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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____Л.В. Радионова

«_____» _____ 20__ г.

Тема работы: Разработка технологии получения полос из сплавов на основе магния в условиях ООО НПП «РосАнтикор»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ-22.03.02-2019-092-00.00.00 ПЗ

Руководитель работы:

_____/ *А.П.Пелленен* /
Автор работы

_____/ *А.М.Ефимов* /

студент группы П-438

Челябинск
2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..….5
1.АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС НА ОСНОВЕ МАГНИЯ……..7
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТА……...……11
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ……..……..22
4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС НА ОСНВЕ МАГНИЯ В УСЛОВИЯХ ООО НПП «РосАнтикор»……...……25
5. РАСЧЁТ РЕЖИОВ ДЕФОРМАЦИИ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ ПОЛОС НА СТАНЕ ДУО-860……28
6. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОСНАЩЕНИЮ СТАНА ДУО-860 ТРЕБУЕМЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ……...……..33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……...…….40
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК……...…….41

АННОТАЦИЯ

Ефимов А.М. Разработка технологии получения полос из сплавов на основе магния в условиях ООО НПП «РосАнтикор». – Челябинск: ЮУрГУ, П-438; 2019, 39с. 8ил., 2табл., 8библиограф. список –наим., 3 листов чертежей ф. А1.

Данная выпускная квалификационная дипломная работа выполнена с целью разработки технологии получения полос из сплавов на основе магния.

В дипломной работе описаны основные сведения о производстве и технологии получения полос из сплавов на основе магния, оборудование для прокатки, операции для резки.

Проведен анализ возможности получения полос из сплавов на основе магния в условиях ООО НПП «РосАнтикор».

Разработаны режимы деформации и проведен расчет энергосиловых параметров при прокатке полос из сплавов на основе магния на стане Дуо-860.

На основании существующей технической литературы и технологических процессов прокатки полос разработана схема для прокатки полос из сплавов на основе магния.

ВВЕДЕНИЕ

Магниевые сплавы – из всех известных конструкционных материаловнаиболее легкий металл. Поэтому применение магниевые сплавы находят в различных областях техники, транспорта и промышленности.

Большая часть добываемого магния используется для производства магниевых конструкционных сплавов, востребованных в авиационной, автомобильной, атомной, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, в приборостроении. Магниевые сплавы отличаются легкостью, прочностью, высокой удельной жесткостью, хорошей обрабатываемостью. Они немагнитны, отлично отводят тепло, обладают в 20 раз большей устойчивостью к вибрации, чем легированная сталь. Магниевые сплавы применяются для изготовления резервуаров для хранения бензина и нефтепродуктов, деталей атомных реакторов, отбойных молотков, пневмотруб, вагонов; емкостей и насосов для работы с плавиковой кислотой, для хранения брома и йода; корпусов ноутбуков и фотоаппаратов.

Лист выпускается по техническим регламентам в соответствие с требованиями, утвержденными на каждом предприятии. Листы из сплавов на основе магния используется для различных видов производства.

Магниевые изделия можно получить в виде литых деталей (в настоящее время в основном литьем под давлением и в кокиль). Также получения магниевых изделий возможно другим способом – производство полуфабрикатов обработкой давлением – прокат (объемы производства представлены на рис. 1. На данной диаграмме указано что наибольшее количество изделий из сплавов магния получаются в виде листа.

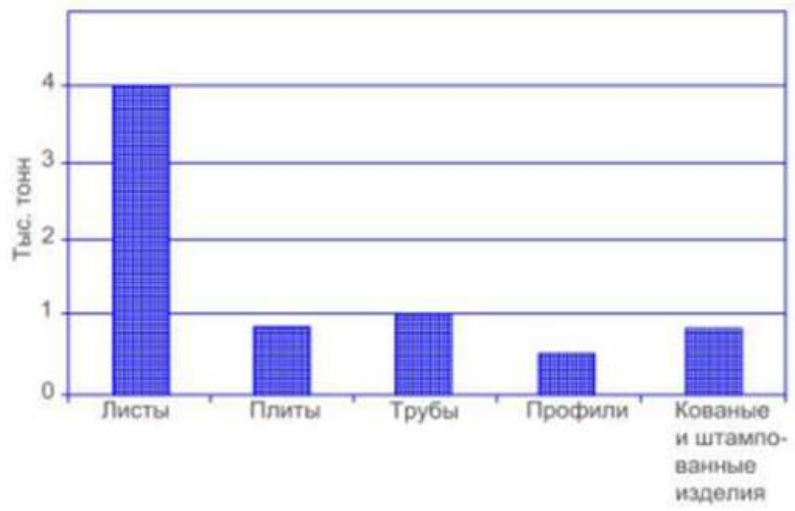

Рис. 1. Диаграмма распределения по видам готовой продукции из полуфабрикатов сплавов магния [1]

Требования, предъявляемые к готовой листовой продукции, причины брака и решение для его исправления:

1. На листе не должно быть перекатов и недокатов. Для того чтобы избежать данный брак нужно следить за обжатием при прокатке, шлифовкой валков и за подбором состава смазки.

2. На листе не должно быть вытянутой кромки. Она может появиться в результате перекоса валков, при нарушении режима охлаждения валков по длине бочки.

3. На листе не должно быть зарезов (складок). Для того чтобы избежать данный брак нужно следить за обжатием и натяжением листов (при сматывании на моталки).

4. На листе не должно образовываться отпечатков. Их появление может быть обусловлено попаданием пыли, песчинок, грязной смазки на поверхность валков.

5. На листе необходимо избегать дырчатости, или сквозных отверстий. Их происхождение может быть как литейного, так и прокатного вида. [2]

Настоящая работа посвящена изучению получения полос из сплавов на основе магния в условиях предприятия ООО НПП «РосАнтико». Разработать

технологию получения магниевых полос на стане ДУО-860 и провести расчёт режимов деформации. Разработать мероприятия по оснащению стана для ввода его в подходящее рабочее состояние.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

Традиционное производство листового материала практикуется в течение предыдущих 80 лет. Известными были такие производители как Electron в Биттерфэлде, Dow, Alcoa и др. На сегодняшний день среди прочих предлагается листовой материал от компании M&BMAGToronto. Эти компании используют непрерывно-литые заготовки для прокатки листов различной толщины (от 0,5 до 150 мм). Технология листового производства состоит из следующих стадий:

- литье слябов;
- гомогенизирующий отжиг;
- механическая поверхностная обработка (шлифование);
- многоэтапная прокатка с обрезанием боковой кромки и промежуточным отжигом;
- конечная термическая обработка.

Процесс прокатки происходит на клетях различного типа. В зависимости от возраста стана используются клети трио и кварто. Современные клети кварто оснащены внешним или внутренним подогревом и устройством очистки рабочих валков Также подобные клети оборудованы системой смазки и противоизгибом рабочих валков для воздействия на профиль полосы. Непрерывно-литые заготовки подвергаются реверсивной прокатке. Число проходов при этом зависит от исходной толщины сляба. Вследствие низкой теплоемкости прокат быстро остывает ниже критической температуры прокатки, что приводит к резкому снижению пластичности материала и образованию трещин на кромке листа. Для продолжения процесса прокатки в подобном случае необходима обрезка кромок и промежуточный отжиг. Быстрое охлаждение проката при малых толщинах

