N1*kf; %Сила внешнего сопротивления
        [gamma1,fo]=f_angle_gamma1(k,Qf,N1_nk,a1,a2,a,f1,R);
        [gamma2]=f_angle_gamma2(k,Qf,N1_nk,a1,a2,a,f1,f2);
        [Mv]=f_moment_rezaniya1(k,R,N1_nk,a,a1,a2,f1,fo,gamma1);
        [Md]=f_moment_rezaniya2(k,R,N1_nk,a,a1,a2,f1,f2,gamma2);
        [Mn]=f_moment_rezaniya3(Qf,R,N1_nk,a,fo,f2);
        data_out{i}(1,j)=Mv;
        data_out{i}(2,j)=Md;
        if Mn==0
            if j==1
                data_out{i}(3,j)=0;
            else
                data_out{i}(3,j)=data_out{i}(3,j-1);
            end
        else
            if j~=1 && data_out{i}(3,j-1)==0
                data_out{i}(3,1:j-1)=Mn;
            end
            data_out{i}(3,j)=Mn;
        end
    end
end

```

```

function [n,k,data_in] = data_input_HOT
%Исходные данные
n = 1; %число пар ножей
k = 300; %количество рассматриваемых участков в очаге
kf_const=0.15; kf_min=-0.3; kf_max=1; kf_delta=0.01;
T_const=700; T_min=675; T_max=800; T_delta=10;
D_const=1000; D_min=920; D_max=1000; D_delta=20;
h_const=40; h_min=25; h_max=50; h_delta=5;
kb_const=2; kb_min=1.5; kb_max=2.5; kb_delta=0.05;
Vo_const=0.5; Vo_min=0.4; Vo_max=0.6; Vo_delta=0.05;

```

```
kdelta_const=0.2; kdelta_min=0.15; kdelta_max=0.25; kdelta_delta=0.01;
psi_const=9; psi_min=8; psi_max=10; psi_delta=0.01;
```

```
kf=kf_min:kf_delta:kf_max;
T=T_min:T_delta:T_max;
D=D_min:D_delta:D_max;
h=h_min:h_delta:h_max;
kb=kb_min:kb_delta:kb_max;
Vo=Vo_min:Vo_delta:Vo_max;
kdelta=kdelta_min:kdelta_delta:kdelta_max;
psi=psi_min:psi_delta:psi_max;
```

```
data_in{1}(1,:)=kf_min:kf_delta:kf_max;
data_in{1}(2,:)=T_const;
data_in{1}(3,:)=D_const;
data_in{1}(4,:)=h_const;
data_in{1}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{1}(6,:)=Vo_const;
data_in{1}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{1}(8,:)=psi_const;
```

```
data_in{2}(2,:)=T_min:T_delta:T_max;
data_in{2}(1,:)=kf_const;
data_in{2}(3,:)=D_const;
data_in{2}(4,:)=h_const;
data_in{2}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{2}(6,:)=Vo_const;
data_in{2}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{2}(8,:)=psi_const;
```

```
data_in{3}(3,:)=D_min:D_delta:D_max;
data_in{3}(1,:)=kf_const;
data_in{3}(2,:)=T_const;
data_in{3}(4,:)=h_const;
data_in{3}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{3}(6,:)=Vo_const;
data_in{3}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{3}(8,:)=psi_const;
```

```
data_in{4}(4,:)=h_min:h_delta:h_max;
data_in{4}(1,:)=kf_const;
data_in{4}(2,:)=T_const;
data_in{4}(3,:)=D_const;
data_in{4}(5,:)=(h_min:h_delta:h_max).*kb_const;
data_in{4}(6,:)=Vo_const;
data_in{4}(7,:)=(h_min:h_delta:h_max).*kdelta_const;
data_in{4}(8,:)=psi_const;
```

```
data_in{5}(5,:)=(kb_min:kb_delta:kb_max).*h_const;
data_in{5}(1,:)=kf_const;
data_in{5}(2,:)=T_const;
data_in{5}(3,:)=D_const;
data_in{5}(4,:)=h_const;
data_in{5}(6,:)=Vo_const;
data_in{5}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{5}(8,:)=psi_const;
```

