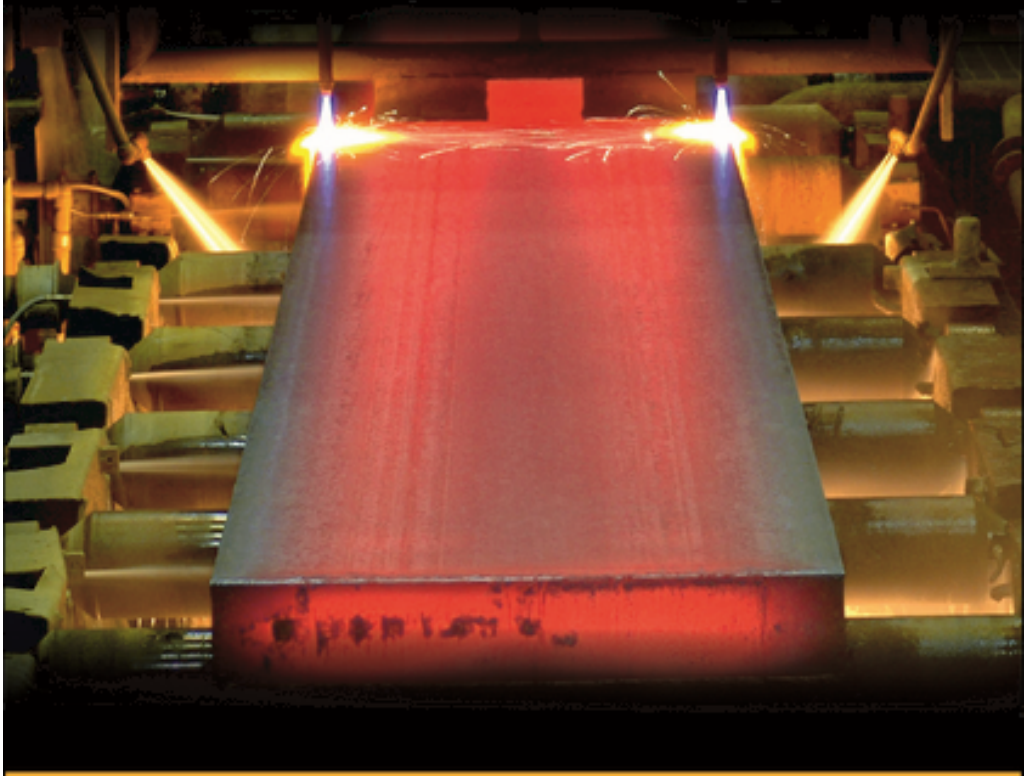
В.М. Салганик Г.В. Щуров
П.П. Полецков Д.Н. Чикишев Д.Ю. Алексеев

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОМД



Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

В.М. Салганик
Г.В. Щуров
П.П. Полецков
Д.Н. Чикишев
Д.Ю. Алексеев

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОМД

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программе бакалавриата по направлению 150400 - Металлургия

Магнитогорск
2014

УДК 621.7

Рецензенты:
Заведующий кафедрой «Машины и технологии обработки материалов давлением»
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
профессор, доктор технических наук
В.Г. Шеркунов

Доцент кафедры автоматизированных систем управления
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент
В.М. Москвин

Салганик В.М., Щуров Г.В., Полецков П.П., Чикишев Д.Н., Алексеев Д.Ю.

Основы автоматизации технологических процессов ОМД: Учебное пособие. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 82 с.

В учебном пособии изложены основы теории автоматического управления, математическое описание, оценка качества и устойчивости работы систем автоматизации процессов ОМД. Проанализированы функции, режимы работы и структура АСУ ТП.

В прикладном плане рассмотрено применение элементов систем автоматического управления и микропроцессорной техники в технологических процессах обработки металлов давлением, а также использование приборов технологического контроля процессов и качества продукции. Отдельным разделом предусмотрено изучение систем автоматизации процессов обработки металлов давлением.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 150400 «Металлургия» и изучающих следующие дисциплины: «Основы автоматизации технологических процессов ОМД», «Основы технологии процессов ОМД», «Моделирование и оптимизация технологических процессов». Может быть полезно аспирантам, специалистам, инженерно-техническим работникам металлургических предприятий, а также слушателям систем повышения квалификации и переподготовки кадров промышленных предприятий.

УДК 621.7

© Салганик В.М., Щуров Г.В., Полецков П.П., Чикишев Д.Н., Алексеев Д.Ю.
© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 10
1 ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 12
1.1 Задачи теории автоматического управления 13
1.2 Назначение систем автоматического регулирования (САР) 13
1.3 Принципы построения САР 14
1.3.1. Принцип разомкнутого управления 14
1.3.2. Принцип регулирования по возмущению (компенсации) 15
1.3.3. Принцип регулирования по отклонению (принцип Ползунова-Уатта) 15
1.3.4. Комбинированное регулирование 16
1.3.5. Принцип адаптации 17
1.4 Системы оптимального управления 17
1.5 Понятие и показатели качества управления 19
1.6 Разновидности систем автоматического регулирования (САР) 20
1.7 Контрольные вопросы 22
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ, ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОМД 23
2.1 Типовые соединения элементов и их характеристики 23
2.2 Типовые звенья и их характеристики 25
2.3 Устойчивость систем управления 27
2.4 Типовые алгоритмы регулирования САУ 28
2.5 Моделирование технологических процессов 29
2.6 Контрольные вопросы 32
3 ФУНКЦИИ, РЕЖИМЫ РАБОТЫ И СТРУКТУРА АСУ ТП 33
3.1 АСУ ТП толстолистового стана 5000 ОАО «ММК» 36
3.1.1. Уровень 2 – Система управления технологическими процессами 36
3.1.2. Уровень 1 - Система базовой автоматизации 38
3.1.2.1. Регулирование толщины для чистовой клети 38

3.1.2.1.1. Позиционирование электромеханических нажимных винтов 38

3.1.2.1.2. Гидравлическое регулирование раствора валков 39

3.1.2.1.3. Автоматическое регулирование толщины 39

3.1.2.1.4. Динамическая компенсация возмущении 39

3.1.2.1.5. Управление конусообразности.....40

3.1.2.1.6. Управление направлением прокатки.....40

3.1.2.2. Контроль профиля и плоскостности для чистовой клети…….....41

3.1.2.2.1. Регулирование противоизгиба рабочих валков .41

3.1.2.2.2. Регулирование сдвижки рабочих валков CVC PLUS…….41

3.1.2.2.3. Системы технологического управления для регулирование манипуляторных направляющих.....41

3.2 Контрольные вопросы.....42

4 ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ, ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССА ОМД.....43

4.1 Контрольные вопросы.....45

5 ПРИБОРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ И КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ. 46

5.1 Измерение энергосиловых параметров 48

5.1.1. Измерение давления металла на валки 48

5.1.1.1. Определение давления металла на валки на основе измерения деформаций в деталях рабочей клети. 48

5.1.1.2. Измерение давления металла на валки при помощи месдоз……51

5.1.2. Измерение крутящего момента при прокатке.....55

5.1.2.1. Измерение крутящего момента по измерению мощности и скорости вращения электродвигателя и давлению металла на валки.....55

5.1.2.2. Непосредственное измерение крутящих моментов .56

5.1.3. Измерение натяжения.....57

5.1.3.1. Измерение натяжения со смещением полосы с оси прокатки…….....57

5.1.3.2. Измерение натяжения и подпора без смещения полосы с оси прокатки 58

5.2 Измерение геометрических размеров проката.....60

5.2.1. Приборы для измерения толщины проката, покрытий и стенки трубы.....60

5.2.1.1. Толщиномеры, основанные на измерении степени поглощения электромагнитного излучения или потока β-частиц…….....62

5.2.1.2. Электромагнитные измерители толщины листов и покрытий…….. 63

5.2.1.3. Пневматические измерители толщины листов 64

5.2.2. Приборы для измерения ширины листа и диметра проволоки.....65

5.2.2.1. Приборы, основанные на фотокомпенсаионном методе измерения 65

5.2.2.2. Приборы, основанные на фотоследящем методе измерения…… 67

5.2.2.3. Приборы, основанные на фотоимпульсном методе измерения……. 68

5.2.3. Приборы для измерения длины прокатываемого металла…….. 70

5.2.3.1. Электромеханические измерители длины 70

5.2.3.2. Фотоимпульсные измерители длины 70

5.3 Измерение температуры.....71

5.4 Контрольные вопросы.....72

6 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ 74

6.1 Позиционное управление нажимными устройствами рабочей клети……76

6.2 Система автоматического регулирования натяжения в черновой группе клетей 77

6.3 Системы автоматического регулирования натяжения в чистовой группе клетей 78
6.4 Система автоматического регулирования ширины полосы 79
6.5 Системы автоматического регулирования толщины полосы в чистовой группе клетей 80
6.6 Контрольные вопросы 82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 85

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия - отрасль промышленности, в которой автоматизации технологических процессов производства имеет большое значение. Она позволяет повысить эффективность производства и обеспечить необходимое качество продукции.