приводит к режимам прокатки, состоящих иногда из комбинации одного прохода и последующем промежуточном отжиге. Во избежание быстрого охлаждения прокатку можно осуществлять пакетами. Разумеется, прокатка пакетами является очень затратной в связи с дополнительной технологической операцией по подготовке пакетов, разницей в толщинах отдельных листов и всеми вытекающими последствиями. В связи с этим, подобная технология применяется очень редко. Конечная термическая обработка происходит в температурных интервалах между 300 и 400°C. В стратегических целях осуществляется прокатка листов с шириной 4 м и более. В подобных случаях процесс состоит из прессования труб большого диаметра, разреза их по образующей, правки и последующей прокатки на клетях типа кварто. Такая технология, включающая промежуточный и конечный отжиг, естественно, не подходит для производства листов в больших объемах. Разработки в области выгодной технологии для производства листа из магния сконцентрированы на методах, которые, с одной стороны, снижают трудоемкость процессов прокатки и отжига, увеличивая тем самым выход годного материала, и, с другой стороны, улучшают однородность литой структуры. Таким образом, удаться осуществить повышение пластичности листового материала. Новые возможности открываются при использовании литейно-прокатных комплексов. Эта технология позволяет существенно сократить производственные издержки и поэтому привлекает огромный интерес по всему миру. Значительные преимущества отражены в использовании исходного материала. Здесь, в отличие от технологии с применением непрерывно-литых заготовок, отсутствуют операции механической обработки поверхности слябов, промежуточного отжига при черновой прокатке, а также уменьшено количества проходов. Еще одно преимущество совмещения литья и прокатки состоит быстром охлаждении (до 10 раз) и одновременной частичной деформации. Это приводит, помимо получения мелкозернистой структуры, к предотвращению зейгерования и образования пор, пустот и хрупких выделений. Таким образом, существенно повышается пластичность и качество материала. Гомогенизирущий отжиг при этом, как правило, не требуется. На рис. 2 производство магниевого

листа на литейно-прокатном комплексе схематично противопоставлено традиционному способу.

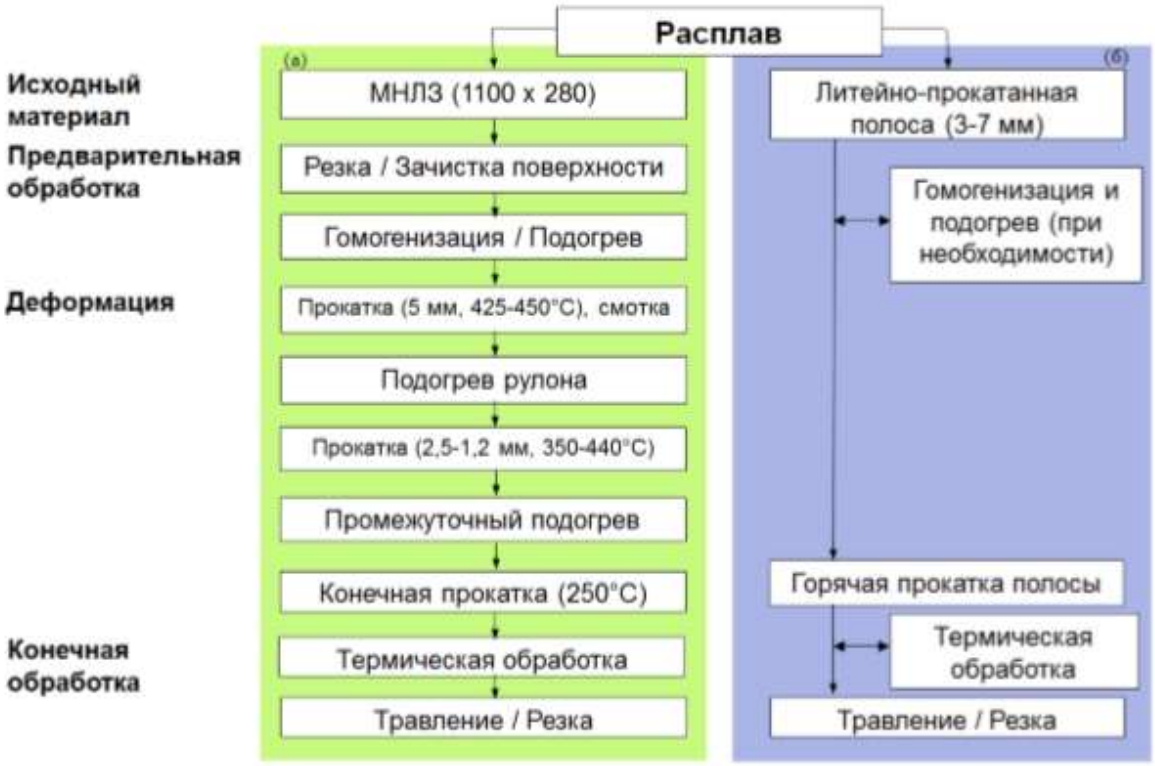

Рис.2. Технология производства листа из магния:
(а) традиционным способом и (б) с использованием литейнопрокатного агрегата

До последнего времени листы из магниевых сплавов использовали в электротехнике, высокой печати и, естественно, в ракетостроении и авиации. Это определило основные габариты листов и требования к их качеству. В основном использовали сплавы на основе систем Mg-Al-Mn, типичными представителями которых являются сплавы AZ31 (США и Европа) и МА2-1 (Россия). Их основными преимуществами являются не очень высокая стоимость, достаточная технологичность при литье и прокатке.

Вместе с тем технологические свойства этих сплавов при листовой штамповке, что типично для технологии автостроения, недостаточно высоки, и при вытяжке глубиной 50 мм, может потребоваться нагрев листов. Существуют малоиспользуемые в настоящее время магниевые сплавы системы Mg-Zn-РЗМ, которые позволяют проводить прокатку листов при более низких температурах по сравнению с прокаткой листов из сплава AZ31. Получение магниевого листа

минимальной стоимости для массового производства в автомобилестроении возможно при использовании бесслитковой прокатки. Эта проблема в настоящее время весьма успешно решается в Германии, во Фрайбурге. Хотя пока еще нет промышленного производства, тем не менее создан полупромышленный агрегат для литья полосы и ее последующей прокатки рис.3 Кромка литой ленты имеет значительные надрывы, на поверхности имеются трещины.

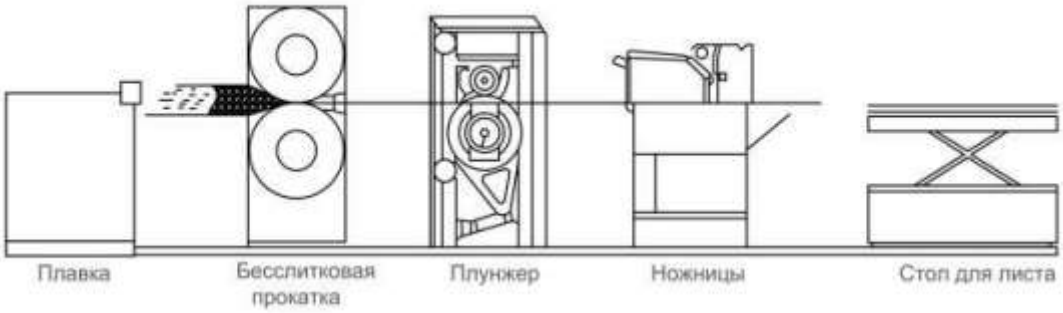

Рис. 3. Схема агрегата для бесслитковой прокатки магниевых сплавов

Полоса из сплавов на основе магния – востребованный материал на сегодняшний день. Производится такой металлопрокат и горячекатаным, и холоднокатаным способами. Благодаря универсальным технологиям производства и использованию высококачественного сырья современным металлургам удается создавать изделия с превосходными эксплуатационными характеристиками для применения в разных отраслях народного хозяйствования.

Производство полос складывается из двух основных процессов: отливки слитков, прокатки слитков в исходную заготовку. Также производство возможно при непрерывной разливке [3].

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТА

2.1. Отливка слитков

Шихтовый материал должен быть чистым и не иметь на поверхности влаги и масла. Масляные отходы и отходы от ленты, тонкой фольги и стружки в виде

кромки, имеющие большую окисленную поверхность, нельзя применять в качестве шихтового материала без предварительного переплава в чушки.

Плавка шихты происходит в электрических, нефтяных мазутных или газовых плавильных печах.

Металл, полученный в плавильных печах, очищают (рафинируют) от окислов, неметаллических включений, а также растворенных в нем газов. Наличие неметаллических включений и газов в слитке приводит к образованию пузырей на готовой продукции.