```

data_in{6}(6,:)=Vo_min:Vo_delta:Vo_max;
data_in{6}(1,:)=kf_const;
data_in{6}(2,:)=T_const;
data_in{6}(3,:)=D_const;
data_in{6}(4,:)=h_const;
data_in{6}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{6}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{6}(8,:)=psi_const;
data_in{7}(7,:)=(kdelta_min:kdelta_delta:kdelta_max).*h_const;
data_in{7}(1,:)=kf_const;
data_in{7}(2,:)=T_const;
data_in{7}(3,:)=D_const;
data_in{7}(4,:)=h_const;
data_in{7}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{7}(6,:)=Vo_const;
data_in{7}(8,:)=psi_const;
data_in{8}(8,:)=psi_min:psi_delta:psi_max;
data_in{8}(1,:)=kf_const;
data_in{8}(2,:)=T_const;
data_in{8}(3,:)=D_const;
data_in{8}(4,:)=h_const;
data_in{8}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{8}(6,:)=Vo_const;
data_in{8}(7,:)=kdelta_const*h_const;
end
function [n,k,data_in] = data_input_COLD
%Исходные данные
n = 1; %число пар ножей
k = 300; %количество рассматриваемых участков в очаге
kf_const=-0.2; kf_min=-0.3; kf_max=0.15; kf_delta=0.01;
G_const=430; G_min=370; G_max=480; G_delta=5;
D_const=1000; D_min=920; D_max=1000; D_delta=20;
h_const=25; h_min=5; h_max=25; h_delta=0.5;
kb_const=2; kb_min=1.5; kb_max=2.5; kb_delta=0.05;
Vo_const=0.5; Vo_min=0.4; Vo_max=0.6; Vo_delta=0.05;
kdelta_const=0.2; kdelta_min=0.15; kdelta_max=0.25; kdelta_delta=0.01;
psi_const=9; psi_min=8; psi_max=10; psi_delta=0.01;
kf=kf_min:kf_delta:kf_max;
G=G_min:G_delta:G_max;
D=D_min:D_delta:D_max;
h=h_min:h_delta:h_max;
kb=kb_min:kb_delta:kb_max;
Vo=Vo_min:Vo_delta:Vo_max;
kdelta=kdelta_min:kdelta_delta:kdelta_max;
psi=psi_min:psi_delta:psi_max;
data_in{1}(1,:)=kf_min:kf_delta:kf_max;
data_in{1}(2,:)=G_const;
data_in{1}(3,:)=D_const;
data_in{1}(4,:)=h_const;
data_in{1}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{1}(6,:)=Vo_const;
data_in{1}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{1}(8,:)=psi_const;
data_in{2}(2,:)=G_min:G_delta:G_max;
data_in{2}(1,:)=kf_const;
data_in{2}(3,:)=D_const;

```

```

data_in{2}(4,:)=h_const;
data_in{2}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{2}(6,:)=Vo_const;
data_in{2}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{2}(8,:)=psi_const;
data_in{3}(3,:)=D_min:D_delta:D_max;
data_in{3}(1,:)=kf_const;
data_in{3}(2,:)=G_const;
data_in{3}(4,:)=h_const;
data_in{3}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{3}(6,:)=Vo_const;
data_in{3}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{3}(8,:)=psi_const;
data_in{4}(4,:)=h_min:h_delta:h_max;
data_in{4}(1,:)=kf_const;
data_in{4}(2,:)=G_const;
data_in{4}(3,:)=D_const;
data_in{4}(5,:)=(h_min:h_delta:h_max).*kb_const;
data_in{4}(6,:)=Vo_const;
data_in{4}(7,:)=(h_min:h_delta:h_max).*kdelta_const;
data_in{4}(8,:)=psi_const;
data_in{5}(5,:)=(kb_min:kb_delta:kb_max).*h_const;
data_in{5}(1,:)=kf_const;
data_in{5}(2,:)=G_const;
data_in{5}(3,:)=D_const;
data_in{5}(4,:)=h_const;
data_in{5}(6,:)=Vo_const;
data_in{5}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{5}(8,:)=psi_const;
data_in{6}(6,:)=Vo_min:Vo_delta:Vo_max;
data_in{6}(1,:)=kf_const;
data_in{6}(2,:)=G_const;
data_in{6}(3,:)=D_const;
data_in{6}(4,:)=h_const;
data_in{6}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{6}(7,:)=kdelta_const*h_const;
data_in{6}(8,:)=psi_const;
data_in{7}(7,:)=(kdelta_min:kdelta_delta:kdelta_max).*h_const;
data_in{7}(1,:)=kf_const;
data_in{7}(2,:)=G_const;
data_in{7}(3,:)=D_const;
data_in{7}(4,:)=h_const;
data_in{7}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{7}(6,:)=Vo_const;
data_in{7}(8,:)=psi_const;
data_in{8}(8,:)=psi_min:psi_delta:psi_max;
data_in{8}(1,:)=kf_const;
data_in{8}(2,:)=G_const;
data_in{8}(3,:)=D_const;
data_in{8}(4,:)=h_const;
data_in{8}(5,:)=kb_const*h_const;
data_in{8}(6,:)=Vo_const;
data_in{8}(7,:)=kdelta_const*h_const;
end
function[t_max,EH,f1,f2]=f_svojstva_materiala_HOT(T,marka,Vl)
%Создание массива переменных, описывающих свойства материала:

```