Для большинства металлургических машин и агрегатов характерны:

- Значительная протяженность и размер оборудования, задействованного в едином технологическом процессе;
- Тяжелые и очень тяжелые условия работы;
- Жесткие требования по надежности и безотказности работы оборудования.

Развитию систем автоматизации в металлургическом производстве поспособствовало развитие электронной и вычислительной техники, а так же самих металлургических агрегатов, необходимость надежно, точно и быстро управлять машинами, двигателями и сложными технологическими процессами.

Все сказанное относится к самым распространенным и наиболее сложным в плане автоматизации и управления металлургическим технологическим комплексам - прокатным станам.

Начало работ по автоматизации процессов черной металлургии СССР следует отнести к концу тридцатых годов двадцатого века, когда были разработаны и внедрены системы регулирования теплового режима мартеновских печей на Магнитогорском и Кузнецком металлургических комбинатах. Были произведены работы по комплексной автоматизации блюминга № 2 Магнитогорского металлургического комбината. Была внедрена система автоматизированного управления раскроем проката на базе специализированной вычислительной машины «Сталь» [9].

Широко развернулись работы по автоматизации процессов черной металлургии в пятидесятые годы. Созданы системы регулирования доменных и мартеновских печей, нагревательных и термических печей, прокатных станов, различных энергетических установок. Существенные результаты были получены в области автоматизации процессов электроплавки – разработаны системы управления тепловым и электрическим режимами дуговых печей. В эти же годы В.А. Сорокиным была осуществлена первая попытка применения ЭВМ для расчёта и управления теплового состояния доменной печи.

Со второй половины шестидесятых годов в связи с развитием ЭВМ и появлением достаточно дешёвых, надёжных и

быстродействующих ЭВМ в мире появились первые автоматизированные системы управления (АСУ).

В металлургии были созданы 350-ти тонные кислородные конвертеры, прокатные станы производительностью более 5 млн. тонн проката в год и др., поэтому существенно возросли требования к качеству продукции и экономичности производства.

Начало 70-х годов ознаменовалось появлением специализированных промышленных управляющих вычислительных машин (УВМ) и созданием на их базе принципиально новых сложных комплексов автоматизации технологических процессов прокатки.

АСУ позволяла управлять рациональным раскроем металла на ножницах, обеспечивала сбор и обработку технологической информации на участках рабочей клети и ножниц блюминга.

К середине 70-х на всех непрерывных станах холодной прокатки были внедрены комплексные системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы, обеспечившие поддержание заданной толщины полосы.

Современные системы управления строятся по модульному принципу на базе унифицированных аппаратных и программных средств вычислительной техники и объединяют функции технологической подготовки производства, управления технологическими комплексами и отдельными агрегатами, графического представления оперативной информации, работы с большими базами данных и численного анализа на основе сложных математических моделей в реальном времени.

Системы управления современных прокатных станов обеспечивают:

- повышение производительности за счет оптимального согласования различных технологических операций;
- максимальную технологическую гибкость прокатного оборудования и минимальную длительность его наладки;
- существенное повышение качества готовой продукции при минимальных производственных допусках;

5 ПРИБОРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ И КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ.

Условия работы установок и приборов для измерения силовых парметров при прокатке, как правило, тяжелые. Измерению подлежат большие величины давления металла на валки до 20—30 Мн (2000—3000 Т*)*; величина крутящих моментов может достигать до 5 Мн*м (500 Т'*м). Измерения часто приходится проводить в условиях высоких температур, большой запыленности и влажности. Работа прокатного оборудования сопровождается большими вибрациями. Нагрузки во многих случаях переменные с продолжительностью импульсов до 0,1 сек и меньше. Определенные трудности при измерении силовых параметров обусловлены также большим разнообразием прокатного оборудования и сортаментом прокатных станов, что требует большого количества различных установок и приборов.

Кроме специфических трудностей, обусловленных условиями прокатного производства, существуют трудности общего порядка, связанные вообще с измерением сил. Эти трудности заключаются в том, что до сих пор нет прямых методов измерения сил. Поэтому во всех случаях производится преобразование сил в другую величину, методы измерения которой известны. На практике чаще всего усилия и моменты преобразуют в упругую деформацию какого-либо элемента, воспринимающего силовой параметр. О величине силового параметра судят либо по линейному перемещению (абсолютная деформация), либо по изменению напряженного состояния этого элемента. При этом линейное перемещение или изменение напряженного состояния меняются пропорционально приложенной силе и находятся с ней в определенной зависимости, известной по теоретическим или экспериментальным данным. В большинстве случаев для этого используют упругую область, где связь усилий с линейным перемещением определяется прямолинейной зависимостью.

Методы измерения линейных перемещений, даже если они имеют малую величину, не представляют больших трудностей и довольно хорошо разработаны. Известны, например, механические тензометры, дающие увеличение перемещений при деформации в десятки тысяч раз и позволяющие измерять линейные перемещения порядка долей микрона. Однако при измерении силовых параметров прокатных станов известные прямые методы измерения линейных перемещений не могут быть использованы в связи с кратковременностью действия измеряемых нагрузок и необходимостью передачи сигнала, пропорционального силовому параметру, на пульт управления станом или в блоки системы автоматического регулирования. Поэтому при измерении силовых

параметров при прокатке малые линейные перемещения преобразуют в величину, которую легко усилить и измерить или записать электрическими методами. Зарегистрировать изменение напряженного состояния можно электрическими методами, для чего изменение напряженного состояния преобразуют в изменение магнитного потока, что в свою очередь приводит к изменению силы тока или напряжения.

Таким образом, схема силоизмерительной установки представляет собой ряд последовательно соединенных преобразователей [4].

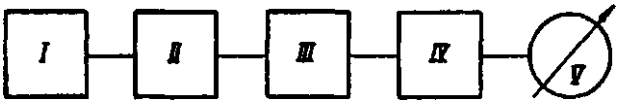


Рис. 5.1. Схема силоизмерительной установки:
I —1-й преобразователь (упругий элемент); *II* — 2-й преобразователь (датчик); *III* — 3-й преобразователь; *IV* — усилитель; *V* — указатель (индикатор)

Первый преобразователь — преобразователь механической силы в упругую деформацию называют упругим элементом и он служит для восприятия силового параметра и преобразования его в линейное перемещение или изменение напряженного состояния. По своему назначению он полностью отвечает определению датчика, поэтому в литературе его часто называют датчиком, чувствительным элементом, приемником или первичным преобразователем.

Второй преобразователь — преобразователь линейного перемещения или изменения напряженного состояния в какую-либо электрическую величину также полностью отвечает определению датчика. В отличие от первого преобразователя в дальнейшем будем называть его датчиком. Силоизмерительные установки получают название обычно по принципу действия второго преобразователя.

Третий преобразователь служит для преобразования изменения емкости, индуктивности, омического сопротивления, магнитного потока и других электрических параметров в изменение силы тока или напряжения, которые уже можно непосредственно усилить и измерить.

Для количественного увеличения (усиления) изменения силы тока или напряжения, если они малы, применяется усилитель. Для отсчета полученных результатов используют указатели или индикаторы.