В настоящее время на передовых отечественных предприятиях применяют метод непрерывного и полунепрерывного литья, который вытеснил старый метод отливки слитков в чугунные и водоохлаждаемые изложницы, который не обеспечивал получение здорового слитка.

Отлитые слитки разрезают на мерные длины, необходимые для последующей прокатки.

1.2. Нагрев слитков

Целью нагрева металла перед горячей обработкой давлением является снижение его сопротивления деформированию и повышение пластичности.

При нагреве металла до максимально допустимых температур прокатки сопротивление его деформированию снижается в 15…20 раз по сравнению с обычным холодным состоянием.

Нагрев является важнейшей операцией при обработке давлением, так как от него зависят качество изделий, производительность оборудования и себестоимость продукции.

Основные требования к нагреву металла сводятся к обеспечению равномерного прогрева слитка или заготовки по сечению и длине за минимальное время, при наименьшей потере металла на угар (в окалину) и экономном расходе топлива.

Несоблюдение установленного режима нагрева по скорости и температурам может привести к ряду дефектов в металле, часть которых является неисправимым браком (пережог, трещины).

В производстве для нагрева заготовок применяют пламенные и электрические печи.

Электрические печи сопротивления имеют металлические или карборундовые элементы сопротивления, которые подключают к электрической сети.

Печи чаще применяют для нагревания цветных металлов и сплавов, имеющих невысокую температуру начала обработки давлением. В таких печах температуру можно регулировать. Кроме электрических печей сопротивления существуют контактные и индукционные электронагревательные устройства.

В устройствах электроконтактного нагрева заготовку зажимают между медными контактами, к которому подведен ток большой силы. В устройствах индукционного нагрева заготовку помещают в индуктор, по которому пропускают ток высокой частоты. Применение электричества обеспечивает высокую скорость нагрева, удобства регулирования температуры, минимальное окисление металла, автоматизацию процесса.

1.3. Горячая прокатка слитков

Горячая прокатка, нагретых предварительно, слитков может производиться на двух-, трех- и четырехвалковых прокатных станах разных конструкций и мощности.

Слитки прокатывают в несколько проходов с разными обжатиями.

Конечная толщина заготовки при горячей прокатке зависит от вида металла или сплава и конструкции прокатного стана. Так как сопротивление металла деформации падает с повышением температуры, то горячую прокатку рекомендуется вести при максимальной температуре, установленной для данного металла, но не допуская перегрева. Повышение температуры начала прокатки позволяет закончить ее также при более высокой температуре, благодаря чему полностью протекает процесс рекристаллизации и металл сохраняет достаточную пластичность, необходимую для дальнейшей холодной прокатки.

1.4. Прокатка полосы

Рекомендуется проводить прокатку листов с разделением на горячую прокатку до толщины 6…3 мм со смоткой в рулон и теплую прокатку на конечный размер 0,8…1,5 мм. Естественно, наиболее продуктивной и с более качественной выкаткой будет именно рулонная, а не листовая прокатка.

При изготовлении полос из магниевых сплавов возникают следующие дефекты проката [3]:

1. Раскатная трещина – дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, образовавшийся при раскатке продольной или поперечной трещины литой заготовки.

2. Плена – дефект поверхности, представляющий собой отслоение металла языкообразной формы, соединенное с основным металлом одной стороной, образовавшееся вследствие раскатки рванин, подрезов, следов глубокой зачистки дефектов или сильной выработки валков, а также грубых механических повреждений.

3. Раковина-вдав – дефект поверхности листа, полосы в виде одиночного углубления образовавшегося при выпадении вкатанной инородной частицы.

4. Механические повреждения (царапины) – дефект поверхности, представляющий собой углубление неправильной формы и произвольного направления.

5. Телескопический рулон или телескопичность – дефект формы рулона в виде выступов витков из внутренней части рулона, образующихся из-за неотлаженности настройки агрегатов стана.

6. Прожиг – дефект образуется при нарушении операций отбора проб.

7. Распущенный рулон – дефект формы рулона в виде неплотно смотанной полосы.

8. Замята кромка – дефект формы в виде местного смятия кромки, образующегося при нарушении режимов транспортировки и укладки рулонов, листов.

9. Расслоение – дефект поверхности в виде трещин на кромках и торцах листов и других видов проката, образовавшихся при наличии в металле усадочных дефектов, внутренних разрывов, повышенной загрязненности неметаллическими включениями и при пережоге.

10. Вкатанная окалина – дефект поверхности в виде вкраплений остатков окалины, вдавленной в поверхность металла при деформации.

11. Заплески (окалина от проб) – дефект поверхности в виде полосок и натеков оплавленного металла, образующихся при нарушении технологии огневой обработки металла.

12. Вкатанные металлические частицы – дефект поверхности в виде приварившихся и частично закатанных кусочков металла.

13. Пузырь-вздутие – дефект поверхности в виде локализованного вспучивания металла, образующегося на поверхности листа, полосы из-за повышенного местного загрязнения металла газами или неметаллическими включениями.

14. Серповидность – отклонение формы, при котором кромки листа, полосы в горизонтальной плоскости имеют форму дуги.

15. Волнистость – отклонение от плоскостности, при котором поверхность металлопродукции или ее отдельные части имеют вид чередующихся выпуклостей и вогнутостей, не предусмотренных формой проката.

1.5 Технологические смазки и эмульсии

Смазка – это специальное вещество, используемое при прокатке для снижения сил трения.

При выборе смазки исходят из природы трения при прокатке и поверхностных физических явлений (адсорбции, смачивания, химического взаимодействия и др.) [4].

Смазка должна удовлетворять следующим требованиям:

– иметь хорошую смазочную и моющую способность, и высокие охлаждающие свойства;

– обеспечивать низкий износ и высокую чистоту поверхности;

– предотвращать образование дефектов и сваривание металла и валков;

– снижать величину коэффициента трения и предельные нагрузки на стане;

– быть стабильна в эксплуатации и хранении;

– соответствовать экологическим требованиям;

– обеспечивать получение качественного проката с заданными значениями шероховатости поверхности;

– обеспечивать низкий расход валков и высокую производительность прокатного стана.

1.6 Измерение толщины листа

На предприятиях черной и цветной металлургии, выпускающих листовой прокат, и на машиностроительных заводах существует необходимость в бесконтактном измерении толщины горячего и холодного проката. Толщина прокатываемого листа может составлять единицы и десятки миллиметров, а ее изменение - доли и единицы миллиметров. В настоящее время известно несколько радиоволновых методов измерения толщины металлических листов, основные из которых связаны с применением СВЧ-резонаторов полуоткрытого (квазизамкнутого) типа и излучающих устройств. Реализация этих методов требует подачи электромагнитной энергии к обеим сторонам металлического листа.

Методы измерения, предполагающие применение излучающих устройств, расположенных по обе стороны листа, реализуются по следующим условным схемам:

– с отражением двух независимых зондирующих сигналов (ЭМВ) с обеих сторон листа и последующим их сравнением (рис. 4, *а);*

– с последовательным обеганием ЭМ-волной обеих сторон листа и сравнением ее с первоначальной волной (рис. 4, *б);*

– с последовательным обеганием ЭМ-волной обеих сторон листа и образованием стоячих волн за счет интерференции этих волн в свободном пространстве и в направляющей системе (рис. 4, *в)*.