```

a(1,1) = -542.92;
a(1,2) = 10.308;
a(1,3) = -31.608*10^-3;
a(1,4) = 35.394*10^-6;
a(1,5) = -13.542*10^-9;
a(2,1) = -2455.1;
a(2,2) = 23.259;
a(2,3) = -63.299*10^-3;
a(2,4) = 69.398*10^-6;
a(2,5) = -27.083*10^-9;
a(3,1) = -1015.6;
a(3,2) = 16.589;
a(3,3) = -50.618*10^-3;
a(3,4) = 57.824*10^-6;
a(3,5) = -22.917*10^-9;
a(4,1) = -150.6;
a(4,2) = 8.3956;
a(4,3) = -22.472*10^-3;
a(4,4) = 18.796*10^-6;
a(4,5) = -4.1667*10^-9;
G = a(marka,1)+a(marka,2)*T+a(marka,3)*T^2+a(marka,4)*T^3+a(marka,5)*T^4;
EH = 0.3+0.7*(T-400)/500; %величина относительного внедрения до скола
t_max = (1.9035*G)/(2.35-1.35*EH); %максимальное сопротивление резке
%Коэффициент трения
k_n = 1.2; %коэффициент состояния поверхности инструмента
if marka==1
    k_m = 1.2; %коэффициент материала для первой марки
else
    if marka==2
        k_m = 1.3; %коэффициент материала для второй марки
    else
        if marka==3
            k_m = 1.1; %коэффициент материала для третьей марки
        else
            k_m = 1; %коэффициент материала для четвёртой марки
        end
    end
end
end
if V1>0&&V1<1
    k_v = 1;
else
    if V1>=1&&V1<2.5
        k_v = 0.9;
    else
        if V1>=2.5&&V1<3
            k_v = 0.75;
        else
            if V1>=3&&V1<4
                k_v = 0.65;
            else
                if V1>=4&&V1<5
                    k_v = 0.55;
                else
                    k_v = 0.5;
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
f1 = k_n*k_m*k_v*(0.5319-0.00115*T+1.337*10^-6*T^2); %коэффициент трения между
верхним диском и отрезаемой кромкой
f2 = f1; %коэффициент трения между нижним ножом и листом
function[t_max,EH,f1,f2]=f_svoystva_materiala_COLD(G,R,delta,psi,h)
A=3.2;
B=0.65;
hmax=25;
en=0.37;
psi=psi*pi/180;
alfa = ((asin((sqrt(R^2-(R-h-(2*R-
(2*R+delta)*cos(psi)))^2))/R))+asin((sqrt(R^2-(R-(h*(1-en)-(2*R-
(2*R+delta)*cos(psi)))^2))/R)))/2;
EH=1-((1-exp(-A*(h/hmax)^B))/(1-exp(-A))*(1-en*(cos(alfa))^2));
t_max=1.41*G/(1.74-EH); %максимальное сопротивление резке
f1 = 0.2; %коэффициент трения между верхним диском и отрезаемой кромкой
f2 = f1; %коэффициент трения между нижним диском и листом
function[L_H,L_O,L_P,alfa,beta,deltaH_n]=f_geometricheskie_parametri_ochaga(n,R,
h,EH,delta,psi)
psi = psi*pi/180;
EH_n = 0;
for i=1:n
    EH_n = EH/n+EH_n;
    h_O(i) = h*(1-EH_n);
    if i==n
        delta_n = delta;
    else
        delta_n = ((2*R+h_O(i))/cos(psi))-2*R;
    end
    deltaH_n(i) = 2*R-(2*R+delta_n)*cos(psi);
    if i==1
        L_H(i) = sqrt(R^2-(R-h-deltaH_n(i))^2);
    else
        L_H(i) = sqrt(R^2-(R-h_O(i-1)-deltaH_n(i))^2);
    end
    L_O(i) = sqrt(R^2-(R-h_O(i)-deltaH_n(i))^2);
    L_P(i) = L_H(i)-L_O(i); %длина очага резки
    alfa(i) = asin(L_H(i)/R);
    beta(i) = asin(L_O(i)/R);
end
function[a1,a2,a,F,X1,X2,h1,h2]=f_geometricheskie_parametri_objoma(n,k,R,L_H,
L_P,deltaH_n)
i=1;
%Разбиение очага резки по оси X
delta_X = L_P/k;
%Вычисление координат каждого участка
for i=1:n
    delta_X = L_P(i)/k;
    j=1;
    %Координата X
    for j=1:k
        if j==1
            X1(i,j) = L_H(i);
        else

```

