

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный машиностроительный университет

УДК 621.771:669.35-122.3

На правах рукописи

ЛУКАШ Алексей Сергеевич

**Усовершенствование технологического
процесса и математической модели холодной
прокатки тонких полос из меди и латуней
для улучшения их качества**

Специальность 05.16.05 – обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени

Кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Шаталов Р.Л.

Москва-2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Обзор современных способов листовой прокатки и методов расчёта силовых параметров.....	9
1.1. Современные технологические процессы прокатки сплавов меди.....	9
1.2. Устойчивость процесса деформации при листовой прокатке	14
1.3. Проблемные вопросы разработки технологии прокатки.....	18
1.4. Современные методы определения напряжений и деформаций в процессах пластической деформации.....	21
1.5. Приближенные методы определения давления на валки и усилий прокатки.....	28
1.6. Современные системы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением.....	33
Выводы по главе 1	37
Глава 2. Создание микропроцессорной системы контроля усилий прокатки и усовершенствование методов расчёта силовых параметров автоматизированной системы проектирования.....	40
2.1. Проектирование, создание и исследование микропроцессорной системы контроля усилий прокатки на лабораторном двухвалковом листовом стане.	40
2.2. Определение величины сопротивления деформации в процессах прокатки	45
2.3. Математическое моделирование процесса холодной листовой прокатки	54
2.4. Программа расчёта и моделирования процесса листовой прокатки	60
Выводы по главе 2	65
Глава 3. Усовершенствование методики расчёта точности прокатки	67
3.1. Влияние условий контактного трения на деформационные и силовые показатели при прокатке тонких полос	67

3.2. Разработка технологических режимов, обеспечивающих повышение точности размеров проката	75
3.3. Анализ устойчивости плоской формы полосы с учётом упругопластического изгиба по толщине металла	81
Выводы по главе 3	90
Глава 4. Исследование и компьютерное проектирование рациональных технологических режимов непрерывной прокатки тонких полос из медных сплавов	92
4.1. Исследование и выбор рационального режима для непрерывного трехклетьевого стана холодной прокатки полос.....	92
4.2. Исследование режимов прокатки медных и латунных полос на одноклетьевых станах для уменьшения поперечной разнотолщинности металла.....	98
Выводы по главе 4	102
Глава 5. Исследование и разработка конструкции калибрующего блока для уменьшения разнотолщинности и улучшения плоскостности тонких полос	104
5.1. Создание и исследование калибрующего блока для повышения качества листов холодной прокатки	104
5.2. Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы	112
Выводы по главе 5	116
Основные выводы	117
Список использованных источников	119
Приложения	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Возрастающие требования к качеству листового проката и, в частности, к точности его размеров, требуют усовершенствования технологии прокатки, компьютеризированных систем проектирования показателей процесса и новых конструкций деформирующих агрегатов.

Усовершенствование процессов обработки металлов давлением и, в частности, процесса прокатки, производится на основе теоретических и экспериментальных исследований процессов пластической деформации. Необходимо отметить важные разработки советских и российских ученых в области теории пластичности, особенно работы А. А. Ильюшина, В. В. Соколовского, Л. М. Качанова, И. М. Павлова, П. И. Полухина, И. Л. Перлина, а также зарубежных ученых А. Надаи, Р. Хилла, В. Прагера, Б. Сен-Венана, А. Треска, Л. Прандтля и других специалистов.

Важные научные разработки по усовершенствованию процессов обработки давлением были проведены в ЦНИИТМАШ, МГТУ им. Баумана, институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, НИТУ МИСИС, «Институте Цветметобработка», Череповецком государственном университете, Тульском государственном университете, МГТУ «Станкин» и в других организациях.

В металлургической промышленности производят значительное количество меди и её сплавов. Эти материалы очень важны для развития электротехники, приборостроения, энергетики, производства электрооборудования и транспортных средств.

В РФ отливают около 200 тысяч тонн меди в год, половина которой подвергается прокатке. Однако повышение требований к качеству проката меди и её сплавов требует обеспечить высокую точность листов и сортового металла, снижение продольной и поперечной разнотолщинности. Этим вопросам посвящена данная работа.

Работа выполнена в рамках государственной программы стратегического развития металлургической промышленности Российской Федерации до 2020 года, утверждённой приказом Минпромэнерго России от 29 мая 2007 года и протоколом №ВП-п9-13пр «О мерах по развитию чёрной металлургии и обеспечению металлопродукцией внутреннего рынка», в рамках которой предусмотрены усовершенствования технологий. Развитие металлургической промышленности России до 2020 года предусмотрено Минпромторгом РФ на базе утвержденной приказом Минпромэнерго РФ от 29 мая 2007 г. №177 «Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации» на период до 2020 года, что предполагает финансирование в размере 198 миллиардов рублей, и увеличение производства, как на экспорт, так и для нужд внутреннего рынка изделий из металлопроката примерно на 61 млн. тонн, при этом добавленная стоимость должна увеличиться в 1,7 раза в общем росте изделий металлургического производства до 55%. В свете поставленных задач особо важное значение приобретает усовершенствование технологических процессов, направленных на повышение качества изделий.

Анализ известных технологий, конструкций деформирующих агрегатов и моделей расчета показал, что они не обеспечивают необходимой точности листовой продукции. Для ряда металлов и сплавов, прокатываемых на промышленных предприятиях, не существует методик по определению величины сопротивления металла деформации неразрушающим методом.

Поэтому разработка режимов прокатки, обеспечивающих повышение точности листов, с использованием математической модели, учитывающей реальные значения сопротивления металла деформации и условия деформирования, разработка новых устройств, обеспечивающих дополнительную калибровку полос, являются весьма актуальными.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является усовершенствование технологических режимов прокатки тонких полос и листов из меди и латуней для улучшения их качества.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие задачи:

- создание лабораторного программно-технического комплекса для исследования процесса прокатки меди и латуней;
- установление статистической зависимости между величиной сопротивления металла деформации и твердостью;
- нахождение зависимостей сопротивления деформации конкретных металлов от величины обжатия;
- исследование силовых параметров на действующем прокатном стане и определение возможных колебаний усилий прокатки;
- исследование влияния контактного трения на усилия прокатки металлов и сплавов конкретного химического состава;
- разработка программной системы расчета и проектирования технологии листовой прокатки, исследование работоспособности созданной математической модели на основе режимов прокатки промышленных прокатных станов;
- исследование формирования плоскостности и определение критических напряжений при прокатке;
- разработка конструкции нового калибровочного агрегата для повышения точности тонких листов.

Объект исследования. Холодная прокатка медных и латунных полос на одноклетьевых и непрерывных станах.

Методы исследования. Теоретический анализ проведен на основании использования методов современной теории пластичности. Экспериментальные исследования проведены с применением современной тензометрической аппаратуры и статистической обработки информации. Результаты исследований, теоретических разработок и математического моделирования подвергались анализу и сравнению с результатами лабораторных и промышленных экспериментов.

Научная новизна работы.

1. Разработан экспериментально-аналитический метод определения сопротивления металла деформации в клети при неизвестной исходной толщине ненаклепанного металла, позволяющий проектировать режимы листовой прокатки в реальных условиях частичной неопределенности входных переменных. Получены уравнения расчета сопротивления деформации меди МЗ и латуней Л63 и ЛС59-1 конкретного химического состава, позволяющие исследовать и проектировать режимы листовой прокатки на действующих промышленных агрегатах.

2. Уточнены уравнения расчета критических напряжений сжатия и показателей плоскостности полосы с учетом упругопластической деформации металла, позволяющие повысить точность определения показателей неплоскостности.

3. Усовершенствована математическая модель пластической деформации металла в клети и, созданная на её основе, программная система, позволяющая в диалоговом режиме исследовать и проектировать показатели холодной листовой прокатки на одноклетьевых и непрерывных станах.

4. Получены регрессионные уравнения, связывающие величины сопротивления деформации меди и латуней с показателями твердости, позволяющие расширить области применения методов неразрушающего контроля механических свойств проката.

5. Уточнены закономерности влияния условий контактного трения на точность определения силовых показателей и профиля полосы при листовой прокатке меди и латуней.

Достоверность работы. Достоверность результатов подтверждается промышленными испытаниями, проводимыми на сертифицированном оборудовании, с использованием современных методов и технических средств, обеспечивающих высокую точность измерений, лицензированных программ статистической обработки данных, применением обоснованных методов математической обработки результатов экспериментов,

применением уточненной методики расчета основных силовых параметров. Теоретический анализ построен на основании использования методов теории пластичности.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Результаты работы внедрены на предприятиях ООО «Кольчугинский завод по обработке цветных металлов» и ООО «Кольчугцветметобработка», что позволило за счет изменения режимов натяжений и корректировки исходной выпуклости рабочих валков уменьшить поперечную разнотолщинность и улучшить плоскостность медных и латунных лент на 2-4%.

2. Разработанный программно-технический комплекс на базе двухвалкового листового прокатного стана 150x235 мм используется в учебном процессе Университета машиностроения.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены, обсуждены и одобрены на научных конференциях и семинарах: Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию П. И. Полухина (Москва, 2011); VI Московской научно-практической конференции «Студенческая наука» (Москва, 2011); Международной конференции «Технологии и оборудование для прокатного производства» (Москва, 2012); Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии» (Москва, 2015); Международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия» (Липецк, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы, включающего 108 наименований. Диссертация изложена на 132 страницах, содержит 32 рисунков и 13 таблиц. Приложения составляют 3 страницы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ И МЕТОДОВ РАСЧЁТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

1.1. Современные технологические процессы прокатки сплавов меди

Производство листовой продукции из меди и её сплавов имеет большое значение для множества отраслей промышленности: энергетики, химической промышленности, приборостроения и других отраслей. Известно, что например в 2005 году мировое производство рафинированной меди составило 16,3 млн. тонн [1], а по данным на 2015 год 18,7 млн. тонн [2].

При этом важно обеспечить не только производство большого количества проката, но и его высокое качество [3, 4]. Как отмечено в [5]: «В работе металлургических компаний всё в большей мере проявляется тенденция первоочередного обеспечения платёжеспособного спроса внутреннего рынка. Машиностроение (в частности станкостроение) потребляет основную долю проката из меди, латуней, сплавов меди и никеля». В странах ЕС производство медного проката на душу населения в 1994 году составляло 8-10 кг, (на одного человека в год), а в 2004 году оно уже достигло 12-14 кг/чел в год. Весьма велики потребности в высококачественном медном прокате электротехнической промышленности [6, 7] и в ряде других отраслей [7, 8]. В РФ развиваются два вида заводов, использующих прокатку меди и её сплавов: кабельные заводы, производящие проволоку и заводы «по обработке цветных металлов», которые производят листы, профили, трубы и другую продукцию [7-10].

В России объём производства меди в период 2007-2013 гг. составил 100-130 тысяч тонн в год, (здесь и далее использованы данные, приведенные в работе [10]). Доля проката из меди составляет 36%, латуни около 50%, и около 3% медно-никелевый прокат. Некоторые заводы проводят работы по модернизации прокатных станов [9, 10].

На Кировском заводе ОЦМ (входит в состав Уральской горно-металлургической компании и ООО «УГМК-ОЦМ») пущен комплекс, включающий линию непрерывного литья полос из меди и латуней (фирма

«SMSMeer») и универсальный реверсивный стан кварто 160 холодной прокатки (фирмы «Danieli-Frohling») для прокатки тонких лент.

На Каменск-Уральском заводе ОЦМ введена в эксплуатацию линия по производству медных шин и комплекс по производству проката листов из латуней (производительность 50 тысяч тонн в год).

Отрицательное влияние на развитие отрасли оказывает отставание машиностроительных заводов изготовителей прокатного оборудования – их доля менее 20% от общего объема продукции для прокатного и литейного оборудования. Ниже, в таблице 1.1 приведены данные о потреблении меди и её сплавов, см. [1-5].

Таблица 1.1.

Данные по потреблению меди и её сплавов

Год	1990	2004	2010	Вид продукции
Грузовые автомобили тыс. штук	720	195	280-320	Ленты из меди, латуней, прутки
Автомобили легковые тыс. штук	1103	1010	1900-2200	Ленты из меди, латуни, бронзы
Тракторы тыс. штук	213	8,5	30-32	Ленты, сорт
Холодильники тыс. штук	3778	2500	2600	Медные трубы
Телевизоры тыс. штук	4717	2400	2400-2600	Ленты из бронзы и сплавов меди с никелем
Электродвигатели тыс. штук	1796	708	750-1000	Провода, медные профили
Металлорежущие станки тыс. штук	74,2	5,5	13-16	Прутки, трубы из латуни и бронзы

Видно, что производство изделий из проката меди и её сплавов медленно, но увеличивается после резкого падения, которое имело место в 90-х годах.

Современные конструкции прокатных станов, использованные, начиная с середины XX века, описаны в ряде монографий [11-14]. При этом в работе [13] уделено особое внимание использованию смазок при холодной прокатке. Ряд конструкций прокатных станов был описан в работах [15-24], в работе [20] исследовали и асимметричную прокатку. Особенности процесса деформации при прокатке изучены в работах [25-32].

Во второй половине XX века стали все чаще применять совмещённые агрегаты непрерывного литья и прокатки. Рассмотрению этих процессов посвящена монография [7], где приведены и подробные библиографические ссылки.

В связи с расширением сортамента возрастают величины усилий и моментов прокатки. Уже сейчас имеются клетки кварто, на которых усилия прокатки достигают величин 40-50 МН. Эти усилия приводят к деформации деталей прокатной клетки. На рис. 1.1 приведён график, полученный в работе [32], для клетки 2800, иллюстрирующий зависимость между усилиями P и деформацией клетки δ . Начальный (нелинейный) участок графика связан с влиянием зазоров и жёсткости контактных поверхностей деталей клетки.

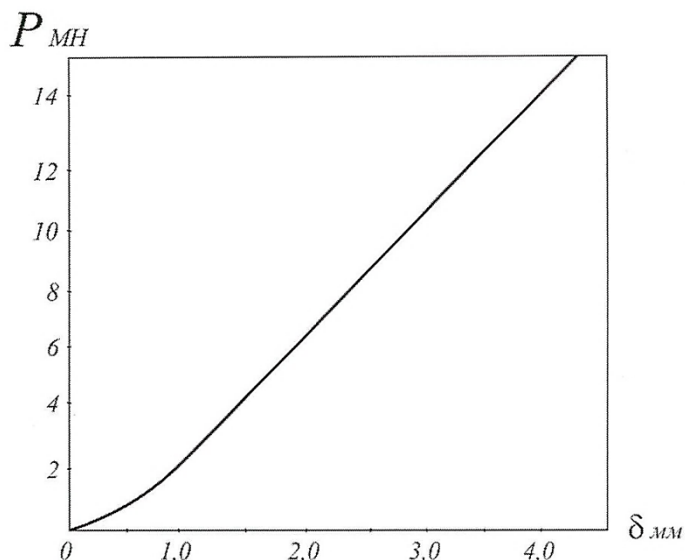


Рис. 1.1. График упругой деформации клетки 2800 (по данным И.М. Мееровича)

Видно, что изменение усилия прокатки от 8 МН до 12 МН может изменить межвалковый зазор и толщину проката на 1 мм, т.е. создать значительную продольную разнотолщинность. Поэтому многие фирмы уже в

60-х годах прошлого века начали разрабатывать конструкции жёстких и предварительно напряжённых клетей. В качестве примера можно привести стан фирмы «Моргардехаммер» для прокатки широких листов.

В работе [33] приведены данные фирмы «United» (США), согласно которым для стана 5335 при усилии прокатки 59 МН деформация клетки (в целом) составляет 8-11 мм, из них: 1,6 мм – на долю станины клетки, 3,7-6,9 мм – доля деформации опорных валков, 0,9 мм – вызвано сплющиванием валков, 0,8 мм – деформированием нажимных винтов. В общем, доля деформации валков 3,6 – 7,8 мм или 40-87% общей деформации.

В клетях конструкции А. Лефрена, разработанных в Швеции, две подушки стягивали жёсткими болтами с усилием, превышающим ожидаемое усилие прокатки. Поскольку эти конструкции создают только предварительное нагружение деталей клетки, но не валков, неоднократно делали попытки создать конструкцию, которая обеспечила бы и нагружение валков.

Многие фирмы в странах ЕС и в США разрабатывают конструкции клетей, в которых предусмотрена возможность воздействия на валки горизонтальными или вертикальными усилиями.

Известно, что на заводе в г. Тибе (Япония) ввели в эксплуатацию стан с четырьмя клетями кварто, в которых диаметры рабочих валков равны 597-700 мм, а опорных 1180-1255 мм. Клетки снабжены системами противоизгиба, позволяющими нагружать валки усилиями до 0,53 МН, см. [30]. М. Сэндзимир разработал конструкцию клетки типа Z [31]. Эта конструкция иллюстрируется рис. 1.2, где показан прокатываемый лист 1, который деформируют валки 2. Предусмотрены опорные валки 3 и 4, а также валки 5, 6 и 8, 9, обеспечивающие удержание рабочих валков от горизонтальных смещений.

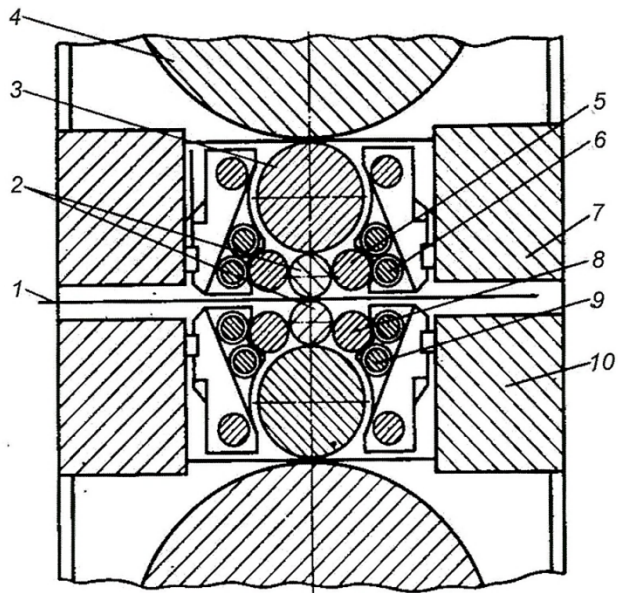


Рис. 1.2. Клеть типа Z для прокатки листов и лент.

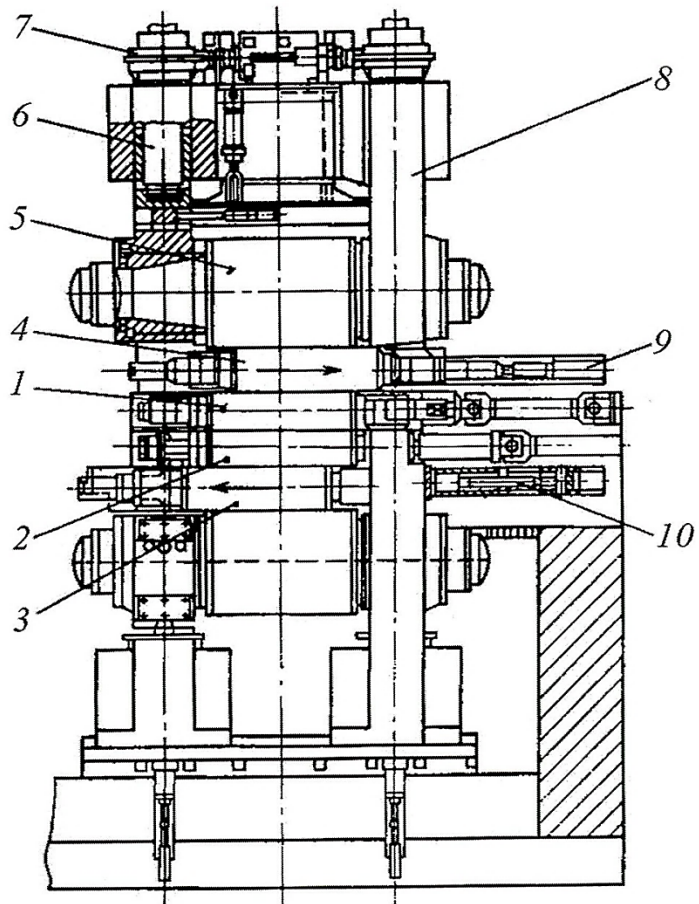


Рис. 1.3. Клеть стан 2030 с устройством для регулирования поперечного сечения профиля проката, конструкции фирмы «Peinesalzgitter» ФРГ.

На рис. 1.3 показана модернизированная клеть кварто конструкции фирмы «Peinesalzgitter» (ФРГ). В этой клетке предусмотрены возможности регулирования толщины проката, его профиля и планшетности [30]. Рабочие валки 1 и 2 имеют диаметры 370-425 мм, а промежуточные валки 3 и 4 диаметрами 575 мм, контактируют с опорными валками 5 диаметрами 1425 мм. В клетке предусмотрены нажимные устройства 6 с приводами 7. Они расположены в станине 8. Промежуточные валки 3 и 4 можно перемещать вдоль их осей с помощью гидравлических цилиндров 9 и 10, что изменяет положение точек опоры рабочих валков 1, 2, а, следовательно, их деформацию изгиба и профиль прокатываемой полосы.

Находят применение и клетки типа РС с прекосами рабочих валков относительно опорных на некоторый регулируемый угол (т.н. «угол скрещивания осей валков») (фирма «Мицубиси дзюкогё» (Япония)).

Наиболее эффективными в отношении возможности регулирования профиля листов являются клетки кварто и шестивалковые с рабочими валками, имеющими возможность перемещения вдоль их осей.

Ряд прокатных реверсивных станов холодной прокатки с гидравлическими системами САРТ (система автоматизированной регулировки толщины) разработан ВНИИМЕТМАШ [34].

1.2. Устойчивость процесса деформации при листовой прокатке.

Известно, что при прокатке возможны случаи потери устойчивости процесса деформации. Основными причинами потери устойчивости могут являться следующие факторы:

А) – поперечное смещение листов в процессе прокатки, вплоть до выхода проката из валков (происходит так называемый, «заброс на станину»). Это приводит к прекращению процесса прокатки и, возможно, к аварии;

Б) – искривление концов проката из-за асимметрии, либо за счёт различия окружных скоростей валков, либо за счет неравномерного нагрева проката, либо за счет различий условий смазки по его поверхностям;

В) – потеря устойчивости за счёт искривления листа при неравномерной деформации по его ширине: либо крайние его участки (у кромок листа) становятся волнистыми, либо нарушается плоскостность центрального участка листа (за счёт возникновения т.н. «коробоватости»).

Очевидно, что процесс прокатки должен происходить стабильно, и если используют определённую асимметрию процесса, например создание скоростной асимметрии для регулирования разнотолщинности [29], то величины этой асимметрии следует выбирать в пределах, обеспечивающих устойчивость процесса деформации.

Устойчивость листов от поперечных смещений – в направлении осей валков обеспечивали за счёт создания вогнутой конфигурации образующих рабочих валков, как показано на рис. 1.4. При такой форме межвалкового зазора между валками 1, 2 крайние участки валков препятствуют боковому смещению листа 3.

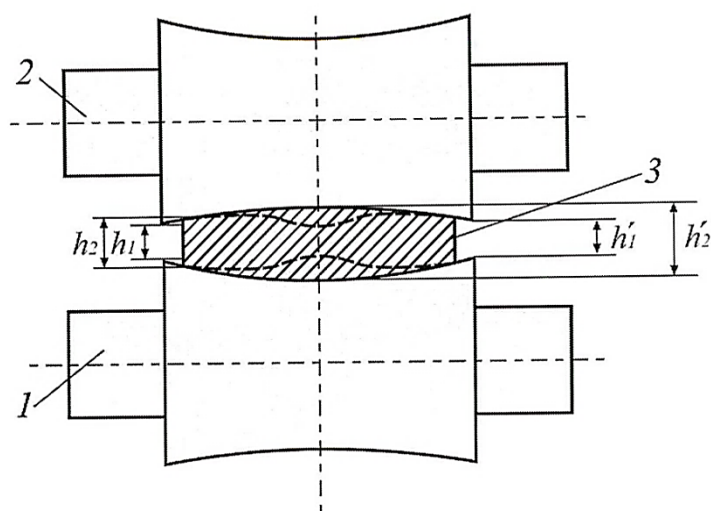


Рис. 1.4. Волновая профилировка прокатных станков.

Обычно профилируют образующие по дугам парабол, и если толщина листа по его краям равна h'_1 , то в центре она равна $h'_2 > h'_1$ и это создаёт существенную поперечную разнотолщинность листа.

В работе [29] при анализе устойчивости процесса прокатки определено изменение мощности деформации N на δN при боковом смещении листа на малую величину Δx , см. [29, 33].

Если при таком смещении мощность прокатки уменьшается, то процесс при $\delta N < 0$ будет неустойчивым. При этом происходит смещение листа вдоль бочки валков и процесс прокатки нарушается.

Если ввести относительное изменение мощности $f = \frac{\delta N}{N_0}$, то анализ опытных данных показывает три возможности [33]. Для обеспечения устойчивости необходимо условие $\delta N > 0$, $f = \frac{\delta N}{N_0} > 0$, но оказывается, что это условие не является достаточным. Для устойчивости необходимо, во-первых, чтобы функция f превышала некоторую величину f_{min} , а во-вторых, чтобы функция f превышала некоторую величину f_{max} на определенную величину (в два раза и более). Если $f_{max} > f > f_{min}$, то процесс устойчив, но возможны случаи неустойчивости ввиду биений валков, их перекосов, неравномерного нагрева валков и т.д. Существует величина f_{max} , после достижения которой, можно гарантировать устойчивость процесса прокатки.

Итак, возможны три варианта:

- А) при $f \leq f_{min}$ - процесс обычно теряет устойчивость;
- Б) при $f_{min} < f < f_{max}$ случаи потери устойчивости возможны, но их частота уменьшается с увеличением f ;
- В) при $f \geq f_{max}$ процесс устойчив.

В условиях прокатки часто имеет место величина

$$f_{min} = (0,1 \div 2) \cdot 10^{-5}, f_{max} = (4 \div 5) \cdot 10^{-5}. \quad (1.1)$$

Был выпущен ГОСТ 1173-2006 Международный стандарт «Фольга, ленты, листы и плиты медные», который регламентирует допуски на медные ленты и фольгу холодной прокатки (а также листы горячей прокатки). Также

действует Международный стандарт ГОСТ 2208-2007 «Фольга, ленты, листы и плиты латунные». Технические условия, определяющие предельные отклонения листов латуней.

Повышение требований к точности размеров листов и лент холодной прокатки потребовало создания новых рабочих клеток, обеспечивающих возможность регулирования профиля листов.

Фирма «StahlwerkeBochum» ввела в эксплуатацию клетку кварто с использованием в ней асимметричной волновой профилировки валков. Эта клетка показана на рис. 1.5. В данной конструкции электродвигатели 1 и 2 обеспечивают привод верхнего опорного валка, а электродвигатели 3 и 4 – нижнего опорного валка. Как видим, в этой конструкции приводными являются не рабочие валки 5 и 6, а опорные валки 7 и 8 [35]. Диаметры рабочих валков 5 равны 480-410 мм, а валка 6 360-320 мм. Имеются устройства изгиба рабочих валков – 9, и устройства их осевого перемещения – 10. В этой клетке можно регулировать профиль проката осевым перемещением рабочих валков, выполненных с асимметричной волновой профилировкой.

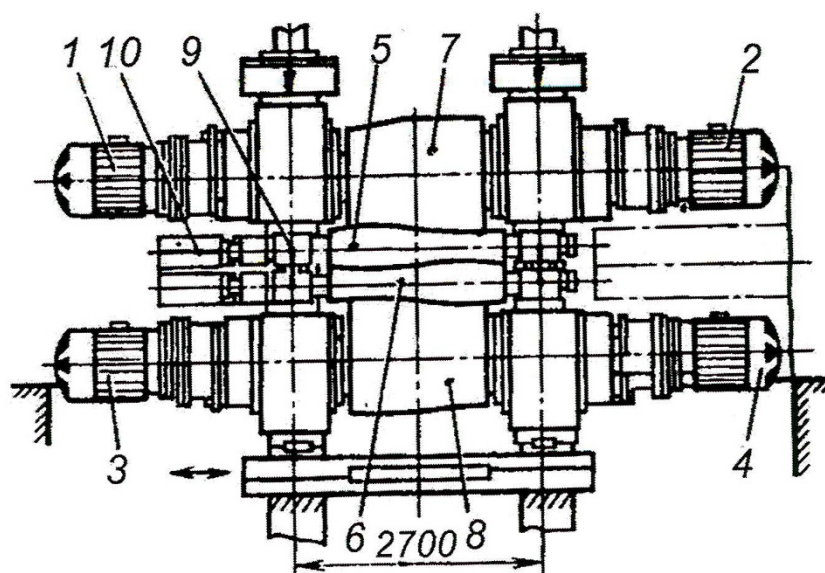


Рис. 1.5. Клетка кварто с приводными опорными валками (фирмы «StahlwerkeBochum»)

Но при прокатке тонких листов возникают затруднения из-за того, что, при попытках регулировать профиль прокатываемых листов, нарушается их устойчивость: возникает волнистость по краям листов, либо образование выступов в центре листов («коробоватость»).

Согласно данным, приведённым в ряде работ [33, 35], регулирование профиля сечения проката возможно только тогда, когда его толщина выше критической, равной

$$h_k = (4,0 \div 4,5) \cdot 10^{-3} b, \quad (1.2)$$

где b – ширина листа.

Попытки изменить профиль при $h < h_k$ приводят к нарушению плоскостности и образованию волнистости, лист теряет свою исходную конфигурацию. При меньших толщинах возможна только такая прокатка, при которой сохраняется постоянной величина вытяжки по ширине листа: например, если по краям листа его толщина равна 1,00 мм, а в центре листа 1,10 мм, то мы, совершая обжатие до толщины 0,5 мм по краям листа с вытяжкой, равной двум (за несколько проходов), должны обеспечить такую же вытяжку в центре прокатываемого листа, т.е. здесь уменьшить толщину от 1,10 мм до 0,55 мм. При попытках уменьшить это соотношение ($\frac{h_0}{h_1} = 2,0$) происходит потеря устойчивости плоской формы листа, что приводит к неисправимому браку.

1.3. Проблемные вопросы разработки технологии прокатки.

Как видно из вышеуказанного, в настоящее время основной проблемой листовой прокатки является не увеличение производительности и скорости прокатки, а повышение качества проката. Очень важной проблемой является необходимость повышения точности размеров проката, что приводит к двум задачам:

А) обеспечить уменьшение продольной разнотолщинности листов;

Б) обеспечить уменьшение поперечной разнотолщинности (и обеспечить «плоскостность проката»).

Первая задача решается за счёт повышения жёсткости прокатных клетей и одновременно точности размеров всех деталей клетей, особенно рабочих и опорных валков [36]. Использование предварительно напряжённых клетей способствует решению этой задачи. Эффективны способы реализации чистовой механической обработки валков после сборки клетки при рабочем положении валков и при их нагрузке усилием, равным усилию прокатки.

Продольную разнотолщинность прокатываемых листов можно регулировать: с помощью изменения положения одного из валков нажимными винтами; изменением усилия нагружения; изменением соотношения скоростей валков, т.е. используя «скоростную асимметрию»; созданием натяжений, что приводит к снижению усилия, а, следовательно, и уменьшению деформации клетки и величины межвалкового зазора.

Уменьшение поперечной разнотолщинности решается за счёт выбора оптимальной профилировки валков. Применение волновой профилировки даёт возможность значительно уменьшить поперечную разнотолщинность. Этой же цели можно достичь, используя системы противоизгиба рабочих или опорных валков.

Зачастую используют сочетание асимметричной волновой профилировки и системы осевого перемещения рабочих валков. Поскольку причиной нарушения плоскостности является неравномерность вытяжки по ширине листа, то уширение несколько способствует улучшению плоскостности, если обжатия по краям листа (и величина отношения h_0/h_1) выше, чем в центре. Поэтому в ряде случаев уширение оказывается полезным, но при прокатке широких листов оно незначительно.