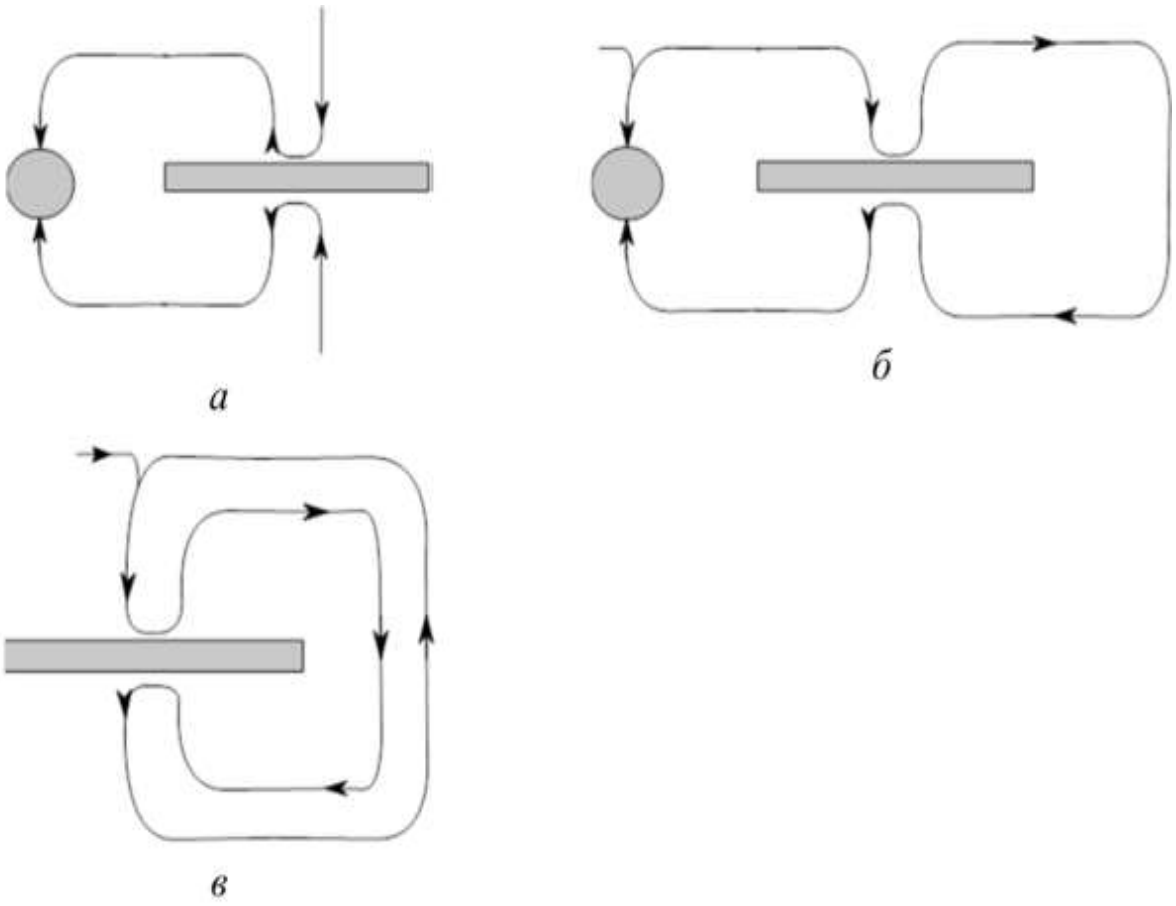

Рис. 4. Метод измерения с расположением излучающих устройств по обе стороны листа

В условиях предприятия ООО НПП «РосАнтикор» используется прибор с контактным видом измерения- микрометр(рис.5). Этот прибор предназначен для измерения контактным методом относительно малых линейных величин с высокой точностью. Для ее обеспечения реализован простой, но очень эффективный преобразовательный механизм, в основе которого – винтовая пара. Первый размер планируется провести после 8 прохода, чтобы в случаи погрешности подправить значения для 9 прохода, после которого заготовку нужно будет отправлять в печь.

Устройство и принцип работы

Общий вид листового микрометра показан на рис. 5. Корпусом инструмента служит U-образная скоба 1, в которую запрессованы с одной стороны пятка 2, с другой – стебель 5, на котором закреплена микрогайка и нанесена продольная шкала. Одной измерительной поверхностью является торец микрометрического

винта 3, выдвигающегося из стебля, второй – торец пятки 2. Микровинт связан с корпусом барабана 6, имеющим на конусном конце круговую шкалу. Заканчивается барабан резьбой, на которую навинчивается гайка 9, являющаяся корпусом механизма трещётки. Основное назначение трещётки – обеспечивать постоянство измерительного усилия за счет храповика **7** и подпружиненного стержня 8. Микрометр снабжен устройством 4, позволяющим стопорить микровинт и гайкой 10 для регулировки зазора в паре микровинт – микрогайка. Отсчет снимается по шкале 11.

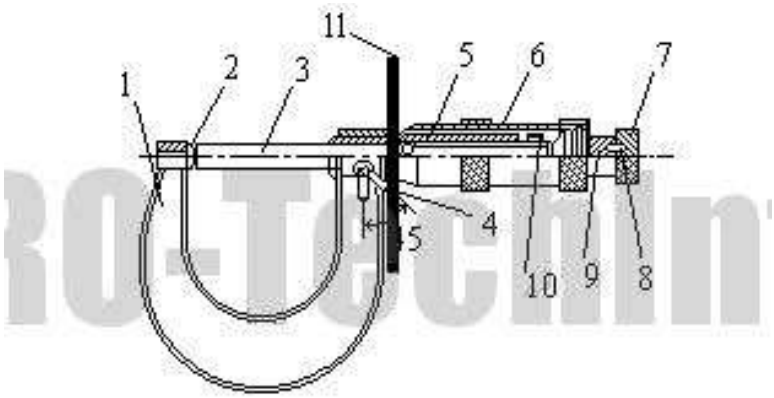

Рис.5 Микрометр листовой

Недостатки приборов контактного типа следующие:

1) они не обеспечивают достаточной точности при большой скорости прокатки (>10 *м/сек*);

2) толщина измеряется только в одном месте (обычно с края листа);

3) при длительной работе наблюдается большой износ роликов, в связи с чем требуются частые поверки;

4) не исключена возможность порчи поверхности проката;

5) не учитывается тепловая деформация роликов.

Горячая прокатка магниевых сплавов обычно не вызывает серьезных трудностей. Получить прокат непосредственно из слитков, обладающих однородной структурой, высокими свойствами, при общей одноразовой деформации 50% практически невозможно из-за отсутствия полной проработки

литой структуры. Поэтому прокатку слитков ведут дробной деформацией. При ε = 15% деформация в полосах скольжения может составлять десятки процентов и наступает разрушение за счет вязкого сдвига. В связи с этим первые проходы должны быть со степенями деформации не выше 10…15%. В паузах между проходами через валки успевает пройти спонтанная рекристаллизация в магниевых сплавах и пластичность восстанавливается. Когда литая структура уже проработана (ε > 50%), степень деформации за проход должна быть увеличена, но не до критической. Последняя для промышленных магниевых сплавов при высоких температурах составляет 10- 15%. Перед сверткой в рулон необходима обрезка кромки на дисковых ножницах. Необходимо заметить, что горячая прокатка на станах, предназначенных для прокатки магниевых сплавов, не вызывает практических затруднений. Однако просто использование станов для прокатки магниевых сплавов может привести к разрушению магниевого сляба при прокатке, если не приняты меры по подготовке специального профиля валка и его нагрева до заданных температур. Тем не менее для достижения большей производительности и большего экономического эффекта весьма целесообразно и перспективно использование станов, состоящих из одной или двух клетей и непрерывной чистовой группы. Такое оборудование позволяет получать горячекатаные полосы толщиной 2…3 мм, а применение специализированных моталок позволит повысить температуру смотки и получить качественную поверхность без образования на поверхности так называемых линий скольжения, что особенно важно при прокатке и свертке в рулон полос из сплавов системы Mg-Zn-Mn (AZ31 и AZ61). Холодную прокатку правильнее назвать теплой, так как рулон нагревают до температуры около 400 °С и прокатку ведут на подогретых валках. Их нагрев может колебаться от 100 до 200 °С в зависимости от состава сплава. При прокатке рулона за один проход температура металла может снизиться в 2 раза, и поэтому наиболее разумно теплую прокатку проводить с использованием подогреваемых моталок на реверсивных станах с максимальным приближением рулона к валкам. Для получения листовых полуфабрикатов требуемой геометрии и с улучшенным

качеством применяют отделочные операции, включающие резку, правку, механическую зачистку поверхности рулонов и листов [5].