С точки зрения целей измерения все силоизмерительные устройства можно разделить на две группы:

- устройства, используемые кратковременно или периодически только в период исследования энергосиловых параметров процесса

прокатки при опробовании новых технологических схем или нового оборудования;

- устройства, находящиеся в непрерывной эксплуатации на стане.

5.1 Измерение энергосиловых параметров

5.1.1. Измерение давления металла на валки

Существующие методы измерения давления металла на валки можно разделить на две группы:

- по измерению упругой деформации какой-либо детали рабочей клети с последующим пересчетом величины этой деформации на величину давления металла на валки;
- по непосредственному измерению давления металла на валки с помощью месдоз.

Месдозой называют прибор, предназначенный для определения силы по величине деформации или изменению напряженного состояния упругого элемента.

5.1.1.1. Определение давления металла на валки на основе измерения деформаций в деталях рабочей клети.

При продольной прокатке без натяжения равнодействующая давления металла на валки направлена практически вертикально. Поэтому возникающее при прокатке усилие в одинаковой мере действует на нижний и верхний валки и через шейки этих валков на подушки клети. Далее давление металла на валки передается на нажимные винты и через нажимные гайки на станины рабочей клети [4].

Если измерить абсолютную деформацию Δl какой-либо детали рабочей клети, то, зная величину базы l, усилие P, передаваемое через эту деталь, можно определить по закону Гука:

$$P = \frac{\Delta l}{l} EF$$

Здесь F— площадь поперечного сечения детали;

E—модуль упругости материала детали.

На практике обычно используют станины рабочих клетей. Стойку станины рабочей клети подвергают при прокатке совместному действию растяжения и изгиба. Максимальные деформации возникают на внутренних поверхностях стоек:

$$\Delta l_{\text{внут}} = \frac{l}{E}\left(\frac{P}{F} + \frac{M}{W_{\text{ст}}}\right)$$

На наружной поверхности стоек деформация равна:

$$\Delta l_{\text{нар}} = \frac{l}{E}\left(\frac{P}{F} - \frac{M}{W_{\text{ст}}}\right)$$

А усилие, действующее на стойку станины, определяют по следующему выражению:

$$P = \frac{F_{\text{ст}}E}{2l}\left(\Delta l_{\text{внут}} + \Delta l_{\text{нар}}\right)$$

Для измерения деформации стоек станины применяют стержневые тензометры, которые устанавливают строго по центральной линии станины.

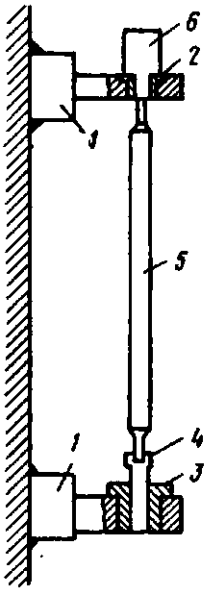


Рис. 5.2. Стержневой тензометр:
1 - кронштейны; 2 и 3 - втулки; 4 - пята; 5 - стержень тензометра;
6 – датчик

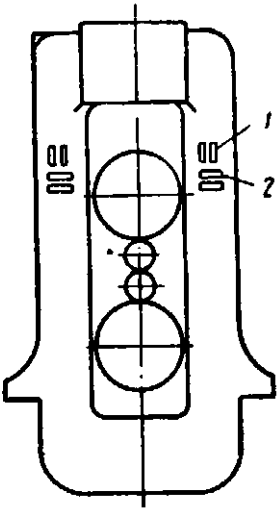


Рис. 5.3. Схема наклейки датчиков на стойки станины:
1 - рабочие; 2 - компенсационные

К стойке станины, в которой установлены втулки, приварены два кронштейна. В нижнюю втулку ввертывают пяту, на которую опирается стержень тензометра. Верхний конец стержня тензометра соприкасается с датчиком, который устанавливают в верхней втулке. При прокатке под действием давления металла на валки станина растягивается и верхний конец стержня перемещается относительно втулки на величину Δl, что регистрируется с помощью датчиков [1].

Для получения наибольшего сигнала выгодно наклеивать тензодатчики там, где возникает максимальная деформация, т. е. на внутренней стороне стойки станины.

Метод определения давления металла на валки по упругой деформации станины имеет следующие недостатки:

- для установки тензометров или наклейки, а также сушки тензодатчиков требуется длительная остановка стана;
- для установки тарировочного гидравлического пресса и на процесс тарировки требуется много времени;
- малая величина сигнала, связанная с обычно малыми деформациями стоек станины, вызывает необходимость работы с высокочувствительными шлейфами и с усилителями.

5.1.1.2. Измерение давления металла на валки при помощи месдоз

Месдоза любой конструкции состоит из трех основных частей: упругого элемента, преобразователя упругой деформации или изменения напряженного состояния в изменение какой-либо электрической величины (датчик или второй преобразователь), и вспомогательных элементов. Вспомогательные элементы служат для установки и закрепления месдозы, для передачи усилия к упругому элементу, для вывода проводов, для охлаждения и герметизации месдоз [1].

Для измерения давления металла на валки месдозы помещают в зону действия измеряемых сил. Наиболее удобное место для расположения месдоз — это пространство между верхней подушкой и нажимным винтом. Месдозу можно также установить между нижней подушкой и станиной рабочей клети.

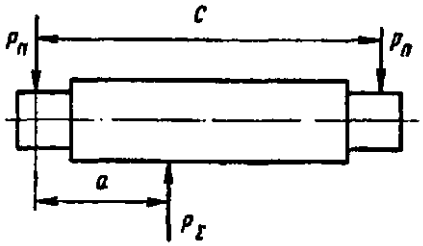


Рис 5.4. Схема сил, действующих на валок

Полное давление металла на валки (рис. 5.4) подсчитывают в этом случае по формулам:

$$P_{\Sigma} = \frac{\mathrm{c}}{\mathrm{a}} \mathrm{P}_{n}$$

или

$$P_{\Sigma} = \frac{\mathrm{c}}{c - \mathrm{a}} \mathrm{P}_{л}$$

Полное давление металла на валки находят суммированием показаний месдоз:

$$P_{\Sigma} = \mathrm{P}_{\mathrm{п}} + \mathrm{P}_{л}$$

К конструкции месдоз предъявляются следующие основные требования:

- она должна быть достаточно прочной и иметь минимальное число деталей и соединений;
- электрическая часть месдозы должна быть надежно защищена от воздействия влаги, масла и т. д.;
- месдоза должна быть наиболее чувствительна к измеряемой нагрузке и иметь линейную градуировочную характеристику;
- показания не должны зависеть от неточной ее установки: перекосов, эксцентричного приложения нагрузки, т. е. от перераспределения нагрузки по контактным площадкам;
- месдоза не должна быть чувствительна к градиенту температуры по объему.

В зависимости от применяемого датчика различают месдозы: емкостные, индуктивные, магнитоупругие, гидравлические, с датчиками омического сопротивления и др [4].

По форме упругого элемента различают месдозы с цилиндрическими, балочными, мембранными, прямоугольными, кольцевыми, шаровыми, тороидными и другими упругими элементами.