```

        X1(i,j) = X2(i,j-1);
    end
    X2(i,j) = X1(i,j)-delta_X;
%Угловая координата
    a1(i,j) = asin(X1(i,j)/R);
    a2(i,j) = asin(X2(i,j)/R);
    a(i,j) = (a1(i,j)+a2(i,j))/2;
%Высотная координата
    h1(i,j) = R*(1-cos(a1(i,j)))-deltaH_n(i);
    h2(i,j) = R*(1-cos(a2(i,j)))-deltaH_n(i);
%Площадь
    F(i,j) = ((h1(i,j)+h2(i,j))/2)*delta_X;
    end
end
function[N1_nk]=f_silovie_parametri_objoma_HOT(T,n,k,h,b,L_P,L_H,L_O,X1,X2,h1,
h2,a,F,t_max,EN)
k2 = 1; %коэффициент, учитывающий затупление ножей
k3 = 1; %коэффициент, учитывающий величину бокового зазора между ножами
z1 = -0.0368+0.388*b/h-0.199*(b/h)^2+0.0643*(b/h)^3-
0.0114*(b/h)^4+0.00102*(b/h)^5-3.62*10^-5*(b/h)^6;
for i=1:n
    for j=1:k
        t(i,j) = t_max*((L_H(i)-0.5*(X1(i,j)+X2(i,j)))/L_P(i))^0.35; %теку-
шее значение сопротивления срезу
        N1p(i,j) = t(i,j)*F(i,j); %вертикальная составляющая силы резки
        N1g(i,j) = z1*N1p(i,j)*((2*h^2)/((L_H(i)-
L_O(i))*(h1(i,j)+h2(i,j))));%вертикальная составляющая силы изгиба кромки
        N1_nk(i,j) = (N1p(i,j)+N1g(i,j))/cos(a(i,j));
        N1_nk(i,j) = N1_nk(i,j)/k2*k3;
    end
end
function[N1_nk]=f_silovie_parametri_objoma_COLD(n,k,h,b,L_P,L_H,L_O,X1,X2,h1,
h2,a,F,t_max,EN)
k2 = 1; %коэффициент, учитывающий затупление ножей
k3 = 1; %коэффициент, учитывающий величину бокового зазора между ножами
z1 = -0.0368+0.388*b/h-0.199*(b/h)^2+0.0643*(b/h)^3-
0.0114*(b/h)^4+0.00102*(b/h)^5-3.62*10^-5*(b/h)^6;
for i=1:n
    for j=1:k
        e_ji=(h-0.5*(h1(i,j)+h2(i,j)))/h;
        alfa_gr=a(i,j)*180/pi;
        Kcp=(alfa_gr+1)^(-0.002*((alfa_gr)^1.1+2.8)^3.19);
        if alfa_gr>2
            Kcp=0.7;
        end
        at=0.43;
        x1=(e_ji/EN);
        K=1/EN;
        t(i,j)=t_max*Kcp*x1^(at*exp(x1^K/K^(2*K)));
        N1p(i,j) = t(i,j)*F(i,j); %вертикальная составляющая силы резки
        N1g(i,j) = z1*N1p(i,j)*((2*h^2)/((L_H(i)-
L_O(i))*(h1(i,j)+h2(i,j))));%вертикальная составляющая силы изгиба кромки
        N1_nk(i,j) = (N1p(i,j)+N1g(i,j))/cos(a(i,j));
        N1_nk(i,j) = N1_nk(i,j)/k2*k3;
    end
end
end

```