Листы из магниевых сплавов в основном выпускают в отожженном состоянии. Отжиг листов и рулонов осуществляют обычно в камерных электрических печах с принудительной циркуляцией нагревательной среды.

Магниевые листы выпускают с защитным покрытием:

1. Кратковременным покрытием – оксидированным.

Оксидирование можно осуществлять химическим и электрохимическим способами. Химический способ более прост и менее трудоемок, но при нем растворяется значительное количество металла, что ведет к изменению размеров деталей. При электрохимическом оксидировании образуются твердые и износостойкие пленки, размеры деталей не изменяются.

2. Долговременным покрытием – анодным.

Электрохимическая защита заключается в том, что на поверхность магния наносят металл, который в данной среде имеет более отрицательный электрохимический потенциал, нежели магний – так называемое анодное покрытие. Такими металлами являются алюминий. При наличии в таком покрытии небольших трещин, царапин, пор и других дефектов возникает гальваническая пара, в которой алюминий являются анодом, а обнаженная поверхность магния – катодом. При работе такой пары защитное покрытие постепенно разрушается, а поверхность магния надежно защищается от коррозии.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

Для изготовления полосы должна использоваться заготовка круглого сечения. Состоящая из магниевой сердцевины диаметром 105 мм и оболочки из алюминия внутренним диаметром 111 мм. Заготовка имеет длину 450 мм. Ширина готового листа равна 450 мм и толщина 2 мм.

Проектная технология получения полос из сплавов на основе магния предусматривает следующие основные технологические операции:

- нагрев заготовки до температуры 460° С;
- прокатка заготовки до длины двух метров;
- нарезка полосы на мерные длины;
- нагрев листов до температуры 460° С;
- прокатка до конечных размеров.
- резка на требуемые размеры

Получение полос на основе магния осуществляется на стане 525×860, приведенном на рис. 6, имеющего следующую технологическую характеристику:

- Наибольшая ширина проката – 800 мм;
- Наибольшее давление на валок – 650 т;
- Окружная скорость валков – 24 м/мин.;
- Мощность двигателя привода валков – 300 кВт;
- Номинальный диаметр бочки валка – 525 мм;
- Длина бочки валка – 860 мм;
- Диаметр шейки валка – 400 мм;
- Длина шейки валка – 400 мм;
- Материал валка – чугун ЛПХНМА-74;
- Опоры валка выполнены на подшипниках скольжения;
- Нажимное устройство – электромеханическое;
- Скорость прокатки – 0,4 м/с;

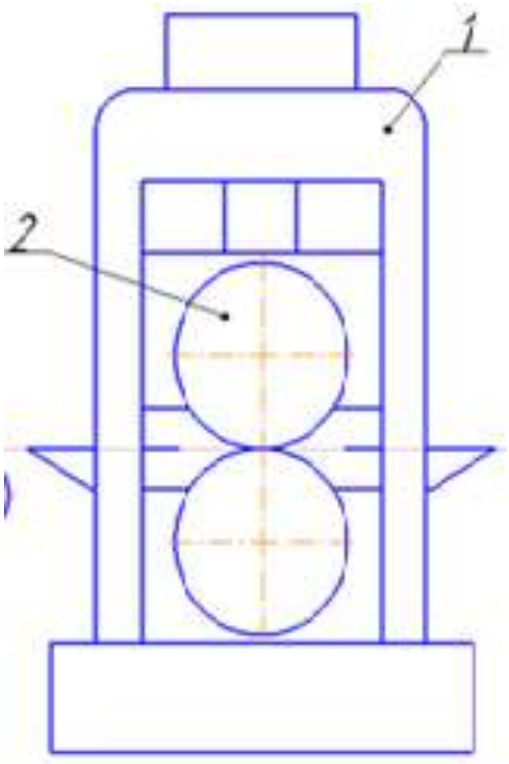

Рис. 6. Схема стана Дуо 525×860:

1 – станина; 2 – рабочие валки

Схема находящегося нажимного механизма (рис. 7).

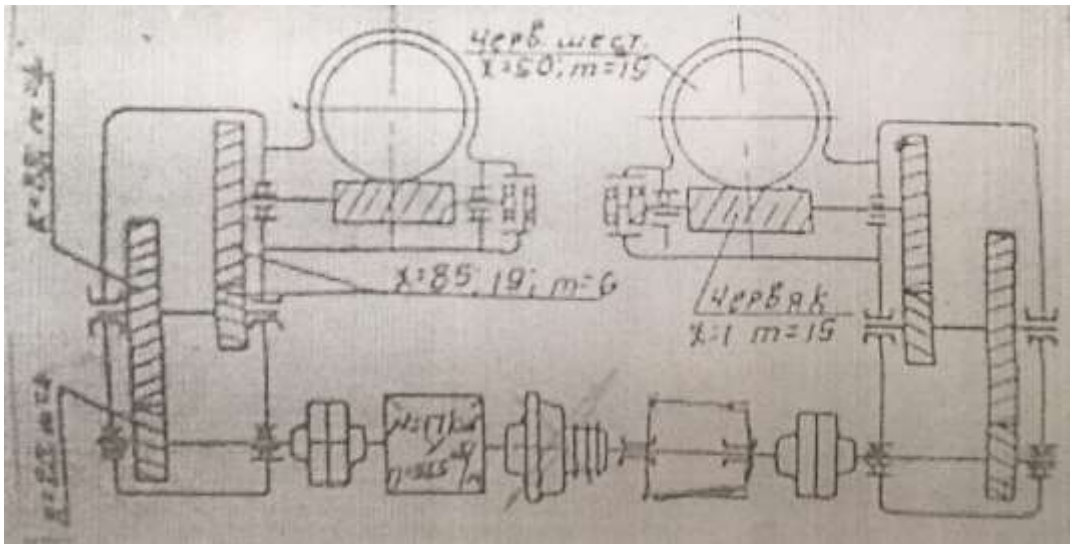

Рис. 7. Нажимное устройство

Редуктор нажимного механизма стан Schloemann.

Первая передача: z_1=20, z_2=88, k=4,4

Вторая передача: z_1=19, z_2=85, k=4,47

Червяк: k=50

Общий коэффициент передачи:

$$k_{общ}=4,4\cdot4,477\cdot50=984,21$$

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС НА ОСНВЕ МАГНИЯ В УСЛОВИЯХ ООО НПП «РосАнтикор»

Получение листа из сплавов на основе магния планируется проводить на стане ДУО-860.

Оборудование прокатного стана можно подразделить на 2 группы - основное, расположенное в рабочей линии стана, и вспомогательное, служащее для транспортирования и отделки прокатываемой полосы. Рабочая линия состоит из рабочей клети и линии привода, включающей в общем случае двигатель, редуктор, шестеренную клеть и соединительные детали. Стан ДУО-860 оснащен только одной клетью.

4.1. Рабочая клеть

Рабочая клеть стана ДУО-860 состоит из станины, в которой установлены два валка. Каждый из валков может вращаться только в одну сторону, поэтому это стан называют нереверсивным. Так же стан Дуо-860 является универсальным так как валки располагаются в горизонтальном положении.

4.2. Шестеренная клеть

Для распределения крутящего момента одного двигателя между несколькими рабочими валками служит шестеренная клеть. Это – редуктор, передаточное отношение которого равно единице, а роль шестерен выполняют шестеренные валки. Соединительные детали, посредством которых крутящий момент передается от шестеренной клети прокатным валкам, называют шпинделями. Концевые части шпинделей (головки) бывают различной формы;

наибольшее распространение получили шпиндели с универсальными и трефовыми головками. В основу конструкции универсальных шпинделей положен принцип шарнира Гука, поэтому шпиндели могут передавать вращение и крутящий момент под углом наклона до 8…10 градусов. Благодаря шарнирной конструкции универсальные шпиндели могут работать плавно; вместе с тем они позволяют передавать большие крутящие моменты, поэтому их применяют для привода валков как листовых и сортовых станов, так и для обжимных, толстолистовых и заготовочных станов.