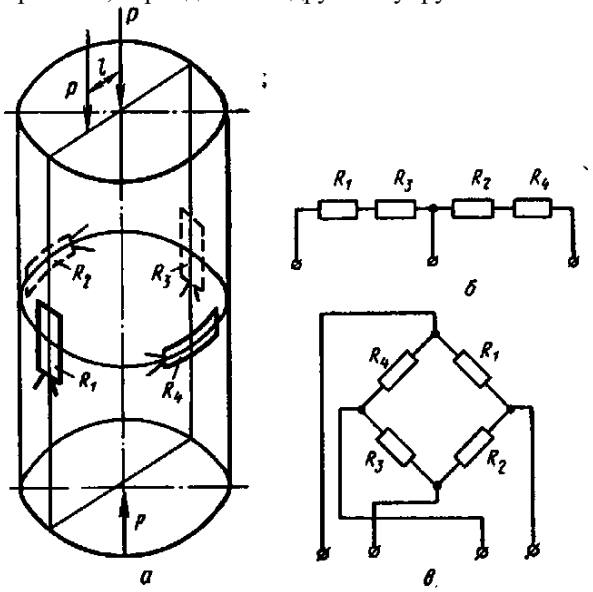


Рис. 5.5. Цилиндрический упругий элемент (а) и схемы соединения тензодатчиков в полумост (б) и мост (в)

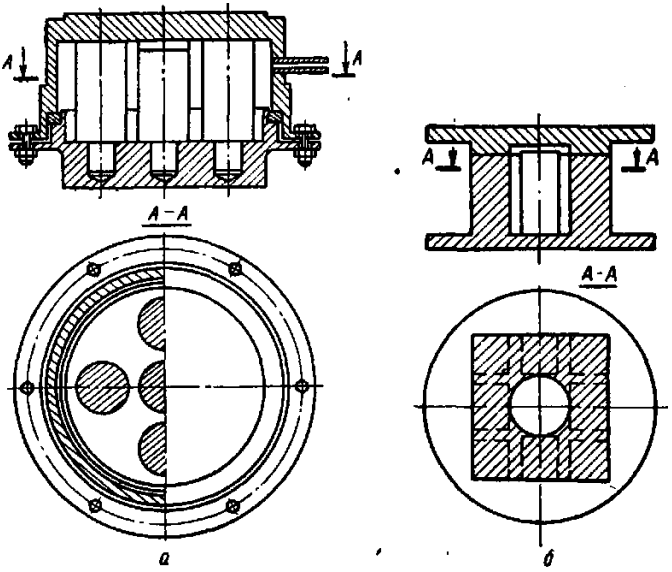


Рис. 5.6. Многостержневые месдозы конструкции
М. А. Беняковского и М. Я. Бровмана:
а - с упругими элементами, выполненными отдельно от основания;
б - с упругими элементами, выполненными заодно с основанием

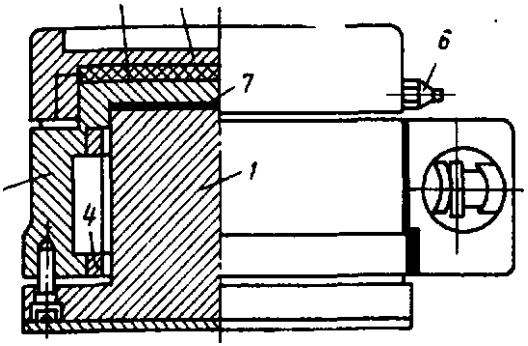


Рис. 5.7. Месдоза с цилиндрическим упругим элементом:
1 - упругий элемент; 2 - кожух; 3 - подпятник; 4 - кольцо из фосфористой бронзы; 5 - прокладка между подпятником и кожухом; 6 - ниппель; 7 - прокладка между кожухом и упругим элементом

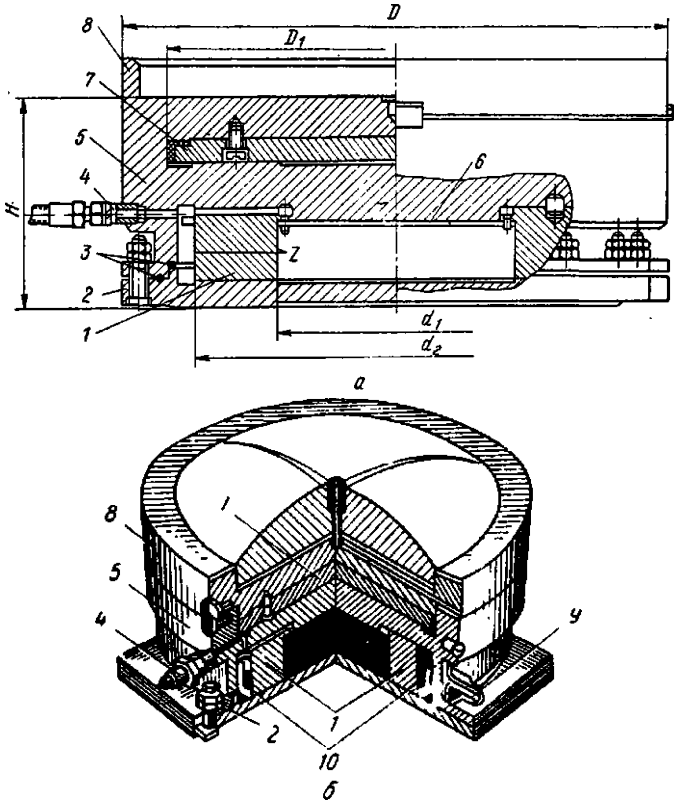


Рис. 5.8. Конструкция универсальных месдоз типа МУ (а) и МУО (б):
1 - упругий элемент; 2 - основание; 3 - уплотнения; 4 - наконечник для вывода проводов; 5 - корпус; 6 - токосъемник; 7 - прижим; 8 - плунжер; *9* - наконечник для подвода воды; 10 - фольговые тензодатчики

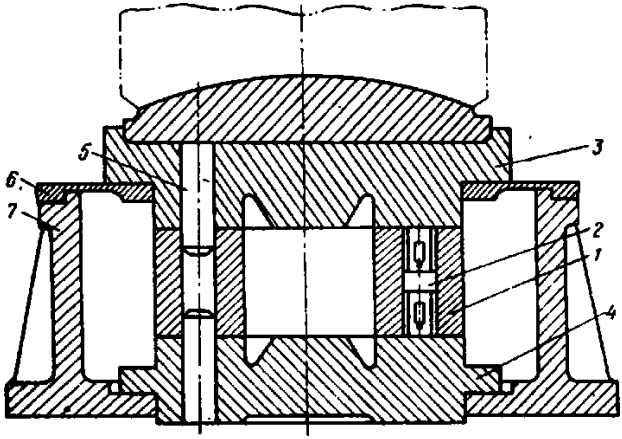


Рис. 5.9. Месдозы повышенной точности (МПТ):
1 - упругий элемент; 2 - тензометрическнй столбик; 3 - верхняя опорная плита; 4 - нижняя опорная плита; 5 - штифт; 6 - мембрана; 7 – корпус

5.1.2. Измерение крутящего момента при прокатке

Крутящий момент является наряду с давлением металла на валки одним из основных параметров, знание которого необходимо при проектировании и эксплуатации прокатных станов. Величина крутящего момента при прокатке определяет степень нагрузки электродвигателя, а также контактные и внутренние напряжения в таких деталях и узлах, как соединительные шпиндели, муфты, редукторы и т. д.

Методы определения крутящего момента могут быть косвенные и прямые. К косвенным методам относятся методы измерения момента по измерению мощности и скорости вращения электродвигателя и по измерению давления металла на валки.

5.1.2.1. Измерение крутящего момента по измерению мощности и скорости вращения электродвигателя и давлению металла на валки

Крутящий момент на его валу может быть определен по следующей формуле [4]:

$$\mathrm{M}_{\text{дв}} = 0{,}975\frac{N}{n}$$

где N — мощность двигателя, кВт
n — скорость вращения электродвигателя, об/мин
$M_{дв}$ является суммой следующих моментов:

$$M_{дв} = M_{пр} \pm M_д + M_{х.х} + M_{тр},$$

Отсюда

$$M_{пр} = M_{ДВ} \pm M_д - M_{х.х} - M_{тр}.$$

$$M_{дв} = \frac{GD^2_{пр}}{375}\frac{dn}{dt}$$

где $GD^2_{пр}$—приведенный к валу двигателя маховой момент;

$\frac{dn}{dt}$ - угловое ускорение, об/мин*сек.

Момент холостого хода $M_{х.х.}$ определяют специальным измерением мощности $N_{х.х}$ и скорости холостого хода

$$M_{х.х.} = 0{,}975\frac{N_{х.х.}}{n_{х.х.}}.$$

Момент трения равен

$$M_{тр} = \frac{Pd_\mu}{i\eta} + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)\frac{M_{пр}}{i},$$

где P — давление металла на валки;
d—диаметр круга трения;
μ — коэффициент трения в подшипниках валков;
i — передаточное число передачи от двигателя к валкам;
η — коэффициент полезного действия передачи двигатель— клеть.