Если представить начальную толщину листа (ленты) в виде параболической функции $h_0(x) = H_0 \left(1 - \frac{4\Delta H_0 x^2}{H_0 b^2}\right)$, а конечный профиль

после прокатки в данной клетке $h_1(x) = H_1 \left(1 - \frac{4\Delta H_1 x^2}{H b^2}\right)$, где H_0, H_1 – толщины листа в его центре (по оси симметрии), то разнотолщинность можно характеризовать соотношениями $\delta_0 = \frac{\Delta H_0}{H_0}$ и $\delta_1 = \frac{\Delta H_1}{H_1}$ (здесь «b» – ширина листа). При $\frac{H_0}{H_1} = \frac{h_0}{h_1} = const.$ $\delta_0 = \delta_1$ вытяжка равномерная по ширине проката и напряжения вдоль прокатываемого материала отсутствуют.

Если $\delta_0 \neq \delta_1$, то появление уравновешенной системы напряжений вдоль оси проката неизбежно, если прокатку осуществляют без натяжений. А параметр $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_0$ характеризует тенденцию к нарушению плоскостности листа.

В работе [37] предложена приближенная зависимость

$$-B_2 \left(\frac{h}{b}\right)^2 \leq \Delta\delta \leq B_1 \left(\frac{h}{b}\right)^2, \quad (1.3)$$

где B_1, B_2 – постоянные величины, равные 50 и 100 соответственно.

Краевые участки полосы должны терять устойчивость при $B_1 \left(\frac{h}{b}\right)^2 = 50$, а условие устойчивой прокатки при деформации медного листа толщиной 2 мм, шириной 100 мм при $\delta_0 = 0,02$, $\Delta H_0 = 0,04$ мм согласно [37] условие устойчивой деформации без искажения формы листа имеет место при $0,04 \leq \delta_1 \leq 0,052$.

Но эти зависимости весьма приблизительные, и их уточнение является необходимым.

Каков возможный интервал изменений δ_0 и δ_1 , при которых их колебания не приведут к потере устойчивости листа и нарушению его формы, не изучено и экспериментально не проверено. Неясно – допустимо ли при анализе устойчивости листа использовать данные расчётов, проведённых методами теории упругости.

1.4. Современные методы определения напряжений и деформаций в процессах пластической деформации.

Методы определения напряжений и деформаций при пластической деформации основаны на разработках современной теории пластичности, разработанной в трудах советских и российских ученых: А. А. Ильюшина, В. В. Соколовского, Л. М. Качанова, Д. Д. Ивлева и других, а также зарубежных ученых Б. Сен-Венана, Р. Мизеса, Л. Прандтля, Г. Генки, Р. Хилла, В. Прагера, Т. Кармана, В. Джонсона, Н. Александера и других.

Задачей расчёта является определение компонент тензора напряжений: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ и тензора деформаций: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$, где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные, а $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – касательные напряжения в данной системе декартовых координат x, y, z , а $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – компоненты тензора деформаций, соответствующие деформациям растяжения – сжатия вдоль осей x, y, z . При этом компоненты тензора γ_{xy}, γ_{xz} и γ_{yz} характеризуют деформации сдвига в плоскостях xy, xz и yz .

И при упругой, и при пластической деформации должны быть выполнены уравнения равновесия

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} &= 0,\end{aligned}\tag{1.4}$$

(при этом рассматриваем статическую задачу без учёта инерционных членов, несущественных в обычных процессах деформации металлов).

При упругой деформации все компоненты тензоров напряжений и деформаций связаны законом Гука;

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G},$$

Другие уравнения аналогичны, всего имеем шесть уравнений.

Поскольку все компоненты тензора деформаций: ε_x , ε_y , ε_z , γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} определяются через три компоненты вектора перемещения u : u_x , u_y , u_z согласно обычным формулам

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

то систему из девяти уравнений (три уравнения равновесия (1.4) и шесть, соответствующих закону Гука), содержат девять неизвестных функций: u_x , u_y , u_z , σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} и задачу можно решать при заданных краевых условиях.

При пластической деформации закон Гука, конечно, неприменим. Основные формулы и методы теории пластичности изложены в работах [37-42], а применение их к анализу процессов обработки давлением описано в [39-48].

В работе [43] было показано, что необходимо не только определять напряжения, деформации, усилия (и моменты при прокатке), но и возможные отклонения этих параметров, т.е. оценивать точность полученных результатов, поскольку все данные, необходимые для расчётов, известны нам лишь с некоторыми погрешностями.

Современная теория пластичности создана на основании ряда экспериментальных данных.

Наиболее простыми являются опыты по одноосному растяжению, когда цилиндрический образец деформируется усилием P и только одна из шести компонент тензора напряжений не равна нулю. Обозначим её

$$\sigma_x = \sigma_1 = \frac{4P}{\pi d^2},$$

где P – усилие растяжения, d – диаметр образца.

Измеряя силу P и удлинение образца, можно определить зависимость $\sigma_x(\varepsilon_x)$. При этом происходит и «поперечная» деформация, поэтому

компоненты ε_y и ε_z не равны нулю (при упругой деформации $\varepsilon_y = -\gamma\varepsilon_x$, $\varepsilon_z = -\gamma\varepsilon_x$, где γ – коэффициент Пуассона).

Деформации определяют по величинам удлинений $\Delta l = l_1 - l_2$, где l_1 – начальная длина до деформации, l_2 – длина после деформации.

Принимают, что $\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0}$, хотя такое определение степени деформации не удовлетворяет условию аддитивности. Более точным является соотношение

$$\varepsilon_x = \ln \frac{l_2}{l_1}, \quad (1.6)$$

предложенное Г. Генки.

Опыты на одноосное растяжение – сжатие позволяют построить диаграмму $\sigma_x(\varepsilon_x)$.

Для примера на рис. 1.6 приведены графики функций $\sigma(\varepsilon)$ для малоуглеродистой стали – линия 1 и технической меди М1 – линия 2, (графики приведены в [47]). Как известно [30], при малых деформациях действует закон Гука и в данном случае $\sigma = E\varepsilon$, но только на участках от нуля до точки А (или D).

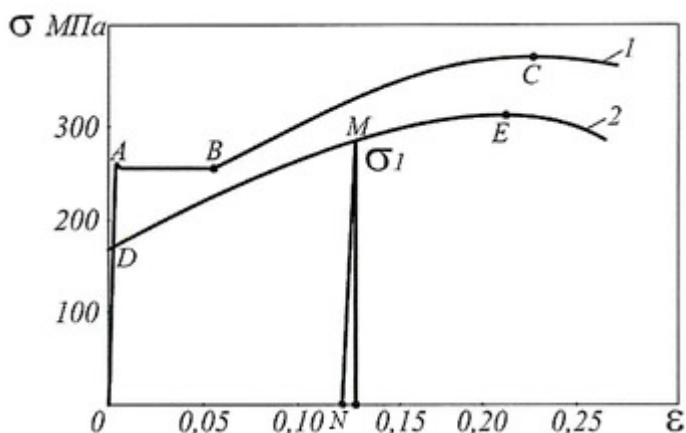


Рис. 1.6. Примеры графиков функции $\sigma(\varepsilon)$ для стали – линия 1 и меди – линия 2.

Для ряда металлов имеется участок АВ, где $\sigma = \text{const.}$, а на участке ВС происходит упрочнение вплоть до образования шейки (или разрушения) в точке С.

Для многих металлов площадки текучести нет, и на всей линии DME происходит упрочнение. Как указывает А. А. Ильющин [37], после достижения предельной упругой деформации тангенс угла наклона касательной к линии $\sigma - \varepsilon$ становится значительно, в десятки раз, меньше модуля упругости E .

При разгрузке, например от точки М, рис. 1.6, деформация уменьшается соответственно линии MN и отрезок от нуля до N равен остаточной деформации.

Если при пластической деформации достигнута величина ε_1 при напряжении σ_1 , то при разгрузке исчезает упругая деформация, равная $\frac{\sigma_1}{E}$, а остаточная деформация равна отрезку ON, см. рис. 1.6.

Главным отличием пластической деформации от упругой является не то, что зависимость $\sigma(\varepsilon)$ нелинейная, а то, что при нагрузке и разгрузке функции $\sigma(\varepsilon)$ совершенно разные.

Действительно, при нагрузке вдоль линии ME мы реализуем этот участок линии о DME, но при разгрузке от точки М мы получим график MN.

Возникает необходимость некоторого уточнения понятия «предел текучести»[49].

В сопротивлении материалов эту величину определяют обычно как «предел упругой деформации», т.е. предел, за которым происходит «текучесть», т.е. пластическая деформация.

Аналогично исследуют зависимости касательных напряжений τ от деформаций сдвига γ , например при кручении полых, тонкостенных, цилиндрических образцов, и в этом случае обозначают предел текучести часто не как σ_T (как при растяжении), а величиной « k », т.е. $\tau_{xy} = k$.

Но в отличие от сопротивления деформации, в теории пластичности нелогично называть величины, соответствующие точкам А или D, рис. 1.6, «предельными».

Если после разгрузки от точки N начать вновь нагрузку, то пластическая деформация начнется уже в точке М, т.е. «предельной» для

упругой деформации будет уже не точка D, а точка M. Любая точка на линиях ABC или DME может соответствовать пределу текучести и оказывается, что все точки на линиях ABC или DME являются «предельными» (т.е. эти линии состоят из «предельных точек»). Тогда определение «предел текучести» становится весьма неопределённым.

Поэтому при решении практических задач стали использовать термин «сопротивление металла деформации (СМД)» или «сопротивление деформации», сохранив термин «предел текучести» только для точек A или D, (рис. 1.6). Принципиально величину СМД можно определить при любой схеме напряженного состояния при условии учёта всех главных напряжений [50].

Развитие теории пластичности началось в период 1869-1871 годов с работ А. Треска и Б. Сен-Венана [51]. Именно А. Треска понял решающее значение касательных напряжений в реализации пластической деформации. Также А. Треска впервые использовал условие несжимаемости для деформации металлов (сейчас сжимаемость принимают в пределах только упругих деформаций).

В 1871 году Б. Сен-Венан получил условие текучести при плоской пластической деформации [51].

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2 \quad (1.7),$$

где k – сопротивление деформации сдвига. Он же получил соотношение между компонентами тензоров напряжений и скорости деформации V (обозначив их V_x, V_y, V_z).

При $V_z=0$ это соотношение имеет вид

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} = \frac{\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y}}{2\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x}\right)} \quad (1.8)$$

или можно записать

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{k}{H} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \\ \sigma_x - \sigma_y &= \frac{2k}{H} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (1.9)$$

где H – некоторая функция инварианта тензора скоростей деформации
 М. Леви в 1871 году обобщил эту систему для объёмной деформации,
 используя вместо (1.9) более общее соотношение[52],

$$\begin{aligned} \frac{2\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y}\right)}{\sigma_x - \sigma_y} &= \frac{2\left(\frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_z}{\partial z}\right)}{\sigma_y - \sigma_z} = \frac{2\left(\frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{\partial V_x}{\partial x}\right)}{\sigma_z - \sigma_x} = \\ &= \frac{\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}}{\tau_{xy}} = \frac{\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y}}{\tau_{yz}} = \frac{\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}}{\tau_{xz}} \end{aligned} \quad (1.10)$$

В настоящее время наиболее часто используют два условия текучести:

а) Треска – Сен-Венана и б) Мизеса.

Первое можно записать в виде

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = 2k, \quad (1.11)$$

а второе в виде

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{xz}^2 + 6\tau_{yz}^2 = 6k^2, \quad (1.12)$$

где « k » предел текучести при сдвиге (для упрощения записано в главных напряжениях).

Из условия (1.11) следует, что при сдвиге предел текучести равен $k = 0,5\sigma_s$, где σ_s – величина СМД при одноосной деформации, когда из всех компонент тензора напряжений только одна, например σ_x , не равна нулю.

В этом случае $|\sigma_x| = 2k$; ($\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$), а из условия Мизеса следует, что в этом случае $2\sigma_x^2 = 6k^2$, т.е. $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$.

Выражение (1.12) является одним из трёх инвариантов тензора напряжений и оно представляет энергию, затраченную на формоизменение деформируемого металла. Со времени работ А. Треска, Б. Сен-Венана и М. Леви считают, что изменения объёма могут быть только упругими, а при пластической деформации изменения объёма не происходит. Для большинства задач обработки давлением это допущение оправдано.

В настоящее время обычно используют один из двух вариантов теории пластичности: а) теорию Генки-Ильюшина и б) теорию Сен-Венана-Мизеса (иногда используют и другие термины).

В первой теории полагают, что компоненты тензоров σ_{ij} и ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) связаны соотношениями, аналогичными по форме закону Гука $\gamma_{i,j} = f_1 \tau_{ij}$, $\varepsilon_{11} = f_2 [\sigma_{11} - 0,5(\sigma_{22} + \sigma_{33})]$ (для других компонент уравнения аналогичны). Функции f_1, f_2 определены на основе единой зависимости между вторыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций.

Эту теорию называют деформационной, поскольку она связывает компоненты тензора напряжений с компонентами тензора деформации.

Вторую теорию называют теорией Сен-Венана-Мизеса (или теорией Леви-Мизеса [51]), а также «теорией течения». Её характеризует то, что она связывает с тензором напряжений не деформации, а «приращения деформаций» или скорости, при деформации $d\varepsilon_{ij}$ а времени $d\tau$, величина $\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial \tau}$ – является соответствующей компонентой тензора скорости деформации.

В дальнейшем в данной работе используется только эта теория (течения) поскольку она лучше согласуется с опытными данными при сложном нагружении, а при «простом» нагружении (пропорциональном изменении всех компонент тензора напряжений) эти теории дают близкие результаты. Сравнительный анализ и критика недостатков обеих теорий приведена в работах [36-51]. А. А. Ильюшин показал, что: «Все основные известные теории пластичности, как отмечал уже В. Прагер, и в том числе его теория, основаны на некоторых линейных соотношениях между тензорами, полученными путем дифференцирования и интегрирования девиаторов напряжений и деформаций и кроме того на некоторых скалярных соотношениях между их инвариантами» [37].

При прокатке листов обычно их ширина намного превышает толщину, и деформацию считают плоской (т.е. двумерной, когда только компоненты скорости V_x и V_y не равны нулю).

Величину сопротивления пластической деформации определяют на основе экспериментальных данных при холодной деформации – в виде функций $\sigma(\varepsilon)$. Для изотропной среды достаточно ввести одну характеристику механических свойств материала: σ_s (или $k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$).

Обычно при холодной деформации величины σ_s и « k » гораздо в меньшей степени зависят от скорости деформации, чем при горячей прокатке, и в большинстве случаев эту зависимость не учитывают. Однако при высоких скоростях учитывать такую зависимость целесообразно.

1.5. Приближённые методы определения давления на валки и усилий прокатки.

В 1925 году Т. Карман вывел [53] приближённое уравнение для давления на валки – функции $p(x)$ при листовой прокатке, приняв допущение о постоянстве напряжения σ_x по толщине проката и приняв приближённое условие текучести при плоской деформации в виде

$$\sigma_y - \sigma_x = 2k. \quad (1.13)$$

В результате была получена приближённая формула

$$\frac{dp}{dx} - \frac{2k}{h} \frac{dh}{dx} - \frac{2\tau_n}{h} = 0, \quad (1.14)$$

где « p » давление на валок, h – переменная толщина полосы, τ_n – напряжения сил трения.

Известно очень много решений уравнений Кармана при различных законах τ_n , например $\tau_n = MD$, при законе сухого трения с коэффициентом трения μ , при $\tau_n = k$ и $\tau_n = \Psi k$, где постоянная $0 < \Psi \leq 1,0$ характеризует силы трения, см. [54].

В ряде случаев заменяли дугу окружности другими линиями: параболами, отрезками прямых линий и т.д. см. [55-56].

А.И. Целиков при замене дуги захвата хордой и законе сухого трения $\tau_n = \mu\sigma_n$ получил формулы для расчёта давления:

в зоне отставания:

$$p = \frac{2k}{\delta_0} \left[(\varphi_0 \delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\delta_0} + 1 \right], \quad (1.15)$$

в зоне опережения:

$$p = \frac{2k}{\delta_1} \left[(\varphi_1 \delta_1 + 1) \left(\frac{h}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right], \quad (1.16)$$

где $\delta_0 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}[0,5(\varphi+\gamma)]}$, $\delta_1 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}(0,5\gamma)}$, $\varphi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2k}$, $\varphi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{2k}$, α – угол захвата, σ_0 , σ_1 – напряжения заднего и переднего натяжений, φ_0 , φ_1 – их безразмерные характеристики (при прокатке без натяжений $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$, $\varphi_0 = \varphi_1 = 1$).

Э. Зибель решал дифференциальное уравнение Т. Кармана при силах трения, равных $\tau_n = \mu 2k$, а А. Надаи при жидкостном трении $\tau_n = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$, (где μ – коэффициент вязкости, а τ_n – пропорционально градиенту скорости вдоль оси «у»). В формуле Э. Зибеля величина μ , вообще, может сильно отличаться от обычного коэффициента трения.

Ввиду сложности расчётов величин усилия прокатки интегрированием формул (1.15) и (1.16), следует определить сначала нейтральное сечение h_H , в котором равны величины давлений, определенных по формулам (1.15) и (1.16) затем определить часть усилия в зоне отставания при $h_0 \geq h \geq h_H$, а потом в зоне опережения, при $h_H > h \geq h_1$.

В частности, было предложено при прокатке без натяжений определять нейтральное сечение по формуле

$$h_H = \sqrt{h_0 h_1},$$

а угол γ соответственно определять по формуле

$$\gamma \approx \frac{\sqrt{R(h_H - h_1)}}{R} = \sqrt{\frac{h_H - h_1}{R}}.$$

Тогда можно определить при $h = h_H$ максимальное давление

$$p = \frac{2k}{\delta_1} \left[\left(\frac{h}{h_H} \right)^{\delta_1} - 1 \right] = \frac{2k \cdot 0,5\sqrt{h_H - h_1}}{\mu \sqrt{R}} \left[\left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{\mu R}{\sqrt{h_H - h_1}}} - 1 \right]$$

$$\text{или } p_{max} = \frac{k}{\mu} \sqrt{\frac{h_H - h_1}{R}} \left[\left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{\mu R}{\sqrt{h_0 - h_1}}} - 1 \right].$$

Такое давление имеет место в точке пересечения кривых $p(x)$ при $x=l_n$ см. рис. 1.7.

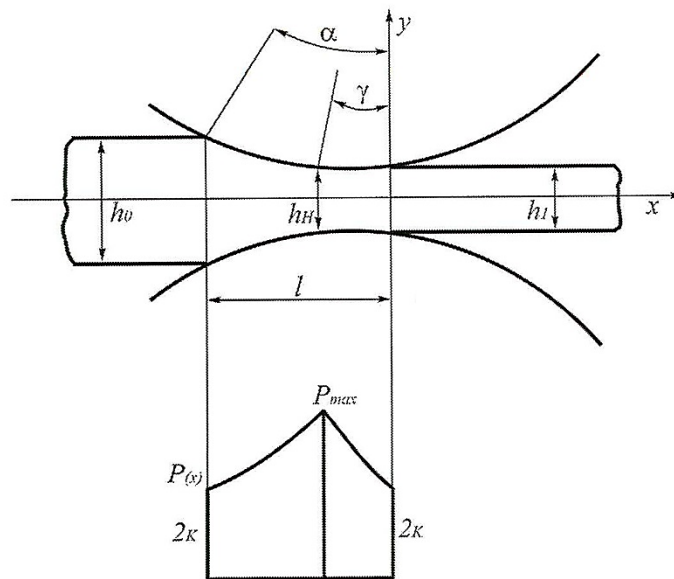


Рис. 1.7. Схема определения давления в зонах отставания и опережения согласно теории Т. Кармана (при прокатке без натяжений)

Известно много различных вариантов формул для расчётов давления (и его средней величины, см. [55-56]).

Ввиду сложности таких расчетов М. Стоун предложил определять среднее давление при прокатке по формуле

$$p = 2kn_{\sigma} = 2k \frac{\exp(\mu t) - 1}{\mu t}, \quad (1.17)$$

т.е. коэффициент напряжённого состояния равен

$$n_{\sigma} = \frac{1}{\mu t} [\exp(\mu t) - 1], \quad (1.18)$$

где $t = \frac{l}{h}$ - отношение горизонтальной проекции длины дуги захвата l к средней толщине листа $h_c = 0,5(h_0 + h_1)$, см. рис. 1.7.

Эту формулу ранее вывел Е. П. Унксов, рассмотрев осадку заготовки размерами lxh в условиях плоской деформации при законе сухого трения на контактных поверхностях [57]. Стоун предложил использовать её для прокатки и, как показали экспериментальные данные, при таких малых углах захвата, какие обычно используют при холодной прокатке, эта формула не приводит к большим погрешностям. Однако её существенным недостатком является то, что она не учитывает влияния натяжений.

М. Я. Бровман обобщил формулу Стоуна для режимов прокатки с натяжениями $\sigma_0 = \varphi_0 \cdot 2k$ и $\sigma_1 = \varphi_1 \cdot 2k$.

Эта формула имеет вид

$$n_\sigma = \frac{1}{\mu t} \{ \exp[(\mu t) \sqrt{(1 - \varphi_0)(1 - \varphi_1)}] - 1 + 0,5(\varphi_0 + \varphi_1) \}. \quad (1.19)$$

Согласно этим данным, нельзя утверждать, что n_σ и p зависят только от средней величины натяжений: $0,5(\varphi_0 + \varphi_1)$. Только при малых натяжениях, когда допустимо принять приближенно $\sqrt{(1 - \varphi_0)(1 - \varphi_1)} \approx 1 - 0,5(\varphi_0 + \varphi_1)$; « p » зависит только от величины $(\varphi_0 + \varphi_1)$.

Методы расчёта процессов прокатки с учётом упругой деформации рабочего инструмента, т.е. валков изложены в работах [55-59] и др.

При этом используется, полученное еще Г. Герцем, решение задачи о сжатии двух цилиндров с параллельными осями.

Схема сплющивания валков показана на рис. 1.8. Длина горизонтальной проекции контактной зоны увеличивается на длину отрезка x_0 , определяемого из решения теории упругости для сжатия двух цилиндров.

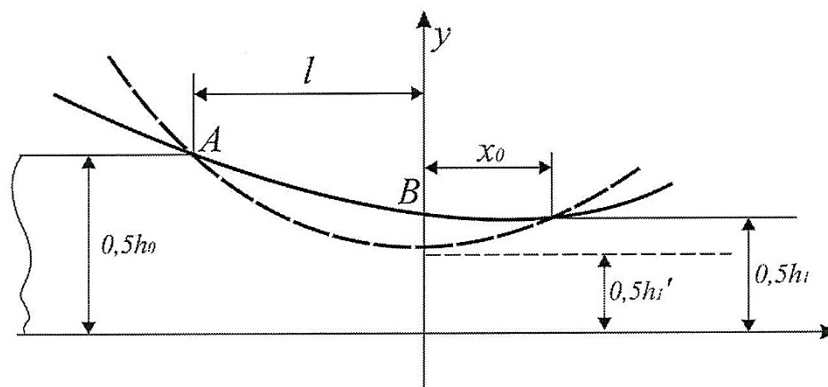


Рис. 1.8. Схема упругой деформации валков.

Длина отрезка x_0 равна [56] $x_0 = \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)}$, где Δ_1 и Δ_2 – величины сжатия, соответствующие сближению осей цилиндров,

$$\Delta_1 = 2q \frac{1 - \gamma_1^2}{\pi E_1}, \quad \Delta_2 = 2q \frac{1 - \gamma_2^2}{\pi E_2},$$

где q – удельное давление на единицу длины сжимаемых тел, E_1, E_2 – модули упругости материалов валка и проката, γ_1, γ_2 – их коэффициенты Пуассона.

В [56] приведена формула Хичкока:

$$x_0 = \frac{8(1-\gamma^2)pR}{\pi E}, \quad (1.20)$$

где p – среднее давление, γ, E – величины для материала валков.

Обычно принимают, что длина зоны контакта металла с валками возрастает не только вблизи линии В, но и вблизи А, рис. 1.8, поэтому длина зоны контакта равна

$$l = \sqrt{R\Delta h + x_0^2} + x_0. \quad (1.21)$$

Упругое сплющивание валков приводит к уменьшению фактического обжатия проката и в результате прокатки его толщина уменьшается от h_0 не до величины h'_1 (определяемой номинальным межвалковым зазором), а до величины h_1 , см. рис. 1.8. При этом всегда $h_1 > h'_1$ и существует предельная толщина проката, при которой фактическое обжатие равно нулю и прокатываемый лист имеет после деформации такую же толщину. Предельную толщину иногда определяют по формулам вида [40].

$$h_{min} = 2,17 \cdot 10^{-3} R \quad (1.22),$$

Для увеличения диапазона толщин полос, которые можно получать прокаткой, применяют валки из более жёстких материалов, чем сталь, например, из карбида вольфрама, для которого $E = (6,6 \div 6,8) \cdot 10^5 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, а также стремятся уменьшать диаметры рабочих валков, используя многовалковые прокатные станы при значительном числе промежуточных опорных валков, например, двадцативалковые станы.

1.6. Современные системы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением.

В настоящее время существует множество методик расчёта силовых параметров при прокатке полос. Классической методикой считается методика А. И. Целикова. Создаются новые методики – этот факт свидетельствует о неудовлетворённости теоретиков и практиков прокатного производства существующими методиками, о поиске новых подходов к оценке силовых параметров прокатки. Современная методика должна обеспечивать возможность расчёта не только усилия прокатки, но и точности размеров полосы, так как повышаются требования к точности размеров и плоскостности полос. Повышение точности проката – источник экономии металла и сплавов, а так же конкурентоспособность предприятия на рынке и возможность поставки продукции на высокотехнологичные производства.

Совершенствование существующих процессов прокатки, разработка и внедрение новых прогрессивных технологий возможно при использовании имитационного моделирования, без которого уже невозможно представить современное производство. В настоящее время мировой рынок готов предложить потребителям ряд программных продуктов по проектированию процессов ОМД, отличающихся универсальностью, широкими возможностями и точностью расчетов.

Преимущества применения компьютерного моделирования обеспечивают [60]:

- существенное сокращение материальных и временных ресурсов, затрачиваемых на запуск нового изделия в производство за счёт исключения проведения дорогостоящих экспериментов на металле;

- значительное повышение уровня качества проектирования и, следовательно, успеха всей технологической разработки в целом (повышение качества потребительских качеств изделия и снижение количества ошибок при принятии конкретных решений);

- повышение эффективности проектирования за счёт ускорения документооборота, а также удобство сохранения и преумножения инженерных знаний в компьютерной среде.

Анализ методов построения моделей проектируемой технологии обработки металлов давлением показывает, что при наличии современных высокопроизводительных средств компьютерной техники и разработанных ранее систем компьютерного моделирования (СКМ) по анализу деформирования инструмента и заготовки, наиболее перспективными являются конечно-элементные системы.

Большинство вычислительных систем, используемых при исследовании и проектировании технологий ОМД для моделирования деформации упругопластических, жёсткопластических, вязкопластических и вязких сред, основаны на использовании метода конечных элементов (МКЭ). Они имеют одинаковую основу – конечно-элементное расчётное ядро – процессор, методы и алгоритмы решения МКЭ для которого могут отличаться в разных СКМ. В любом случае процессор работает с высокоэффективными предпроцессорными и постпроцессорными модулями, которые обеспечивают ввод и вывод необходимой информации в виде широкого спектра разного рода расчётной и численной информации.

Заготовка при моделировании может рассматриваться как нелинейно-вязкое пластическое или вязкое тело или как упругопластическое линейно или нелинейно упрочняющееся тело. Деформирующий инструмент обычно рассматривается в виде линейной упругопластической среды. Большое значение для теории и практик ОМД является то, что краевая задача механики деформируемого твёрдого тела решается в конечно-элементной постановке для условий неизотермической деформации с возможностью задания различных условий для температуры и теплообмена, как в заготовке, так и в инструменте по отдельности.

При вводе данных в препроцессорах СКМ задаются, кроме геометрии и материалов заготовки и инструмента, начальные и граничные условия по

температуре, кинематике, силовым характеристикам деформирования, условиям граничного трения, механическим и теплофизическим свойствам материалов, точности расчётов, типа рассчитываемых параметров и характеристик процессов формоизменения и т.д.

Среди САПР (систем автоматического проектирования) для проектирования процессов ОМД наибольшее распространение получили:

1. Q-Form, разработанная российском фирмой QuantorSoft под руководством Н. В. Бибы, С. А. Стебунова, позволяет моделировать процессы обработки металлов давлением, которые используются в аэрокосмической, автомобильной, транспортной, энергетической, горнодобывающей промышленности [61]. Прокатка требует сложных теоретических расчётов для обоснования режимов деформации с целью сокращения числа проходов, надёжного расчёта энергосиловых параметров станов. Широкий диапазон скоростей прокатки на практике требует проведения исследований при соответствующих скоростях деформации. QForm V8 является оптимальной программной средой как для целей снижения затрат производства на заводах, так и для научно-исследовательских работ. Однако она обладает рядом недостатков (возможность работы только с треугольными конечными элементами, способность моделировать только плоскую и ассиметричную задачи ОМД и ряд других), которые сдерживают распространение этой САПР. Но фирма-создатель постоянно совершенствует свой продукт, что обеспечивает конкурентоспособность Q-Form не только на внутреннем, но и на мировом рынке программного обеспечения.

2. ANSYS – многоцелевая программная система, довольно популярная у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчётов в широком круге инженерных дисциплин, в том числе и технологиях ОМД [62]. Препостпроцессор ANSYS является законченным инструментом с удобным объектно-ориентированным графическим интерфейсом для создания, импорта редактирования геометрических и

сеточных моделей, поставки задач, решения и визуализации, обработки и внешнего вывода результатов. Главным недостатком этой САПР является сложность в освоении из-за большой номенклатуры решаемых задач, а также недостаточно глубокое проникновение в механизмы процессов ОМД. Следует также отметить отсутствие академической версии продукта в доступном ценовом сегменте для вузов.

3. Nastran – современная трёхмерная компьютерная система моделирования, построенная на методе конечных элементов, позволяющая решать задачи штамповки,ковки, прокатки и т.п. Программное обеспечение Nastran позволяет осуществлять расчёт напряженно-деформированного состояния, запасов прочности, исследовать установившиеся и неустановившиеся динамические процессы. Система имеет встроенные в алгоритм различные модели пластичности материала, базу данных по характеристикам конкретных материалов, а также возможность моделировать практически всех материалов, в том числе композитных.

4. Deform-3D. Одна из наиболее прогрессивных вычислительных систем ОМД на сегодняшний день. Она позволяет рассчитывать как формоизменение, температурные, энергосиловые характеристики деформации заготовки, так и напряженно-деформированное, силовое и температурное состояние инструмента. Расчеты проводятся для граничных условий, моделирующих температурные, кинематические и силовые характеристики всех видов нагрева и всех типов кузнечно-штамповочного и прессового оборудования. К достоинству Deform-3D можно отнести сравнительно небольшие затраты на изучение данного программного комплекса, что обусловлено его специализацией на процессах ОМД.

5. ABAQUS – программный комплекс для анализа широкого спектра сложных линейных и нелинейных инженерных задач, в том числе и процессов ОМД. Данный продукт позволяет рассчитывать сложное нелинейное напряженно-деформированное состояние модели, оценивать прочность и устойчивость с учётом нагружения. К недостаткам данного

комплекса можно отнести достаточно большое время, необходимое для полного освоения программы.

Кроме рассмотренных ВС для ОМД разработан ряд других систем, в частности: Splen, ALPID, ANTARES, MARC/AutoForge, SuperForge и других, пока не получивших широкого распространения.

Помимо представленных выше программных комплексов, предназначенных для решения широкого спектра задач, развиваются и узкоспециализированные программные системы, предназначенные для моделирования процесса прокатки листовых станов. Так, например, был разработан и создан программный продукт, позволяющий вести расчёт проката стальных полос [63-64]. Достоинством данного продукта является интуитивно понятный интерфейс, широкие возможности по расчёту энергосиловых параметров прокатки. Однако данный продукт имеет ряд недостатков: позволяет моделировать прокатку только стальных полос, не учитывает характер профилировки валков и, как следствие, не позволяет оценить разнотолщинность на выходе из стана.