```

function [gamma1,fo]=f_angle_gamma1(k,Qf,N1_nk,a1,a2,a,f1,R)
fp=0.0;% коэффициент трения в подшипниках опоры
np=2; %количество подшипников в опоре ножа
Rp=75; %радиус трения подшипника опоры
fo=fp*np*Rp/R;
E=.001;
gamma_r=(max(a1(:))+min(a2(:)))/2;
gamma1 = 0;
    while (gamma1==0)
        err = 0;
        Q = 0;
        Qa = 0;
        Qr = 0;
        Qg = 0;
            ag_i = 0;
            ag1_i = 0;
            ag2_i = 0;
        for j = 1:k
            if a2(j)>=gamma_r
                Q_ai = N1_nk(j)*f1*(cos(a(j))-sin(a(j))*fo);
                Qa = Qa+Q_ai;
            else
                if a1(j)<=gamma_r
                    Q_ri = N1_nk(j)*f1*(cos(a(j))-sin(a(j))*fo);
                    Qr = Qr+Q_ri;
                else
                    Qg = N1_nk(j)*f1*(cos(a(j))-sin(a(j))*fo);
                    ag_i = a(j);
                    ag1_i = a1(j);
                    ag2_i = a2(j);
                end
            end
            Qi = N1_nk(j)*(-sin(a(j))-cos(a(j))*fo);
            Q = Q+Qi;
        end
        err = Q+Qa-Qr-Qf+((2*ag_i-2*gamma_r)/(ag1_i-ag2_i))*Qg;
        if abs(err)<=E
            gamma1 = gamma_r;
        else
            if gamma_r<=min(a2(:))
                gamma1=min(a2(:));
            end
            if gamma_r>=max(a1(:))
                gamma1=max(a1(:));
            end
            gamma_j = ag_i+((Q+Qa-Qr-Qf)/(2*Qg))*(ag1_i-ag2_i);
            gamma_r = (gamma_j+gamma_r)/2;
        end
    end
    end
function [gamma2]=f_angle_gamma2(k,Qf,N1_nk,a1,a2,a,f1,f2)
E=.001;
gamma_r=(max(a1(:))+min(a2(:)))/2;
gamma2 = 0;
    while (gamma2==0)
        err = 0;
        Q = 0;

```



```

Qa = 0;
Qr = 0;
Qg = 0;

        ag_i = 0;
        ag1_i = 0;
        ag2_i = 0;
for j = 1:k
    if a2(j)>gamma_r
        Q_ai = N1_nk(j)*f1*(cos(a(j))+sin(a(j))*f2);
        Qa = Qa+Q_ai;
    else
        if a1(j)<gamma_r
            Q_ri = N1_nk(j)*f1*(cos(a(j))+sin(a(j))*f2);
            Qr = Qr+Q_ri;
        else
            Qg = N1_nk(j)*f1*(cos(a(j))+sin(a(j))*f2);
            ag_i = a(j);
            ag1_i = a1(j);
            ag2_i = a2(j);
        end
    end
    Qi = N1_nk(j)*(-sin(a(j))+f2*cos(a(j)));
    Q = Q+Qi;
end
err = Q+Qa-Qr-Qf+((2*ag_i-2*gamma_r)/(ag1_i-ag2_i))*Qg;
if abs(err)<=E
    gamma2 = gamma_r;
else
    if gamma_r<=min(a2(:))
        gamma2=min(a2(:));
    end
    if gamma_r>=max(a1(:))
        gamma2=max(a1(:));
    end
    gamma_j = ag_i+((Q+Qa-Qr-Qf)/(2*Qg))*(ag1_i-ag2_i);
    gamma_r = (gamma_j+gamma_r)/2;
end
end
function [Mv]=f_moment_rezaniyal(k,R,N1_nk,a,a1,a2,f1,fo,gamma1)
R = R*10^-3;
Mr=0;
Ma=0;
Mg=0;
for i=1:k
    if a(i)>gamma1
        Ma_k=R*N1_nk(i)*f1;
        Ma=Ma+Ma_k;
    else if a(i)<gamma1
        Mr_k=R*N1_nk(i)*f1;
        Mr=Mr+Mr_k;
    else
        Mg=R*N1_nk(i)*f1*((2*(a(i)-gamma1))/(a1(i)-a2(i)));
    end
end
end
Mv=Ma+Mg-Mr;

```