5.1.2.2. Непосредственное измерение крутящих моментов

Прямое (непосредственное) измерение крутящих моментов производят с помощью специальных устройств, называемых крутильными динамометрами. Для определения момента прокатки крутильные динамометры следует разместить непосредственно на бочке валка. Однако на промышленных станах это выполнить практически нельзя из-за соприкосновения валков с прокатываемым металлом. В связи с этим крутильные динамометры размещают на шпинделях, а момент прокатки подсчитывают по следующей формуле:

$$M_{пр} = M_в + M_н - M_{тр} - 2M_{х.х.},$$

где $M_в$ и $M_н$—крутящие моменты, измеренные на верхнем и нижнем шпинделях;

$M_{тр}$ — момент трения в подшипниках;

$M_{х.х}$ —момент холостого хода, измеренный на шпинделе при холостом ходе.

Крутильные динамометры известны трех видов. К первому виду относятся крутильные динамометры, основанные на измерении упругой деформации вала, возникающей под действием приложенного момента.

Ко второму виду относятся крутильные динамометры, основанные на измерении величины тангенциального усилия, возникающего при приложении крутящего момента.

К третьему виду относятся крутильные динамометры, основанные на эффекте изменения магнитных свойств (магнитная проницаемость) вала или другого передающего крутящий момент звена под действием механических напряжений.

5.1.3. Измерение натяжения

Натяжение и подпор оказывают большое влияние на остальные параметры прокатки: давление металла на валки, крутящий момент, расход энергии, опережение, размеры полосы и т. д.

Существующие методы измерения натяжения (подпора) можно разделить на два основных вида: прямые и косвенные.

Прямые методы измерения натяжения основаны либо на измерении усилий, действующих непосредственно на прокатываемый металл, либо на измерении усилий, передаваемых от прокатываемой полосы на специальные измерительные ролики или рабочую клеть прокатного стана. Косвенные методы измерения натяжения — на зависимости между, натяжением и другими величинами, характеризующими процесс прокатки (опережением, давлением металла на валки, моментом прокатки и др.).

5.1.3.1. Измерение натяжения со смещением полосы с оси прокатки

Данный метод заключается в том, что между рабочими клетями или между клетью и моталкой устанавливают ролик. При подъеме ролика полоса выводится с оси прокатки. Если прокатка ведется с натяжением, то на ролик со стороны полосы будет действовать сила, измерив которую можно определить натяжение в полосе.

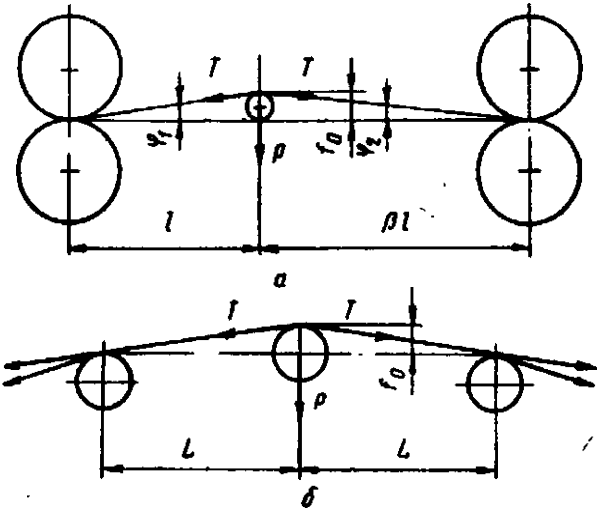


Рис. 5.10. Схема одноролико́вого (а) и трехроликового (б) измерителя натяжения

5.1.3.2. Измерение натяжения и подпора без смещения полосы с оси прокатки

Натяжение (подпор) может быть определено измерением горизонтальных сил, действующих на станины рабочих клетей со стороны прокатываемого металла. Для этого рабочие клети устанавливают либо на шарниры, либо на специальные катки (рис. 5.11, а, б). От поворота или перемещения рабочая клеть удерживается двумя месдозами, которые и воспринимают усилие натяжения (подпора).

Недостаток данного метода заключается в чрезмерном усложнении рабочей клети и необходимости защиты подшипников от попадания воды, масла, окалины и т. д.

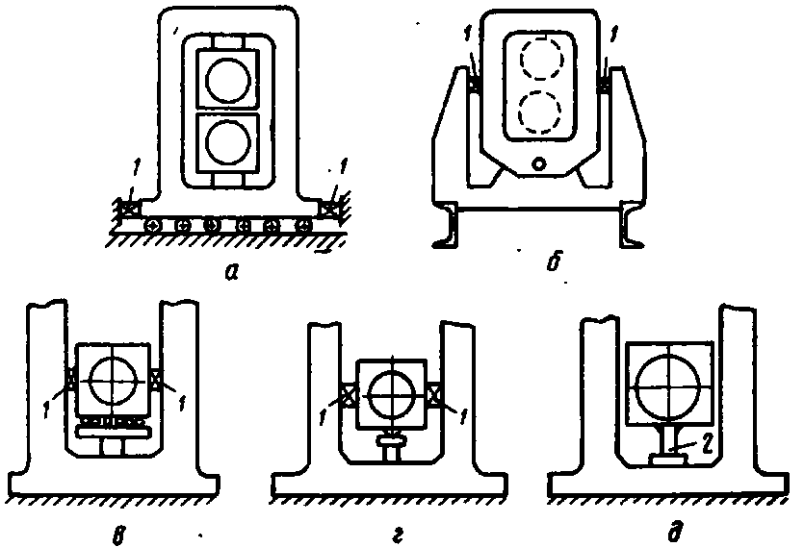


Рис. 5.11. Схемы измерения натяжения (подпора) измерением горизонтальных усилий, передаваемых рабочей клети прокатного стана от прокатываемого металла:
а - с подвижной рабочей клетью; б - с рабочей клетью, установленной на шарнире; в - с подвижной подушкой, расположенной на роликах; г - с подвижной подушкой, расположенной на шарнире; д - с подвижной подушкой, расположенной на упругом стержне
(1 - месдозы; 2 - упругий элемент)

Более перспективным является определение натяжения (подпора) путем измерения горизонтальных усилий, действующих на клеть, установленную на упругом основании. Прокатная клеть установлена иа раме, имеющей стойки повышенной податливости в направлении измеряемого усилия. На верхней поперечине, жесткость которой значительно выше жесткости стоек, находится датчик, связанный упругими шарнирами с неподвижными стойками.

Горизонтальное усилие, действующее на клеть, деформирует упругие стойки рамы, в результате происходит перемещение клети. При перемещении клети мембрана изгибается и изменяется омическое сопротивление тензодатчиков.

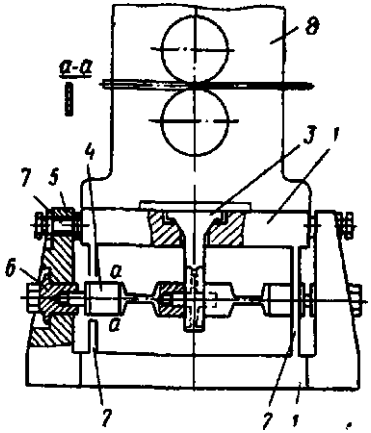


Рис. 5.12. Схема установки клети на упругое основание:
1 - рама; 2 - вертикальные стойки, обладающие повышенной податливостью в направлении измерения усилий; 3 - датчик малых перемещений; 4 - упругие шарниры; 5 - неподвижные стойки; 6 - дифференциальный резьбовой механизм; 7 - предохранительные болты; 8 - прокатная клеть

5.2 Измерение геометрических размеров проката

Измерение геометрических размеров проката производят для контроля размеров и учета количества проката перед сдачей готовой продукции на склад; для выявления нарушений технологического режима с целью ручной или автоматической настройки прокатных станов; для использования автоматизированных систем отделки прокатных изделий.