4.3. Двигатель и редуктор

Двигатели постоянного тока устанавливают на реверсивных станах и станах с широким диапазоном изменения числа оборотов валков, асинхронные двигатели переменного тока применяют, когда для работы прокатного стана не требуется изменение числа оборотов валков в широких пределах. Асинхронные двигатели с регулированием числа оборотов можно также применять аналогично двигателям постоянного тока, а синхронные двигатели переменного тока – на станах с постоянным оборотом валков.

На предприятии ООО НПП «РосАнтикор» решили отказаться от реверсивной прокатки. Не экономично переустанавливать оборудование в данном случаи.

4.4. Прокатные валки

Прокатные валки листопрокатных станов имеют гладкую бочку. Их устанавливают в клети на двух опорах (наиболее распространенные тип крепления валков). Основные части валка:

- бочка – деформирующая часть валка(860 мм);
- шейка – служит опорными участками для установки валка в подшипниковых узлах её длина составляет 400 мм;
- концевые участки – предназначены для соединения со шпинделями и могут иметь различную конфигурацию в зависимости от конструкции шпинделя.

4.5. Гильотинные ножницы

Резка листа – это одна из отделочных операций, следующая за прокаткой на готовый размер или в процессе прокатки для упрощения дальнейших операций.

Резка может быть двух видов: обрезка кромок и разрезка на мерные длины, требуемые по заказу.

Главным режимом механической гильотины является поперечная резка листов. Такую операцию удаётся выполнить в один ход верхнего гильотинного ножа. Продольная резка, когда длина листа оказывается 2 метра и больше, выполняют при помощи нескольких повторных резов, однако на ровности реза и его направлении это не сказывается, так как продвижение листа вдоль станины выполняется с высокой точностью позиционирования для каждого последующего реза.

5. РАСЧЁТ РЕЖИОВ ДЕФОРМАЦИИ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ ПОЛОС НА СТАНЕ ДУО-860

1. Исходные данные

	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
Заготовка	111	450	111
Готовая продукция	2000	450	2

Температура начала прокатки – 460° С.

Диаметр бочки валка – 525 мм.

Коэффициент трения – 0,25.

2. Расчёт параметров прокатки

2.1 Площадь заготовки по диаметру S_0= 450·111= 49950 мм^2.

2.2 Площадь готового листа в поперечном сечении $S_к$=450*2=900 мм^2

2.3 Суммарная вытяжка $\lambda_\Sigma = S_0 / S_к$= 49950/900=55,5

2.4 Число проходов $n=\ln(\lambda_\Sigma)/\ln(\lambda_{ср})$,

$\lambda_{ср}$- примем равное 1,5;

$$n=\ln(55,5)/\ln(1,5)= 4,02/0,4=10.$$

2.5 Окружная скорость валка $V_{пр}= \frac{n_в * \pi * D_в}{60000}$,

Примем скорость прокатки равной окружной скорости валка (опережение полосы при прокатке не учитывается).

Здесь $n_в$ – скорость вращения валков;

$D_в$ – диаметр валка.

$$V_{пр}= \frac{14,55*3,14*525}{60000}=0,4 \text{ м/с.}$$

3. Расчёт режимов деформации по проходам

3.1 Высота полосы:

$$h_1=h_0-\Delta h,$$

где h_0 – высота заготовки;

Δh – обжатие за проход.

$$h_1=111-25= 86 \text{ мм.}$$

3.2 Длина полосы

$$l_1=\frac{\pi * D^2_з}{4*h_1}=\frac{3,14*111^2}{4*86}=112,5 \text{ мм.}$$

3.3 Вытяжка за проход

$$\lambda_1=l_1/l_0=112,5/111=1,013.$$

4. Расчёт времени прокатки за один проход

$$t_{прохода}=t_{прокатки}+t_1+t_2+t_3+t_4,$$

где t_1 – время подъёма стола, t_1=2 с;

t_2 – перемещение заготовки с одного стола на другой, t_2=1 с;

t_3 – время спуска стола, t_3= 2 с;

t_4 – время задачи заготовки, t_4=1 с;

$$t_{прокатки}=l_1*0,001/V_{пр}= 112,5*0,001/0,4=0,28 \text{ с;}$$

$$t_{прохода}= 0,28+2+1+2+1=6,28 \text{ с.}$$

5. **Таблица с расчётами для каждого прохода** (табл. 1)

Таблица 1

	Проход	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота заготовки		111	86	71	56	44	34	24	14	8	4
Ширина заготовки		450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Длина заготовки		111	112,4649	136,2251	172,714	219,8178	284,4701	402,9994	690,8561	1208,998	2417,996
Обжатие		25	15	15	12	10	10	10	6	4	2
Высота полосы		86	71	56	44	34	24	14	8	4	2
Ширина полосы		450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Длина полосы		112,4649	136,2251	172,714	219,8178	284,4701	402,9994	690,8561	1208,998	2417,996	4835,993
Вытяжка		1,013198	1,211268	1,267857	1,272727	1,294118	1,416667	1,714286	1,75	2	2

Время прокатки в каждом проходе и за весь процесс

	Проход	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время прохода		6,281	6,3407	6,43204	7,549873	7,7116	8,0081	9,728172	11,0243	15,0486	22,0972
Полное время	100,222										

Энергосиловые параметры для каждого прохода при прокатке полос из сплавов магния на стане ДУО-860 приведены в табл .2 [8].

Таблица 2

Скорость прокатки на входе V01	м/с	0,41533	0,49662	0,51982	0,52182	0,53059	0,58083	0,70286	0,71750	0,82000	0,82000
Частота вращения двиг ω	об/мин	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067	21,77067
Степень деформации ε	-	0,22523	0,17442	0,21127	0,21429	0,22727	0,29412	0,41667	0,42857	0,50000	0,50000
Средняя степень деформации	-	0,15015	0,11628	0,14085	0,14286	0,15152	0,19608	0,27778	0,28571	0,33333	0,33333
Логарифмич степень деформации	-	0,25518	0,19167	0,23733	0,24116	0,25783	0,34831	0,53900	0,55962	0,69315	0,69315
Среняя высота в очаге деформа hc	мм	98,50000	78,50000	63,50000	50,00000	39,00000	29,00000	19,00000	11,00000	6,00000	3,00000
Длина очага деформа l	мм	2,47076	2,71926	3,06186	3,45425	3,92953	4,67707	6,12372	8,10093	11,45644	16,20185
m=l/hc	-	0,02508	0,03464	0,04822	0,06908	0,10076	0,16128	0,32230	0,73645	1,90941	5,40062
коэф напр состояние (меньше 1) nб	-	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
Средняя скорость деформ Uc	c^-1	0,37569	0,37560	0,45495	0,51592	0,59942	0,77571	1,09893	1,45925	2,08507	2,94874
среденее сопр деформации бср	МПа	22,63655	20,59340	22,25138	22,46432	23,07614	25,60947	29,47900	30,07647	32,23049	32,61252
Среднее уд давление pcp	МН/м^2	22,63655	20,59340	22,25138	22,46432	23,07614	25,60947	29,47900	30,07647	32,23049	32,61252
Усилие прокатки P	МН	0,78	0,55	0,59	0,53	0,50	0,56	0,64	0,51	0,44	0,32
Площадь F	м^2	0,034369	0,026622	0,026622	0,023812	0,021737	0,021737	0,021737	0,016837	0,013748	0,009721
Момент прокатки Мпр	Н*м	1,922	1,491	1,814	1,848	1,971	2,604	3,924	4,102	5,076	5,136
Момент трения Мтр	Н*м	0,9803	0,6908	0,7464	0,6740	0,6320	0,7014	0,8074	0,6381	0,5583	0,3995
Номинальный момент Мн	Н*м	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40	1222,40
Момент холостого хода Мхх	Н*м	122,24	122,24	122,24	122,24	122,24	122,24	122,24	122,24	122,24	122,24
Момент двигателя Мдв	Н*м	128,10	128,06	128,08	128,08	128,08	128,12	128,20	128,20	128,25	128,25
Момент динамический Мдин	Н*м	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Мощность двигателя Nдв	Вт	46,37	46,36	46,37	46,36	46,37	46,38	46,41	46,41	46,43	46,43

Методика расчёта

Среднее сопротивление деформации σ_{sc} в каждом проходе определим по методике НИИМ (1):

$$\sigma_{sc} = K_b \cdot K_0 \cdot \upsilon_c^{K_U} \cdot (10 \cdot \varepsilon_c)^{K_\varepsilon} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{-K_t}, \quad (1)$$

где K_0 – базовое сопротивление деформации, определяемое при υ_c = 1 с$^{-1}$, ε_c =0,1, t = 1000 °С, МПа; K_b, K_u, K_ε, K_t соответственно коэффициенты учета влияния скорости, степени и температуры на сопротивление деформации выбираемые в соответствии с материалом;

υ_c – средняя скорость деформации;

ε_c – средняя степень деформации;

t – температура прокатки.