```

function [Md]=f_moment_rezaniya2(k,R,N1_nk,a,a1,a2,f1,f2,gamma2)
R = R*10^-3;
M1r=0;
M1a=0;
M1g=0;
M2r=0;
M2a=0;
M2g=0;
N2=0;
for i=1:k
    if a2(i)>gamma2
        N2_nk=N1_nk(i)*cos(a(i))+N1_nk(i)*sin(a(i))*f1;
        M1a_k=R*N1_nk(i)*f1;
        M1a=M1a+M1a_k;
        M2a_k=R*N2_nk*f2;
        M2a=M2a+M2a_k;
    else if a1(i)<gamma2
        N2_nk=N1_nk(i)*cos(a(i))-N1_nk(i)*sin(a(i))*f1;
        M1r_k=R*N1_nk(i)*f1;
        M1r=M1r+M1r_k;
        M2r_k=R*N2_nk*f2;
        M2r=M2r+M2r_k;
    else
        N2_nk=N1_nk(i)*cos(a(i))+N1_nk(i)*sin(a(i))*f1*((2*(a(i)-
gamma2))/(a1(i)-a2(i)));
        M1g=R*N1_nk(i)*f1;
        M2g=R*N2_nk*f2;
    end
end
N2=N2+N2_nk;
end
M1=(M1a-M1r+M1g);
M2=(M2a+M2r+M2g);
Md=M1+M2;
function [Mn]=f_moment_rezaniya3(Qf,R,N1_nk,a,fo,f2)
R = R*10^-3;
if sum(N1_nk.*f2.*cos(a))>=(Qf+sum(N1_nk.*sin(a))+sum(N1_nk.*fo.*cos(a)))
    Mn=R*(Qf+sum(N1_nk.*sin(a))+sum(N1_nk.*fo.*cos(a)));
else
    Mn=0;
end
function [data_inMK] = data_inMK_chevron
%Число моделируемых опытов
Nop=1000;
%Число варьируемых параметров
Np=4;
%Номинальные значения варьируемых параметров и их коэффициенты вариации
%Толщина листа
h=25;
vh=0.004;
%Предел прочности
G=430;
vG=0.058;
%Угол наклона прямолинейных плоскостей режущей кромки
alfa=3;
va=0.017;

```

```

%Зазор между ножами
delta=0.5;
vd=0.1;
%Массив псевдослучайных равномерно распределенных чисел
ck=rand(Nop,Np);
mk=ck-0.5;
Spi=sqrt(2*pi);
for i=1:Nop
    for j=1:Np
        if abs(mk(i,j))<=0.487
            Bk(i,j)=(3-sqrt(9-12*pi*mk(i,j)^2))/(mk(i,j)*Spi);
        end
        if abs(mk(i,j))>0.487
            Bk(i,j)=(abs(mk(i,j))/mk(i,j))*(2.25867+57.0256*(abs(mk(i,j))-
0.487));
        end
    end
end
%Массив варьируемых параметров
data_inMK(:,1)=h*(1+Bk(:,1).*vh);
data_inMK(:,2)=G*(1+Bk(:,2).*vG);
data_inMK(:,3)=alfa*(1+Bk(:,3).*va);
data_inMK(:,4)=delta*(1+Bk(:,4).*vd);
lim_data=size(data_inMK,1)+1;
data_inMK(lim_data,1)=h;
data_inMK(lim_data,2)=G;
data_inMK(lim_data,3)=alfa;
data_inMK(lim_data,4)=delta;
end
function [Forse_max_out,Forse_out,S_out]=steel_MK(data_in)
for i1=1:size(data_in,1)
h=data_in(i1,1);
G=data_in(i1,2);
alfa=data_in(i1,3);
delta=data_in(i1,4);
R=2500;
L=1000;
a=2000; %ширина отрезаемой части листа
alfa=alfa*pi/180;
C=35;%расстояние от прижима до плоскости реза
k_x=1000; %частота разбиения по оси X
N=1000; %число рассматриваемых положений ножа
delta_x=L/2/k_x; %шаг приращения по оси X
LR=L/2-R*sin(alfa);%расстояние от начала координат до точки начала скругления
h_noz=LR*tan(alfa)+(R-R*cos(alfa)); %расстояние от поверхности листа до верхней
точки профиля ножа
A=3.2;
B=0.65;
hmax=25;
en=0.37;
e=1-((1-exp(-A*(h/hmax)^B))/(1-exp(-A))*(1-en*(cos(alfa))^2));
delta_N=(h_noz+h*e)/N; %шаг перемещения ножа
k2=1;%коэффициент,учитывающий повышение усилия из-за притупления ножей
delta5=0.17; %относительное удлинение при испытании на разрыв
%набор массива начальных координат ножа
for i=1:k_x

```

