

Министерство науки и высшего образования РФ

Государственное образовательное учреждение высшего образования
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Институт новых материалов и технологий

Кафедра «Металлургические и роторные машины»

Методические указания

по выполнению проекта по модулю

«Автоматизированное проектирование технологических машин и оборудования»

для студентов бакалавриата всех форм обучения
направления **15.03.02 "Технологические машины и оборудование"**
программы **"Металлургические машины и оборудование"**

Автор :
канд. техн. наук, доцент
БЕЛЯЕВ С.Ю.

Екатеринбург 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
1.1 Цель проекта по модулю	3
1.2 Тематика проекта по модулю	3
1.3 Содержание и оформление проекта по модулю	4
1.4 Исходные данные для выполнения проекта по модулю	5
1.5 Использование пакета прикладных программ	6
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	18
2.1 Описание технологического процесса	18
2.2 Расчет схемы обжатий	18
2.3 Расчет геометрических и деформационных параметров очага деформации	20
2.4 Расчет контактных давлений и усилия прокатки	27
2.5 Расчет скоростного режима прокатки	38
2.6 Расчет температурного режима прокатки	52
2.7 Расчет моментов и мощности прокатки	53
2.8 Расчет технико-экономических показателей работы прокатного стана	60
2.9 Выводы	62
3. ЗАЩИТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ	64
Список рекомендуемой литературы	65
Приложения	66

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Цель проекта по модулю

Цель проекта по модулю заключается в закреплении полученных в лекционных курсах, на практических и лабораторных занятиях знаний по построению, организации и расчету технологического процесса производства проката из черных и цветных металлов на листовых станах с использованием современных автоматизированных средств программирования, расчета и проектирования.

Данная цель достигается путем самостоятельного решения студентом с использованием современных автоматизированных средств программирования, расчета и проектирования конкретной практической задачи по расчету технологических, энергосиловых и технико-экономических показателей процесса прокатки, а также в определении технической возможности производства заданного вида прокатной продукции по принятому маршруту деформации на конкретном прокатном стане.

Проект по модулю является междисциплинарным и основывается на ранее изученных студентами естественнонаучных и общепрофессиональных курсах, дисциплинах модуля «Автоматизированное проектирование технологических машин и оборудования», «Программное обеспечение САПР», «Математическое моделирование технологических процессов металлургического производства», а также смежных дисциплин «Технологические линии и комплексы металлургических производств» и «Металлургические машины и оборудование».

1.2 Тематика проекта по модулю

В зависимости от специализации обучения студент выполняет проект по модулю на одну из нижеперечисленных тем:

Тема 1. Технология и автоматизированный расчет энергосиловых параметров процесса горячей прокатки листов на толстолистовом реверсивном стане.

Тема 2. Технология и автоматизированный расчет энергосиловых параметров процесса горячей прокатки листов на непрерывном широкополосовом стане.

Тема 3. Технология и автоматизированный расчет энергосиловых параметров процесса горячей прокатки листов на полунепрерывном стане.

Тема 4. Технология и автоматизированный расчет энергосиловых параметров процесса холодной прокатки листов на одноклетьевом реверсивном стане.

Тема 5. Технология и автоматизированный расчет энергосиловых параметров процесса холодной прокатки листов на непрерывном стане.

Могут быть сформулированы дополнительные темы проекта по модулю в зависимости от специализации обучения студентов.

1.3 Содержание и оформление проекта по модулю

Проект по модулю должен содержать:

Титульный лист.

Задание на проект по модулю.

Исходные данные (в развернутом виде с учетом технических характеристик механического оборудования и главных электродвигателей стана).