Анализ показывает, что существует большое разнообразие САПР, позволяющих моделировать обработку металлов давлением, как в рамках программных комплексов широкого профиля задач, так и при помощи узкоспециализированных программ. Это фактически вывело из практики конструкторов, проектировщиков и технологов на всех ведущих предприятиях, старые механические чертёжные приспособления, а также весь процесс черчения вручную; заменило проведение прочностных, динамических и технологических расчётов и испытаний имитационным математическим моделированием.

Выводы по главе 1

1. Изложенное позволяет сделать вывод, что повышение качества тонколистового проката требует совместного комплексного решения задачи регулирования и продольной, и поперечной разнотолщинности. Необходимо

обеспечить точность размеров межвалкового зазора, а также, за счёт выбора жёсткости клетки, её предварительного нагружения и регулирования в процессе деформации, стабильность величины межвалкового зазора и размеров прокатываемого листа. Важно обеспечить стабильность конфигурации прокатанного листа, в котором неравномерность деформации по ширине создаёт систему напряжений растяжения и сжатия, при этом в тех слоях, где действуют напряжения сжатия, возможны потеря устойчивости и образование волн, что приводит к браку продукции.

2. Процесс потери устойчивости изучен недостаточно и при его анализе используют формулы теории упругости, применимые только в области упругих деформаций. Недостаточно изучено и влияние возможных отклонений параметров прокатки на величины, характеризующие потерю устойчивости деформируемого листа.

3. На основании изучения процессов пластической деформации, выполненных советскими, российскими учёными, а также учёными Франции, Германии, Англии, США, Японии, разработана теория пластичности и методы расчёта напряжений и деформаций в процессах прокатки.

4. Процесс листовой прокатки глубоко изучен. На основании работы Т. Кармана выполнено значительное количество работ с использованием приближённых уравнений равновесия и условия текучести. Получены расчётные формулы для различных условий трения на контактных поверхностях.

5. Однако, очень мало работ, посвящённых анализу точности предложенных формул. Важно провести такой анализ не с целью определить близость результатов к какой-то определённой формуле, а определить каков возможный интервал изменения результатов расчёта, с учётом того, что все величины входящие в расчётные формулы, не являются постоянными, а могут изменяться, являясь не точными, а лишь приближёнными.

6. Для более тонких листов деформация с неравномерной по ширине вытяжкой приводит к потере устойчивости и образованию

волнистости или коробоватости. Поэтому при прокатке тонких листов необходимой является разработка калибрующих устройств и способов деформации, позволяющих повысить точность проката.

7. Системы автоматизированного проектирования процессов ОМД достаточно широко применяются в университетах, научно-исследовательских организациях и на производстве. Анализ показывает, что одни из них являются узкоспециализированными программными продуктами, а другие, ориентированные на решение широкого спектра задач, являются весьма сложными для освоения и применения. Существует потребность в создании универсальной автоматизированной системы проектирования процесса прокатки полосы, обеспечивающей возможность имитировать процесс прокатки для разных (по количеству валков, клетей, способу прокатки) типов станов, с возможностью выбора металла конкретной марки, а также добавления новых по характеристикам металлов, позволяющей рассчитывать силовые, геометрические и механические характеристики получаемой продукции на каждом этапе работы программы.

ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УСИЛИЙ ПРОКАТКИ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

2.1. Проектирование, создание и исследование микропроцессорной системы контроля усилий прокатки на лабораторном двухвалковом листовом стане

Оптимизация технологических режимов прокатки полос и листов на промышленных прокатных станах, как правило, требует проведения предварительных исследований. Экспериментальные исследования показателей листовой прокатки на лабораторных станах позволяют в первом приближении реализовать физическое моделирование процесса деформации металла на промышленных агрегатах, обеспечивая экономию затрат на эксперимент в заводских условиях. Кроме того, именно лабораторные эксперименты позволяют с большой точностью установить закономерности взаимосвязи между входными и выходными переменными, характеризующими процесс прокатки. При этом лабораторный стан должен быть оснащён современными техническими средствами контроля технологических параметров.

Листопрокатный двухвалковый стан 150x235 был установлен в 1973 году, по инициативе известного учёного, крупного организатора высшего образования в СССР профессора И.К. Суворова, на кафедре обработки металлов давлением ВЗПИ, впоследствии МГОУ, который в конце 2012 года вошел в состав Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), а лаборатория прикреплена к кафедре «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына». На рисунке 2.1 показан фрагмент лаборатории и прокатный стан 150x235, с установленной системой контроля усилий прокатки.

Модернизация двухвалкового стана была проведена в два этапа. На первом этапе, при технической помощи Московского завода по обработке

цветных металлов, были проведены ремонт и модернизация валкового узла, рабочие валки были переточены и отшлифованы. На втором этапе, разработано техническое задание и, при участии ЗАО ИТЦ «КРОСС», выполнен проект оснащения стана микропроцессорной системой контроля усилия прокатки под левым и правым нажимным винтами. Функциональная схема системы приведена на рисунке 2.2.



Рис. 2.1. Фрагмент лаборатории и прокатный стан 150x235 с установленной системой контроля усилий прокатки.

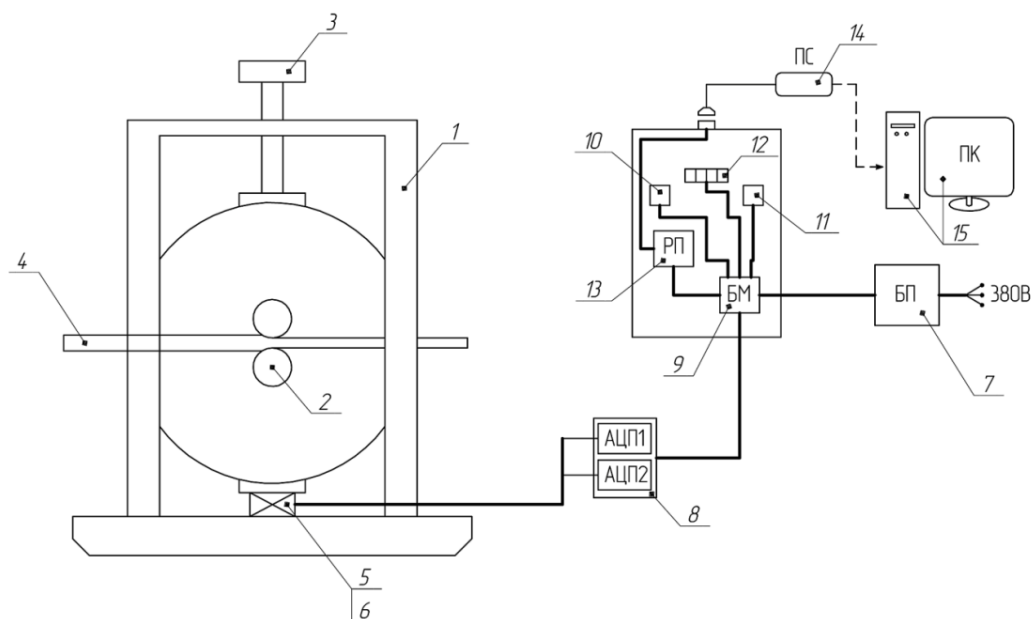


Рис. 2.2. Функциональная схема микропроцессорной системы контроля усилия прокатки на лабораторном стане 150x235.

На рис. 2.2 показаны: 1 – станина стана; 2 – валки; 3 – нажимной механизм; 4 – прокатываемая полоса; 5, 6 – датчики усилия прокатки под правым и левым нажимными винтами; 7 – блок питания; 8 – АЦП1(2) – блок АЦП; 9 – микропроцессор; 10, 11 – цифровые индикаторы усилий прокатки под левым и правым нажимными винтами; 12 – цифровой индикатор суммарного усилия прокатки; 13 – регистратор параметров; 14 – прибор считывания информации; 15 – персональный компьютер.

Питание системы контроля осуществляется от блока питания (БП) 7 постоянного тока; выходное напряжение 25 В, выходной ток 0,5 А, потребляемая мощность не более 5 Вт. БП запитывается, как и двигатель прокатного стана, от сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В. Измерители (датчики) усилия прокатки 5, 6 установлены на подушках верхнего валка под левым и правым нажимными винтами прокатного стана. Измерители усилия прокатки преобразуют сигналы, поступающие с тензорезисторных датчиков, установленных на датчиках 5 и 6. Сигналы с датчиков 5 и 6 поступают в блок АЦП, который обеспечивает преобразование аналоговых сигналов в цифровые. Хранение идентификационной информации, обработка и регистрация оперативной информации (изменение усилия прокатки по длине полосы при прокатке) производится микропроцессором 9, соединённым с регистратором параметров 13. Регистратор параметров обеспечивает хранение идентификационной информации и накопление информации долговременного хранения. Сигналы усилий прокатки поступают на цифровые индикаторы 10–12, на которых отображаются текущее (в процессе прокатки полосы), а затем среднее значение усилий прокатки в кН под левым, правым нажимными винтами и их суммарная величина. Информация с регистратора 13 считывается прибором 14 с памятью 512 Кб. Эта информация переносится на ПК 15 через СОМ-порт для дальнейшей обработки. Обработка информации и формирование отчёта о параметрах

прокатки производится с использованием разработанного программного обеспечения.

Программа, обслуживающая прибор считывания информации усилий прокатки 14, может работать на любом персональном компьютере с установленной операционной системой семейства WINDOWS. Программа обработки данных, предназначенная для анализа информации с измерителей (датчиков) усилий прокатки, имеет простой и интуитивно понятный интерфейс. Все основные управляющие кнопки расположены в верхней части окна программы. Множество подсказок позволяет пользователю быстро освоить работу с программой. Система автоматизированного контроля усилий прокатки позволяет формировать отчёты, что необходимо при проведении экспериментов по прокатке полос или по их завершении. Возможно получение отчёта об измерении усилий прокатки за определённый период времени. С помощью кнопки «HTML» можно сохранить отчёт регистратора усилий прокатки в виде файла формата htm. Такой файл может быть открыт для просмотра и печати с помощью программы, поддерживающей данный формат (например, Microsoft Word или Internet Explorer). На рис. 2.3 представлен вид рабочего окна регистратора параметров работы стана.

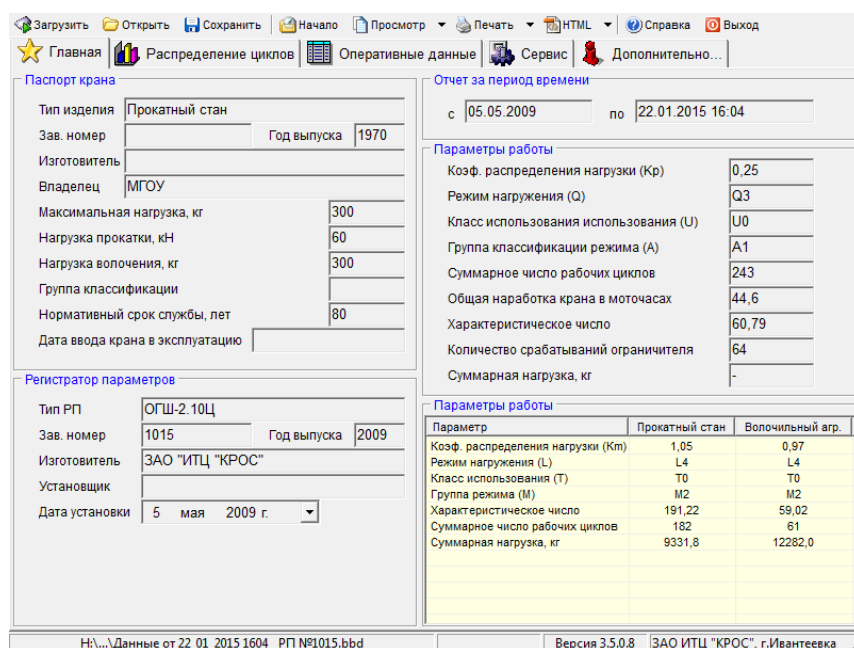


Рис. 2.3. Интерфейс программы регистратора параметров работы стана.

Зарегистрированные и полученные после автоматического расчёта значения усилия прокатки могут быть выведены на печать в виде отчёта результатов опытной прокатки (кнопка «ПЕЧАТЬ») с предварительным просмотром (кнопка «ПРОСМОТР»). Печать результатов можно выполнять на любом принтере. Отчёт о показателях усилий прокатки включает данные об изменениях во времени, средние значения по длине полосы, максимальные значения, нагрузки в процентах на правом и левом датчике усилия прокатки (рис. 2.4).

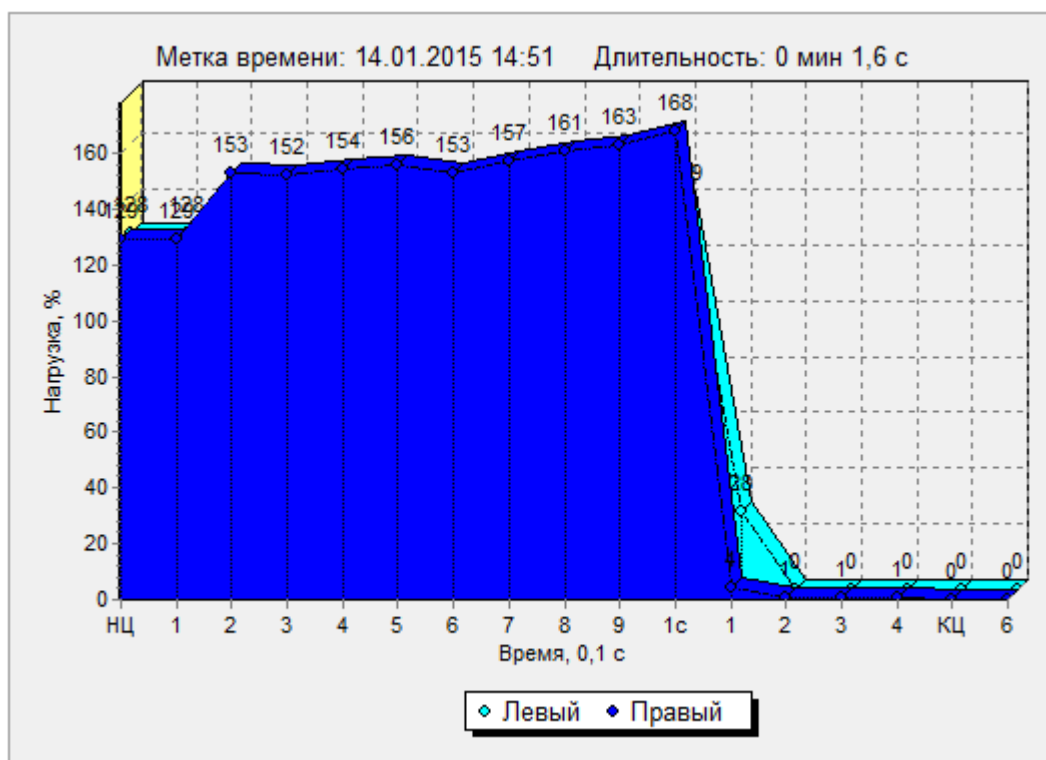


Рис. 2.4. Отображение оперативной информации по распределению нагрузки во времени.

Созданная микропроцессорная система контроля усилия прокатки на стане 150x235 позволяет исследовать влияние различных возмущающих и управляющих воздействий на формирование деформационных и силовых показателей прокатки полос, контролировать усилие прокатки с точностью до 0,1 кН. Регистрация сигналов с датчиков осуществляется с частотой в 0,1 секунду.

Опыт внедрения микропроцессорной системы контроля усилий прокатки может быть полезен при разработке проектов автоматических систем измерения на прокатном оборудовании, а также в качестве примера модернизации прокатных станов.

2.2. Определение величины сопротивления деформации в процессах прокатки.

Как было указано выше, сопротивление деформации – это напряжение, необходимое для реализации пластической деформации в условиях простейшего напряжённого состояния, которым является такое состояние, при котором только одна из шести компонент тензора деформации не равна нулю.

Эта компонента является обычно или нормальным напряжением растяжения-сжатия: σ или касательным напряжением τ в условиях кручения. Для того, чтобы эти компоненты тензоров были бы точно связаны с усилием (при растяжении) или с крутящим моментом (при кручении), образцы должны быть достаточно длинными – при растяжении и кручении, а при сжатии следует использовать эффективные смазки, чтобы исключить влияние трения на контактных поверхностях (или хотя бы уменьшить его), в противном случае возникает объёмное напряжённое состояние и данные испытаний оказываются существенно завышенными.

Величина сопротивления металла деформации (СМД) зависит при холодной деформации от степени деформации и увеличивается при упрочнении металла, см. [65-69].

Причём такие характеристики, как величины СМД, не определены как некоторые точные числа, а для каждого металла (сплава) их следует понимать, как некоторые интервалы (интервалы равной вероятности), - т.е. такие интервалы, в пределах которых каждое число имеет равную вероятность быть реализованным в процессе деформации. Эти вопросы были рассмотрены в [7, 40] и далее развиты в работах [50, 69-80].

Однако желательно иметь возможность простого контроля этой величины. Важно установить связи между различными механическими свойствами, чтобы иметь возможность определять реальные характеристики металлов, сплавов в производственных условиях наиболее простыми способами, например, по величинам твёрдости прокатываемых материалов.

Это тем более важно сейчас, когда многие сплавы и литые заготовки получают из металлического лома с широкими колебаниями и химического состава, и механических свойств.

Традиционные и новые (неразрушающие) методы контроля механических свойств металлов и сплавов позволяют определять механические свойства проката, а очевидные преимущества неразрушающего контроля позволяют, во-первых, сократить отходы производства, а во-вторых, повысить точность и оперативность определения этих показателей.

С целью изучения этого вопроса был проведён цикл экспериментальных исследований.

Опыты проводили в лаборатории кафедры «Металлургия, металловедение и обработка металлов давлением» (ММиОМД) Московского государственного открытого университета им. В.С. Черномырдина (МГОУ) (ныне кафедра «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына» Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)), а также в лабораториях Московского завода по обработке цветных металлов (МЗ ОЦМ) и Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»).

В качестве заготовок под экспериментальную прокатку использовали образцы толщиной 2,0-2,75 мм, шириной 20 мм, длиной 150 мм из промышленных партий меди и латуни, прокатанных на Кольчугинском и Кировском заводах ОЦМ. Исследовали 36 образцов, из которых 9 медных, 9 свинцовой латуни и 18 образцов латуни марки Л63.

Химический состав определялся в лабораториях МЗ ОЦМ и НИТУ «МИСиС» методом рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. В

результате были уточнены химические составы марок металлов и сплавов опытных образцов: медь МЗ – 99,53% Cu, свинцовая латунь ЛС59-1 – 58,39% Cu, 1,7% Pb, 38,24% Zn, латунь Л63 – 62,6% Cu, 34,5% Zn, соответствующие ГОСТ 859-2001 и ГОСТ 15527-2004. Прокатку образцов проводили на лабораторном двухвалковом стане 150x235, оборудованном отечественной микропроцессорной системой измерения усилий прокатки. Система позволяет измерять усилия прокатки по длине полосы и вычислять их средние значения под левым и правым нажимными винтами, вычислять суммарное их значение, отображать значения на циферблатах приборов, передавать собранную информацию на вход персонального компьютера, а также формировать отчёт по последовательности испытаний и распечатывать результаты измерений.

Фотографии прокатного стана, использованного для проведения экспериментального исследования, представлены на рис. 2.5 и 2.6 (на рис. 2.5 показаны индикаторы микропроцессорной системы контроля усилия прокатки).



Рис. 2.5. Измерительная аппаратура, установленная на стан 150x235.



Рис. 2.6. Общий вид лабораторного двухвалкового стана 150x235.

До и после прокатки измеряли толщину в ряде сечений по длине образцов с точностью $\pm 0,01$ мм. Образцы по 3-4 штуки прокатывали с разной степенью обжатия в диапазоне от 4% до 26%. После каждой прокатки были произведены замеры толщины и ширины образцов, а также записаны усилия прокатки, измеренные и усреднённые электронным измерителем на стане.

На Московском заводе обработки цветных металлов из прокатанного металла были вырезаны образцы, необходимой формы по ГОСТ 1497-84, для проведения испытаний на растяжение. Опытные образцы были испытаны на прочность и пластичность на универсальной разрывной машине 1958У-10. Затем образцы были зачищены и протравлены, для обеспечения большей точности при проведении испытаний на твёрдость материала. Измерение твёрдости проводилось на твёрдомерах с наконечником в форме стального шарика по шкале Роквелла. Полученные результаты затем были переведены

в единицы твердости по шкале Бринелля. Основные результаты измерений деформационных показателей и механических свойств сгруппированы и представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Деформационные показатели и механические свойства прокатанных образцов из меди и латуни.

№ п/п	Материал образца	Исходная толщина h_0 , мм	Обжатие ε , %	Толщина после прокатки h_l , мм	σ_s МПа	σ_B МПа	δ , %	Твёрдость	
								HRB	HB
1	МЗ	2,00	5,5	1,89	193,16	268,75	22	30,0	58,08
2			7,5	1,85	184,47	261,69	18	32,5	62,19
3			14,5	1,73	232,06	292,40	12	46,0	84,42
4			15,0	1,71	242,76	294,12	14	45,0	82,77
5			25,0	1,50	259,26	332,86	9	48,6	88,69
6			25,5	1,49	282,31	335,57	9	49,8	90,59
7	ЛС59-1	2,03	3,9	1,99	341,88	423,28	8	65,8	116,9
8			3,9	1,99	345,95	423,28	9	65,2	116,0
9			11,3	1,80	352,73	418,87	6	71,3	127,9
10			11,3	1,80	352,73	423,28	8	72,1	129,9
11			25,6	1,52	383,69	441,50	1	71,9	129,4
12			26,0	1,50	380,95	444,44	2	72,4	130,7
13	Л63	2,75	10,7	2,44	329,32	372,13	50	56,8	102,2
14			11,1	2,42	327,38	370,37	50	51,2	92,9
15			17,1	2,29	348,09	403,79	40	69,1	122,8
16			17,5	2,27	360,11	405,57	36	70,2	125,3
17			24,4	2,08	381,56	427,35	22	75,7	138,5
18			24,7	2,08	387,24	429,41	21	75,5	138,1

В таблице 2.1 приведены толщины образцов до h_0 и после h_l прокатки, а также значения сопротивления деформации σ_s и предела прочности σ_B , относительное обжатие ε , относительное удлинение δ образцов при

испытании на разрывной машине, а также твёрдость по шкале Роквелла HRB и по шкале Бринелля HB после деформации металла.

При холодной прокатке металлов и сплавов величина сопротивления металла деформации σ_s зависит от величины суммарного относительного обжатия полосы от отожжённого (начального) до рассматриваемого состояния и условий деформирования металла. Большой объём экспериментальных исследований упрочнения (наклепа) различных металлов показывает, что величина σ_s при холодной прокатке определяется зависимостью [18, 19].

$$\sigma_s = A + B\varepsilon^D \quad (2.1),$$

где коэффициенты A , B , D характеризуют упрочнение данного металла или сплава.

Их определяют экспериментально, а величина деформации равна:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\%.$$

На практике, при непрерывной или реверсивной холодной прокатке, поиск значений коэффициентов в уравнении (2.1) для определения величины сопротивления металла деформации σ_s осложняется тем, что начальная толщина ненаклёпанной полосы иногда неизвестна. Разработан метод решения этой задачи, при котором следует составить и решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_{s_0} = A \\ \sigma_{s_1} = A + B\varepsilon_1^D \\ \sigma_{s_2} = A + B\varepsilon_2^D \\ \sigma_{s_3} = A + B\varepsilon_3^D \end{cases} \quad (2.2)$$

где σ_{s_0} – сопротивление деформации ненаклёпанного металла, а σ_{s_1} , σ_{s_2} , σ_{s_3} величины СМД после деформации обжатиями ε_1 , ε_2 , ε_3 .

Далее принимая

$$\varepsilon_i = \frac{x - h_i}{x} \cdot 100\%, \quad (i = 1, 2, 3),$$

где x – толщина недеформированного металла, определяем величины σ_{s_1} , σ_{s_2} и σ_{s_3} при различных значениях h_1, h_2, h_3 .

После этого мы можем определить интересующие нас коэффициенты методом замены переменных, наряду с начальной толщиной образцов.

По характеру составленной системы уравнений (2.2) видно, что данная система при наличии четырёх уравнений имеет три неизвестных коэффициента (A, B, D). Однако данная избыточность позволяет упростить процесс вычисления и уменьшить погрешность при операциях логарифмирования и возведения в степень дробных значений. Можно решать данную систему и при отсутствии известного сопротивления металла деформации в исходном (ненаклепанном) состоянии, представляя относительную деформацию в приращениях в виде $\varepsilon_1^D - \varepsilon_2^D$, таким образом, начальные коэффициенты исключаются из расчётов и играют лишь косвенную роль. При подобных построениях, необходимым условием является значительная разница между величинами степени деформации (различных образцов), так как при малых различиях результатов существенно возрастает погрешность вычислений (и сложность расчётов). С учётом же данного условия, появляется возможность определять тип прокатываемого металла при известных параметрах обжатия и сопротивления деформации.

В ходе вычислений на основании системы уравнений (2.2) были получены коэффициенты для расчёта величины сопротивления деформации σ_s в МПа при холодной прокатке полос из меди МЗ и латуни Л63 и ЛС59-1, см. таблицу 2.2. Обработка результатов измерений позволила с достоверностью 0,99 определить доверительные интервалы степени деформации ε , полученных зависимостей для меди МЗ от 2,96 до 31,23%, для латуни Л63 от 8,87 до 26,64% и для латуни ЛС59-1 от 1,41 до 31,51%. На основании полученных регрессионных уравнений построены графики зависимости сопротивления деформации металлов от обжатия при прокатке,

показанные на рис. 2.7, где символами показаны экспериментальные данные. Графики $\sigma_s(\varepsilon)$ характеризуют упрочнение данных металлов и сплавов.

Таблица 2.2

Коэффициенты A , B , D для расчёта по уравнению (2.1) сопротивления деформации σ_s (МПа) для меди и латуней при холодной прокатке, а также коэффициент достоверности аппроксимации R^2 .

Марка металла	A	B	D	R^2
МЗ	77	54,3	0,42	0,981
Л63	159	39,6	0,56	0,982
ЛС59-1	192	118,6	0,13	0,897

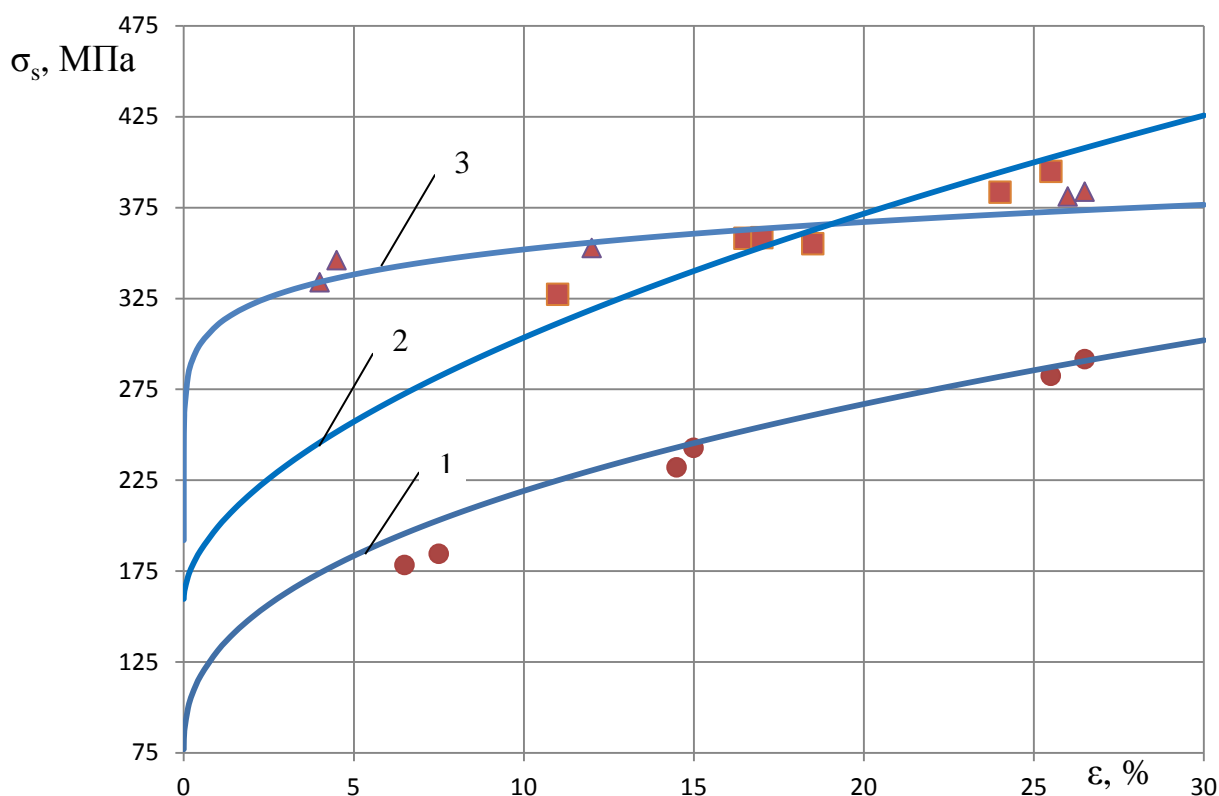


Рис. 2.7. Зависимость сопротивления деформации σ_s от степени деформации ε меди и её сплавов при прокатке: 1 – медь МЗ; 2 – латунь Л63; 3 – латунь ЛС59-1.

Полученные зависимости $\sigma_s(\varepsilon)$ не противоречат, а уточняют опытные данные, приведённые ранее в работах [79-81], при деформации меди МЗ и латуни Л63. Кроме того, для свинцовой латуни ЛС59-1, установлены

закономерности влияния степени обжатия на сопротивление деформации сплава и определены коэффициенты A , B , D , позволяющие с использованием уравнения (2.1) рассчитывать изменение сопротивления металла деформации сложного медного сплава при прокатке.

Результаты экспериментального исследования, приведённые в таблице 2.1, позволяют установить зависимости сопротивления металла деформации σ_s от твёрдости НВ для прокатанных образцов из меди МЗ и латуней Л63 и ЛС59-1. После обработки экспериментальных данных методом математической статистики, получены уравнения (наибольшее согласование с экспериментом показала линейная аппроксимация) для меди МЗ – уравнение (2.3), латуни ЛС59-1 – уравнение (2.4) и латуни Л63 – уравнение (2.5):

$$\sigma_s = 2,609 \cdot HB + 31,73 \quad (R^2 = 0,884), \quad (2.3)$$

$$\sigma_s = 2,572 \cdot HB + 39,33 \quad (R^2 = 0,696), \quad (2.4)$$

$$\sigma_s = 1,355 \cdot HB + 197,01 \quad (R^2 = 0,880), \quad (2.5)$$

где НВ – твердость по Бринеллю, в МПа.

На основании полученных уравнений, с учётом экспериментальных данных, построены зависимости сопротивления деформации от твёрдости для меди МЗ (рис. 2.8), латуни ЛС59-1 (рис. 2.9) и Л63 (рис. 2.10). Из построенных графиков видно, что после прокатки величины твёрдости и сопротивления деформации могут быть связаны линейными зависимостями.