```

%координата 'X'
if i==1
    x(1,i)=0;
    x(2,i)=x(1,i)+delta_x;
else
    x(1,i)=x(2,i-1);
    x(2,i)=x(1,i)+delta_x;
end
%координата 'Y' и угол реза 'alfa_i'
if (x(1,i)+x(2,i))/2<LR
    y(1,i)=x(1,i)*tan(alfa);
    y(2,i)=x(2,i)*tan(alfa);
    alfa_i(i)=alfa;
else
    if i==1
        y(1,i)=0;
    else
        y(1,i)=y(2,i-1);
    end
    y(2,i)=h_noz-(R-sqrt(R^2-(L/2-x(2,i))^2));
    alfa_i(i)=atan((y(2,i)-y(1,i))/delta_x);
end
end
for j=1:N
    ch=1;
    Forse(j)=0;
    for i=1:k_x
        if (y(1,i)+y(2,i))/2<=0 && (y(1,i)+y(2,i))/2>=-h*e
            h1=h-abs(y(1,i));
            h2=h-abs(y(2,i));
            F=(h1+h2)/2*delta_x;
            e_ji=(h-(h1+h2)/2)/h;
            lamda=a*tan(alfa_i(i))/(delta5*h);
            if lamda>=6
                z=0.95;
            else
                z=0.3357*(1-exp(-0.436*lamda))/(1-exp(-0.436));
            end
            alfa_gr=alfa_i(i)*180/pi;
            Kep=(alfa_gr+1)^(-0.002*((alfa_gr)^1.1+2.8)^3.19);
            if alfa_gr>2
                Kep=0.7;
            end
            at=0.43;
            e=1-((1-exp(-A*(h/hmax)^B))/(1-exp(-A))*(1-en*(cos(alfa_i(i)))^2));
            x1=(e_ji/e);
            K=1/e;
            t_max=1.41*G/(1.74-e); %максимальное сопротивление резке
            t=t_max*Kep*x1^(at*exp(x1^K/K^(2*K)));
            Y=delta/h;
            X=C/h;
            Forse(j)=t*F*10^-
6*2*(1+(z*tan(alfa_i(i))/(0.6*delta5)+1/(1+10*delta5/(G*Y^2*X))))+Forse(j);
        end
    end
end
S(j)=j*delta_N;

```