Средняя скорость деформации вычисляется по формуле (2):

$$\upsilon_C = 0{,}105 \cdot n_в \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \frac{R_в}{h_0}}, \quad (2)$$

где $R_в$ – радиус валка по вершине калибра, мм;

ε – степень деформации.

Степень деформации ε при прокатке на гладкой бочке определяется по формуле (3):

$$\varepsilon_n = \left(1 - \frac{h_n}{h_{n-1}}\right). \quad (3)$$

Средняя степень деформации находится по формуле (4):

$$\varepsilon_c = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon. \quad (4)$$

Среднее удельное давление определяем по выражению (5):

$$p_C = \beta \cdot n_\sigma \cdot \sigma_{sc}, \quad (5)$$

где β – коэффициент Лодэ: для узких полос β = 1;

n_σ – коэффициент напряженного состояния определяется по методике М.Я. Бровмана:

$$n_\sigma = \begin{cases} 1, при \frac{l}{h_c} \le 1; \\ 0{,}5 \cdot (\frac{l}{h_c} + \frac{h_c}{l}), при 1 < \frac{l}{h_c} \le 2; \\ (0{,}75 + 0{,}25 \cdot \frac{l}{h_c}), при 2 < \frac{l}{h_c} \le 4; \\ (1 + 0{,}25 \cdot \frac{l}{h_c}), при \frac{l}{h_c} > 4, \end{cases} \quad (6)$$

где l – длина очага деформации, мм,

$$l = \sqrt{(h_0 - h_1) \cdot R_в}; \quad (7)$$

h_c – средняя высота в очаге деформации, мм,

$$h_c = \frac{h_0 + h_1}{2}.$$

Усилие прокатки определяется по выражению (8):

$$P = p_c \cdot F_г, \quad (8)$$

где $F_г$ – горизонтальная проекция площади контакта полосы с валками.

При прокатке прямоугольной полосы на гладкой бочке:

$$\mathrm{F_г} = \frac{\mathrm{b_0} + \mathrm{b_1}}{2} \cdot \sqrt{(\mathrm{h_0} - \mathrm{h_1}) \cdot \mathrm{R_в}}. \quad (9)$$

6. Разработка мероприятий по оснащению стана ДУО-860 требуемым оборудованием

6.1. Выбор и расчёт параметров печи

Прокатку полос планируется вести в горячем состоянии, но возникает проблема в оснащенности стана ДУО-860 печью. На предприятии ООО НПП «РосАнтикор» находится два стана ДУО-860 и ДУО-1400 и в отличие от стана ДУО-860 стан ДУО-1400 оснащен необходимой печью. Но в рамках предприятия стан ДУО-1400 имеет большую загруженность текущем сортаментом, а стан ДУО-860 находится на консервации. Поэтому целесообразно будет

оснастить данный стан необходимым оборудованием и начать производство полос из сплавов на основе магния именно на нём.

6.1.1 Схема расклада заготовки по поду

Определение размеров рабочего пространства печи и задание схемы расклада по поду.

На рис. 8 представлена схема расположения заготовки по поду камерной печи.

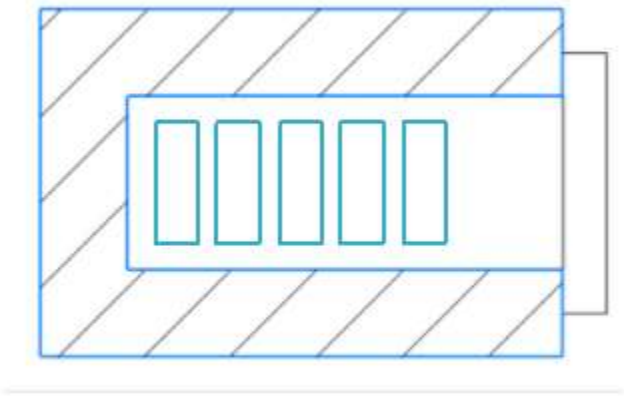

Рис. 8. Расположение заготовки по поду

6.1.2 Основные размеры рабочей камеры печи

Исходные данные

Длина, мм	2000
Ширина, мм	450

Длина камеры по ходу газов

$$l_{кам} = Z(l + \delta), м; \quad (1)$$

где Z — число заготовок в печи; l – длина заготовки.

Ширина камеры

$$b_{кам} = n \cdot b + (n+1) \cdot \delta, м; \quad (2)$$

где n – число рядов заготовок по ширине печи; b – ширина заготовки.

Высота камеры

Высоту рабочего пространства печи по конструктивным соображениям принимают в камерных печах с выкатным подом 0,45 м.

По формулам (1), (2), найдем:

$$l_{кам}=5\cdot(0,450+0,111)=2,8м;$$

$$b_{кам}=1\cdot0,450+(1+1)\cdot0,450=1,35м;$$

$$h_{кам}=0,45.$$

6.2. Реконструкция нажимного устройства

Так же при горячей прокатке на стане ДУО-860 возникает проблема со скоростью регулировки валков и обеспечения требуемого зазора между валками в проходе. Данное нажимное устройство не позволяет проводить прокатку с необходимой скоростью. Проблема заключается в недостаточной скорости вращения нажимного винта. На данный момент максимальная скорость опускания винта составляет 8 миллиметров за одну минуту, а необходимая скорость значительно больше и составляет 120 миллиметров за одну минуту. Эту проблему предлагается решить отказом от цилиндрического двух ступенчатого редуктора, но тогда возникает вопрос о замене двигателя на более мощный. Дальнейшие расчёты проводим с целью выбора нового двигателя [7].

1. Расчёт веса уравновешивающих узлов

1.1Вес верхнего валка

$$G_в=V_в*\rho_{мат},$$

где $V_в$ – объем валка;

$\rho_{мат}$ – плотность материала из которого изготовлен валок.

$$V_в=\frac{\pi\cdot0,28^2}{4}\cdot0,18\cdot2+\frac{\pi\cdot0,4^2}{4}\cdot0,4\cdot2+\frac{\pi\cdot0,525^2}{4}\cdot0,86+\frac{\pi\cdot0,27^2}{4}\cdot0,3=$$

$$=0,022+0,1+0,186+0,0172=0,325\ м^3.$$

$\rho_{мат}=7850\ {кг}/{м^3}$ (т.к. материал валка чугун).

$$G_в = 0{,}325 \cdot 7850 = 2553 \text{ кг.}$$

1.2Вес подушек

$$G_п = 1702 \text{ кг.}$$

1.3Вес нажимного винта

$$G_{н.в.} = 310 \text{ кг.}$$

1.4Вес червячного колеса

$$G_к = 400 \text{ кг.}$$

1.5Общий вес уравновешивающих узлов

$$G_{общий} = G_в + G_п + 2G_{н.в} + 2G_к = 2553+1702+620+800 = 5675 \text{ кг.}$$

2. Определение крутящего момента, который необходимо приложить к верхнему концу нажимного винта.