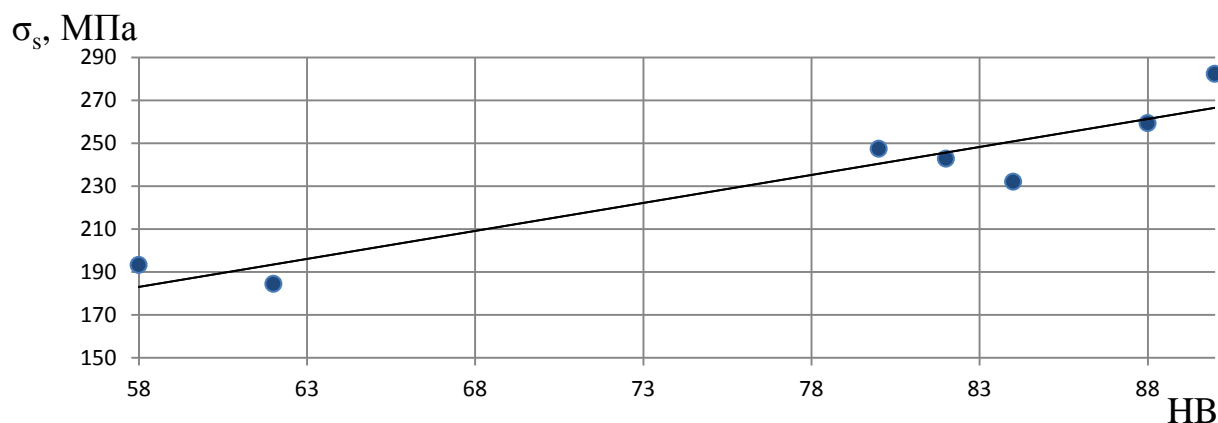


Рис. 2.8. Зависимость сопротивления деформации меди МЗ от ее твёрдости при прокатке.

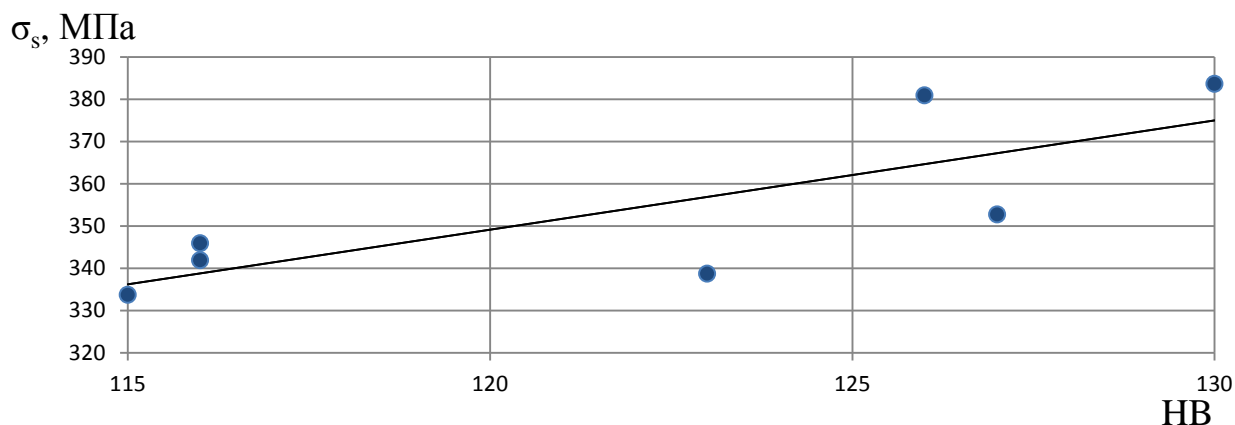


Рис. 2.9. Зависимость сопротивления деформации латуни ЛС59-1 от ее твёрдости при прокатке.

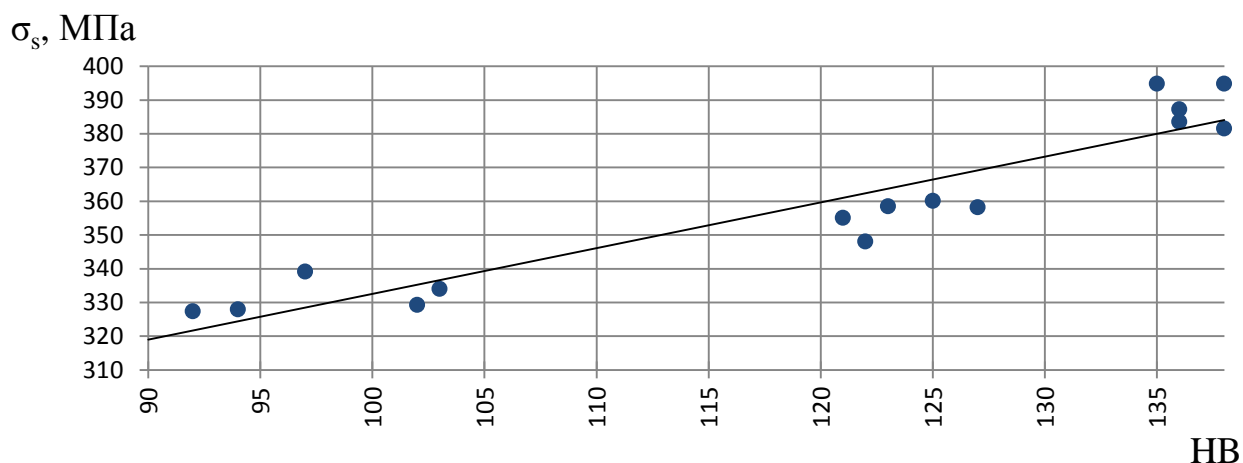


Рис. 2.10. Зависимость сопротивления деформации латуни Л63 от ее твёрдости при прокатке.

Использование полученных регрессионных уравнений связи сопротивления металла деформации и твёрдости для меди МЗ и латуней ЛС59-1, Л63 позволит шире применять результаты неразрушающего контроля качества металла в системах автоматизированного проектирования процессов холодной прокатки полос и лент.

2.3. Математическое моделирование процесса холодной листовой прокатки.

Системы, способные имитировать процесс листовой прокатки с учётом особенностей технологии состава и характеристик оборудования, позволяют

осуществить качественный переход от традиционных методов контроля проката к неразрушающим методам. Также они позволяют моделировать ход непрерывной прокатки металла без необходимости перенастройки режимов прокатки станов в реальных условиях

При построении математической модели в первую очередь необходимо установить, какие стороны исследуемого процесса она должна моделировать. Для решения задачи о выборе оптимального режима прокатки необходимо располагать чёткой математической моделью зоны деформации полосы, т.е. иметь аппарат расчёта давления металла на валки, мощности прокатки и опережения полосы в зависимости от обжатия. Данные модели достаточно широко описаны в литературе (например [18,58,69]).

При выделении тонкого элемента размерами $u dx$ и усреднении напряжения σ_x по толщине полосы (что допустимо для тонких полос), можно получить приближенное уравнение равновесия

$$d(\sigma_x y) + p dy \pm 2\tau dx = 0, \quad (2.6)$$

(знак плюс перед 2τ соответствует зоне опережения, а минус – зоне отставания).

Приняв, следуя идее Т. Кармана, приближённое условие пластичности в виде

$$\sigma_y - \sigma_x = 2k \quad (2.7),$$

где k – предел текучести при деформации сдвига, ($2k$ – предел текучести при растяжении-сжатии в условиях плоской деформации), можно при малых углах захвата α , заменить σ_y на давление p . Обозначив, далее $q = -\sigma_x$ и, записав (2.7) в виде $p + q = 2k$, примем предел текучести постоянным и равным его усреднённой величине, тогда

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2k}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{2\tau}{y}. \quad (2.8)$$

Краевые условия при $x = 0$, $p = 2k_1 - \sigma_1$, и при $x = l$, $p = 2k_0 - \sigma_0$, где k_1, k_0 – величины k , при $x = 0$ и $x = l$, а σ_1 и σ_0 – напряжения переднего и заднего натяжений.

При законе «сухого трения» схема распределения давления p и силы трения τ показана на рис. 2.11, см. [32,33,81].

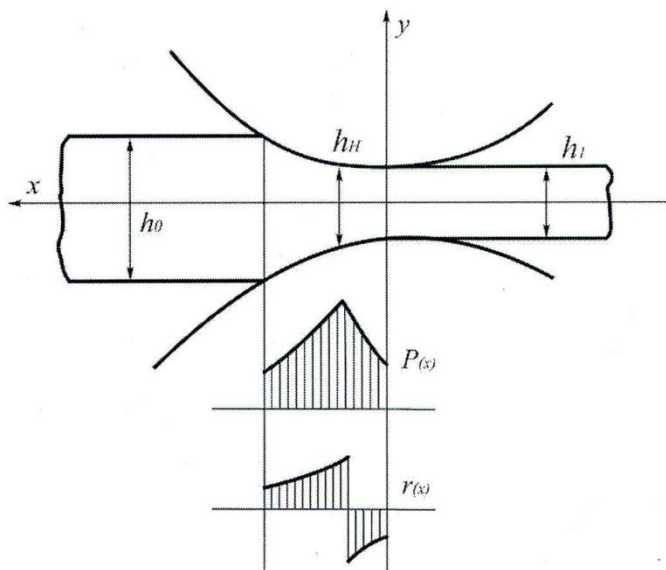


Рис. 2.11. Схема изменения удельного давления и сил трения при $\tau = \pm\mu p$.

Длину горизонтальной проекции зоны деформации примем, равной $l = \sqrt{R\Delta h}$, где $\Delta h = h_0 - h_1$ – обжатие, h_0, h_1 – толщина полосы на входе и на выходе из зоны деформации.

Схема изменения давления иллюстрируется рис. 2.11, где показано, что две линии $p(x)$ пересекаются в нейтральном сечении, где скорость листа V равна скорости валка V_b . Скорость выхода листа из валков выше, чем V_b и равна

$$V = V_b \frac{h_H}{h_1} = V_b(1 + S),$$

а опережение $S = 100 \left(\frac{h_H}{h_1} - 1 \right)$ (в %).

Различные методы интегрирования уравнения (2.8) приведены в литературе [53, 57, 65], при этом используются различные формулы для определения сил трения.

В данной работе использован способ Рунге–Кутта, причем интегрирование ведётся для зоны опережения и зоны отставания, а точка

пересечения получающихся кривых $p(x)$ определяет положение нейтрального сечения, в котором напряжения трения меняют знак, см. [53-56].

Усилии определяли по формуле

$$P = b \int_0^\alpha p \cos \theta R d\theta + b \int_\theta^\alpha \tau R \sin \theta d\theta - b \int_0^\theta \tau R \sin \theta d\theta ,$$

где θ – угол, соответствующий нейтральному сечению, b – ширина листа. Но при холодной прокатке углы θ и α малы, обычно меньше $5-8^\circ$, поэтому влиянием касательных напряжений можно пренебречь и принять

$$P = b_0 \int_0^\alpha p R d\theta , \quad (2.9)$$

где b_0 – ширина проката.

Момент прокатки для кругового цилиндра можно определить по формуле

$$M = b_0 \int_0^\alpha \tau R^2 d\theta = b_0 \left[\int_\theta^\alpha \tau R^2 d\theta - \int_0^\theta \tau R^2 d\theta \right] , \quad (2.10)$$

но при холодной деформации надо учитывать упругую деформацию валков, при этом радиус изменяется и не равен первоначальной величине R , (обозначим его R_1).

Момент прокатки равен

$$M = M_\tau + M_R ,$$

где M_τ – момент от действия касательных напряжений, а M_R – момент от действия нормальных напряжений, возникающих из-за упругой деформации валка.

$$\begin{aligned} M_\tau &= b_0 \int_\theta^\alpha \tau R_1^2 d\theta - b \int_0^\theta \tau R_1^2 d\theta , \\ M_R &= \frac{b_0}{R_1} \left[\int_0^\alpha p \left(\theta - \frac{\alpha}{2} \right) R_1 d\theta - \int_0^\theta p \left(\theta - \frac{\alpha}{2} \right) R_1 d\theta \right] . \end{aligned} \quad (2.11)$$

При расчётах методом Рунге-Кутты интегралы определяли методом трапеций с концевой поправкой, равной

$$\delta = \frac{h}{12} \left[\frac{dp(C_1)}{dx} - \frac{dp(C_2)}{dx} \right] ,$$

где C_1, C_2 – конечные точки интервала интегрирования.

При выполнении расчётов форму контактной поверхности принимают, обычно следуя одному из трех вариантов:

а) окружность с уравнением

$$x^2 + \left(R - \frac{h}{2} + \frac{y}{2}\right)^2 = R^2$$

или $y = h_1 + (\sqrt{R^2 - x^2} - R)$, откуда следует

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}};$$

б) парабола $y = h_1 + \frac{\Delta h}{l} x^2$, при этом $\frac{dy}{dx} = \frac{2\Delta h}{l} x$;

в) и прямая (хорда) с уравнением

$$y = h_1 + x \frac{\Delta h}{l}, \text{ когда } \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta h}{l}.$$

В расчётах принимают одно из двух допущений о характере упрочнения (наклёпа) материала прокатываемой полосы:

а) наклёп, упрочнение отсутствует и предел текучести равен среднему арифметическому, т.е. величине

$$k = 0,5(k_0 + k_1) \quad (2.12),$$

б) либо предел текучести равен средней величине

$$k = \frac{1}{l} \int k(x) dx \quad (2.13),$$

(при этом необходимо принять какую-то определённую функцию $k(x)$, например по данным упрочнения материала проката).

В разработанной программе расчёта предусмотрена возможность использования любого из указанных допущений.

Сплющивание валков в разработанной программе рассчитывается методом итераций с применением формулы Хичкока

$$R_i = \left(1 + \frac{P_{i-1}}{c \cdot \Delta h}\right), \quad (2.14)$$

$$c = \frac{\pi \cdot E}{16 \cdot (1 - \nu^2)},$$

где R_i – радиус валка в i -ой итерации; P_{i-1} – усилие прокатки в предыдущей итерации, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона материала валка.

Сходимость процесса итераций в процессе вычислений определяется по сходимости ряда ΔL . Член этого ряда имеет вид

$$\Delta L = L_{i-1} - L_i, \quad (2.15)$$

где L_{i-1} и L_i – длина горизонтальной проекции дуги захвата в предыдущей и текущей итерации по сплющенной дуге.

Если на каком-либо шаге итерации условие $\frac{L_i}{L_{i-1}} < 1$ не выполняется, то это значит, что рассчитываемый режим находится в состоянии «предела прокатываемости» и клеть из-за больших деформаций валка не может прокатать полосу с заданным обжатием Δh .

В построенной модели учитываются следующие режимы процесса прокатки:

- нормальный режим, когда нейтральное сечение находится между входом и выходом из зоны деформации;
- волочение, когда нейтральное сечение находится перед входом в зону деформации и вся зона деформации является зоной опережения. Это говорит о том, что избыточное переднее натяжение проволакивает полосу через валки. При волочении, все точки поверхности листа в зоне деформации имеют скорость больше скорости поверхности валка;
- пробуксовка, когда нейтральное сечение находится за выходом из зоны деформации и вся зона деформации является зоной отставания. Это говорит о том, что силы трения на контакте полосы с валком недостаточны для того, чтобы прокатать полосу;
- предел прокатываемости, когда из-за больших деформаций валка полоса не может быть прокатана с заданным обжатием.

Методика расчета поперечной разнотолщинности рассмотрена в [82,83]. Прогиб одного опорного валка четырёхвалковой клетки на длине бочки равной L от действия изгибающего момента и поперечных сил по А. И. Целикову

$$y = \frac{Y}{3\pi E D_0^2} \left[\frac{12(L+2c)L^2 - 7L^3}{2D_0^2} + 4L \right], \quad (2.16)$$

где $a=L+2c$ – расстояние между серединами опор валка, D – диаметр валка, E – модуль упругости. Прогиб одного рабочего валка по длине бочки считается таким же, а двух валков на ширине листа b , который можно отождествить с поперечной разнотолщиной полосы, будет

$$\delta h_b = \frac{2yb^2}{L^2}, \quad (2.17)$$

если считать профиль полосы очерченным дугами парабол. Определив значение δh_b , можно назначить профилировку – величину выпуклости бочки валков.

Передаточные функции (производные) от параметров процесса прокатки используются при проектировании систем автоматического управления станами, позволяют оценить влияние разброса данных на качество конечного продукта.

В программе производные от усилия, моментов и опережения вычисляются по входной (h_0) и выходной (h_1) толщине полосы, переднему (t_0) и заднему (t_1) натяжению, коэффициенту трения, а также по величине сопротивления металла деформации.

Вычисления производных производится по 5-точечной схеме методом наименьших квадратов [84]. Для расчёта значения в переменной в точке x , значения усилия P , момента M и опережения S вычисляются в 5 равноотстоящих точках $x, x \pm \Delta x, x \pm 2 \cdot \Delta x$, где Δx – малое отклонение значения переменной x .

2.4. Программа расчёта и моделирования процесса листовой прокатки.

На основе математической модели [63,64] разработана система проектирования технологических процессов деформирования цветных металлов и сплавов, предназначенная для моделирования работы одно- и многоклетевых листовых прокатных станов, позволяющая проектировать режимы прокатки полос реальных станов. Входными данными, необходимыми для начала расчёта режимов прокатки, являются следующие

параметры: количество клеток (не больше 6), максимально допустимое обжатие, максимально допустимое натяжение к пределу текучести, материал валков, форма дуги захвата, характер наклёпа полосы, форма ввода натяжения, вид трения, марка материала полосы, ширина полосы, радиус рабочих валков, диаметр опорных валков, длина бочки валков, профилировка валков, длина от середины подшипника до бочки валка, толщина полосы перед клетью, толщина полосы на выходе из клетки, заднее и переднее натяжение, профилировки валков, а также коэффициент трения.

Ввод данных происходит последовательно и комментируется в окне подсказок в нижней части интерфейса программы. При возникновении ошибки во время ввода данных или в процессе расчета, в окне подсказки выводится сообщение, рекомендуемые изменить определённый параметр, либо начать моделирование заново. Общий вид рабочего окна программы представлен на рис. 2.12.

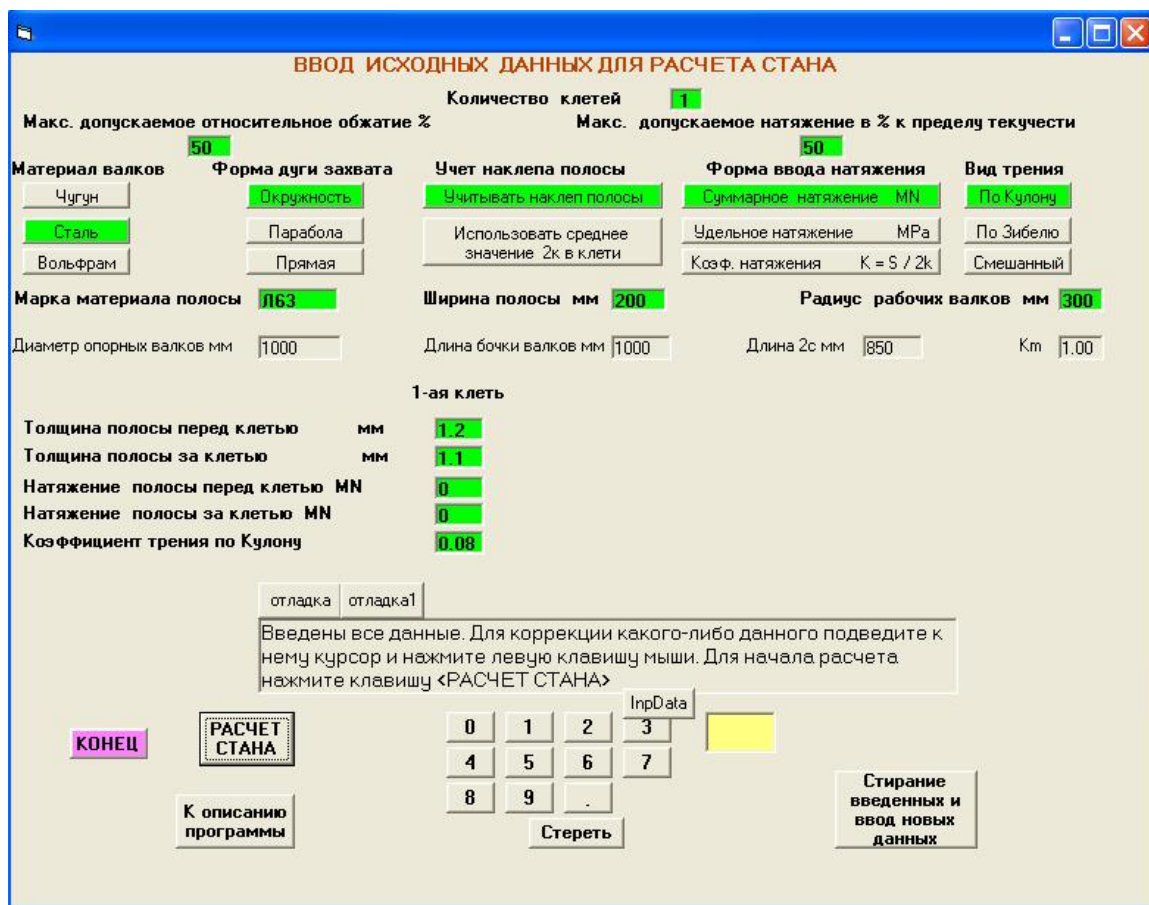


Рис. 2.12. Общий вид интерфейса программы.

Математическая модель, заложенная в программный продукт, описана в разделе 2.3 данной работы. Ниже, на рис. 2.13, приводится общий вид блок-схемы работы программы.

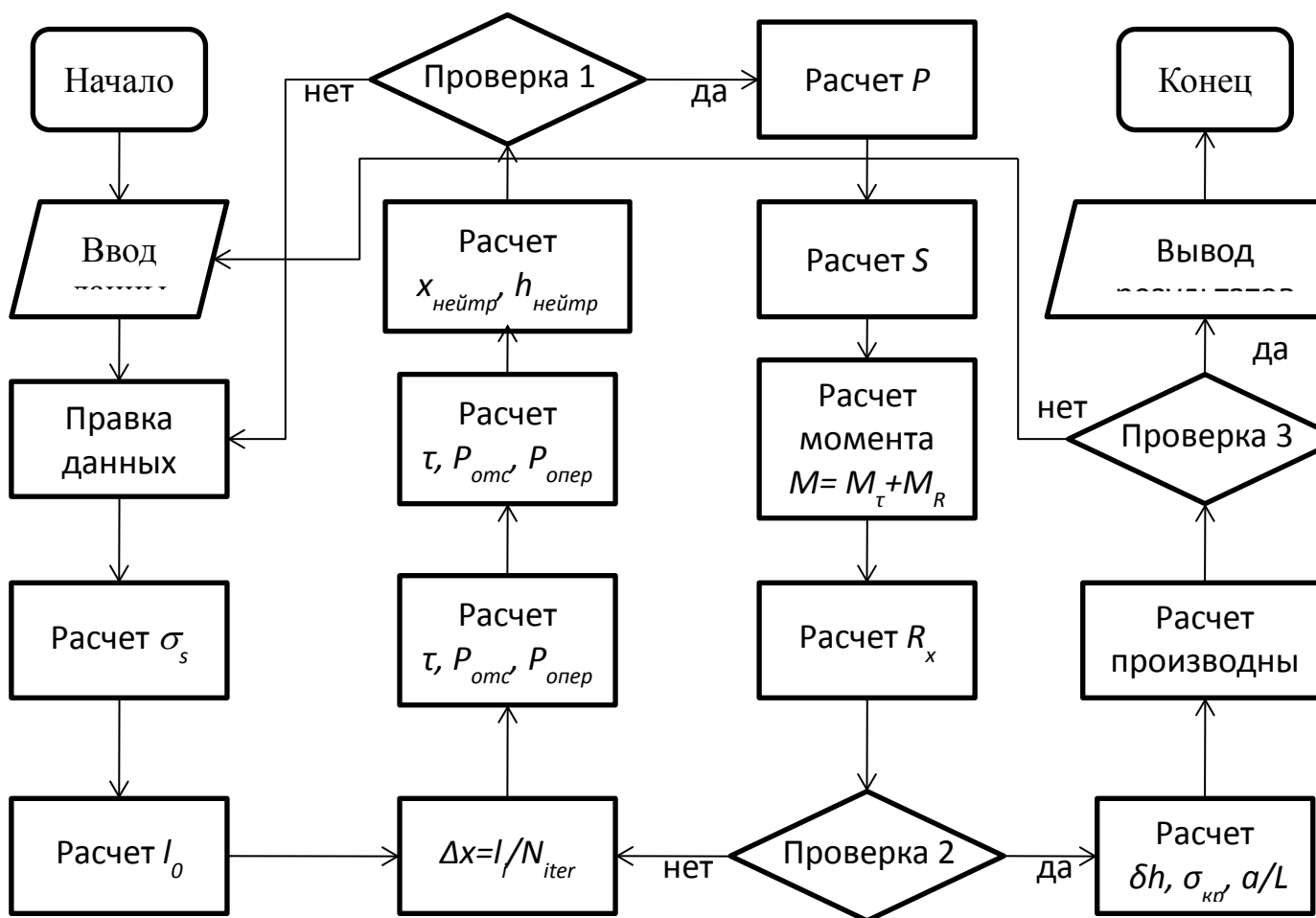


Рис. 2.13. Блок-схема программы расчёта и моделирования процесса листовой прокатки.

На схеме отображена последовательность выполнения шагов расчета параметров прокатки в программе. После ввода данных происходит расчет в первом приближении силовых параметров процесса прокатки. Далее после определения положения нейтрального сечения происходит проверка на пробуксовку/волочение, если режим прокатки соответствует нормальному, тогда программа продолжает вычисления величины усилия P , опережения S , момента M , а также деформированного радиуса валков R_x , в противном случае пользователю предоставляется возможность редактировать входные данные (данное условие представлено блоком «Проверка 1»). После этого

следует проверка условия сходимости ряда ΔL (см. 2.15). Если выполнено $\Delta L < 0,001$, то итерационный процесс считается завершенным, программа переходит к расчету поперечной разнотолщинности, а также вычислению производных, если же данное условие не выполнено, то итерационный процесс продолжается (данное условие представлено блоком «Проверка 2»). Если клеть для которой производились вычисления последняя, то программа выводит на экран таблицы итоговых результатов. Если клеть не последняя, пользователю предлагается возможность ввести данные в следующей клетке и продолжить расчет (блок «Проверка 3»).

Результатом работы программы является таблица основных расчётов программы, состоящая из 21 пунктов, описывающих рассчитанный режим прокатки: относительное обжатие, усилие прокатки, полный момент прокатки, момент прокатки от сил трения, момент прокатки от радиальных сил, отношение моментов радиальных сил и сил трения, опережение полосы, скорректированное опережение, предел текучести полосы на входе в клеть, предел текучести полосы на выходе из клетки, коэффициент приложения равнодействующей, деформированный радиус вала, исходная дуга захвата, деформированная дуга захвата, увеличение дуги захвата от сплющивания, координата нейтрального сечения, среднее удельное давление, максимальное удельное давление, максимальное напряжение трения, прогиб валков, разнотолщинность полосы, величину критического напряжения сжатия, и показателя формы. Также программа просчитывает 21 производных величины для усилия, момента и опережения прокатки.

Результаты расчёта программы могут быть выведены в качестве таблиц «результаты расчета процесса прокатки» (рис. 2.14), «производные от усилий прокатки P , опережения S , момента M » (рис. 2.15). Полученные таблицы можно сохранить в формате .doc для дальнейшего использования или отправить печатать на принтер. Так же в программе реализована возможность графического представления эпюр контактного напряжения (рис. 2.16).

Таблицы Ввода-Вывода

Параметры процесса, общие для всего стана

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	
Количество клетей	1
Материал валка	Сталь
Форма дуги захвата	Окружность
Вид учета наклепа	Наклеп вдоль дуги захвата
Вид вала захватной	Симметрично установлен в МН

Настройка клетей стана

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	1-я клеть
Толщина полосы перед клетью мм	1.2
Толщина полосы за клетью мм	1.1
Относительное обжатие %	8.33
Натяжение полосы перед клетью MN	00
Натяжение полосы за клетью MN	00
Коэффициент трения по Кулону	0.08

Результаты расчета процесса прокатки

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	1-я клеть
Деформированный радиус валка мм	480.517
Деформированная дуга захвата мм	6.932
Исходная дуга захвата мм	5.48
Увеличение длины дуги от сплющивания %	20.984
Координата нейтрального сечения мм	3.116
Среднее удельное давление МПа	393.334
Максимальное удельное давление МПа	499.43
Максимальное напряжение трения МПа	39.954
Диаметр опорных валков мм	1000
Длина бочки валка мм	1000
длина 2с мм	850
Прогиб валков мм	0.0032
Разнотолщинность мм	0.0003

Рис. 2.14. Таблица основных результатов расчёта процесса прокатки.

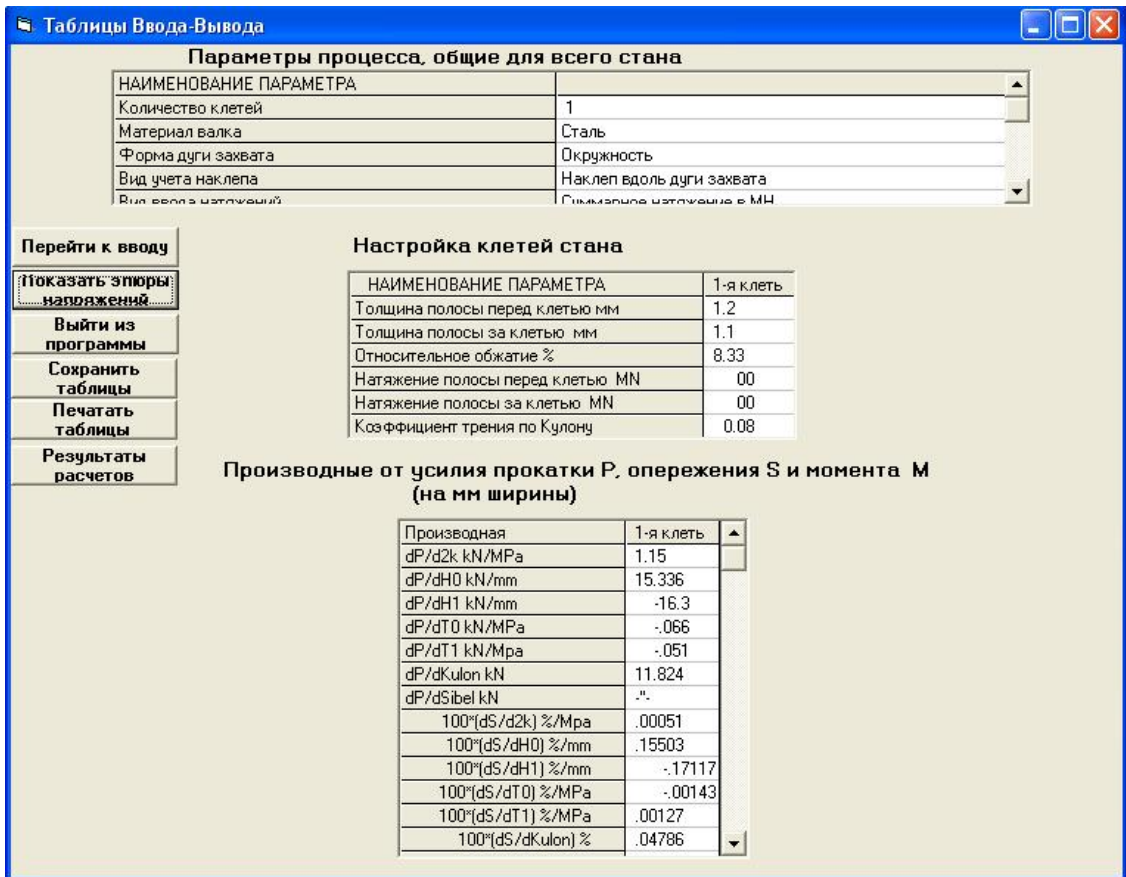


Рис. 2.15. Таблица расчёта производных.