```

        y=y-delta_N;
    end
    S_out(i1,:)=S(:);
    Forse_out(i1,:)=Forse(:);
    Forse_max_out(i1)=max(Forse(:));
    end
function [n,k,kf,D,delta,psi,data_inMK] = f_data_inMK_disk
n = 1;
k = 300;
psi=9;
kf=-0.2;
D=1000;
%Число моделируемых опытов
Nop=1000;
%Число варьируемых параметров
Np=4;
%Номинальные значения варьируемых параметров и их коэффициенты вариации
%Толщина листа
h=25;
vh=0.004;
b=2*h;
delta=0.2*h;
%Предел прочности
G=430;
vG=0.061;
%Ширина отрезаемой кромки
b=50;
vb=0.1;
%Коэффициент трения
f=0.15;
vf=0.1;
%Массив псевдослучайных равномерно распределенных чисел
ck=rand(Nop,Np);
mk=ck-0.5;
Spi=sqrt(2*pi);
for i=1:Nop
    for j=1:Np
        if abs(mk(i,j))<=0.487
            Bk(i,j)=(3-sqrt(9-12*pi*mk(i,j)^2))/(mk(i,j)*Spi);
        end
        if abs(mk(i,j))>0.487
            Bk(i,j)=(abs(mk(i,j))/mk(i,j))*(2.25867+57.0256*(abs(mk(i,j))-
0.487));
        end
    end
end
end
data_inMK(:,1)=h*(1+Bk(:,1).*vh);
data_inMK(:,2)=G*(1+Bk(:,2).*vG);
data_inMK(:,3)=b*(1+Bk(:,3).*vb);
data_inMK(:,4)=f*(1+Bk(:,4).*vf);
lim_data=size(data_inMK,1)+1;
data_inMK(lim_data,1)=h;
data_inMK(lim_data,2)=G;
data_inMK(lim_data,3)=b;
data_inMK(lim_data,4)=f;
end

```

## Приложение Б

Акты и справки по внедрению результатов диссертационной работы

## СПРАВКА

о долевом участии *Селезнева Максима Евгеньевича* в экономическом эффекте, полученном при использовании результатов научно–исследовательских работ по совершенствованию технологий и оборудования для производства горячекатаных листов и полос, выполненных в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) совместно с ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»

Результаты диссертационной работы *Селезнева Максима Евгеньевича*, полученные в рамках договора Гс–12–2008 о партнерстве, сотрудничестве и научном обмене между Донбасской государственной машиностроительной академией (г. Краматорск) и Донбасским государственным техническим университетом (г. Алчевск), а именно:

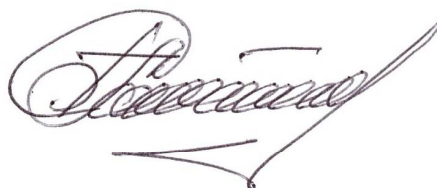
- уточненные методики по определению энергосиловых параметров процесса горячей резки металла на ножницах;
- численные математические модели распределения интегральных показателей напряженно-деформированного состояния металла при реализации процессов продольной и поперечной резки толстых листов на ножницах;
- методики по определению показателей качества процессов продольной и поперечной резки толстых листов на ножницах;
- комплексы программных средств по автоматизированному расчету энергосиловых параметров процессов продольной и поперечной резки толстых листов на ножницах с учетом варьирования формой режущих инструментов;
- технические решения, направленные на совершенствование технологии и оборудования процессов продольной и поперечной резки толстолистого металлопроката были использованы в рамках комплекса научно-исследовательских работ по совершенствованию технологических

режимов резки, расширение сортамента и повышение качества готового листа, снижению нагрузок на оборудование производства ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод».

Общий экономический эффект, за счет снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ, а также, за счет, усовершенствования методики определения основных технологических параметров разделительных операций и увеличения выхода годной металлопродукции, составил 18800 тыс. (восемнадцать миллионов восемьсот тысяч) гривен по ценам 2012 года.

Долевое участие *Селезнева М.Е.* при выполнении данных работ в качестве исполнителя составило 1,5%, что соответствует экономическому эффекту от внедрения результатов его диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.08 «Машины для металлургического производства», в объеме 282000 (двести восемьдесят две тысячи) гривен по ценам 2012 года.

Научный руководитель комплекса научно-исследовательских работ по совершенствованию технологий и оборудования для производства горячекатаных листов и полос, выполненных совместно ПАО «НКМЗ»,  
д-р. техн. наук, профессор



А.В. Сатонин

Подпись профессора Сатонина А.В. заверяю:  
проректор по научной работе и внешним связям  
Донбасской государственной  
машиностроительной академии,  
д-р. техн. наук, профессор




И.С. Алиев

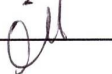


ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи,  
управління розвитком та  
міжнародних зв'язків  
Донбаської державної

машинобудівної академії,

професор

 М. А. Турчанін  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

### АКТ ВИКОРИСТАННЯ

Матеріали дисертаційної роботи Селезньова Максима Євгеновича на тему: «Удосконалення технології та обладнання процесів різання товстолистового металопрокату на ножицях», а саме:

– методики і програмні засоби з визначення енергосилових і кінематичних показників процесів подовжнього і поперечного різання листового металопрокату на ножицях;

– рекомендації відносно реалізації процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножем із скругленням, а також комбінування процесів правлення та подовжнього різання листового металопрокату на дискових ножицях;

– технічні рішення, спрямовані на вдосконалення процесів подовжнього і поперечного різання листового металопрокату; були використані в Донбаській державній машинобудівній академії при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0113U003979, № держ. реєстрації 0114U002537 наказ № 1611 від 22.11.2013).

Завідуючий кафедрою  
«Автоматизовані металургійні  
машини та обладнання»,  
канд. техн. наук, проф.



В.А. Федорінов



**Затверджую:**

Ректор Донбаського державного  
технічного університету

М.І. Антощенко

\_\_\_\_\_ 20016р.

### **ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ**

Матеріали дисертаційної роботи, виконаної асистентом кафедри «Машини металургійного комплексу та прикладна механіка» Селезньовим Максимом Євгеновичем на тему: «Удосконалення технології та обладнання процесів різання товстолистового металопрокату на ножицях», а саме:

– методики з визначення енергосилових і кінематичних показників процесів подовжнього і поперечного різання листового металопрокату на ножицях;

– програмні засоби з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану металу при реалізації процесів подовжнього і поперечного різання листового металопрокату на ножицях, використовуються на кафедрі «Машини металургійного комплексу» Донбаського державного технічного університету в рамках викладання наступних спеціальних дисциплін:

– «Математичні моделі в розрахунках на електронно-обчислювальних машинах»;

– «Сучасні напрямки розвитку та проектування металургійного обладнання»;

– «Науково-дослідна робота студента», а також при виконанні курсових і дипломних проектів магістрами галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

В. о. завідувача кафедри

«Машини металургійного комплексу

та прикладна механіка», канд. техн. наук, доцент

Боровік П.В.