2.1Усилие на один нажимной винт

$$Y = 0{,}4\frac{5675}{2} = 1135 \text{кг.}$$

2.2Диаметр пяты нажимного винта

$$d_п = 0{,}2 \text{ м.}$$

2.3Коэффициент трения в пяте

$$\mu_п = 0{,}2.$$

2.4Средний диаметр резьбы нажимного винта

$$d_{ср} = 0{,}225.$$

2.5Крутящий момент для вращения винта

$$M_в = Y\left[\mu_п * \frac{d_п}{3} + \frac{d_{ср}}{2}\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)\right] = 1135\left[0{,}2\frac{0{,}2}{3} + \frac{0{,}225}{2}0{,}11\right] = 29 \text{ кг·м.}$$

3. Выбор двигателя привода нажимного винта

3.1Статическая нагрузка на червяке

$$M_{ст}=\frac{M_в}{i\cdot\eta}=\frac{29}{50\cdot 0{,}6}=0{,}972\,кг\cdot м.$$

3.2Динамический момент

3.2.1 Момент инерции массы всех вращающихся деталей привода, приведенный к валу двигателя

$$J= mR_i^2= 79{,}2\cdot 0{,}025^2=0{,}0495\ кг\cdot м^2.$$

3.2.2 Угловое ускорение привода при разгоне

$$\varepsilon=\frac{d\omega}{dt}=\frac{\pi\cdot n_{дв}}{30\cdot dt}=\frac{\pi\cdot 600}{30\cdot 6{,}3}=9{,}96\ сек^{-2}.$$

3.2.3 Динамический момент

$$M_{дин}=J\cdot\varepsilon= 0{,}0495\cdot 9{,}96=0{,}493\ кг\cdot м.$$

3.2.4 Момент на червяке

$$M_{дв}= M_{ст}+M_{дин}= 0{,}972+ 0{,}493= 1{,}465\ кг\cdot м= 0{,}0146\ кН\cdot м$$

4. Мощность необходимая для вращения червяка

$$N_{дв}= M_{дв}\cdot\omega_{дв}= 0{,}0146\cdot 63=0{,}92\ кВт.$$

Из всех вышеперечисленных расчётов делаем вывод что необходимо выбрать электродвигатель АИРМ132М2.

Предлагаемы вид нажимного устройства после его реконструкции (рис. 7).

6.3 Выбор параметров подъёмного стола

Проводковый стол планируется сделать длиной 2 метра, так как производство продукции подразумевает изготовление листов максимальной длинной два метра. Так как стан ДУО-860 нереверсивный возникает потребность в постоянном возврате листа на исходную позицию для прокатки. Эту функцию будет выполнять проводковый стол, для этого необходимо обеспечить его подъёмным механизмом (на каждый стол планируется установить гидроцилиндр). Так после каждого прохода заготовки, столы по обе стороны будут подниматься, и заготовка перемещается по столам вручную над верхним рабочим валком. Для этого столы необходимо поднимать на 550 мм. Здесь же появляется проблема в

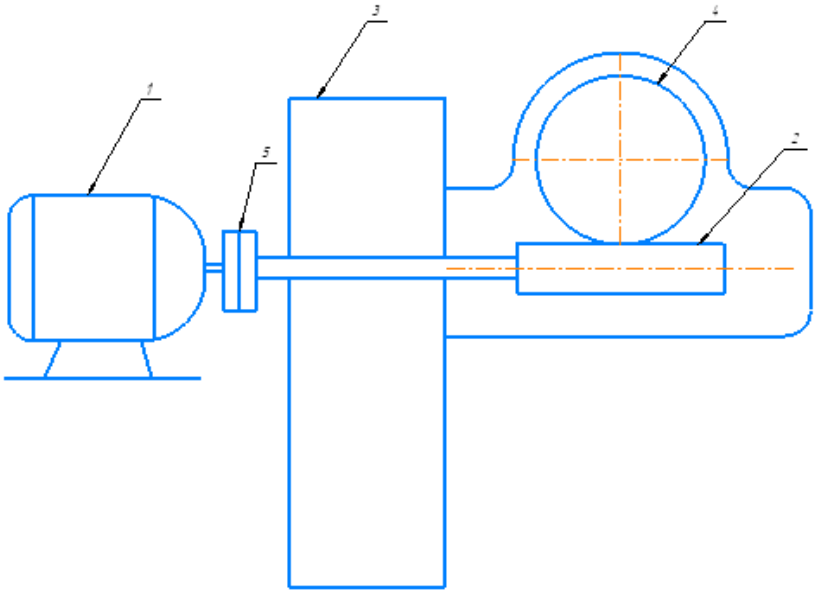

Рис.7. Нажимное устройство после реконструкции:
1 – электродвигатель АИРМ12М2; 2 – червяк; 3 – корпус редуктора;
4 – червячное колесо; 5 – муфта переходная

переносе заготовки с одного стола на другой, после первых проходов её длина не достаточна чтобы её просто протолкнуть, но снабжать стан ещё дополнительным оборудованием будет не выгодно. Предлагается делать это вручную, с помощью щупов, заготовка по весу достаточно лёгкая и имеет не большие габариты, поэтому такая операция не вызовет сложностей.

6.4 Выбор ножниц для резки листа

Ножницы рекомендуется установить гильотинные.

6.5 Конечная схема расположения линии стана ДУО-860 рис. 4.

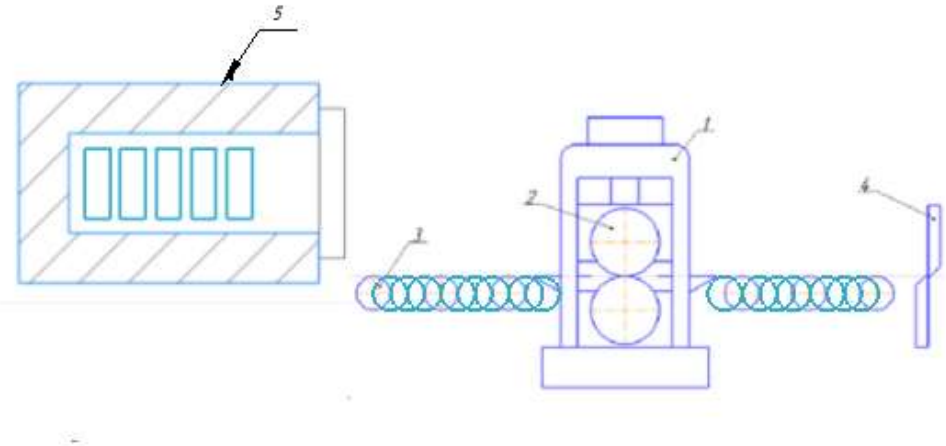

Рис. 4. Схема стана Дуо-525×860:
1 – станина; 2 – рабочие валки; 3 – транспортные рольганги; 4 – ножницы гильотинные поперечной резки; 5- камерная печь с выкатным подом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной работе предложен технологический процесс получения полос из сплавов на основе магния.

Предложены варианты реконструкции стана ДУО-860, с целью ввода его в рабочее состояние для получения необходимой продукции в рамках предприятия «РосАнтикор».

Произведены расчеты параметров необходимого оборудования с целью установки их в производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Портной К.И., Лебедев А.Л. Магниевые сплавы. Свойства и технология. Справочник. — М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1952. — 736 с.

2. Захарьин В.Р. Учет готовой продукции. – М., 2002.

3. Е.М. Булыжев, В.Н. Кокорин, Ю.А. Титов, А.А. Григорьев. Прокатка листового металла. – Ульяновск, 2009. - 186 с.

4. А.с. 1084290 (СССР) Эмульсия для обработки металлов давлением / С.С. Стоба и др. // Открытие. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. - 1984. - № 13. - 18 с.

5. Магниевые сплавы для производства полуфабрикатов. — М.: ВИЛС, 1987. — С. 22-34, 53-57.

6. Портной К.И., Лебедев А.А. Магниевые сплавы, Справочник. Металлургиздат, 1952.

7. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М: Металлургия, 1985. - 376 с.

8. Дубинский, Ф.С. Энергосиловые параметры процесса прокатки на станах листового проката: Учебное пособие для самостоятельной работы / Дубинский Ф.С., Выдрин А.В., Крайнов В.И., Шаламов А.В. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2001. – 30 с.