В большинстве случаев приборы для измерения геометрических размеров проката являются узкоспециализированными, предназначенными для измерения, как правило, только одного какого-нибудь параметра: толщины листа, ширины листа, диаметра труб, длины прокатанных изделий, толщины покрытий и т.д.

5.2.1. Приборы для измерения толщины проката, покрытий и стенки трубы

Толщину проката в прокатном производстве измеряют двумя методами: прямым и косвенным.

При прямом методе измерения толщина изделия (или отклонение толщины от заданной) с помощью датчиков непосредственно преобразуется в электрическую величину, по которой и судят о толщине проката. При косвенном методе измерения о толщине проката судят по

тем параметрам процесса прокатки, которые связаны функциональной зависимостью с толщиной прокатываемого металла. Наиболее просто толщину прокатываемых листов таким методом можно определить по давлению металла на валки.

$$h = \frac{P}{k} + S_0,$$

где P – давление металла на валки;
k – коэффициент, характеризующий упругие свойства стана;
S_0 – раствор валков.

Данный метод имеет и ряд недостатков: не учитывается изменение диаметра валков, что может произойти вследствие их износа, толщина масляной пленки между валками и прокатываемым металлом и ряд др.

Приборы, основанные на прямом методе измерения, можно разделить на контактные и бесконтактные. В приборах контактного типа измерения производят при соприкосновении измерительных элементов (или преобразователей) с поверхностью проката.

Недостатки приборов контактного типа следующие:

- они не обеспечивают достаточной точности при большой скорости прокатки (>10 м/сек*);*
- толщина измеряется только в одном месте (обычно с края листа);
- при длительной работе наблюдается большой износ роликов, в связи с чем требуются частые поверки;
- не исключена возможность порчи поверхности проката;
- не учитывается тепловая деформация роликов.

В последнее время для измерения толщины прокатываемых изделий широкое применение нашли бесконтактные приборы, в которых измерение производится без соприкосновения измерительных элементов с поверхностью изделия.

Бесконтактные толщиномеры по принципу действия можно разделить на следующие группы:

- приборы, основанные на измерении степени поглощения электромагнитного излучения или потока β-частиц;
- электромагнитные;
- пневматические;
- ультразвуковые.

5.2.1.1. Толщиномеры, основанные на измерении степени поглощения электромагнитного излучения или потока β-частиц

Используются два вида электромагнитного излучения: рентгеновские и γ-лучи. В качестве источников рентгеновского излучения применяют рентгеновские трубки и бетатроны, а в качестве источников γ и β-излучения – в основном искусственные радиоактивные изотопы [2].

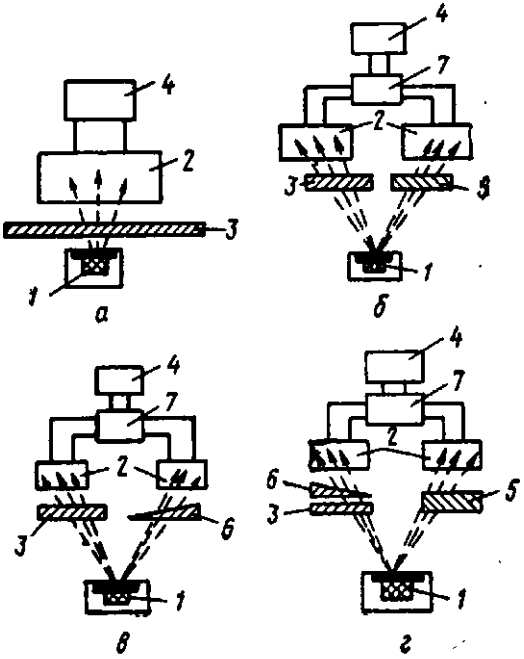
Действие приемников излучения основано на различных видах взаимодействия с веществом. В большинстве приемников излучения используется ионизация, создаваемая в них при прохождении заряженных частиц. Сюда относятся ионизационные камеры, газоразрядные счетчики и сцинтилляционные счетчики.

Измерение толщины листа, основанное на измерении ослабления интенсивности излучения при прохождении через контролируемый лист, можно осуществить тремя методами: абсолютным (прямым) методом, методом сравнения (дифференциальным методом) и методом компенсации (рис. 5.13).

Абсолютный метод (рис. 5.13, а). При абсолютном методе мерой толщины полосы является абсолютное значение интенсивности излучения, измеренной после прохождения через контролируемый лист. Точность измерений поэтому методу зависит от стабильности параметров источников излучения и погрешностей приемников излучения.

Метод сравнения (рис. 5.13, б). При измерении толщины полосы методом сравнения величину остаточного излучения после прохождения через контролируемый лист сравнивают с величиной остаточного излучения после прохождения через эталонный образец. Поток излучения в этом случае делится на две части, одна из которых облучает образец, другая — измеряемую полосу. Разность сигналов двух приемников воздействует на одно показывающее устройство. При измерении по этому методу не требуется высокой стабилизации параметров источника излучения, точность измерения повышается.

Метод компенсации. В этом случае остаточное излуение, прошедшее через полосу и эталонный образец, уравнивается при помощи компенсирующего клина.



1 - источник излучения; 2 - приемник; 3 -объект контроля; 4 - показывающий прибор; 5 - эталон; 6 - клин; 7 - блок сравнения

Рис. 5.13. Измерение толщины листа различными методами (а - абсолютный; б - метод сравнения; в - компенсационный; г - то же, с применением эталона), основанными на ослаблении интенсивности излучения при прохождении через контролируемый объект

5.2.1.2. Электромагнитные измерители толщины листов и покрытий

Принцип действия электромагнитных измерителей толщины листов и покрытий основан на прямом или косвенном измерении магнитного потока, изменяющегося с изменением толщины листа или покрытия. Для измерения толщины листов и покрытий применяют три основных электромагнитных метода [4].

Первый метод основан на измерении силы притяжения постоянного магнита или электромагнита к исследуемому объекту. Эта сила определяется при отрыве магнита от объекта.

Второй метод измерения толщины листов и покрытий основан на изменении сопротивления магнитной цепи, составленной из листа и сердечника электромагнита.

Наибольшее распространение получил третий метод— метод вихревых токов (или метод электромагнитной индукции). Этот метод заключается в следующем: испытуемый объект помещают в магнитное поле катушки или в катушки, питаемые переменным током (рис. 5.14.). Переменное магнитное поле индуктирует в испытуемом объекте вихревые токи, которые в свою очередь создают собственное магнитное поле, направленное против основного магнитного поля. В результате взаимодействия этих магнитных полей электрические параметры катушки изменяются. Величина вихревых токов и их магнитного поля при всех прочих равных условиях зависит от свойств испытуемого объекта. Поэтому с изменением этих свойств будут изменяться и электрические параметры катушки.

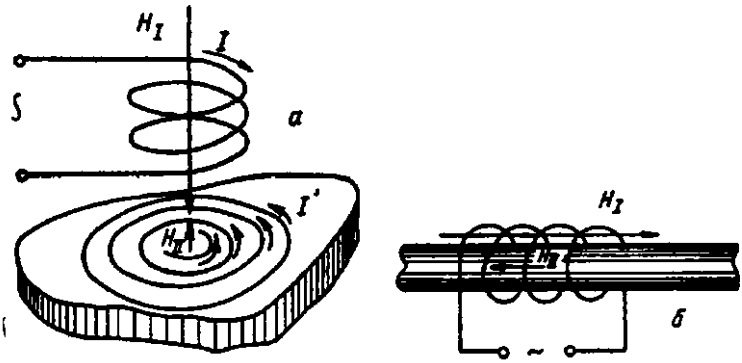


Рис. 5.14. Взаимное расположение катушки и испытуемого объекта:
а — катушка расположена над поверхностью испытуемого объекта (накладная катушка); б —испытуемый объект расположен внутри катушки (проходная катушка); H_I — первичное магнитное поле катушки в отсутствии испытуемого объекта; H_{II}—вторичное магнитное поле, созданное вихревыми токами в испытуемом объекте

5.2.1.3. Пневматические измерители толщины листов

Принцип действия этих датчиков основан на зависимости между расходом сжатого газа и площадью проходного сечения отверстия (рис. 5.15.).