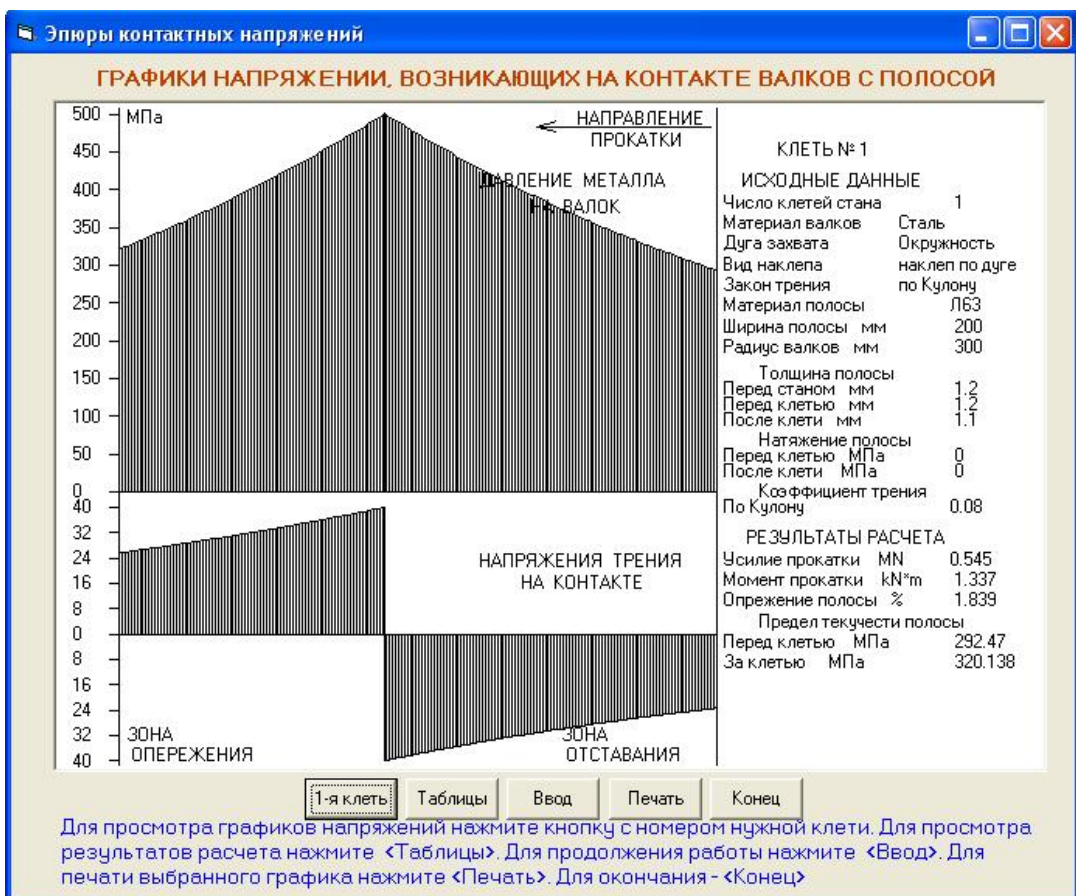


Рис. 2.16. Графики эпюр контактных напряжений в программе.

Система проектирования технологических процессов деформирования цветных металлов и сплавов построена на базе языка Basic.

Выводы по главе 2.

1. На лабораторном двухвалковом стане 150x235 создана микропроцессорная система контроля усилий прокатки, которая позволяет с высокой точностью $\pm 0,1$ кН определять изменения усилий по длине прокатываемой полосы, автоматически фиксировать и отображать максимальную нагрузку на валки с частотой в 0,1 секунду.

2. Приведены результаты исследования сопротивления металла деформации, показана связь этого параметра с величиной твёрдости прокатываемого металла. Экспериментальное исследование, проведённое на лабораторном стане 150x235, подтверждает возможность использования этих данных для контроля величин сопротивления деформации.

3. Получены регрессионные связи величин пределов текучести и твёрдости для меди и ряда латуней, что облегчает применение методов неразрушающего контроля качества металла.

4. Усовершенствована математическая модель и программная система, позволяющая в диалоговом режиме исследовать и проектировать показатели холодной листовой прокатки на одноклетьевых и непрерывных станах.

ГЛАВА 3. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ТОЧНОСТИ ПРОКАТКИ

3.1. Влияние условий контактного трения на деформационные и силовые показатели при прокатке тонких полос.

Известно, что в процессах прокатки усилия (и моменты на шпинделях) могут изменяться в весьма широких пределах.

Если рассматривать усилие P , как функцию ряда независимых переменных, например, (h_0, h_1, R, b) , (μ, σ_s) , (σ_1, σ_0) , то можно отметить, что первая группа этих восьми переменных – это геометрические размеры деформируемой полосы и валков; вторая группа – это характеристики условий трения и сопротивления пластической деформации, определяемые на основе имеющихся экспериментальных данных, и третья группа – это напряжения переднего и заднего натяжений, которые специально создаются и регулируются для обеспечения стабильного и эффективного режима прокатки.

Можно вместо величин σ_0 и σ_1 использовать усилия натяжений T_0 и T_1 , равные $T_0 = \sigma_0 b h_0$, $T_1 = \sigma_1 b h_1$.

Все эти величины нельзя определить, как некоторые точные числа, являющиеся аргументами функции $P(h_0, h_1, R, b, \mu, \sigma_s, \sigma_1, \sigma_0)$. Любое из этих чисел известно лишь приближенно с некоторой степенью неопределенности, а именно: Δh_0 , Δh_1 , ΔR , Δb , $\Delta \mu$, $\Delta \sigma_s$, $\Delta \sigma_1$ и $\Delta \sigma_0$, причем никогда нельзя утверждать, что любой из этих аргументов (обозначим их u_i) известен точно, так что для него $\Delta u_i = 0$.

Однако эти отклонения Δu_i ($i=1, 2... 8$) определяются различными факторами. Первые четыре из них (h_0, h_1, R, b) определены точностью изготовления прокатываемой полосы и валков. Исходная толщина полосы определена диапазоном $h_0 \pm \Delta h_0$, зависящим от начальной разнотолщинности листа, а конечная разнотолщинность зависит от диапазона $h_1 \pm \Delta h_1$.

Величины σ_1 и σ_0 также могут колебаться и значения их возможных отклонений $\Delta \sigma_1$ и $\Delta \sigma_0$ зависят от системы регулирования натяжений.

Величины сил натяжений обычно измеряют контрольными приборами и корректируют скоростной режим по их показаниям.

Для первой клетки непрерывного стана, например, чрезмерно высокая величина заднего натяжения свидетельствует о том, что надо увеличить скорость вращения моталки, а для последней клетки непрерывной группы чрезмерное переднее натяжение можно уменьшить, снизив скорость вращения моталки за станом.

Анализ колебаний натяжений и их зависимость от колебаний скоростей валков клетей непрерывной группы и моталок приведен в работе [85].

Системы регулирования натяжений все время совершенствуются, и поэтому возрастает точность регулирования натяжений, что способствует уменьшению возможных колебаний $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_0$.

Что касается таких переменных как величина сопротивления деформации σ_s и коэффициент трения μ , то следуя работам [55, 72, 85-88], надо признать, что эти переменные являются до некоторой степени неопределёнными не потому, что невозможно их точно измерить, а потому, что они таковыми (т.е. неопределёнными) величинами являются по своей природе.

Разброс экспериментальных данных по величинам предела текучести может для различных металлов и сплавов достигать 10-20% от средней величины, что значительно выше, чем погрешность экспериментов при определении этих величин. Еще большую неопределённость вносит в расчётные формулы величина коэффициента трения μ , которая изменяется в весьма широком диапазоне.

На лабораторном двухвалковом стане 150x235 провели экспериментальное исследование процесса прокатки меди МЗ и латуни Л63 и ЛС59-1(поставки Кировского и Кольчугинского заводов ОЦМ).

Цель исследования заключалась в установление количественных закономерностей влияния различных смазок на деформационные и силовые показатели прокатки тонких полос из меди и латуни из промышленных

партий, а также оценка точности расчёта этих параметров на разработанной система проектирования технологических процессов деформирования.

Эксперименты проводили на лабораторном двухвалковом стане 150x235, оснащённом микропроцессорной системой контроля усилий проката в лаборатории кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына» Университета машиностроения (МАМИ). После настройки на стане зазора между валками равного 1,14 мм, прокатали со скоростью 0,271 м/с 15 образцов (полос длиной около 200 мм) из меди МЗ и 15 полос из латуни ЛС59-1. 5 полос в сухих валках, 5 полос со смазкой в виде эмульсии 5% (СП-3) и 5 полос со смазкой валков керосином (КО-25). После настройки зазора между валками $S_0=1,55$ мм прокатали 15 полос из латуни Л63. 5 полос в сухих валках, обезжиренных ацетоном, 5 полос со смазкой в виде эмульсии 5% (СП-3), а затем 5 полос со смазкой валков керосином (КО-25).

До и после прокатки измерили толщину полос по длине в пяти точках точечным контактным ручным микрометром с часовой головкой с точностью $\pm 0,001$ мм и ширину полос штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм. В процессе прокатки полос автоматически измеряли усилия прокатки по длине полосы с точностью $\pm 0,1$ кН, с использованием установленной на стане микропроцессорной системы контроля сил прокатки. Данная система контроля была описана выше в главе 2. Вопросы обработки и анализа экспериментальных данных рассмотрены в работах [89-93].

Основные, усреднённые и оценённые в достоверности методами математической статистики [89] результаты исследования, представлены в таблице 3.1, в которой приняты следующие обозначения: f_{mp} – коэффициент контактного трения; h_0 , h_1 – толщина полос до и после прокатки; b_0 , b_1 – ширина полос до и после прокатки; Δh – абсолютное обжатие; ε – относительное обжатие; l/h_{cp} – фактор формы очага деформации; P_{cp} – среднее значение усилия прокатки по длине полосы в установившейся период; $P_{расч}$ – расчётное усилие прокатки; ΔP – погрешность между

экспериментально полученным и рассчитанным усилием прокатки. Коэффициенты контактного трения f_{mp} определяли по уравнению А.П. Грудева и таблицам из работ [59,86,89].

Таблица 3.1.

Влияние смазки на деформационные и силовые показатели прокатки медных и латунных полос на двухвалковом стане 150x235.

Марка металла	Смазка, f_{mp}	h_0 , мм	h_1 , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	ε , %	l/h_{cp}	P_{cp} , кН	$P_{расч}$, кН	ΔP , %
ЛС59-1	без смазки, 0,104	1,9	1,363	20,0	20,5	0,537	28,263	3,96	65,24	59,09	9,43
	эмульсия, 0,087	1,9	1,359	20,5	21,0	0,541	28,744	3,87	64,37	57,72	10,33
	керосин, 0,067	1,9	1,347	20,2	20,5	0,553	29,105	4,02	63,66	57,23	10,10
МЗ	без смазки, 0,104	1,9	1,260	20,1	20,6	0,640	33,684	4,38	55,38	48,26	12,86
	эмульсия, 0,087	1,9	1,240	20,0	20,5	0,660	34,737	4,47	50,67	45,21	10,78
	керосин, 0,067	1,9	1,223	19,0	20,0	0,677	35,632	4,54	43,89	40,68	7,31
Л63	без смазки, 0,104	2,6	2,023	20,0	21,0	0,577	22,192	2,88	53,50	52,14	2,54
	эмульсия, 0,087	2,6	1,967	20,1	21,3	0,633	24,346	3,04	54,35	52,02	4,29
	керосин, 0,067	2,6	1,963	20,1	21,2	0,637	24,500	3,05	52,03	51,11	1,77

Графики влияния коэффициента контактного трения на усилие прокатки при деформации опытных полос показаны на рис. 3.1.

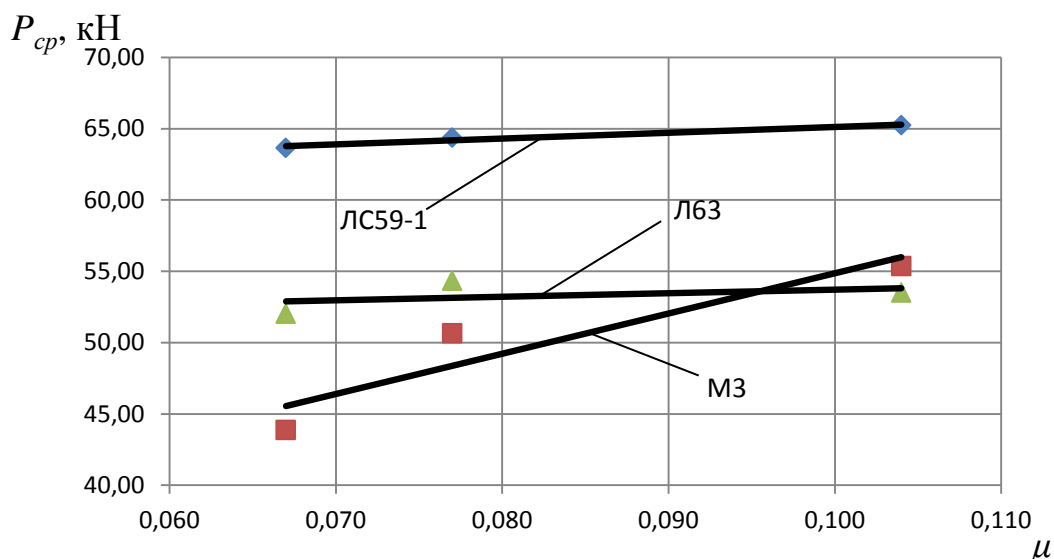


Рис. 3.1. Влияние коэффициента контактного трения, соответствующего опытным смазкам, на средние величины усилий прокатки на стане 150x235 при деформации полос из меди МЗ и латуни Л63, ЛС59-1.

Результаты эксперимента подтвердили положительное влияние применения смазок валков на деформационные и силовые показатели прокатки и позволили установить количественное влияние условий контактного трения на эти показатели при прокатке образцов от промышленных партий полос. Причём с учётом величины фактора очага деформации $l/h_{cp} > 4$ свободная прокатка на стане 150x235 моделировала деформационные условия прокатки полос двухвалкового стана 350x450 ООО «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов».

На стане 150x235 при прокатке полос из меди МЗ среднее и максимальное значение усилий прокатки при деформации в сухих валках составило 55,38 и 64,7 кН, а при смазке валков эмульсией 50,66 и 63,0 кН, керосином 43,88 и 58 кН соответственно. Следовательно, применение смазок позволило уменьшить усилие прокатки на 14-24% при прокатке меди.

Для латуни влияние параметра μ на усилия меньше, чем для меди.

На рис. 3.2 представлены графики влияния коэффициента трения на изменение степени деформации при прокатке опытных полос в фиксированных исходных зазорах ненагруженных валков. Улучшенные

условия контактного трения позволяют увеличить обжатие металла и уменьшить толщину полосы на выходе из стана без изменения зазора между валками.

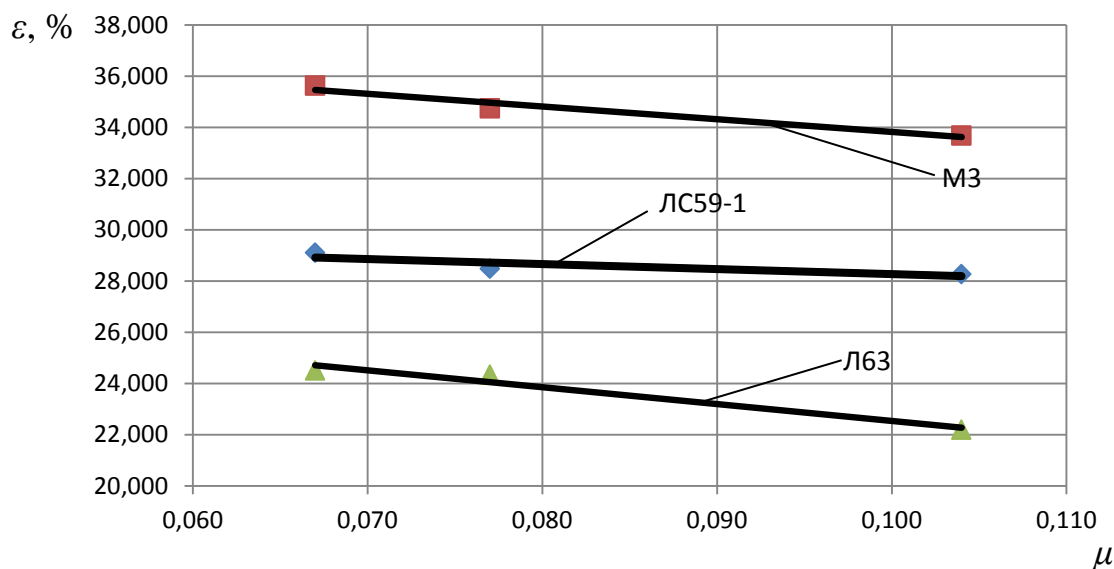


Рис. 3.2. Влияние коэффициента контактного трения, соответствующего опытным смазкам, на степень деформации на стане 150x235 при деформации полос из меди МЗ и латуни Л63, ЛС59-1.

Кроме того исследовали изменение усилия по длине полосы в зависимости от условий контактного трения.

В данном эксперименте на стане 150x235 производили прокатку 10 полос из меди МЗ длиной $L_0 = 204$ мм, толщиной 1,9 мм, шириной 20 мм. Прокатку проводили вначале в сухих валках, тщательно обезжиренных ацетоном (5 полос), затем прокатали 5 полос со смазкой валков керосином (КО-25), не изменяя настройку стана (зазор между валками $S_0 = 1,14$ мм). Величину зазора между валками определяли путём прокатки по краям бочки валков свидетелей (узких полос из свинца, шириной 5 мм и толщиной 2 мм).

Результаты исследований представлены в таблице 3.2, в которой приняты обозначения: h_0, h_1 – толщина полосы до и после прокатки; L_1 – длина полосы после прокатки; ε – относительное обжатие металла; l/h_{cp} – фактор формы очага деформации; $P_{II}, P_3, P_{max}, P_{cp}$ – усилие прокатки на

переднем конце, заднем конце, максимальное и среднее значение по длине полосы.

Таблица 3.2

Влияние смазки на деформационные и силовые показатели прокатки медных полос на двухвалковом стане 150x235.

Металл	Смазка, f_{mp}	h_0 , мм	h_1 , мм	ε , %	l/h_{cp}	P_n , кН	P_z , кН	P_{max} , кН	P_{cp} , кН	L_1 , мм
МЗ	Без смазки 0,104	1,9	1,260	33,684	4,2	45,7	47,1	64,7	60,4	306
МЗ	Керосин 0,067	1,9	1,223	35,632	4,4	44,0	41,8	58,0	53,9	323

Усреднённые и оценённые в достоверности методами математической статистики [89] параметры прокатки (см. таблицу 3.2) позволили оценить работу системы контроля и точность измерения усилий прокатки, а также установить некоторые количественные закономерности влияния условий контактного трения на деформационные и силовые параметры процесса прокатки медных полос. Измерение усилий с частотой 0,1 сек. по длине полосы позволило выявить эксцентриситет и биение валков стана. Так, при прокатке медных полос в сухих валках в период установившегося процесса, усилие при прокатке переднего конца составляло 45,7 кН, а заднего 47,1 кН (среднее значение 60,4 кН и максимальная величина 64,7 кН). Применение смазки (керосина) при холодной прокатке медных полос позволило уменьшить усилие прокатки на переднем конце на 1,7 кН, на заднем конце полосы на 5,2 кН; среднее значение P_{cp} уменьшилось на 6,5 кН, максимальное на 6,7 кН, т.е. снизилось на 10,4%, что подтверждает положительное влияние смазки на силовые параметры процесса. На рис. 3.3 показано распределение усилий прокатки по длине медных полос, в том числе на нестационарных участках в зависимости от условий контактного трения на двухвалковом стане 150×235 (когда $l/h_{cp} > 4$).

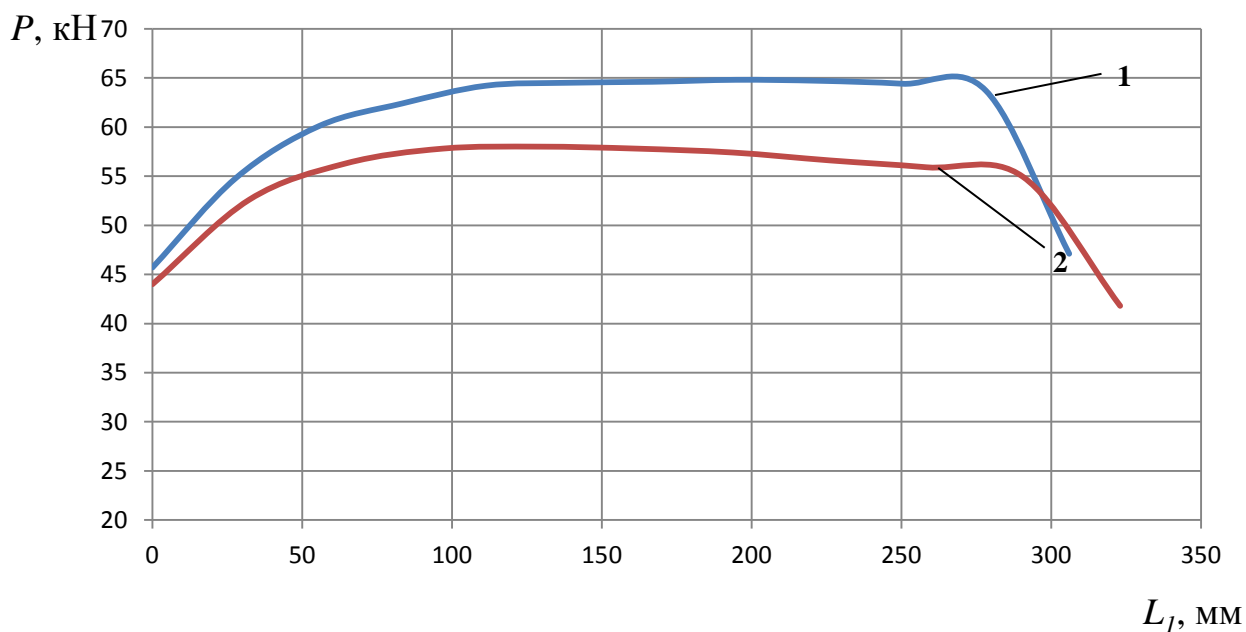


Рис. 3.3. Распределение усилий прокатки по длине медных полос в зависимости от условий контактного трения на двухвалковом стане 150×235. Кривая 1 – прокатка в сухих валках, кривая 2 – прокатка со смазкой валков керосином.

Усилия прокатки при применении керосина в качестве смазки валков меньше, чем при сухом трении на всех участках длины прокатываемой полосы, причем при нестационарных условиях процесса сила P более чем в два раза меньше, что необходимо учитывать при управлении показателями качества плоского проката.

Результаты лабораторных исследований были использованы для анализа и проектирования режимов прокатки лент из латуней на двухвалковом стане 350×450 Кольчугинского завода ОЦМ. В результате рекомендовано увеличить натяжение между клетью и моталкой (разматывателем), а также изменить профилировку рабочих валков, (несколько увеличив их выпуклость для уменьшения разнотолщинности). Ожидаемый экономический эффект составит 800 тысяч рублей в год, что подтверждается актом от 13.01.2015 г. (см. приложение № 1).

3.2. Разработка технологических режимов, обеспечивающих повышение точности размеров проката.

Если до начала прокатки установлен зазор между валками, равный S , то толщина проката не будет равна этой величине.

Во-первых, она возрастёт за счёт упругой деформации клетки и будет иметь место соотношение

$$h = S + \frac{P}{C_k} \quad (3.1)$$

где C_k – жёсткость клетки.

Во-вторых, из неточностей размеров валков и их биений возможно изменение и величины S .

Впервые на то, что для процессов прокатки необходимо производить расчёты не только усилий и моментов прокатки, мощности привода, опережения и уширения, но также необходимо выполнять расчёты точности прокатки, т.е. возможных отклонений размеров проката от номинальной величины было указано в работе [33]. В дальнейшем такие расчёты стали применять для оценки возможных отклонений согласно зависимости

$$\Delta h = \Delta S + \frac{1}{C_k} \sum_{i=1}^8 \frac{\partial P}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (3.2)$$

или

$$\Delta h = \Delta S + \frac{1}{C_k} \left(\frac{\partial P}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial P}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial P}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial P}{\partial \mu} \Delta \mu + \frac{\partial P}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial P}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_s + \frac{\partial P}{\partial \sigma_1} \Delta \sigma_1 + \frac{\partial P}{\partial \sigma_0} \Delta \sigma_0 \right)$$

$$\Delta h = \Delta S + \frac{1}{C_k} (A \Delta h + A_1 \Delta h_0 + A_2 \Delta R + A_3 \Delta \mu + A_4 \Delta b + A_5 \Delta \sigma_s + A_6 \Delta \sigma_1 + A_7 \Delta \sigma_0),$$

где функции A_i равны:

$$A = \frac{\partial P}{\partial h}, A_1 = \frac{\partial P}{\partial h_0}, A_2 = \frac{\partial P}{\partial R}, A_3 = \frac{\partial P}{\partial \mu}, A_4 = \frac{\partial P}{\partial b}, A_5 = \frac{\partial P}{\partial \sigma_s}, A_6 = \frac{\partial P}{\partial \sigma_0}, A_7 = \frac{\partial P}{\partial \sigma_1}.$$

Колебания межвалкового зазора могут быть вызваны эксцентриситетом валков, их эллиптичностью и другими факторами, которые для одного валка можно обозначить ΔR , а для межвалкового зазора $\Delta S = 2\Delta R$, т.е. в наихудшем случае, когда влияние эксцентриситета обоих валков складывается, вносимая

ими погрешность удваивается, именно такой наихудший вариант рассмотрим далее.

С учётом изложенного получим

$$C_k \Delta h = 2C_k \Delta R + A \Delta h + A_1 \Delta h_0 + A_2 \Delta R + A_3 \Delta \mu + A_4 \Delta b + A_5 \Delta \sigma_s + A_6 \Delta \sigma_1 + A_7 \Delta \sigma_0, \quad (3.3)$$

а для величины возможной разнотолщинности получаем

$$\Delta h = \frac{1}{C_k - A} (A_1 \Delta h_0 + (2C_k + A_2) \Delta R + A_3 \Delta \mu + A_4 \Delta b + A_5 \Delta \sigma_s + A_6 \Delta \sigma_1 + A_7 \Delta \sigma_0). \quad (3.4)$$

(величина A всегда отрицательная, поэтому выражение $(C_k - A)$ всегда будет положительным).

Поскольку $P = n_\sigma \cdot \sigma_s bl$ или, при наличии натяжений $P = n_\sigma [\sigma_s - 0,5(\sigma_0 + \sigma_1)] bl$, то

$$A_4 = \frac{\partial P}{\partial b} = \frac{P}{b}, \quad A_5 = \frac{\partial P}{\partial \sigma_s} = \frac{P}{\sigma_s - 0,5(\sigma_0 + \sigma_1)},$$

$$A_6 = -\frac{P}{2[\sigma_s - 0,5(\sigma_0 + \sigma_1)]}; \quad A_7 = -\frac{P}{2[\sigma_s - 0,5(\sigma_0 + \sigma_1)]}$$

- эти коэффициенты определяются наиболее просто.

Функции A, A_1, A_2 и A_3 определены влиянием отклонений и на величину n_σ , и на величину l .

В работе [15] при использовании формулы Стоуна получено

$$A = -\frac{Pm(2 - \varepsilon)}{4l\varepsilon} \left(\mu m + \frac{1}{n_\sigma} \right),$$

$$A_1 = \frac{Pm}{4l\varepsilon} \left[2 - \varepsilon + (2 - 3\varepsilon) \left(\mu m - 1 + \frac{1}{n_\sigma} \right) \right], \quad (3.5)$$

$$A_2 = \frac{Pl}{ml(2 - \varepsilon)} \left(1 + \frac{\Delta h}{2l} - \frac{1}{\mu} + \frac{\Delta h}{2ln_\sigma} \right),$$

$$A_3 = \frac{P\varepsilon}{2ml} \left(\mu m + \frac{1}{n_\sigma} \right),$$

однако эти формулы получены без учёта упругого сплющивания валков, которое при холодной прокатке может быть весьма существенным.

Используем для расчёта коэффициента A_3 разложение экспоненциальной функции в степенной ряд и ограничимся тремя членами

ряда. Тогда заменив $\exp(\mu t) = 1 + \frac{(\mu t)^2}{2}$ в выражении для n_σ , получим $n_\sigma = 1 + 0,5\mu t$

$$P = 2k \cdot n_\sigma b l = 2kb(n_\sigma l) = 2kb \left(l + 0,5\mu \frac{l^2}{h_c} \right),$$

а после дифференцирования

$$A_3 = \frac{\partial P}{\partial \mu} = \frac{kbl^2}{h_c} = 2kb \left(l^2 + 0,5\mu \frac{l^2}{h_c} \right) \frac{\frac{l^2}{h_c}}{l + 0,5\mu \frac{l^2}{h_c}},$$

или

$$A_3 = P \frac{\frac{l}{h_c}}{l + 0,5\mu \frac{l}{h_c}}. \quad (3.6)$$

Приняв с учётом упругой деформации валков

$$l = l_0(1 + a) = l_0 \left(1 + 1,15 \cdot C_0 \frac{\sigma_T l_0}{E \Delta h} \right) \quad (3.7)$$

(согласно формуле (2.15)), получим

$$A_3 = P \frac{m_0(1+a)}{1 + 0,5\mu m_0(1+a)}. \quad (3.8)$$

Коэффициент $A = \frac{\partial P}{\partial h}$ будет равен

$$A = \frac{\partial P}{\partial h} = -P \frac{R \left[1 + \frac{\mu m}{2-\varepsilon} (3-0,5\varepsilon) \right]}{2l(1+0,5\mu t)} \quad (3.9)$$

или

$$A = -\frac{P}{2} \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \left[\frac{1 + \frac{(3-0,5\varepsilon)}{(2-\varepsilon)} \mu m_0(1+a)}{1 + 0,5\mu t_0(1+a)} \right]. \quad (3.10)$$

Приведенная методика позволяет рассчитать влияние различных характеристик на точность прокатки.

Сравнительные расчёты показывают наиболее сильное влияние на разнотолщинность исходной разнотолщинности и изменений коэффициента трения. Как следует из формулы (3.4) первый фактор определен функцией $A_1(C_k - A)^{-1}$, где

$$A_1 = \frac{Pm}{4l\varepsilon} \left[2 - \varepsilon + (2 - 3\varepsilon) \left(\mu t - 1 + \frac{1}{n_\sigma} \right) \right]$$

$$C_k - A = C_k + 0,5P \sqrt{\frac{R}{\Delta h} \frac{[2-\varepsilon+(3-0,5\varepsilon)\mu t_0(1+a)]}{(2-\varepsilon)[1+0,5\mu t_0(1+a)]}} \quad (3.11)$$

Структура этих формул показывает, что показатель точности, (обозначим его f_1) можно записать в виде

$$f_1 = \frac{m[2-\varepsilon+(3-0,5\varepsilon)\mu t_0(1+a)]}{4l\varepsilon \left(\frac{C_k}{P} + \frac{0,5}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\frac{R}{n_0} \frac{[(2-\varepsilon)+(2-\varepsilon)\mu t_0(1+a)]}{(2-\varepsilon)[1+0,5\mu t_0(1+a)]}} \right)} \quad (3.12)$$

При уменьшении обжатия и $\varepsilon \rightarrow 0$ получим

$$f_1 \rightarrow \frac{m(2+3\mu t_0)}{-\frac{4C_k}{P}\varepsilon l + 2R\varepsilon \frac{1+\mu t_0}{1+0,5\mu t_0}} \quad (3.13)$$

и отсюда видно, что $f_1 \rightarrow \infty$ при $\varepsilon \rightarrow 0$.

С уменьшением обжатия снижается и влияние жёсткости клетки, поскольку в первом слагаемом в знаменателе формулы (3.13) содержится ε , а во втором слагаемом $\sqrt{\varepsilon}$, то с уменьшением ε первое слагаемое будет уменьшаться значительно быстрее, чем второе. Коэффициент трения в данном случае оказывает меньшее влияние, чем обжатие.

Уменьшение обжатия увеличивает влияние начальной разнотолщинности на точность проката, особенно сильно при $\varepsilon \leq 0,01$.

Влияние коэффициента трения на функцию f_1 незначительно, даже приняв $\mu=0$, получим

$$f_1 \approx \frac{2m}{4 \frac{C_k}{P} \varepsilon l + 2R\varepsilon}$$

и можно показать, что эта величина возрастает при уменьшении ε , как $(\sqrt{\varepsilon})^{-1}$, в реальном диапазоне изменения μ это влияние незначительно.