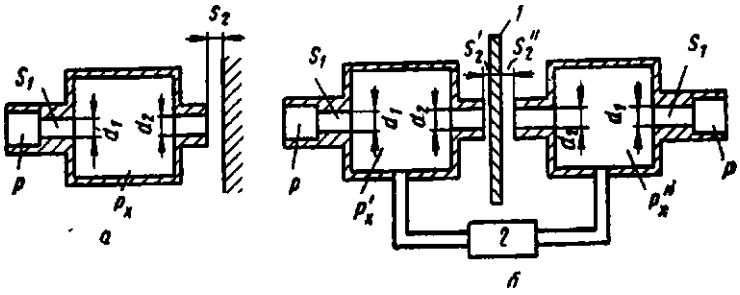


Рис. 5.15. Схема пневматического датчика:
а — прямой метод измерения; б — дифференциальный метод измерения
(1— объект контроля; 2 — дифференциальный манометр)

5.2.2. Приборы для измерения ширины листа и диметра проволоки

С связи с большими скоростями прокатки листов (до 35 м/сек*)* и проволоки (до 45 м/сек*)* для измерения ширины листов и диаметра проволоки применяют в основном фотоэлектрические бесконтактные методы измерения, которые можно разделить на три группы: фотокомпенсационные, фотоследящие и фотоимпульсные.

5.2.2.1. Приборы, основанные на фотокомпенсаионном методе измерения

При фотокомпенсационном методе измерения сравниваются два световых потока, один из которых частично перекрывается измеряемым изделием, а другой — подвижной заслонкой, положение которой при равенстве потоков, определяет размер изделия.

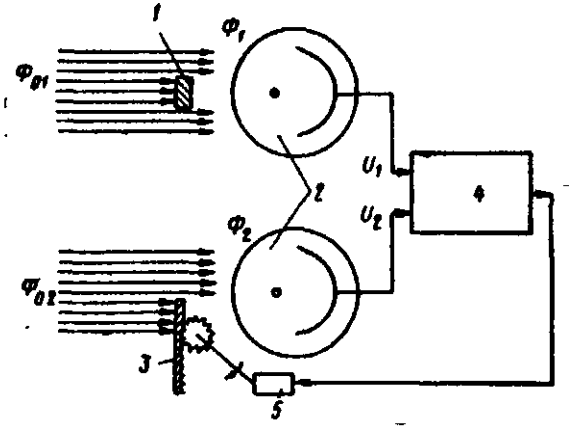


Рис. 5.16. Принципиальная схема измерения ширины проката по фотокомпенсационвому методу:
1 — измеряемое изделие; 2— фотоэлементы; 3 — подвижная заслонка; 4—усилитель разности; 5 — реверсивный двигатель

Световой поток Φ_{01} перекрывается измеряемым телом, а световой поток Φ_{02} — заслонкой. Световые потоки Φ_1 и Φ_2, падающие на фотоэлементы, сравниваются и на выходе усилителя разности появляется напряжение, пропорциональное разности световых потоков Φ_1 и Φ_2 Реверсивный двигатель на выходе усилителя в зависимости от знака напряжения соответственно перемещает заслонку, уменьшая или увеличивая поток Φ_2 до полной компенсации потока Φ_1. В момент равенства потоков двигатель останавливается, а положение заслонки определяет размер изделия.

Для реализации данной схемы и удовлетворительной ее работы необходимо выполнение определенных требований, главные из которых следующие: 1) однородность световых потоков Φ_{01} и Φ_{02}; 2) линейная связь потоков Φ_{01} и Φ_{02}; 3) независимость результатов измерений от характеристик отдельных фотоэлементов.

Если световой поток Φ_{01} неоднороден, то остаточный поток Φ_1 зависит от положения изделия, что приводит к погрешностям измерения. Для уменьшения этой погрешности применяют параболические отражатели и конденсоры, а также объективы, избирающие при помощи диафрагм у общего потока лучи, близкие к параллельным. То же самое относится и к потоку Φ_{02}, неоднородность которого позволяет получить линейную шкалу прибора.

Состояние баланса в схеме не нарушается, если яркости обоих световых потоков Φ_{01} и Φ_{02} уменьшаются пропорционально.

Пропорциональность их изменения достигается тем, что оба потока исходят из одного источника света, в качестве которого обычно используют лампу накаливания.

В схеме, приведенной на рис. 5.16, сравниваются два постоянных напряжения U_1 и U_2, каждое из которых при неизменном световом потоке зависит от темнового тока, чувствительности и сопротивления нагрузки соответствующего фотоэлемента. Изменение этих величин приводит к погрешностям измерения. Для устранения этих погрешностей используют один фотоэлемент, некоторый с помощью обтюратора поочередно с определенной частотой направляют оба потока Φ_1 и Φ_2. При неравенстве потоков в нагрузке фотоэлемента возникает переменное напряжение. Амплитуда этого напряжения пропорциональна разности потоков Φ_1 и Φ_2, а фаза соответствует знаку неравенства. Кроме того, в этом случае может быть применен усилитель низкой частоты, что исключает погрешности из-за дрейфа сравнивающего усилителя. Последний работает на постоянном токе в схеме с двумя фотоэлементами.

5.2.2.2. Приборы, основанные на фотоследящем методе измерения

При фотоследящем методе измерения ширины проката размер изделия устанавливается по положению кромок листа относительно фиксированной оптической оси. Положение каждой кромки определяется бесконтактной фотоследящей системой.

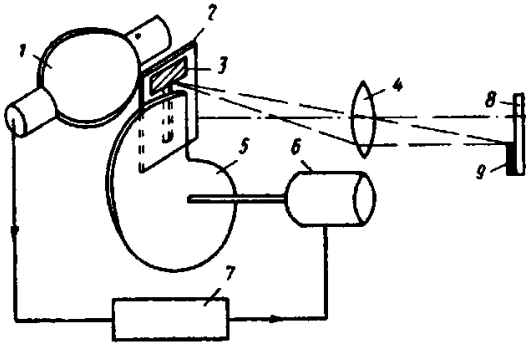


Рис. 5.17. Принципиальная схема прибора для измерения размеров по фотоследящему методу:
1 — фотоэлемент; 2 — щелевая диафрагма; 3 — изображение изделия; 4 — линза; 5—заслонка; 6—двигатель; 7 — усилитель; 8 — осветитель; 9 — изделие

От фотокомпенсационных приборов фотоследящие приборы отличаются главным образом меньшей погрешностью, которая вызвана неравномерностью освещенности.

5.2.2.3. Приборы, основанные на фотоимпульсном методе измерения

Фотоимпульсный (времяимпульсный) метод измерения основан на применении развертки изображения для образования светового импульса, длительность которого определяет размеры изделия.

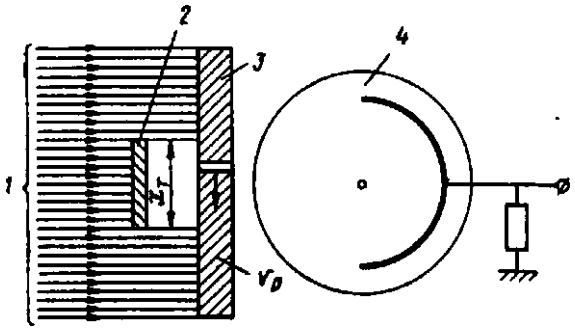


Рис. 5.18. Принципиальная схема фотоимпульсного метода измерения размеров изделия:
1 — световой поток; 2 — изделие; 3 —экран с отверстием;
4 — фотоэлемент

На рис. 5.19 показана оптико-механическая схема прибора конструкции ВНИИметмаш для измерения ширины полосы при горячей прокатке.

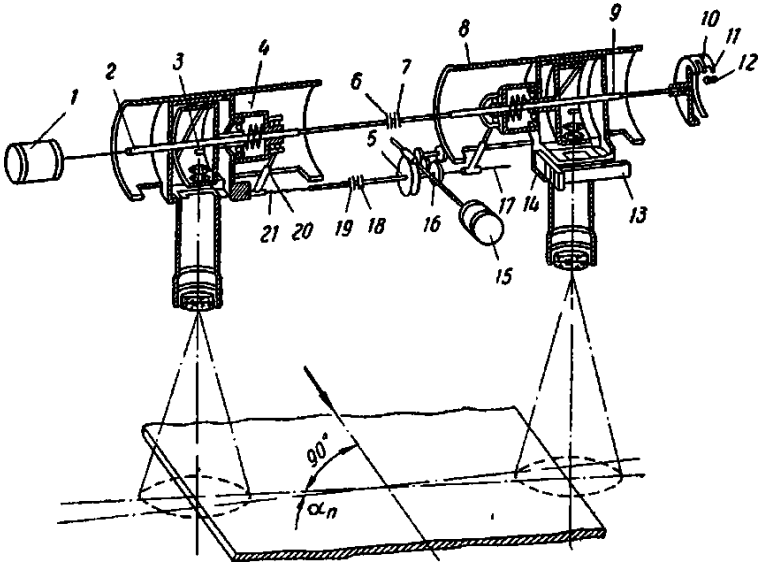


Рис. 5.19. Оптико-механическая схема прибора для измерения ширины полосы при горячей прокатке:
1 — электродвигатель развертывающих систем; 2, 9— вал с винтовой шпоночной канавкой; 3, 11— фотосопротивления; 4 — механизм для выборки люфта; 5 —редуктор привода головок; 6, 19 — муфты; 8 — направляющий стакан; 10 — калибратор; 12 — лампа подсветки; 13, 14 — направляющие механизмы; 15 — электродвигатель; 16—механизм провода сельсина-датчика установки головок; 17, 21 — винты ходовые: правый, левый; 18—муфта точной взаимной установки головок; 20 — поводковый механизм

Этот прибор также основан на фотоимпульсном методе измерения, но работает без применения искусственной подсветки, так как используется собственное излучение нагретого металла. Развертка изображения кромок полосы производится с помощью барабана со сквозными винтовыми прорезями. Световой поток при помощи оптики и развертывающей системы попадает на фотосопротивление, сигнал с которого с помощью электронной схемы преобразуется в напряжение, пропорциональное отклонению ширины полосы от заданной. Напряжение измеряется стрелочным прибором, шкала которого проградуирована в миллиметрах.

5.2.3. Приборы для измерения длины прокатываемого металла

Приборы для измерения длины проката условно можно классифицировать по трем основным признакам:

- по направлению измерения относительно движения изделия;
- по виду преобразователя, устанавливаемого на линии движения проката;
- по наличию или отсутствию контакта измерителя с измеряемым изделием.

В зависимости от вида преобразователя, устанавливаемого на линии движения проката, измерители длины можно разбить на два больших класса: электромеханические измерители длины (контактные) и фотоимпульсные измерители длины (бесконтактные). Кроме того, к бесконтактным измерителям длины относятся приборы с магнитными и тепловыми метками, а также приборы, основанные на эффекте Доплера.

5.2.3.1. Электромеханические измерители длины

Принцип работы электромеханических измерителей длины заключается в следующем: мерительный цилиндрический ролик, вращаемый на оси, прижимается к изделию и обкатывает его при поступательном движении. С роликом жестко связан импульсатор, который выдает определенное число импульсов на один оборот ролика.

Подсчитав число импульсов m, можно определить длину изделия L:

$$L = km.$$

В качестве импульсаторов применяют сельсины, высокочастотные генераторы, а также фотоэлектрические, электромеханические, электромагнитные и другие устройства.

5.2.3.2. Фотоимпульсные измерители длины

Фотоимпульсные измерители длины в зависимости от получаемой информации с фотодатчиков можно разбить на три группы:

- приборы, в которых длину изделия измеряют по времени прохождения изделием какого-либо датчика с учетом средней скорости движения за это время;
- с прямым счетом импульсов;
- с применением развертывающих систем.

Фотоимпульсные измерители длины с прямым счетом импульсов. Указанные измерители характеризуются тем, что датчики, установленные на линии продольного движения проката, при прохождении мимо них измеряемого изделия выдают в измерительную систему импульсы, равные определенной фиксированной длине.

5.3 Измерение температуры

Температура является важнейшим параметром множества технологических и теплотехнических процессов, характеристикой кинетической энергии молекул и характеризует степень нагретости тела.

Самое широкое распространение получили:

- термометры сопротивления;
- термоэлектрические термометры;
- пирометры излучения.

Пирометры относятся к бесконтактным датчикам температуры. В основу их работы положен принцип использования теплового и светового излучения нагретых тел.

Лучистая энергия выделяется нагретым телом в виде волн различной длины. До 500^0C нагретое тело излучает энергию инфракрасного спектра не воспринимаемую человеческим глазом. По мере повышения температуры тело излучает энергию всех воспринимаемых глазом длин. Одновременно с повышением температуры возрастает интенсивность монохроматического излучения (яркость), т.е. излучение при определенной длине волны, а также увеличивается суммарное, т.е. световое и тепловое излучение. Монохроматическое излучение используется в пирометрах частичного излучения, суммарное – в пирометрах полного излучения.

Интенсивность монохроматического и суммарного излучения кроме температуры зависит от физических свойств вещества. Поэтому шкалы приборов работающих в комплекте с пирометрами градуируются по излучению абсолютно черного тела, степень черноты которого $E_0 = 1$. Реальные физические тела излучают энергию менее интенсивно, т.к. степень черноты для них $0<E<1$. Поэтому пирометры излучения показывают температуру, заниженную относительно действительного значения. Следовательно, при использовании пирометров вводят соответствующие поправки на степень черноты реального тела.

В общем случае пирометр состоит из первичного датчика, вторичного преобразователя и вторичного измерительного прибора.

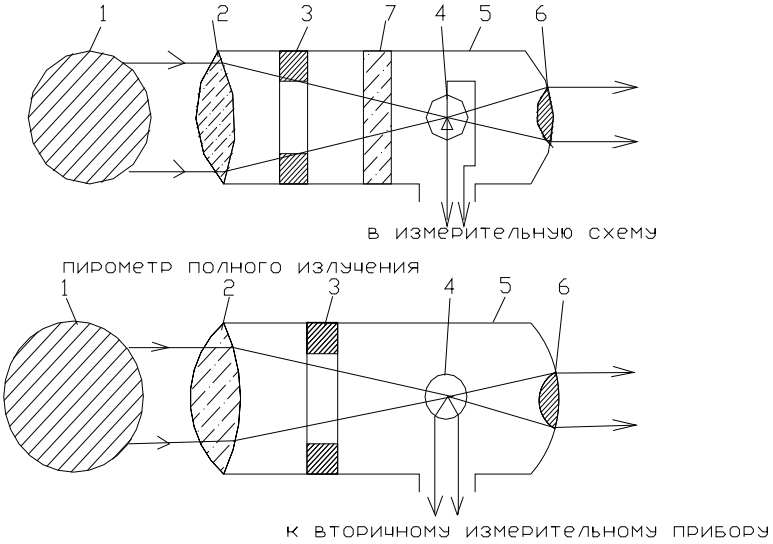


Рис. 5.20. Пирометр частичного и полного излучения

Различные типы пирометров позволяют измерять температуру в интервале 30-6000^{0}С. Кроме степени черноты тела на точность измерения сильно влияет промежуточная среда (пыль, дым, пар и т.п.) между нагретым телом и датчиком.

5.4 Контрольные вопросы

1 Назвать элементы силоизмерительных установок и их назначение.

2 Как измеряется давление металла на валки?

3 При помощи каких датчиков измеряется деформация клети?

4 Что такое месдоза и из чего она состоит?

5 Назвать основные виды месдоз.

6 С помощью каких методов определяется крутящий момент при прокатке?

7 Из каких компонентов состоит момент прокатки?

8 Виды измерения натяжения.

9 Сформулировать принцип измерения натяжения без смещения полосы с оси прокатки.

10 Перечислить способы бесконтактного измерения толщины.

11 В чем различия между основными методами измерения ширины?

12 Сформулировать принцип работы электромеханического измерителя длины.

13 Назвать основные элементы пирометра.