Влияние коэффициента трения на коэффициент A_3 и на разнотолщинность Δh можно оценить величиной

$$f_3 = \frac{A_3}{C_k - A} = \frac{m(2-\varepsilon)}{2(1+0,5\mu t_0) \frac{C_k}{P} + 0,5 \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} [2-\varepsilon-(3-0,5\varepsilon)\mu t_0]} \quad (3.14)$$

Если в формуле (3.14) принять $\varepsilon = 0$, то

$$f_1 = \frac{2m}{2(1+0,5\mu t_0) \frac{C_k}{P} + 0,5 \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} (2+3\mu t_0)} \quad (3.15)$$

и в данных условиях

$$f_1 = \left(0,18 \frac{C_k}{P} + 0,19 \right)^{-1}.$$

Важным является вопрос о влиянии колебаний условий трения на точность прокатки.

Если принять при малых величинах ε (и пренебречь параметром $\frac{C_k}{P}$), то из (3.14) получим

$$f_3 = \frac{4m}{\sqrt{\frac{R}{\Delta h}} (2 - 3\mu t)} = \frac{4\sqrt{R\Delta h}}{hc \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} (2 + 3\mu t)},$$

следовательно

$$f_3 = \frac{4\Delta h}{hc(2 - 3\mu t)}$$

и при $\Delta h \rightarrow 0$ $f_3 \rightarrow 0$, поэтому в отношении колебаний усилия (и соответственно разнотолщинности) за счёт изменения коэффициента трения, для повышения точности полезны «прогладочные проходы» с очень малыми обжатиями. Такая технология описана ниже при малых величинах μt

$$f_3 \rightarrow \frac{2\Delta h}{hc} \quad (3.16)$$

Во всех этих случаях, и при изменении начальной толщины h_0 на величину $\pm\Delta h_0$, и при изменении коэффициента трения μ на $\pm\Delta\mu$, (также и других факторов: σ_s , σ_0 , σ_1 , b) увеличение жёсткости клетки, т.е. параметра C_k , является положительным фактором, который существенно уменьшает разнотолщинность проката. Но такая закономерность наблюдается не во всех случаях прокатки.

Ведь в формуле (3.4) аргумент C_k находится и в знаменателе ($C_k - A$), и в числителе, в качестве сомножителя при отклонении ΔR , (см. здесь и далее методику [33, 40]).

Если продифференцировать это выражение по параметру C_k , то получим, что если величина

$$f_0 = -2|A|\Delta R + \sum A_i \Delta x_i > 0, \quad (3.17)$$

то с увеличением жёсткости клетки C_k разнотолщинность уменьшается, (т.е. увеличение жёсткости является полезным).

Если же неравенство (3.17) не выполнено, то увеличение жёсткости не уменьшает, а увеличивает разнотолщинность проката и поэтому только ухудшает точность проката. Это понятно, поскольку при низкой точности радиуса валков и значительных величинах ΔR – за счёт биений валков или их эллиптичности (овальности) для очень жёсткой клетки все эти отклонения ΔR реализуются на прокате, создавая соответствующие колебания его толщины. Менее жёсткая клетка за счёт упругой деформации компенсирует в некоторой степени влияние биений валков.

Если формулу (3.4) записать в виде

$$\Delta h = \frac{1}{C_k - A} [2C_k \Delta R + \sum A_i \Delta x_i], \quad (3.18)$$

где Δx_i изменения всех параметров: ($x_1 - h_0, x_2 - R, x_3 - \mu$ и т. д.), то

$$\frac{\partial \Delta h}{\partial C_k} = \frac{2\Delta R}{C_k - A} - \frac{(2C_k \Delta R + \sum A_i \Delta x_i)}{(C_k - A)^2} \text{ и}$$

если $2\Delta R(C_k - A) - 2C_k \Delta R - \sum A_i \Delta x_i > 0$, т.е. $(2A\Delta R + \sum A_i \Delta x_i) < 0$, то с увеличением параметра C_k разнотолщинность будет возрастать, поскольку параметр «А» отрицательный, то можно записать условие того, что производная $\frac{\partial \Delta h}{\partial C_k}$ отрицательная, в виде $2|A|\Delta R < \sum A_i \Delta x_i$, т.е. в виде (3.17).

Видно, что если $\Delta R = 0$, т.е. валки изготовлены идеально точно и биений нет, то условие (3.17) выполнено всегда и в этом случае увеличение жёсткости клетки было бы всегда полезным.

Следует учитывать и использовать методы обработки валков, повышающие их точность, в частности, методы механической чистовой обработки непосредственно в прокатной клетке (после установки в нее рабочих и опорных валков). Ещё более высокая точность достигается, если чистовую механическую обработку производят при предварительном нагружении валков усилием, равным ожидаемому усилию прокатки, см. [6, 19, 21].

Что касается влияния величины обжатия (т.е. аргументов Δh или ε), то с уменьшением обжатия влияние на разнотолщинность начальной разнотолщинности листа увеличивается (усиливается), но влияние колебаний сил трения на разнотолщинность снижается. Это понятно, поскольку коэффициент трения «входит» в ряд расчётных формул не в виде отдельного аргумента μ , а в виде произведения $\mu t = \frac{\mu \sqrt{R \Delta h}}{h_c}$; при малых Δh $\mu t \approx \sqrt{\frac{R}{h}} \varepsilon$ и этот параметр с уменьшением Δh (и ε) уменьшается. Это важно для решения практических задач, поскольку уменьшение обжатия приводит к уменьшению интенсивности влияния коэффициента трения на усилия прокатки, и на продольную разнотолщинность.

Что же касается влияния исходной разнотолщинности, его можно уменьшить, используя несколько прогладочных проходов.

3.3. Анализ устойчивости плоской формы полосы с учётом упругопластического изгиба по толщине металла.

Как было указано выше, в главе 1, процесс деформации листа начальными размерами $h_0 \times b_0$ должен обеспечивать устойчивость процесса прокатки.

Устойчивость должна быть обеспечена, как в отношении предотвращения искривления листа или его боковых смещений, так и в отношении обеспечения его плоскостности. Искривления даже отдельных участков листа (образование «волн» или коробоватости) приводит к браку.

Обычно потерю устойчивости проката определяют по формулам теории упругости, имеющим вид [94-96]

$$\sigma_{кр} = \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2, \quad (3.19)$$

где h – толщина, b – ширина деформируемого листа, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, k – безразмерный параметр, определяемый видом закрепления полосы по её контуру.

Недостатком формул такого типа является то, что они получены при рассмотрении только упругих деформаций, хотя в условиях прокатки на тонколистовых станах вполне вероятным является процесс с пластической деформацией листов.

Учитывая это, С.П. Тимошенко получил для предельной (критической) нагрузки величину

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi h^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \sqrt{E\sigma_s}, \quad (3.20)$$

см. [94], а критическое напряжение (среднее по всей ширине листа)

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{\pi h}{b\sqrt{3(1-\nu^2)}} \sqrt{E\sigma_s}. \quad (3.21)$$

С.П. Тимошенко получил формулу, отличающуюся от многих формул типа (3.19) тем, что в (3.21) входит не только модуль упругости, но и величина сопротивления металла деформации, таким образом, учитывается и влияние пластической деформации, т.е. произведения $E\sigma_s$.

После потери продольной устойчивости происходит изгиб продольных сечений по толщине полосы в упругой области. Форма полосы определяется параметром показателя формы a/L (a , L – амплитуда и длина периода волны), а соответствующее ему изменение относительной продольной деформации по ширине e , по уравнению из работы [97]

$$e = \frac{\Delta L_y}{L} = \left(\frac{a\pi}{2L}\right)^2, \quad (3.22)$$

где $\Delta L_y = L_B - L$; L_B – длина волны, позволяют оценить характер деформации металла.

На рис. 3.4 приведена схема потери продольной устойчивости полосы на выходе из валков, а на рис. 3.5 варианты распределения продольных напряжений по толщине металла при различных условиях изгиба полосы: упругий, упруго-пластический и пластический изгиб.

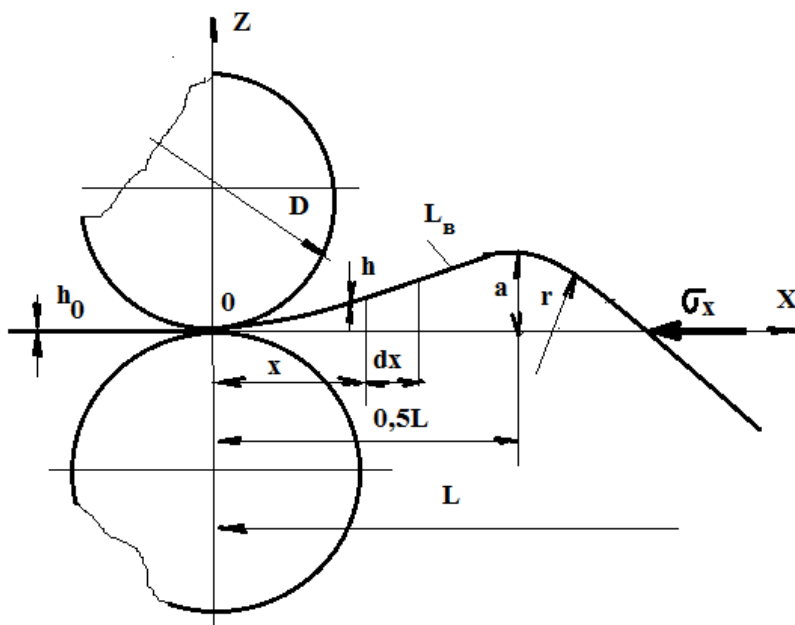


Рис. 3.4. Схема потери продольной устойчивости (плоской формы) полосы при тонколистовой прокатке под действием продольных напряжений сжатия.

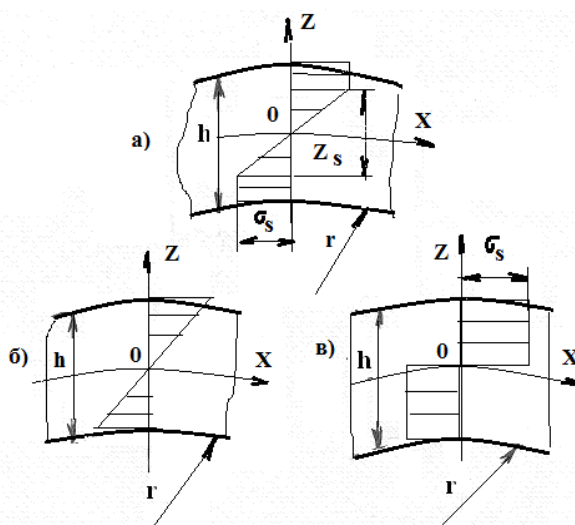


Рис. 3.5. Распределение продольных напряжений по толщине полосы: а - упругопластический изгиб, б - упругий изгиб, в - пластический изгиб.

Анализ измерений показателей неплоскостности a и L полос и листов из цветных металлов Кировского и Кольчугинских заводов ОЦМ, позволили провести анализ показателя формы a/L , а также изменения относительной продольной деформации e по ширине холоднокатаных полос. Результат анализа показал, что a/L изменяется в широких пределах $0,0015 \leq a/L \leq 0,041$, а соответствующее ему изменение относительной продольной деформации

по ширине прокатываемых полос изменяется еще в более широком диапазоне $0,000034 \leq \Delta L_y/L \leq 0,0042$. Следовательно, значения показателя формы листа a/L , а также, соответствующее им изменение относительной продольной деформации по ширине полос для сортамента металлопродукции, прокатываемой на станах холодной тонколистовой прокатки, находятся как в упругой ($e \leq 0,002$), так и пластической ($e > 0,002$) области.

Однако до настоящего времени, при оценке формы прокатываемых полос рассматривается потеря продольной устойчивости только в упругой области, при этом используется математический аппарат теории упругости. Такой подход к оценке плоскостности прокатываемых полос не позволяет обоснованно ответить на вопрос о количественном несовпадении измеренных и расчётных значений показателя формы и напряжения по ширине полосы при прокатке. Поэтому был предложен метод расчёта [96], основанный на принятии равенства работ внешних и внутренних сил (3.23), развивающий подходы [98-100].

$$A_F = A_B, \quad (3.23)$$

где A_F, A_B – работа внутренних и внешних сил.

Примем работу внутренних сил (работу тангенциальных и радиальных напряжений, возникающих при изгибе) в виде

$$A_F = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dz, \quad (3.24)$$

где I – момент инерции поперечного сечения полосы, а изгибающий момент

$$M = \frac{2Ebz_s^3}{3r} + \sigma_s b \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - z_s^2 \right], \quad (3.25)$$

где $z_s = \frac{\sigma_s r}{E}$ – длина упругого слоя, $r = \frac{0,12L^2}{a}$ – радиус кривизны, b – ширина волнистого участка полосы.

Отсюда определяем

$$A_F = \frac{\sigma_s^2 b^2 h^4 L}{32EI} + \frac{Eb^2 h^6 a^2}{288IL^3}. \quad (3.26)$$

Если по толщине полосы наблюдается упругая деформация, то выполняются зависимости $z = 0,5h$, $M = \frac{bEh^3}{12r}$, с учётом которых формула (3.26) преобразуется к виду

$$A_F = \frac{Eb^2h^6a^2}{288IL^3}. \quad (3.27)$$

Работу внешних сил запишем в виде

$$A_B = \sigma_{1x}bh\Delta L = \sigma_{кр}bh\Delta L, \quad (3.28)$$

где h – толщина полосы на выходе из валков, b – ширина волнистого участка полосы, $\sigma_{кр}$ – напряжение сжатия, $\Delta L = dx - dx\cos\alpha = dx(1 - \cos\alpha) = 0,5\alpha^2 dx$.

Изменение высоты волны (текущее изменение амплитуды волны) для произвольного продольного сечения по длине периода волны имеет вид

$$z = a\sin\frac{\pi x}{L}.$$

Принимая, что $\alpha = \partial z / \partial x$, выражение (3.28), будет иметь следующий вид:

$$A_B = 0,5\sigma_{кр}bh \int_0^L \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 dx = 0,25\sigma_{кр}bh \frac{\pi^2 a^3}{L}. \quad (3.29)$$

Если по толщине полосы наблюдается упругий изгиб, то из условия равенства работ, получим следующие выражения:

$$L = \frac{\pi h}{k\sqrt{12}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{кр}}}, \quad (3.30)$$

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{h}{kL}\right)^2, \quad (3.31)$$

где $1 \leq k \leq 2$ – коэффициент для приведенной длины. Но зависимости (3.30) и (3.31) могут быть использованы только для упругой области, когда критические напряжения сжатия по своей величине меньше величины сопротивления деформации $\sigma_{кр} \leq \sigma_s$. Полученные зависимости приводят к погрешностям, когда критические напряжения сжатия по своей величине больше истинного предела текучести $\sigma_{кр} \geq \sigma_s$ (изгиб полосы в пластической области).

В уравнениях (3.30) и (3.31) безразмерный параметр (коэффициент) K потерян, новый введенный коэффициент приведения длины – K неоднозначно характеризует условия изменения жёсткости полосы.

Опытные измерения длины периода волнистости холоднокатаных полос из меди МЗ для сортамента 0,35x200, 0,8x300, 0,8x340 и 1,2x340 мм реверсивного четырёхвалкового стана 150/500x400 ООО «Кольчугцветметобработка» показали, что она изменяется в пределах $350 \text{ мм} \leq L \leq 1200 \text{ мм}$.

Расчётные значения критических напряжений сжатия при холодной прокатке тонких полос, рассчитанные по формулам (3.19) (3.31) даны в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Расчётные значения критических напряжений сжатия при холодной прокатке полос из меди МЗ.

h , мм	B , мм	L , мм	h/L	$\sigma_{кр}$, расчет по (3.19), МПа	$\sigma_{кр}$, расчет по (3.31), МПа
0,35	200	350	0,0010	0,4277	0,1150
0,8	300	640	0,0013	0,9932	0,1797
0,8	340	1000	0,0008	0,7732	0,0736
1,2	340	1200	0,0010	1,7398	0,1150

Сравнительный анализ критических напряжений сжатия представленных в табл. 3.3, для $h=0,35-1,20$ мм, $B=200-340$ мм, $L=350-1200$ мм, показывает, что $\sigma_{кр}$ рассчитанные по формуле (3.31) находятся в пределах $0,1 \div 0,2$ МПа и меньше, чем рассчитанные по сложившейся традиционной методике (3.19).

Результаты расчётов указывают, что для решения задач связанных с настройкой листопрокатного стана и регулирования профиля и формы прокатываемых полос, необходимо исходить из того, что запас продольной устойчивости прокатываемых полос гораздо меньше, чем рассчитанный по

традиционной методике, что не согласуется с опытными данными из работ [98,101]. Поэтому структура уравнения (3.31) требует уточнения.

Длину волнистого участка прокатанной полосы определим из геометрических условий (рис. 3.4) с учётом следующей зависимости:

$$L_B = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2}, \quad dx = \left(\frac{\pi a}{2L}\right)^2 + 1. \quad (3.32)$$

Принимая равенство $L = L_B$ по формулам (3.30) и (3.32), получим

$$\frac{a}{L} = \frac{2}{k\pi} \sqrt{\left| \left(\frac{\pi h}{\sqrt{12}L} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{кр}}} - 1 \right) \right|}. \quad (3.33)$$

При анализе формоизменения для случая упругопластического изгиба по толщине полосы в зависимостях (3.30), (3.31), (3.33) вместо модуля упругости E , необходимо использовать E_0 – модуль упругопластического продольного изгиба (модуль Т. Кармана)[100].

Поэтому зависимости (3.30), (3.31), (3.33) принимают вид:

$$L = \frac{\pi h}{k\sqrt{12}} \sqrt{\frac{E_0}{\sigma_{кр}}}, \quad \sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E_0}{12} \left(\frac{h}{kL}\right)^2, \quad (3.34)$$

$$\frac{a}{L} = \frac{2}{k\pi} \sqrt{\left| \left(\frac{\pi h}{\sqrt{12}L} \sqrt{\frac{E_0}{\sigma_{кр}}} - 1 \right) \right|}, \quad (3.35)$$

где $E_0 = \frac{4EE_S}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_S})^2}$.

Модуль упругости металла на кривой текучести E_s определяется по кривым упрочнения деформируемых прокаткой металлов и сплавов, приведенных в справочниках [66, 102, 103]. Например, для меди $E = 12,5 \cdot 10^4$ Н/мм², а значение $E_s = (1,5-5) \cdot 10^4$ Н/мм². Причем большие значения E_s соответствуют меньшим пластическим деформациям материала.

Настройка листопркатного стана на прокатку полос без образования дефектов формы (волнистости и коробоватости) допускает формирование продольных напряжений сжатия, не превышающих критических значений $\sigma_{сж} \leq \sigma_{кр}$. Результаты расчёта критических напряжений сжатия полос при холодной прокатке на листовых станах с использованием уравнений (3.19),

(3.31), (3.34) показали (см. табл. 3.3), что значения $\sigma_{кр}$ находятся на низких пределах $\sigma_{кр}=0,1-1,0$ МПа, что существенно отличается от опытных данных, приведённых в работах [97,101]. Экспериментальными исследованиями установлено, что на величину критических напряжений $\sigma_{кр}$ влияют условия прокатки: наличие или отсутствие натяжения полосы, склонность полосы к образованию «волны» или «короба», ширина участка, на котором образуются дефекты формы. Учёт условий деформирования позволит уточнить полученные зависимости для расчёта $\sigma_{кр}$ за счёт обоснованного введения и конкретизации численных значений коэффициента K , используемого в уравнениях (3.19), (3.31), (3.34). С.П. Тимошенко в работе [95] коэффициентом K в уравнении (3.19) расчёта критических напряжений при упругой деформации пластины учитывал условия её закрепления, отличающиеся от условий прокатки полос и листов. Поэтому, для адаптации уравнений (3.19), (3.31) и (3.34) к условиям прокатки следует принимать: $K=1$ – при прокатке листов и концевых участков полосы до $L_n \leq B$; $K = 1,5$ – при прокатке полосы с образованием (склонности) волнистости по кромкам; $K = 2,0$ – когда прокатываемая полоса склонна к образованию «короба» (волнистости по середине) и ее жёсткость более высокая.

При тонколистовой прокатке формирование неплоскостности (волна, короб) происходит, как правило, не по всей ширине, а на некотором участке ширины B полосы. Анализ экспериментальных данных, приведённых в работах [97,100,104] показывает, что эти участки составляют $(0,1 \div 0,5) \cdot B$, что необходимо учитывать коэффициентом K_l . Причем, величина $K_l = 0,1 \div 0,5$ должна уточняться на конкретном листопрокатном стане.

Поэтому, при тонколистовой прокатке расчёт критических напряжений сжатия $\sigma_{кр}$ следует проводить при обоснованных значениях коэффициентов K и K_l с учётом условий деформирования металла. Поэтому в упругой области

$$\sigma_{кр} = K \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{h}{K_l L} \right)^2. \quad (3.36)$$

В упругопластической области

$$\sigma_{кр} = K \frac{\pi^2 E_0}{12} \left(\frac{h}{K_1 L} \right)^2. \quad (3.37)$$

Показатель формы a/L прокатываемых полос вычисляется по уравнениям (3.33) или (3.35) при учёте условий деформирования металла и применением соответствующего уравнения (3.36) или (3.37) для расчёта величины критического напряжения сжатия.

Опытная холодная прокатка полос из меди МЗ проводилась на реверсивном четырёхвалковом стане 150/500x400 завода «Кольчугцветметобработка». Расчёты критических напряжений сжатия проводили по формуле (3.37), а показателя формы a/L по зависимости (3.35). Параметры плоскостности прокатываемых полос измеряли в соответствии с ГОСТ 1173-2006. Для сортамента полос, прокатываемых на стане, статистическая обработка параметров плоскостности показала, что амплитуда волнистости находится в интервале 0-20 мм, длина периода – 400-600 мм. Результаты измерений и расчёты соответствующих показателей прокатки представлены в табл. 3.4, где h_0, h_1 – толщина полосы на входе и выходе из валков; T_0, T_1 – переднее и заднее натяжение; P – усилие прокатки; a, L – амплитуда и длина периода волны, $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение.

Таблица 3.4

Показатель формы и критические напряжения для режима обжатий полос шириной 340 мм из меди МЗ на реверсивном четырёхвалковом стане 150/500x400.

Проход №	h_0 , мм	h_1 , мм	T_0 , кН	T_1 , кН	P , кН	a , мм	L , мм	a/L	$e = \Delta L/L$	$\sigma_{кр}$ МПа	Форма полосы/ деформация
1	1,50	1,20	60	60	388						планшетная
2	1,20	0,80	60	50	455						планшетная
3	0,80	0,65	50	40	341	9	600	0,015	0,0006	3,028	волнистая/ упругая
4	0,65	0,45	40	30	442	11	500	0,022	0,0012	2,090	волнистая/ упругая
5	0,45	0,35	30	30	352	15	400	0,038	0,0035	1,975	волнистая/ пластическая

Анализ продольных критических напряжений сжатия $\sigma_{кр}$ и показателя формы a/L , представленных в табл. 3.4 показал, что нарушение плоскостности прокатываемых полос происходит, начиная с толщины $h_1=0,80$ мм, то есть после третьего прохода. Амплитуда волнистости прокатываемых полос a последовательно увеличивается с третьего по пятый проходы с 9 мм до 15 мм, а длина периода волны снижается с 600 мм до 400 мм. При этом с третьего по пятый проходы неплоскостность ухудшается, поэтому a/L увеличивается с 0,015 до 0,038.

Расчёты критических напряжений сжатия по представленной методике (3.37) показали, что с третьего по пятый проходы они находятся на уровне 2-3 МПа. Сравнение фактической (измеренной) величины показателя формы a/L с расчётной по зависимости (3.35) показали, что их расхождение не превышает 30%, что позволяет повысить точность определения критических напряжений сжатия и показателя плоскостности полосы. Использование полученных зависимостей позволит повысить точность настройки листовых станов и регулирования плоскостности полос в процессе прокатки, а также обосновано проводить корректировку режимов обжатий.

Результаты проведенных расчётов применительно к режимам прокатки стана 150/500x400 «Кольчугцветметобработка» были использованы для анализа и проектирования режимов прокатки полос из меди и её сплавов. Рекомендовано перераспределить обжатия и увеличить на 17-20% натяжения, а также скорректировать профилировку рабочих валков стана – увеличить их выпуклость, что способствует уменьшению поперечной разнотолщинности. Внедрение разработанных режимов прокатки и профилировки рабочих валков позволит улучшить на 3-4% качество по точности медных полос на стане 150/500x400 и получить экономический эффект в размере 1,2 млн. руб. в год. (см. приложение № 2)

Выводы по главе 3.

1. Получены формулы для определения возможных отклонений параметров прокатки от их номинальных величин. Показано, что при

холодной прокатке на величину разнотолщинности оказывают наиболее существенное влияние изменения величины коэффициента трения, размеров валков и начальной разнотолщинности.

2. Уменьшить влияние колебаний коэффициента трения на разнотолщинность можно, уменьшая обжатия. С точки зрения уменьшения влияния изменений сил трения, лучше использовать 2-3 малых обжатия, чем одно – равное сумме этих величин. Для уменьшения влияния начальной разнотолщинности проката целесообразно использовать несколько прогладочных проходов.

3. Приведен анализ нарушения размеров проката ввиду потери устойчивости листов в процессе прокатки. Получены формулы для расчёта величин критических напряжений.

4. Установлено, что параметр формы прокатываемых полос a/L , а также соответствующее ему изменение относительной продольной деформации по ширине полос $e = \Delta L/L$ для сортамента, прокатываемого на станах холодной прокатки, может находиться как в упругой, так и в пластической областях.

5. Разработана методика расчёта критических напряжений и параметра формы полосы с учётом упругопластического изгиба по толщине участка полосы после потери плоскостности проката.

6. Методика расчёта критических напряжений и параметра формы прокатываемых полос может быть использована при разработке режимов обжатий, а также для оценки эффективности систем регулирования геометрической формы и поперечного профиля полос.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

4.1. Исследование и выбор рационального режима для непрерывного трёхклетьевого стана холодной прокатки полос.

Настройка непрерывного стана холодной прокатки на производство качественных полос является сложной и актуальной научно-технической задачей. Математическое моделирование и проектирование режимов прокатки позволяет исследовать и подобрать по клетям стана рациональные обжатия, натяжения и условия контактного трения, обеспечивающие экономию энергозатрат и получение заданных размеров полос с учётом требований к качеству проката и ограничений по нагрузкам прокатного оборудования.

Созданная система проектирования технологических процессов деформирования, описанная в главе 2, позволяет исследовать и проектировать технологию и оборудование непрерывной холодной прокатки. В базу данных этой системы были заложены 11 полиномиальных аппроксимаций кривых наклёпа наиболее часто используемых сталей, что ограничивало область её применения, и не позволяло использовать и проектировать технологические режимы прокатки полос из меди и её сплавов. Использование кривых наклёпа и уравнений для расчёта сопротивления металла деформации из работ [3,4,105] не позволяло получать адекватные уравнения для моделирования промышленных технологий. Поскольку эти зависимости были получены при испытании образцов, выплавленных из чистых металлов без использования ломов, которые сегодня в значительном объёме применяются для производства медных и латунных слитков на заводах по обработке цветных металлов. Испытания образцов из медных и латунных заготовок, полученных с Кировского и Кольчугинского заводов ОЦМ, позволили установить зависимости для расчёта сопротивления

металла деформации адекватные процессам прокатки в современных условиях [5] и расширить базу данных системы проектирования технологических процессов деформирования цветных металлов и сплавов.

Имитационное моделирование проводили применительно к прокатке тонких полос из меди и латуни на непрерывном трёхклетьевом стане 1000 с размерами валков в клетки 375/1000x1000 мм Кировского завода по обработке цветных металлов (ОАО КЗОЦМ). Стан обеспечивает холодную прокатку полос толщиной до 0,4 мм и шириной до 800 мм из подката толщиной до 15 мм со скоростью до 5 м/с. Клетки стана имеют ограничения по усилиям прокатки с 1-й по 3-ю клетки 10000 кН, что необходимо учитывать при проектировании деформационных режимов.

С помощью усовершенствованной системы проектирования технологических процессов деформирования были рассчитаны режимы прокатки тонких полос из меди и латуни Л63 толщиной 2,7 мм, шириной 630 мм на указанном стане.

Исследовали влияние условий контактного трения (f_{mp}) с применением трех видов смазок и использованием двух закономерностей распределения касательных напряжений трения по длине зоны деформации (Амонтона-Кулона и Зибеля) на деформационные и силовые показатели по клетям непрерывного стана 1000 при прокатке полос толщиной 2,7 мм, шириной 630 мм из латуни Л63. Коэффициенты контактного трения определяли по формуле А.П. Грудева [86].

$$f_{тр} = K_m \left(0,07 - \frac{0,1V^2}{2(1+V)+3V^2} \right), \quad (4.1)$$

где V – скорость прокатки, м/с; K_m – коэффициент, характеризующий вид смазки, который брали из работы [86].

Результаты математического моделирования и расчёта показателей прокатки, а также измеренные усилия прокатки по клетям стана 1000 приведены в табл. 4.1. В таблице обозначено: h_0 , h_1 – толщина полосы на входе и выходе из клетки; T_0 , T_1 – заднее и переднее натяжение полосы; ε – относительное обжатие; $P_{расч}$, $P_{экс}$ – усилие прокатки расчётное и опытное;

$\delta h_{расч}, \delta h_{экс}$ – поперечная разнотолщинность полосы расчётная и опытная; ΔP – погрешность расчёта усилия прокатки; А-К, З – законы трения по Амонтону-Кулону и Зибелю соответственно.

Таблица 4.1

Деформационные и силовые показатели прокатки полос толщиной 2,7 мм, шириной 630 мм из латуни Л63 на непрерывном трёхклетьевом стане 1000 в зависимости от условий и законов распределения контактного трения.

№ клетей	h_0 , мм	h_1 , мм	ε , %	T_0/T_1 кН	Вид смазки, $f_{тр}$	Закон трения	$P_{экс}$, кН	$P_{расч}$, кН	ΔP , %	$\delta h_{экс}$, мм	$\delta h_{расч}$, мм	$\Delta \delta h$, %
1	9,4	6,0	36,17	15/80	эмульсия 5%, 0,069	А-К	5413	6139	13,41	-	0,041	-
						З			6213		14,78	0,045
					эмульсия 10%, 0,065	А-К	5203	6059	16,45	-	0,037	-
						З			6143		18,07	0,041
					эмульсия 10% + керосин, 0,06	А-К	-	5949	-	-	0,032	-
						З					6051	-
2	6,0	4,0	33,33	80/80	эмульсия 5%, 0,067	А-К	6506	6944	6,74	-	0,075	-
						З			7035		8,14	0,08
					эмульсия 10%, 0,063	А-К	6271	6815	8,67	-	0,068	-
						З			6944		10,73	0,075
					эмульсия 10% + керосин, 0,058	А-К	-	6709	-	-	0,06	-
						З					6827	-
3	4,0	2,7	32,50	80/80	эмульсия 5%, 0,065	А-К	6804	7443	9,39	0,055	0,061	11,2
						З			7509		10,36	0,062
					эмульсия 10%, 0,061	А-К	6520	7252	11,23	0,049	0,056	14
						З			7399		13,48	0,058
					эмульсия 10% + керосин, 0,056	А-К	-	7155	-	-	0,055	-
						З					7257	-

Тип смазки рабочих валков влияет на деформационные и силовые показатели прокатки. Изменение типа смазки при подаче в зону деформации уменьшает коэффициент контактного трения приблизительно с 0,069 (эмульсия 5% (СП-3)) до 0,061 (эмульсия 10% (СП-3)). Смазка валков снижает усилие прокатки (расчётные показатели): в первой клетке с 6139 до 6059 кН, во второй клетке с 6944 до 6815 кН, в третьей с 7443 до 7252 кН, при расчёте распределения нормативных и касательных напряжений и коэффициента трения по дуге контакта по Амонтону- Кулону. Если в системе проектирования технологических процессов деформирования принять вид трения по Зибелю, то результаты расчёта будут иные. Расчётные значения усилий прокатки будут больше при снижении значений с улучшенными условиями контактного трения.

Увеличение усилия прокатки при принятии в расчётах распределения нормальных P_x и касательных τ_x напряжений и коэффициента трения по дуге контакта по Зибелю ($f_{тр.З} = \tau_x / \sigma_s$) объясняется тем, что сопротивление металла деформации σ_s при холодной прокатке зависит только от степени деформации (наклепа) металла (сплава) от входа к выходу из очага деформации. Нормальное напряжение (давление) по дуге контакта при прокатке, как правило, больше σ_s и определяет изменение коэффициента трения по Кулону $f_{тр.К} = \tau_x / P_x$. Результаты распределения напряжений и коэффициентов трения по дуге контакта подтверждают превышение $f_{тр.З}$ над $f_{тр.К}$ по всей длине зоны деформации полосы, что необходимо учитывать при проектировании параметров и режимов работы оборудования листового стана.

Проектирование рациональных режимов листовой прокатки предполагает наличие компьютеризированной системы, адекватно имитирующей сложный технологический агрегат типа непрерывного трёхклетьевого стана 1000 Кировского завода ОЦМ. С учётом разброса входных и выходных технологических переменных, механических свойств и размеров проката адекватность математической компьютеризированной

системы (программы расчёта) на промышленном прокатном стане можно оценивать по усилиям прокатки при наличии измерителей усилий по клетям и размеров полосы на выходе из стана с использованием методов математической статистики.

Опытную прокатку полос проводили на шлифованных стальных (из стали 9Х2МФ) рабочих валках с диаметрами по клетям $D_{p1}=375$ мм, $D_{p2}=375$ мм, $D_{p3}=375$ мм. Расстояние между серединами подшипников опорных валков 1850 мм. Верхние рабочие валки в первой клетке имели выпуклый профиль (профилировку) +0,06, нижние валки цилиндрические. Стальные цилиндрические опорные валки из стали 75ХМ по клетям имели диаметры: $D_{o1}=1000$ мм, $D_{o2}=1000$ мм, $D_{o3}=1000$ мм. Диаметры верхних и нижних рабочих валков по клетям были практически одинаковыми, как и опорных.

На непрерывном трёхклетевом стане 1000 КЗОЦМ, при установившемся процессе работы стана, осуществили прокатку 16 полос размером 9,4x630 мм из латуни Л63. Усилия прокатки по клетям стана измеряли с точностью ± 1 кН. Прокатку первых 7 полос производили в валках обрабатываемых эмульсией 5%, при проведении прокатки следующих 9 использовалась эмульсия 10%. Обработка результатов измерений усилий прокатки методами математической статистики позволила с достоверностью 0,95 определить математические ожидания и среднеквадратичные отклонения результатов измерений [89]. В таблице 4.1 приведены математические ожидания (средние значения) усилий прокатки по клетям стана 1000 при опытной прокатке полос. Измерения толщины осуществляли с использованием установленного на стане рентгеновского толщиномера РИТ 10.6, а поперечной разнотолщинности опытных полос проводили вручную с использованием современного портативного микропроцессорного ультразвукового измерителя толщины металла «Т-МИКЕ ЕМ» (производства США) с точностью $\pm 0,001$ мм, а также точечного микрометра с индикаторной головкой.

Измерения толщины по ширине с шагом 50,0 мм проводили на концевых (задних) участках полосы на расстоянии 4 метра. При исследовании поперечной разнотолщинности в качестве оценки ее симметричной составляющей принимали стрелу параболы $\delta h_{экс}$, полученную при обработке измеренных толщин по ширине полосы методом наименьших квадратов. Среднее квадратичное отклонение δh , при аппроксимация поперечного профиля полосы квадратичной параболой, полученных замеров в смежных сечениях находилось в пределах $(1-2) \cdot 10^{-4}$ мм при среднем уровне порядка 0,045 мм, что говорит о достаточной стабильности принятой характеристики. В таблице представлена поперечная разнотолщинность опытных полос непрерывного стана 1000 холодной прокатки. Наибольшие значения поперечной разнотолщинности наблюдаются при прокатке полос с применением смазки в виде эмульсии 5%. При прокатке одного и того же типоразмера в пределах одной партии среднее значение поперечной разнотолщинности увеличивается из-за износа рабочих валков, что требует корректировки в настройки стана.

Сравнение результатов измеренных значений $\delta h_{экс}$ с расчетными δh показало, что минимальное относительное отклонение около 10-15% расчетного значения от фактической поперечной разнотолщинности наблюдается при использовании в системе проектирования модели распределения касательного напряжения и коэффициента трения по дуге контакта по Амонтону-Кулону по сравнению с применением модели Зибеля. Применение 10% эмульсии приводит к уменьшению поперечной разнотолщинности на 12-15%, и к уменьшению в 17-23% при подаче на валки СОЖ эмульсии 10% с керосином.

Анализ результатов эксперимента позволил рекомендовать на непрерывном стане 1000 скорректировать деформационный режим в сторону увеличения обжатия во 2-й и соответствующего уменьшения в последней 3-й клетки и увеличить профилировку верхних рабочих валков до +0,07 мм, что позволит уменьшить поперечную разнотолщинность полос до 0,01-0,02 мм

для соответствия требованиям европейских стандартов, предъявляемых к качеству листового проката.

4.2. Исследование режимов прокатки медных и латунных полос на одноклетевых станах для уменьшения поперечной разнотолщинности металла.

Существует несколько методов для уменьшения поперечной разнотолщинности готовой латунной полосы:

- модернизировать прокатный стан за счёт установки системы противоизгиба валков;
- осуществить профилировку валков;
- определить рациональный режим натяжений.

Система противоизгиба рабочих валков предназначена для обеспечения точности проката за счёт принудительного изгиба верхнего и нижнего рабочих валков. Распирающие усилия создаются между шейками рабочих валков. Изгиб бочек валков создается за счёт давления противоизгиба и противоположен по направлению изгибу от давления нажимного устройства. Противоизгиб можно осуществить с помощью гидравлических цилиндров, вмонтированных в подушки рабочих валков. Усилие гидроцилиндров и давление от нажимных винтов создают изгибающий момент. Приложение дополнительного изгибающего момента к валкам позволяет изменять профиль бочки рабочего валка в процессе прокатки и тем самым регулировать распределение вытяжки по ширине прокатываемой полосы. Этот вариант является самым трудоёмким и дорогостоящим.

К факторам, влияющим на поперечный профиль и форму полосы в клетях «кварто», также относится неравномерный износ валков по длине бочек. Для компенсации влияния этого фактора и упругой деформации валков выполняют станочную профилировку образующих бочек валков

(выпуклая, цилиндрическая, вогнутая). Например, для валков стана кварто 150/500x400 необходима выпуклая профилировка.

Другой же способ управления качеством полосы – рациональный режим натяжений.

Исследовали (экспериментально и на компьютеризированной имитационной модели) режимы прокатки медных и латунных полос на листовом двухвалковом стане 350x450 «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов» и реверсивном листовом четырёхвалковом прокатном стане 150/500x400 завода «Кольчугцветметобработка».

Реверсивный листовый четырёхвалковый прокатный стан 150/500x400 предназначен для холодной прокатки полос из цветных металлов.

Максимальная толщина обрабатываемых лент 1,5 мм, минимальная толщина ленты после прокатки 0,2 мм, максимальная ширина ленты – 340 мм. Скорость прокатки 0,45 – 1,5 м/с.

Приводными являются рабочие валки. Они приводятся от электродвигателя постоянного тока через шестерённую клетку и универсальные шпиндели. Материал валков – сталь 9Х. Опорные валки предназначены для уменьшения прогиба рабочих валков и для увеличения жёсткости валковой системы.

Был проанализирован режим прокатки ленты толщиной 1,2 мм шириной 340 мм из меди МЗ на реверсивном стане 150/500x400 за 2 прохода до толщины 0,8 мм. С поперечной разнотолщинностью на выходе равной 0,05 мм.

Прокатка осуществляется на скорости 1,5 м/с без применения эмульсии, с заданным передним и задним натяжением полосы – 50 кН.

Допустимая поперечная разнотолщинность (оценивается разницей в толщинах между серединой и кромкой листа) медных полос принимается равной максимальному допуску по толщине, таким образом, для полосы толщиной 0,8 мм – максимальное значение поперечной разнотолщинности при нормальной точности – 0,09 мм, при повышенной точности – 0,08 мм,

при этом толщина середины и толщина кромки листа должны быть в рамках ГОСТ 1173-2006.

Исследовано влияние режима натяжений на поперечную разнотолщинность, для этого с помощью разработанного программного обеспечения для проектирования технологических процессов деформирования, были произведены расчёты усилия прокатки и поперечной разнотолщинности с целью определения режима прокатки для получения полосы с минимальной разнотолщинностью. Результаты расчётов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Деформационные и силовые показатели прокатки полос толщиной 0,8 мм, шириной 340 мм из меди МЗ на реверсивном листовом четырёхвалковом прокатном стане 150/500х400 при различных режимах натяжения.

Номер прохода	h_0 , мм	h_1 , мм	T_0/T_1 , кН	Условие трения			
				Сухие валки		Эмульсия 5%	
				P , кН	δh , мм	P , кН	δh , мм
Действующий режим $\Delta D_{ст} = +0,01$ мм							
1	1,2	0,9	20/20	365	0,045	363	0,044
2	0,9	0,8	20/20	267	0,039	266	0,038
Предлагаемый режим $\Delta D_{ст} = +0,015$ мм							
1	1,2	0,9	27/27	320	0,040	319	0,039
2	0,9	0,8	27/27	240	0,035	239	0,034

Расчёты показали, что увеличение выпуклости валков позволяет уменьшить поперечную разнотолщинность (при профилировке валков +0,015 мм δh снизилась на 10-16%). А увеличение переднего и заднего натяжения с 20 кН до 27 кН позволяет снизить поперечную разнотолщинность в среднем на 11%.

Внедрение разработанных режимов прокатки и профилировки рабочих валков позволит улучшить на 3-4% качество по точности медных полос на стане 150/500х400 завода «Кольчугцветметобработка» и получить экономический эффект в размере 1,2 млн. руб. в год.

Листовой двухвалковый стан 350х450 «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов» предназначен для холодной прокатки полос и лент из:

- бронзы марок БрБ2, БрБНТ1,9, БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15;
- латуни марок Л63, Л68, Л70, Л90, ЛС59-1, ЛК75-0,5;
- меди всех марок;
- некоторых других сплавов.

Максимальная толщина обрабатываемых лент 5 мм, минимальная толщина ленты после прокатки 0,95 мм, максимальная ширина ленты – 350 мм. Скорость прокатки до 0,88 м/с.

Рабочие валки из стали 9Х имеют профилировку верхних +0,04 мм, нижних +0,07 мм.

Исследовали режим прокатки ленты толщиной 3,0 мм шириной 300 мм из латуни Л63 на реверсивном стане 350х450 за 5 проходов до толщины 1,0 мм. С поперечной разнотолщиной на выходе равной 0,05 мм.

Исследовано влияние режима натяжений на поперечную разнотолщиной, для этого с помощью разработанного программного обеспечения для моделирования процессов прокатки были произведены расчёты усилия прокатки и поперечной разнотолщиной с целью определения режима прокатки для получения полосы с минимальной разнотолщиной. Результаты приведены в таблице 4.3.

В таблице 4.3 представлен расчёт усилия прокатки и поперечной разнотолщиной для действующего технологического режима прокатки лент из латуни Л63 на двухвалковом стане 350х450 (действующий режим), а также подобранный режим, при котором получены наилучшие результаты по плоскостности полосы (предлагаемый режим). Так при увеличении

натяжения на моталке на 20% и увеличении выпуклости валков до +0,09 мм, усилие прокатки снизилось в среднем на 4%.

Таблица 4.3

Деформационные и силовые показатели прокатки полос толщиной 1 мм, шириной 350 мм из латуни Л63 на листовом двухвалковом прокатном стане 350x450.

Номер прохода	h ₀ , мм	h ₁ , мм	Действующий режим ΔD _{ст} =+0,055 мм				Предлагаемый режим ΔD _{ст} =+0,09 мм			
			T0, кН	T1, кН	P, кН	δh, мм	T0, кН	T1, кН	P, кН	δh, мм
1	3	2,25	30,71	31,06	1548	0,101	36,85	37,27	1508	0,078
2	2,25	1,7	31,06	30,17	1864	0,084	37,27	36,21	1817	0,049
3	1,7	1,35	30,17	28,10	1956	0,073	36,20	33,72	1903	0,037
4	1,35	1,15	28,10	26,18	1799	0,064	33,72	31,42	1745	0,029
5	1,15	1	26,18	24,33	1805	0,059	31,42	29,19	1747	0,024

Корректировка профиля рабочих валков листового двухвалкового прокатного стана 350x450 «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов» до величины +0,09 мм и увеличение натяжений между станом и моталкой позволит уменьшить разнотолщинность и улучшить плоскостность лент на 2-3%, и получить экономический эффект в размере 800 тыс. руб. в год.

Выводы по главе 4.

1. Исследования на имитационной модели и при эксперименте на непрерывном стане 1000 КЗОЦМ позволили уточнить закономерности по влиянию условий трения на дуге контакта на усилие прокатки и поперечный профиль полосы из латуни Л63. По результатам исследования сформулированы рекомендации по проектированию деформационного

режима и профилировки рабочих валков в клетях стана 1000 для уменьшения поперечной разнотолщинности при прокатке тонких полос из латуни.

2. Расчёты, проведенные для реверсивного листового четырёхвалкового прокатного стана 150/500x400 завода «Кольчугцветметобработка», позволили рекомендовать изменение режимов натяжения на стане, а также профилировки рабочих валков, для получения тонких медных полос повышенной точности. Внедрение разработанных режимов прокатки и профилировки рабочих валков позволит улучшить на 3-4% качество по точности медных полос на стане 150/500x400 и получить экономический эффект в размере 1,2 млн. руб. в год.

3. По результатам расчётов, проведенных для листового двухвалкового прокатного стана 350x450 «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов», сформулированы рекомендации по увеличению натяжения между клетью и моталкой, а также изменению профилировки рабочих валков для улучшения плоскостности латунных лент. Внедрение этих мероприятий позволит уменьшить разнотолщинность и улучшить плоскостность лент на 2-3%, и получить экономический эффект в размере 800 тыс. руб. в год.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАЛИБРУЮЩЕГО БЛОКА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС.

5.1 Создание и исследование калибрующего блока для повышения качества листов холодной прокатки.

В настоящее время повышение качества листов, в частности, узкой полосы, имеет большое значение, поскольку технология производства сварных труб на непрерывных агрегатах включает в себя: размотку, правку, сварку на стыкосварочной машине в непрерывную ленту, формовку трубы, сварку, порезку на мерные длины на летучих ножницах, охлаждение, правку, отсортировку [96, 100].

При производстве сварных труб до 15 процентов от их общего объёма отсортировываются по дефекту: непровары, смещение кромок, закаты, надрезы.

Известно, что в настоящее время полосы, используемые при производстве сварных труб, производятся по двум технологиям:

- прокаткой полос на штрипсовых станах,
- прокаткой на широкополосных станах полос шириной 1000 мм – 1700 мм с последующим их роспуском на агрегатах продольной резки на несколько более узких полос.

Как правило, полоса, производимая по первой технологии, имеет дефект в виде серповидности.

Полоса, производимая по второй технологии, имеет дефект кромок в виде заусенца и подгиба кромок, являющимися следствием некачественной настройки агрегата продольной резки.

Существующие ТУ допускают такой вид дефектов кромок, однако их превышение приводит к вышеперечисленным дефектам сварных труб.

Следует отметить, что с целью экономии металла сварные трубы целесообразно производить из узких полос с толщиной, равной нижней границе минусового допуска по толщине.

Так для полосы толщиной 3 мм нижняя граница минусового допуска по толщине равна $-0,2$ мм.

Для исключения дефектов узкой полосы, необходимо её прокалибровать перед формовкой и сваркой, что позволит уменьшить (устранить) серповидность, устранить дефект «подгиб кромок», а также получить полосу с минусовым допуском по толщине. Для этой цели была разработана технология и конструкция агрегата для реализации процесса калибровки листа.

Калибрующий агрегат состоит из клетки дуо, в которой деформация полосы производится между валками, имеющими разный диаметр, и калибрующего блока, в котором деформация полосы осуществляется путем его волочения между двумя рабочими роликами, рис. 5.1.

Калибрующий блок состоит из двух рабочих цилиндрических роликов, опирающихся попарно на два опорных цилиндрических ролика, нажимного устройства и корпуса.

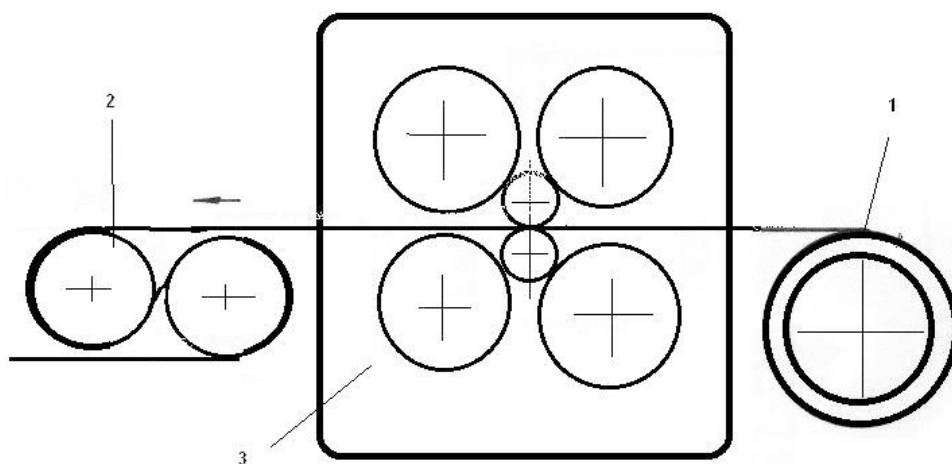


Рис. 5.1. Кинематическая схема калибрующего агрегата: 1 – разматыватель, 2 – клеть дуо, 3 – калибрующий блок.

Калибровка полосы осуществлялась путем волочения через калибрующий блок и деформации в клетки дуо в валках разного диаметра по трем компоновочным вариантам.

По первому варианту калибровка полосы проводилась в калибрующем блоке, состоящем из двух рабочих роликов с диаметрами равными 50 мм, опирающихся на четыре цилиндрических опорных ролика.

По второму варианту калибровка полосы проводилась в калибрующем блоке, состоящем из двух рабочих роликов с диаметрами равными 80 мм, опирающихся на четыре цилиндрических опорных ролика.

По третьему варианту калибровка полосы проводилась в калибрующем блоке, состоящем из двух рабочих роликов с диаметрами, равными, 50 мм, опирающихся на четыре многоопорные оси.

В процессе проведения работы осуществляли калибровку полосы толщиной 1,0 мм, шириной 60 мм из материала меди МЗ, диаметр рабочих роликов равнялся 50 мм, диаметр цилиндрических опорных роликов равнялся 200 мм, диаметр валков клетки дуо 180 мм (различие диаметров валков двухвалковой клетки составило 1,00 мм). Входная продольная разнотолщинность полосы составляла 0,20 мм, амплитуда неплоскостности 7 мм на 1,0 погонный метр.

В процессе калибровки получена конечная продольная разнотолщинность, которая была равна 0,17 мм, дефект полосы в виде подгиба кромок и серповидности полностью устранялся.

Исходная и конечная продольная разнотолщинность полосы после калибровки в калибрующем блоке и клетки дуо определялась с помощью летучего микрометра, а также контролировалась традиционным способом.

Выравнивание продольной разнотолщинности полосы после калибровки в калибрующем агрегате оценивали по коэффициенту выравнивания абсолютной продольной разнотолщинности.

$$K_B = \frac{\Delta h_0}{\Delta h_1}, \quad (5.1)$$

где Δh_0 , Δh_1 – исходная и конечная продольная разнотолщинность полосы.

Изменение толщины полосы на выходе из калибрующего блока (изменение продольной разнотолщинности полосы), определялось при совместном графическом решении уравнений упругой деформации станины калибрующего блока и пластической деформации металла.

О влиянии параметров процесса калибровки на изменение конечной продольной разнотолщинности полосы, судили по величине параметра

$$C_0 = L \frac{dp_c}{dh_0} + p_c, \quad (5.2)$$

где L – длина очага деформации в калибрующем блоке, h_0 – толщина полосы на входе в калибрующий блок, p_c – среднее давление в калибрующем блоке.

Расчёты показывают, что для устранения продольной разнотолщинности полосы ($\Delta h_1 = 0$) на выходе из калибрующего блока необходимо, чтобы выполнялось условие $C_0 = 0$.

Если в процессе калибровки узкой полосы величина параметра « C_0 » значительно превышает нулевую величину, то необходимо: использовать другой вариант компоновки калибрующего блока, увеличить переднее натяжение или увеличить жёсткость калибрующего блока.

Расчётная величина параметра « C_0 » при калибровке полос из меди МЗ в калибрующем блоке приведена в таблице 5.1.

Таблице 5.1.

Изменение параметра C_0 при калибровке полос из меди МЗ на калибрующем блоке.

№ варианта	h_0	μ	R	p_c	C_0
-	мм	-	мм	МПа	МПа
1	3,0	0,1	50	236	423
2	3,0	0,1	50	215	202
3	3,0	0,1	50	201	116

В таблице 5.1 обозначены h_0 – толщина полосы на входе в калибрующей блок; μ - коэффициент трения в очаге деформации; R – радиус

рабочего ролика; p_c – среднее удельное давление в калибрующем блоке; C_0 – расчётный параметр. Анализ расчётных данных, приведенных в табл. 5.1, показал, что на параметр C_0 значительное влияние оказывает компоновка калибрующего блока.

Из табл. 5.1 следует, что наиболее эффективной является компоновка калибрующего блока по третьему варианту, а менее эффективна по первому варианту.

Процесс калибровки более эффективен при уменьшении толщины полос и диаметра роликов калибрующего блока.

Испытания показали, что при компоновке калибрующего блока по первому варианту, после калибровки полосы, коэффициент выравнивания абсолютной продольной разнотолщинности равен $K_B = 1,2$.

Полоса имеет прямоугольные кромки, а дефект в виде подгиба кромок отсутствует.

Определим параметр « C_0 », характеризующий выравнивание исходной продольной разнотолщинности полосы в калибрующем блоке, а также жёсткость калибрующего блока.

Расчёты провели для следующих параметров: толщина полосы от 3,4 мм до 6,0 мм, ширина 400 мм, радиус роликов калибрующего блока 25 мм, компоновка калибрующего блока по первому варианту. Расчётная величина параметра « C_0 » при калибровке полос из меди МЗ на калибрующем блоке приведена в таблице 5.2.

Анализ данных, приведенных в таблице 5.2, показал, что в зависимости от толщины полосы значение параметра « C_0 » изменяется в пределах от 285 до 301 МПа.

Расчёты показали, что, при компоновке калибрующего блока по первому варианту, коэффициент выравнивания абсолютной продольной разнотолщинности толщины полосы равен 1,8.

Таблица 5.2.

Изменение параметра « C_0 » при калибровке полос из меди МЗ на калибрующем блоке.

№	h_0	μ	R	p_c	C_0
-	мм	-	мм	МПа	МПа
1	3,4	0,1	25	236	301
2	3,8	0,1	25	215	299
3	5,5	0,1	25	216	288
4	6,0	0,1	25	201	285

Из табл. 5.2 также следует, что повышенное значение параметра « C_0 » наблюдается при толщине полос равной 3,4 мм, то есть для данной толщины полос выравнивающие свойства калибрующего блока снижены.

Для рассматриваемого варианта компоновки калибрующего блока расчёты жёсткости калибрующего блока показали, что для ширины полосы равной 400 мм, начальной и конечной продольной разнотолщинности полос соответственно равных 0,36 мм и 0,20 мм, параметра « C_0 » равном 301 МПа жёсткость калибрующего блока составляет 433 МН/м, см. [96,98,100].

Анализ показал, что в виду значительной величины параметра « C_0 » дальнейшее уменьшение продольной разнотолщинности узких полос только за счёт его волочения через калибрующий блок невозможно. Для дальнейшего снижения продольной разнотолщинности полосы необходимо повысить жёсткость калибрующего блока.

Повышения жёсткости калибрующего блока добивались путем использования в качестве опорных роликов многоопорных осей попарно опирающихся на рабочие ролики, см. рис. 5.2.

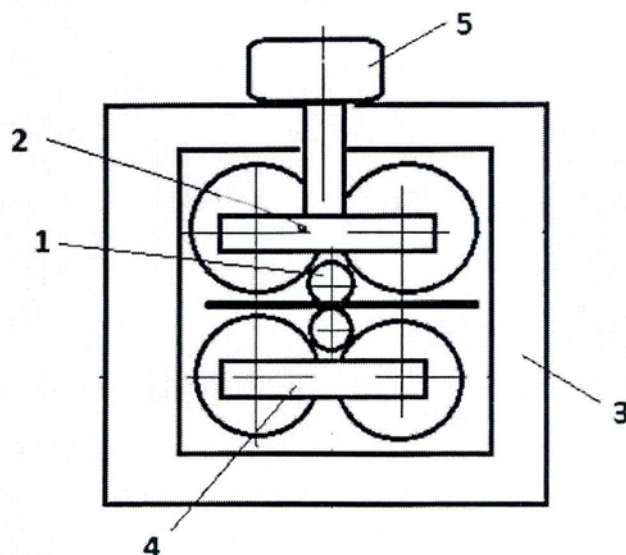


Рис. 5.2. Схема калибрующего блока:

1 – рабочие ролики, 2 – многоопорная ось, 3 – станина, 4 – подушки, 5 – нажимное устройство.

Многоопорная ось состоит из неподвижной оси, на которую насажены два опорных ролика, выполненных в виде подшипников качения, разделенных средней опорой, опирающейся на траверсу неподвижного корпуса. Крайние опоры многоопорной оси расположены в окнах корпуса и могут перемещаться в вертикальном направлении, воспринимая усилие от нажимного устройства. Опорные ролики многоопорной оси воспринимают усилие от рабочих роликов и через среднюю опору и передают её на неподвижный корпус.

Такая конструкция калибрующего блока позволяет свести к минимуму поперечный изгиб рабочих и опорных роликов и проводить калибровку полосы до толщины, равной нижней границе минусового поля допуска.

Расчёты показывают, что дефект полосы в виде подгиба кромок может быть полностью устранён.

Величины параметра « C_0 » при компоновке калибрующего блока по третьему варианту для полос из меди МЗ приведены в таблице 5.3.

Изменение параметра « C_0 » при калибровке полос из меди МЗ.

№	h_0	μ	R	C_0
-	мм	-	мм	МПа
1	2,0	0,1	40	14
2	3,0	0,1	40	116
3	4,5	0,1	80	64
4	3,0	0,1	65	20

Анализ расчётных данных, приведённых в табл. 5.3, показал, что, при калибровке полос на роликах с диаметром равным 40 мм и изменении толщины полосы от 2,0 мм до 3,0 мм, значение параметра « C_0 » изменяется в пределах от 14 до 116 МПа.

Наименьшее значение параметра « C_0 » получено при компоновке калибрующего блока с диаметром рабочих роликов равном 40 мм (толщина 2,0 мм), то есть в этом случае происходит наибольшее снижение продольной разнотолщинности.

При компоновке калибрующего блока по данному варианту переднее натяжение в калибрующем блоке – минимальное.

При толщине полосы, равной 3,0 мм, ввиду большой величины параметра C_0 (116 МПа) необходимо для дальнейшего снижения продольной разнотолщинности увеличить величину переднего натяжения в калибрующем блоке.

Расчёты показали, что начальную серповидность полосы можно устранить в клети дуо при деформации её в валках с разными диаметрами различающимся на 1,01 ... 1,10 мм.

Калибровка узких полос может быть использована на агрегатах непрерывной сварки труб ряда металлургических заводов.

5.2. Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы.

На основе проведённых исследований разработана новая конструкция калибрующего блока для регулирования плоскостности. В данной конструкции учтены достоинства и недостатки подобных устройств [106-108], для обеспечения дополнительного улучшения плоскостности прокатанных тонких полос.

Предложен калибрующий блок, который содержит две последовательно расположенные группы валков, каждая из которых снабжена своим нажимным устройством и приводом второй группы валков. Первая группа валков выполнена неприводной, и обе группы валков установлены в общей клетке, при этом каждый рабочий валок первой группы снабжен двумя опорными, два из которых относятся к одному рабочему валку, установлены в одной общей подушке с ближайшим валком второй группы, причем оси этих трёх валков лежат в одной плоскости. Валки второй группы установлены с взаимным смещением и выполнены того же диаметра, что и опорный валок первой группы. Два верхних опорных валка выполнены в виде насаженных на ось ряда роликов, контактирующих с верхним рабочим валком. Ролики расположены в промежутках между смежными опорами, на продольной части опорного моста выполнены горизонтальные отверстия, соединяющиеся с перпендикулярными им вертикальными отверстиями, при этом в горизонтальных отверстиях установлены толкатели, а в вертикальных отверстиях - поворотные оси, на каждом толкателе со стороны парной ему оси имеется паз, на обращенной к толкателю части оси эксцентрично насажена втулка, размещенная в пазу.

Схема калибрующего блока для регулирования плоскостности полосы представлена рисунке 5.3.

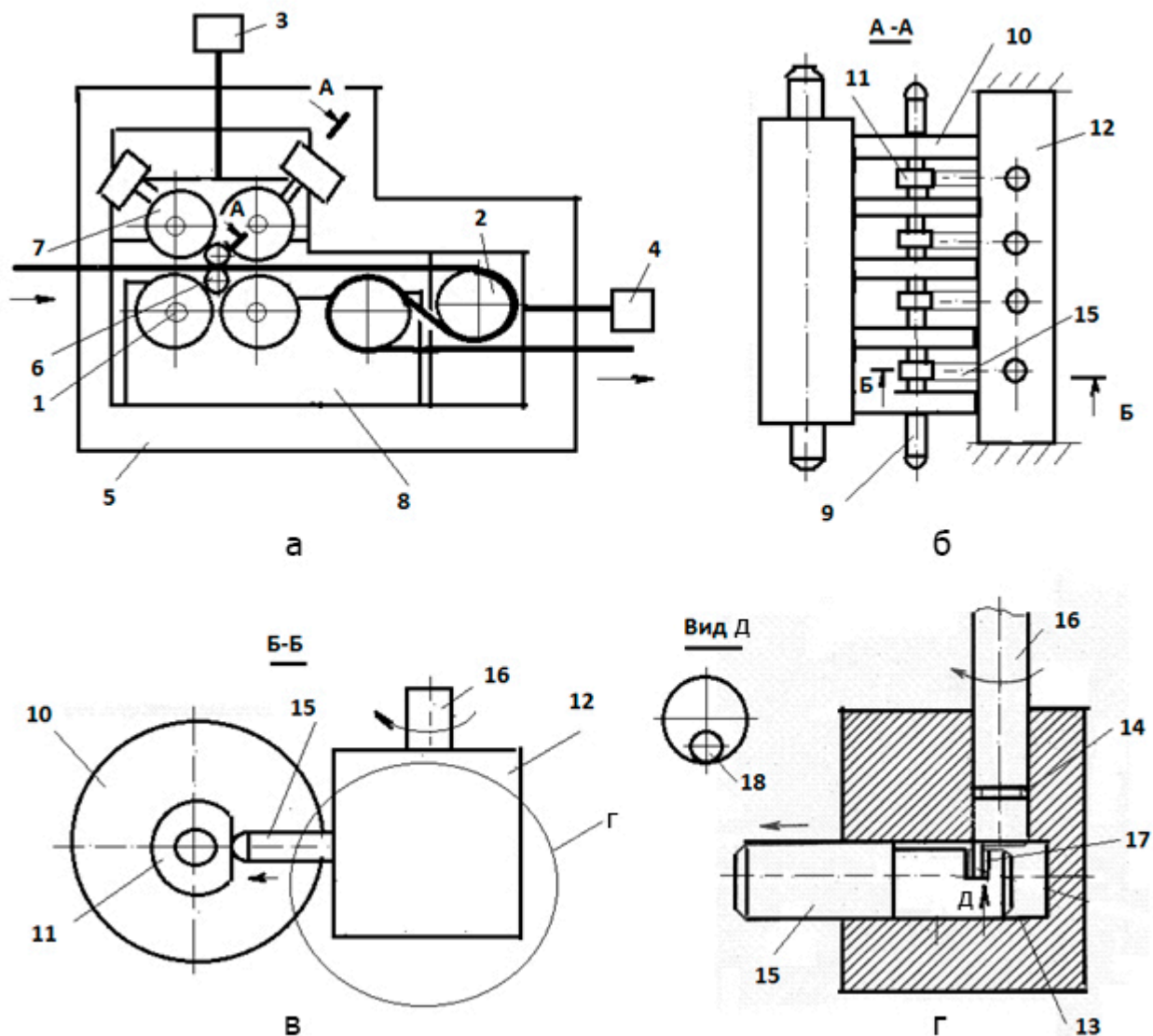


Рис. 5.3. Схема калибрующего блока для регулирования плоскостности полосы: а – общий вид блока, б – разрез А-А, в – разрез Б-Б, г – разрез Г.

Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы, содержит две последовательно расположенные группы валков 1 и 2, каждая из которых снабжена своим нажимным устройством 3 и 4, и привод второй группы валков (не показан), первая группа валков выполнена неприводной и обе группы валков установлены в общей клетке 5, при этом каждый рабочий валок 6 первой группы снабжен двумя опорными 7, два из которых относятся к одному рабочему валку, установлены в одной общей подушке 8 с ближайшим валком второй группы, причем оси этих трех валков лежат в

одной плоскости. Валки второй группы установлены с взаимным смещением и выполнены того же диаметра, что и опорный валок первой группы. Два верхних опорных валка выполнены в виде насаженных на ось 9 ряда роликов 10, контактирующих с верхним рабочим валком, ролики расположены в промежутках между смежными опорами 11, на продольной части опорного моста 12 выполнены горизонтальные отверстия 13, соединяющиеся с перпендикулярными им вертикальными отверстиями 14, при этом в горизонтальных отверстиях установлены толкатели 15, а в вертикальных отверстиях - поворотные оси 16, на каждом толкателе со стороны парной ему оси имеется паз 17, на обращенной к толкателю части оси эксцентрично насажена втулка 18, размещенная в пазу.

Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы работает следующим образом.

Полоса пропускается между рабочими валками 6 первой группы 1 и заправляется в валки второй группы 2. С помощью нажимного устройства 3 устанавливается зазор в валках первой группы, а с помощью нажимного устройства 4 устанавливается зазор во второй группе валков, которые являются приводными. С помощью тянущего устройства (не показано) создается заднее натяжение. Полоса за счёт заднего и переднего натяжения прижимается к валкам 2, на дугах охвата которых создаются силы трения, и протягивается через калибрующий зазор между рабочими валками 6. Для калибровки полосы между рабочими валками 6 первой группы 1 обе группы валков установлены в общей клетке 5, при этом каждый рабочий валок 6 первой группы снабжён двумя опорными 7, два из которых относятся к одному рабочему валку, установлены в одной общей подушке 8.

Если при калибровке полоса имеет неплоскостность в виде волнистости по краям, то необходимо изменить профиль межвалкового зазора и профиль полосы на двояковыпуклый, чтобы полоса получала большее обжатие по середине и становилась плоской. Это достигается следующим образом.

При повороте поворотных осей 16 по часовой стрелке, эксцентрики, насаженные на втулки 18, взаимодействуют с пазами 17, вызывая перемещение толкателей 15. При этом ось 9 изгибается, вызывая перемещение роликов 10 находящихся в середине бочки. Давление роликов передается на середину бочки рабочего валка. Середина бочки рабочего валка опускается, поперечный профиль межвалкового зазора и полосы становится двояковыпуклым и полоса получает большое обжатие по середине.

Если при калибровке полоса имеет неплоскостность в виде волнистости по середине, то необходимо изменить профиль межвалкового зазора и профиль полосы на двояковогнутый, чтобы полоса получала большее обжатие по краям и становилась плоской.

Данная регулировка осуществляется путем поворота поворотных осей 16 по часовой стрелке для роликов 10, находящихся по краям бочки.

При повороте поворотных осей 16 по часовой стрелке, эксцентрики, насаженные на втулки 18, взаимодействуют с пазами 17, вызывая перемещение толкателей 15. При этом ось 9 изгибается, вызывая перемещение роликов 10, находящихся по краям бочки. Давление роликов передается на края бочки рабочего валка. Края бочки рабочего валка опускаются, поперечный профиль межвалкового зазора и полосы становится двояковогнутым и полоса получает большое обжатие по краям и становилась плоской.

Таким образом, регулирование поперечного профиля межвалкового зазора приводит к изменению поперечного профиля полосы и устранению дефектов неплоскостности (волнистости по краям или посередине полосы).

При калибровке полосы с помощью представленного калибрующего блока изменение амплитуды волнистости (неплоскостность) снижается с 10-12 до 5-7 мм на 1 пог.м. Таким образом, использование предлагаемого калибрующего блока позволит снизить отсортировку холоднокатаных полос по неплоскостности на 42-50%.

Выводы по главе 5.

1. Исследованы различные варианты компоновки калибрующего блока для снижения продольной разнотолщинности полос на калибровочном агрегате. Показано, что лучшие технологические показатели достигаются при реализации калибрующего блока с многоопорными осями для обеспечения жёсткости конструкции.

2. Исследования показали, что для полос из меди МЗ толщиной 1,0 мм, шириной 60 мм, и компоновке калибрующего блока по первому варианту, с радиусом роликов калибрующего блока равном 50 мм, исходной продольной разнотолщинности 0,20 мм: обеспечивается, величина коэффициента выравнивания продольной разнотолщинности, равная 1,2.

3. Разработана новая конструкция калибрующего блока для регулирования плоскостности, обеспечивающего уменьшение разнотолщинности и улучшение плоскостности тонких полос. Предлагаемая конструкция калибрующего блока позволит улучшить плоскостность проката с 10-12 до 5-7 мм на 1 пог. м. Подана заявка на изобретение «Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы» (заявка от 03.09.2015 регистрационный номер №2015137420).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На базе двухвалкового листового стана 150x235 создана экспериментальная установка с микропроцессорной системой, которая позволяет контролировать усилие прокатки с точностью до 0,1 кН и с частотой 0,1 с. по длине прокатываемой полосы. Современный программно-технический комплекс на базе прокатного стана позволил уточнить закономерности влияния обжатия и условий контактного трения на силовые и деформационные показатели по длине полос из меди и латуни.

2. Полученные уравнения расчёта сопротивления деформации меди МЗ и латуней Л63 и ЛС59-1 для конкретного химического состава, позволяют при математическом моделировании повысить точность определения силовых и, как следствие, деформационных параметров холодной прокатки, а также показателей качества геометрии тонких полос на промышленных станах.

3. Полученные регрессионные уравнения, связывающие величины пределов текучести меди и латуней с величинами твёрдости, позволяют шире использовать современные портативные средства неразрушающего контроля механических свойств заготовок и готового проката.

4. Усовершенствована математическая модель и программный продукт, позволяющие осуществлять расчёт, как сопротивления деформации, давления, усилий и моментов прокатки, так и показателей точности полос, прокатываемых на одноклетьевых и непрерывных станах. Гибкие настройки входных параметров программы позволяют моделировать работу большинства листовых станов холодной прокатки, тем самым значительно уменьшая затраты на проектирование и на анализ настроек этих станов в реальных условиях. Данный продукт успешно протестирован на Кировском заводе ОЦМ, Кольчугинском заводе ОЦМ и заводе «Кольчугцветметобработка».

5. Выполнены расчёты возможных отклонений параметров прокатки от их номинальных величин, а также оценено влияние этих отклонений на точность показателей прокатки. Наиболее сильное влияние может оказать неопределенность в изменении коэффициента трения. Показано, что уменьшение обжатий снижает влияние изменений коэффициента трения на разнотолщинность, т.е. способствует повышению точности проката.

6. Уточнено уравнение для оценки устойчивости плоской формы проката с учётом не только упругой, но и пластической деформации по толщине полосы. Изучены параметры волнистости при потере устойчивости и повышена точность определения критических напряжений и режимов обжатий. Результаты подтверждены анализом экспериментальных данных.

7. Разработанная конструкция калибрующего блока для регулирования плоскостности, обеспечивает уменьшение разнотолщинности и улучшение плоскостности тонких полос. Предлагаемая конструкция калибрующего блока позволит улучшить плоскостность проката с 10-12 до 5-7 мм на 1 пог.м.

8. Результаты работы были использованы на предприятиях ООО «Кольчугинский завод по обработке цветных металлов» и ООО «Кольчугцветметобработка». Внедрение рациональных режимов прокатки и профилировок валков на листовом двухвалковом стане 350x450 и реверсивном листовом четырёхвалковом прокатном стане 150/500x400 позволило уменьшить поперечную разнотолщинность и улучшить плоскостность тонких полос на 2-4%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Райков Ю.Н. Тенденции развития российского рынка проката из меди и ее сплавов [текст] / Ю.Н. Райков // В сб. Медь. Латунь. Бронза. М.: ОАО «Институт Цветметобработка». 2006. С. 332-340.
2. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2015 [текст] / U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. 2015. С. 48-49.
3. Шаталов Р.Л. Технологии и режимы прокатки качественных полос из медных сплавов для монет [текст] / Р.Л. Шаталов, И.Ф. Пружинин, Н.А. Мочалов, А.Е. Шиманаев, С.А. Карпов // В сб. Медь. Латунь. Бронза. М.: ОАО «Институт Цветметобработка». 2006. С. 179-194.
4. Шаталов Р.Л. Повышение качества полос из цветных металлов и сплавов [текст] / Р.Л. Шаталов // Цветные металлы. 2001. № 5. С. 65-70.
5. Гугис Н.Н. Состояние и основные направления развития прокатного производства России в 2010 – 2013 гг. [текст] / Н.Н. Гугис // В сб. докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». С. 67-71.
6. Николаев А.К. Низколегированные медные сплавы в электротехнике [текст] / А.К. Николаев, И.Ф. Пружинин, Н.И. Ревина, В.М. Розенберг // В сб. Материалы Всемирного электротехнического конгресса. М.: ВЭЛК, 1977. 22 с.
7. Бровман М.Я. Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки. Перспективы развития металлургической промышленности. Saarbrücken, Deutschland / Германия. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 626 с.
8. Baukloh A. Das kontinuierliche Gießen von Kupfermittenem Gießband; Weiterentwicklung von Produktion und Weiterentwicklung von Produktion und Wirtschaftlichkeit von Produktion und Wirtschaftlichkeit / A. Baukloh, H. Gravemann, I. Fricke // Draht. 1990, NY. S. 491-495.

9. Чеботарев В.А. Создание литейно-прокатных агрегатов малой мощности для цветной металлургии [текст] / В.А. Чеботарев, А.В. Самсонов // В сб. неделя металлов в Москве 14-18 ноября, 2005 г. С. 432-438.

10. Райков Ю.Н. Производство и потребление проката тяжелых цветных металлов [текст] / Ю.Н. Райков // В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Национальный исследовательских технологический университет «МИСиС», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. М.: 2014. Т.1. С. 59-60.

11. Третьяков А.В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки [текст] / А.В. Третьяков. М.: Металлургия, 1966 – 255 с.

12. Полухин П.И. Прокатное производство [текст] / П. И Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев. – М.: Металлургия, 1982. 696 с.

13. Белосевич В.К. Эмульсии и смазки при холодной прокатке [текст] / В.К. Белосевич, Н.П. Нетесов, В.И. Мелешко, С.Д. Адамский. М.: Металлургия, 1976 – 416 с.

14. Сафьян М.М. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство [текст] / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. Киев, «Выща школа». 1988 – 351 с.

15. Целиков А.И. Прокатные станы [текст] / А.И. Целиков. М.: Металлургиздат, 1946. 560 с.

16. Целиков А.И. Основы теории прокатки [текст] / А.И. Целиков. М.: Металлургия, 1965. 247 с.

17. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов [текст] / В.П. Полухин. М.: Металлургия, 1972. 512 с.

18. Полухин В.П. Алгоритмы расчета основных параметров прокатных станов [текст] / В.П. Полухин, В.Н. Хлопонин, Е.В. Сигитов, М.В. Косырева, К.П. Тимощук, А.Г. Васильченко, Н.Е. Геништа, В.В. Лурье. М.: Металлургия. 1975. 231 с.

19. Павлов И.М. Теория прокатки [текст] / И.М. Павлов. М.: Металлургиздат, 1950. 611 с.
20. Хейн А.Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки [текст] / А.Я. Хейн. М.: Металлургиздат. 1941. 248 с.
21. Chobrial M.J. A photo elastic investigation of the contact stresses developed in rolls during asymmetrical flat rolling [text] / M.J. Chobrial. International Journal of the Mechanical Sciences. – 1989. – Vol. 31. - №10. – P. 751 – 764.
22. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов [текст] / В.Н. Выдрин. М.: Металлургиздат, 1960. – 265 с.
23. Колесников, А. Г. Технологическое оборудование прокатного производства : учебное пособие / А. Г. Колесников, Р. А. Яковлев, А. А. Мальцев. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 158 с.
24. Гарбер Э.А. Производство проката: Справочное издание. Том 1. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) [Текст] – М.: Теплотехник, 2007. – 368 с.
25. Кохан Л.С. Механическое оборудование цехов по производству цветных металлов [текст] / Л.С. Кохан, А.Г. Навроцкий. М.: Металлургия, - 1985. 312 с.
26. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением [текст] / В.Л. Колмогоров. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. – 836 с.
27. Богатов А.А., Ресурс пластичности металлов при обработке давлением [текст] / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
28. Шевелев В.В. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку [текст] / В.В. Шевелев, С.П. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1972. – 136 с.
29. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке [текст] / М.Я Бровман – М.: Металлургия, 1965. 247 с.

30. Бровман М.Я. Оборудование для точной прокатки в СССР и за рубежом [текст] / М.Я. Бровман – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ. 1988. вып. 2. 37 с.
31. Sendzimir M. Hot strip mills for thin Slab Continuous systems [text] / M. Sendzimir // Iron and Steel Engineer, 1986. № 10. P. 36-43.
32. Меерович И.М. Прокатка плит и листов легких сплавов [текст] / И.М. Меерович. М.: Metallurgiya 1969. 252 с.
33. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки [текст] / М.Я. Бровман. М.: Metallurgiya, 1995. 256 с.
34. Пасечник Н.В. Сравнительный анализ эффективности регулирования профиля валков в шестивалковых станах конструкции ВНИИМЕТМАШ [Текст] / Н. В. Пасечник, С. В. Родинков, Ю. В. Гесслер, В. К. Орлов, А. Н. Акимов // Неделя металлов в Москве, 14-18 ноября 2005 г. : сб. тр. конф. и семинаров - М.: Информация – XXI век. 2005. – С. 191-194.
35. Бровман М.Я. Оборудование для асимметричной прокатки в СССР и за рубежом [текст] / М.Я. Бровман. М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ. Вып. 2. 1987. 31 с.
36. Трайно, А.И. Повышение эффективности механической обработки валков листовых станов [Текст] / А.И.Трайно, В.С.Юсупов, Г.К.Ноников [и др.] // Труды второго конгресса прокатчиков. – М.: АО Черметинформация. — 1998. С. 344-346.
37. Ильюшин А.А. Пластичность. Часть первая. Упруго-пластические деформации [текст] / А.А. Ильюшин. – М. Издание МГУ, 2004. – 376 с.
38. Соколовский В.В. Теория пластичности [текст] / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа. 1969. – 608 с.
39. Ивлев Д.Д. Теория идеальной пластичности [текст] / Д.Д. Ивлев – М.: Наука, 1966 – 232 с.
40. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке [текст] / М.Я. Бровман. – М.: Metallurgiya. 1991. – 265 с.

41. Кийко И.А. Теория пластического течения [текст] / И.А. Кийко – М.: Изд. МГУ 1978. – 75 с.
42. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформация, разрушение [текст] / В.Л. Колмогоров – М.: Metallurgiya, 1970 – 230 с.
43. Мазур В.Л. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения) [текст] / В.Л. Мазур, А.В. Ноговицын. – Днепропетровск, «Днепр – VAL». 2010. 498 с.
44. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением [текст] / Г.Я. Гун. – М.: Metallurgiya, 1980. – 456 с.
45. Ключников В.Д. Математическая теория пластичности [текст] / В.Д. Ключников. М.: Изд. Московского университета. 1979. 207 с.
46. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением [текст] / В.Л. Колмогоров. М.: Metallurgiya, 1986. – 688 с.
47. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести [текст] / Н.Н. Малинин. М.: Высшая школа, 1979. – 119 с.
48. Хилл Р. Математическая теория пластичности [текст] / Р. Хилл. М.: Изд. Иностранной литературы, 1977. – 407 с.
49. Прагер В. Исследование зависимости напряжений – деформации в изотропных пластических твердых телах [текст] / В сб. Теория пластичности под ред. Ю.Н. Работнова // М.: Изд. иностранной литературы. 1948. С. 301-315.
50. Матвеев Б.Н. Пластичность и сопротивление металлов деформации [Текст]: Учебное пособие / Матвеев Б.Н., Петров А.П., Шелест А.Е. – М.: МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2003. – 56 с.
51. Сен-Венан Б. Об установлении уравнений внутренних движений, возникающих в твердых пластических телах за пределами упругости [текст] / Б. Сен-Венан // В сб. Теория пластичности. Под ред. Ю.Н. Работнова. М.: Гос. издательство иностранной литературы. 1948. С. 11-19.
52. Леви М. К вопросу об общих уравнениях внутренних движений, возникающих в твердых телах за пределами упругости [текст] / М. Леви.

Всб. «Теория пластичности. Под ред. Ю.Н. Работнова. М.: Гос. издательство иностранной литературы. 1948. С. 20-23.

53. Karman Th. V. Beitrag zur Theorie des Walzvorgang [text] / Th. Karman. // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. 1925. V. 5. № 2. S 118-121.

54. Тарновский И.Я. Контактные напряжения при пластической деформации [текст] / И.Я. Тарновский, А.И. Леванов, М.М. Поксеваткин. М.: Металлургия, 1966. 279 с.

55. Рокотян Е.С. Энергосиловые параметры обжимных и листовых станов [текст] / Е.С. Рокотян, С.Е. Рокотян. М.: Металлургия. 1968. 272 с.

56. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах [текст] / А.И. Целиков. – М.: Металлургиздат. 1962. 494 с.

57. Унксов Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением [текст] / Е.П. Унксов. М.: Машгиз, 1955. 280 с.

58. Кохан Л.С. Силовые и кинематические параметры продольной листовой прокатки: монография / А.Б. Коростелев, Ю.А. Морозов, А.В. Алдунин и др. – М.: МГВМИ, 2012. – 432 с.

59. Шаталов Р.Л. Теория процессов прокатки и волочения: учебник для вузов [текст] / Р.Л. Шаталов – М.: ВЗПИ, 1993. 250 с.

60. Кобелев О.А. Ковка широких толстых плит [текст] / Цепин М.А., Скрипаленко М.М.. – М.: Теплотехник, 2009. – 192 с.

61. Элингхаузен Т. QForm 7- новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением [текст] / Т. Элингхаузен, С. А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство . 2014 . № 2 . С. 31-34.

62. Барышников, М.П. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением [текст] / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 72-74.

63. Шаталов Р.Л. Автоматизированная система расчета и проектирования технологии и оборудования для прокатки листов [текст] / Р.Л. Шаталов // Пластическая деформация сталей и сплавов: Сборник научных трудов. – М.: Изд-во МИСиС, 1996. С. 374-378 .

64. Шаталов Р.Л. Автоматизированное рабочее место технолога-листопрокатчика / Р.П. Шаталов, Ю.И. Передерий, С.Ю. Передерий // Производство проката. 2003. № 1. – С. 15-18.

65. Коновалов Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки [текст] / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев, - М.: Metallurgiya, 1968. 429 с.

66. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. / Гун Г.Я., Галкин А.М. – М.: Metallurgiya, 1983. 352 с.

67. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости [текст] / М.П. Марковец. М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

68. Шевакин Ю.Ф. Обработка металлов давлением [текст] / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышов, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов – Обработка металлов давлением – М.: Интермет. 2005 – 496 с.

69. Луговской В.М. Теоретические основы составления алгоритмов расчета процессов прокатки и волочения. Учебное пособие [текст] / В.М. Луговской, Р.Л. Шаталов – М.: ВЗПИ. 1988. – 96 с.

70. Гуревич А.Е. Методы исследования прокатных станов [текст] / А.Е. Гуревич, Е.С. Рокотян. – М.: Metallurgizdat, 1957. 494 с.

71. Рокотян Е.С. Исследование типового облучинга конструкции ЦКБММ ЦНИИТМАШ [текст] / Е.С. Рокотян Н.В. Сб. Прокатные станы. М.: Машгиз. 1955. С. 158-178.

72. Тарновский И.Я. Энергосиловые параметры прокатки цветных металлов и сплавов [текст] / Тарновский И.Я., Бровман М.Я., Серебренников В.Н., Додин Ю.С., Римен В.Х., Волкогон Г.М. – М.: Metallurgiya, 1975, 136 с.

73. Чижигов Ю.М. Прокатка квадратной заготовки из слябов непрерывной разливки с высоким отношением сторон [текст] / Ю.М. Чижигов, А.Н. Барам, А.Г. Веденов, Л.Л. Мадорский, Э.В. Никитин // В сб. Машиностроение и металлургия Кировского завода. Ленинград. Машиностроение. 1967. С. 191-203.

74. Баимов Н.И. Фольговые датчики для исследования прокатного оборудования [текст] / Н.И. Баимов, Ю.М. Гагазеев, Б.Н. Поляков // Металлургическое оборудование. НИИИНФОРМТЯЖМАШ. 1972. № 47, С. 35-36.

75. Ткалич К.Н. Точная прокатка тонких полос [текст] / К.Н. Ткалич, Ю.В. Коновалов. – М.: Металлургия, 1972. 108 с.

76. Чижигов Ю.М. Редуцирование и прокатка металла непрерывной разливки [текст] / Ю.М. Чижигов. М.: Металлургия, 1974. 384 с.

77. Беняковский М.А. Применение тензометрии в прокатке [текст] / М.А. Беняковский, М.Я. Бровман – М.: Металлургия, 1965. 144 с.

78. Ефимов В.Н. Сопротивление деформации в процессах прокатки [текст] / В.Н. Ефимов, М.Я. Бровман – М.: Металлургия, 1996 – 251 с.

79. Шаталов Р.Л. Определение механических свойств медных и латунных полос по показателям твердости при холодной прокатке [текст] / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, В.Л. Зисельман // Цветные металлы. 2014. № 5. С. 61-65.

80. Бровман М.Я. О сопротивлении пластической деформации в процессах прокатки и непрерывного литья металлов [текст] / М.Я. Бровман // Металлы. 2004. № 3. С. 24-33.

81. Зиновьев А.В. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов. [текст] / Колпашников А.И., Полухин П.И. и др.– М.: Металлургия, 1992. – 512 с.

82. Луговской В.М. Расчеты металлургического оборудования и технологических процессов прокатки на программируемом

микрокалькуляторе [текст] : Учебное пособие / Луговской В.М., Шаталов Р.Л. – М.: Изд-во ВЗПИ, 1989. – 103 с.

83. Зайцев. В.С. Проектирование параметров и режимов работы оборудования листопрокатных цехов [текст] : Учебное пособие / В.С. Зайцев, В.А. Третьяков – Липецк: ЛГТУ, 2009. – 660 с.

84. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство. [текст] / - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961.– 524 с.

85. Выдрин В.Н. Процесс непрерывной прокатки [текст] / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Metallurgy, 1970. 465 с.

86. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке [текст] / А.П. Грудев. – М.: Metallurgy, 1973. – 288 с.

87. Ионов С.М. Проблемы трения и технологические смазки при холодной листовой прокатке: Тр. V Междунар. науч.-практич. конф. «Научно-технический прогресс в металлургии» (15–16 октября 2009 г.). / С.М. Ионов, А.В. Зиновьев // Теміртау – 2009. С. 401–408.

88. Ионов С.М. Расчет усилий при холодной листовой прокатке с использованием информационно-расчетной системы “Трение и технологические смазки”. Труды пятого конгресса прокатчиков. (Череповец, 21 – 24 октября 2003 г.) [Текст] / Ионов С.М., Осадчий В.А. -М.: МОО «Объединение прокатчиков», ОАО "Черметинформация", 2004. С. 127 – 129.

89. Железнов Ю.Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки [текст] / Ю.Д. Железнов, С.Л. Коцарь, А.Г. Абиев – М.: Metallurgy. 1974. 240 с.

90. Третьяков А.В. Результаты аналитических и экспериментальных исследований неплоскостности тонколистовой прокатки [текст] / А.В. Третьяков, И.М. Кондашевский. // В сб. Конструирование и совершенствование оборудования, выпускаемого Уралмашзаводом // Сб. трудов № 51. ВНИИМЕТМАШ. М.: Машиностроение. 1977. С. 60-63.

91. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением [текст] / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. 312 с.
92. Белосевич В.К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали [текст] / В.К. Белосевич – М.: Металлургия, 1982, 256 с.
93. Лукаш А.С. Компьютерное моделирование, программирование процесса непрерывной прокатки полос [текст]. Сборник докладов международной научно-технической конференции "Инновационные технологии обработки металлов давлением. / Шаталов Р.Л., Луговской В.М. – М.: МИСИС. 2011. С. 232-236.
94. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем [текст] / С.П. Тимошенко. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1946. 532 с.
95. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек [текст] / С.П. Тимошенко – М.: Наука. 1971. 807 с.
96. Максимов Е.А. Устойчивость плоской формы полосы с учетом упругопластического изгиба по толщине металла при тонколистовой прокатке [текст] / Е.А. Максимов, Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш // Черные металлы. 2011, № 10. С. 9-13.
97. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. [текст] / Железнов Ю.Д. – М.: Металлургия, 1971, 200 с.
98. Григорян Г.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки [текст] / Г.Г. Григорян, Ю.Д. Железнов, В.А. Черный, Ю.Д. Железнов, В.А. Черный – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
99. Целиков А.И. Теория продольной прокатки [текст] / Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. – М.: Металлургия, 1980. – 345 с.
100. Максимов Е.А. Производство планшетных полос [текст] / Е.А. Максимов, Р.Л. Шаталов, Н.Ш. Босхамджиев – М.: «Теплотехние», 2008 – 336 с.

101. Железнов Ю.Д. Различия условий прокатки тонких полос до и после потери плоской формы [текст] /Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г., Шаталов Р.Л., Гуров А.С. // Теория и технология обработки металлов давлением. Научные труды МиСИС, - М.: Metallurgiya, 1975, № 81, с.157-160.

102. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением [текст] : Справочник / Третьяков А.В., Зюзин В.И.– М.: Metallurgiya, 1973. - 224 с.

103. Головин В.А. Листы и ленты из тяжелых цветных металлов (производство, свойства, применение) [текст] : Справочник / Головин В.А., Кручер Г.Н. – М.: Metallurgiya, 1985. – 384 с.

104. Песин А.М. Новые технологические решения на основе моделирования осесимметричной прокатки [текст] // Сталь. 2003. № 2, с. 66-68

105. Зайков М.А. Процессы прокатки [текст] / М. А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов // М.: МИСиС, 2004. – 640 с.

106. Авторское свидетельство СССР № 312634 МПК В 21b 1/22. Устройства для регулирования профиля рабочих валков стана кварто / И.П. Дерягин, А.В. Грачев, Е.Г. Зиновьев и др., заявлено 18.05.1970, опубликовано 31.08.1971, Бюллетень изобретений № 26.

107. Максимов Е.А. Калибровка штрипса в непрерывном агрегате сварки труб [текст] // Metallurg .2009, №7. С.59-65.

108. Авторское свидетельство СССР № 1600871 А1МПК В 21 В 1/28. Способ деформации полосы и прокатный стан для его осуществления / В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев, А.В. Выдрин и др., заявлено 24.08.1988, опубликовано 23.10.1990, Бюллетень изобретений № 39.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Акты, подтверждающие использование результатов диссертационной работы

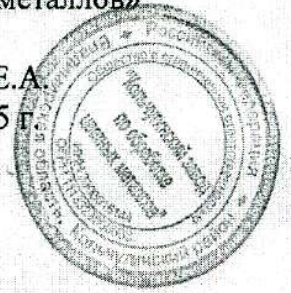
1. Акт опытно-промышленной проверки научно-практической работы по договору № 332 от 04.03.2013 г. «О научно-техническом сотрудничестве и подготовке кадров» между заводом и университетом.
2. Акт опытно-промышленной проверки результатов НИР по договору № 173 от 08.09.2014 г. «О научно-технологическом сотрудничестве и подготовке кадров (ООО «Кольчугцветметобработка» от 03.02.2015 г.)

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер ООО «Кольчугинский
завод по обработке цветных металлов»


13.01.

Юдин Е.А.
2015 г.



А К Т

опытно-промышленной проверки научно-практической работы
по договору № 332 от 04.03.2013 «О научно-техническом сотрудничестве и
подготовке кадров» между заводом и университетом

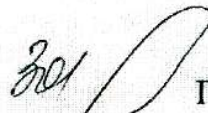
Результаты автоматизированного проектирования режимов прокатки и
опытных прокаток лент из латуней на стане ДУО 350x450 ООО «
Кольчугинского ЗОЦМ» позволяют рекомендовать внедрение следующие
технические мероприятия для улучшения качества плоского проката:

1. Рациональные деформационные режимы прокатки на стане ДУО
350x400 (изменение обжатий по проходам, увеличение натяжений между станом
и моталкой-разматывателем).

2. Усовершенствование профилировки стальных валков стана 350x450.

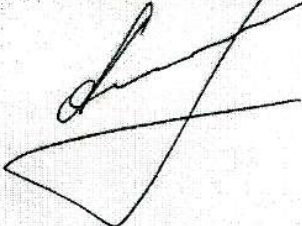
Внедрение этих мероприятий позволит уменьшить разнотолщинность и
улучшить плоскостность латунных лент на 2-3%. Ожидаемый экономический
эффект составит 800 тыс.руб./год.

Начальник лентопрокатного участка



Г.А.Завьялова

Вальцовщик 5-го разряда



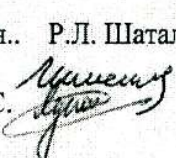
С.А. Александров

Руководитель работ от МГМУ (МАМИ), д.т.н. Р.Л. Шаталов

Исполнители:

к.т.н. Максимов Е.А.

аспирант Лукаш А.С.





«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ООО «Кольчугцветметобработка»

Сухов Б. В.

3.02

2015 г.

АКТ

опытно-промышленной проверки результатов НИР по договору №173 от 08.09.2014г.
«О научно-технологическом сотрудничестве и подготовке кадров»

На основании результатов расчётов, автоматизированного проектирования и успешных опытных прокаток полос из меди и её сплавов на реверсивном четырёхвалковом стане 150/500/400 ООО «Кольчугцветметобработка» рекомендовано внедрить следующие технологические мероприятия:

1. Усовершенствованные деформационные режимы стана кварто 150/500/400 (перераспределение обжатий, увеличение натяжений между станом и моталкой).
2. Скорректированные профилировки рабочих валков стана кварто 150/500/400 (увеличение выпуклости рабочих валков).

Внедрение указанных мероприятий позволит увеличить качество по точности медных полос на 3-4%. Ожидаемый экономический эффект составит 1,2 млн. руб/г.

Начальник участка прокатного
производства

Д.Л. Алексеев.

Старший вальцовщик

А.А. Бобков.

Руководитель работ от
« Университета машиностроения »

д.т.н. Д.Н. Шаталов.

Исполнители:

к.т.н. Е.А. Максимов.
аспирант А.С. Лукаш.