1. Описание технологического процесса производства проката на конкретном стане.
 - 1.1. Описание технологического процесса на стане;
 - 1.2. Техническая характеристика оборудования;
 - 1.3. Схема расположения оборудования стана.
2. Расчет параметров технологического процесса прокатки.
 - 2.1 Расчет схемы обжатий;
 - 2.2 Расчет геометрических и деформационных параметров очага деформации;
 - 2.3. Расчет контактных давлений и усилия прокатки;
 - 2.4. Расчет скоростного режима прокатки;
 - 2.5. Расчет температурного режима прокатки;
 - 2.6. Расчет моментов и мощности прокатки.
3. Расчет технико-экономических показателей работы прокатного стана.

Выводы.

В конце проекта по модулю приводятся:

- график Адамецкого для данного стана,
- скоростная диаграмма главного привода стана,
- нагрузочная диаграмма главного привода стана.

Титульный лист оформляется по образцу, приведенному в приложении 1.

Типовое задание на проект по модулю приводится в приложении 2 и заполняется преподавателем.

Проект по модулю выполняется на стандартных листах формата А4 с рамками, соответствующими оформлению текстовых документов по Единой системе конструкторской документации (ЕСКД). Оформление проекта по модулю должно соответствовать требованиям стандартов для текстовых документов. График Адамецкого, скоростная и нагрузочная диаграммы главного привода могут выполняться на листах большего размера, исходя из объема представленной на них информации.

Исходные данные и основное содержание работы должно соответствовать приведенным ниже рекомендациям по выполнению проекта по модулю.

1.4 Исходные данные для выполнения проекта по модулю

Исходные данные для выполнения проекта по модулю включают:

- данные задаваемые преподавателем,
- данные, принимаемые на основе технических характеристик конкретных прокатных станов (см. таблицы 1 – 3),
- данные принимаемые по литературным источникам (описание технологических линий, состава оборудования и характеристик технологического процесса производства (библиографический список в конце данных методических указаний)).

Исходными данными для выполнения проекта по модулю являются:

- Тип прокатного стана или рабочей клетки указывается преподавателем в задании на проект по модулю.
- Размеры исходной заготовки (толщина, ширина, длина) $h_0 \times b_0 \times l_0$, мм; размеры исходной заготовки указываются преподавателем в задании на проект по модулю.
- Размеры готовой продукции или полуфабриката (толщина проката или размеры поперечного сечения после n -го прохода или клетки) h_n или $h_n \times b_n$, мм; размеры готовой продукции или полуфабриката указываются преподавателем в задании на проект по модулю.
- Схема обжатий указывается преподавателем в задании на проект по модулю.
- Марка сплава прокатываемого металла; марка сплава указывается преподавателем в задании на проект по модулю.
- Температура исходного нагрева металла (для станов горячей прокатки) указывается преподавателем в задании на проект по модулю.
- Размеры или калибровка валков; для листопрокатных станов размеры валков принимаются из представленных ниже технических характеристик ряда станов (см. таблицы 1 – 3) и/или из литературных источников.
- Параметры главного привода каждой из рабочих клеток принимаются из представленных ниже технических характеристик ряда станов, главных электродвигателей (см. таблицы 1 – 3) и/или из литературных источников:
 - Тип и количество электродвигателей главного привода рабочей клетки;
 - Суммарная мощность электродвигателей главного привода клетки;
 - Номинальный крутящий момент электродвигателей главного привода клетки;
 - Допустимый коэффициент перегрузки электродвигателей главного привода рабочей клетки;
 - Частота вращения ротора электродвигателя главного привода клетки n_y в установившемся режиме;
 - Передаточное число главного привода клетки i_{np} ;
 - Маховый момент или момент инерции ротора электродвигателя главного привода клетки (см. таблицу 8);
 - Ускорения главного привода рабочей клетки при пуске и торможении.

- Параметры рабочих клеток принимаются из представленных ниже технических характеристик ряда станов (см. таблицы 1 – 3) и/или из литературных источников:

Максимально допустимое усилие, которое может воспринимать клеть;

Средняя скорость перемещения нажимных винтов (для реверсивных станов);

Расстояние между клетями (для многоклетевых станов);

- Условия прокатки:

Количество проходов (рабочих клеток для непрерывных станов) n ;

Количество одновременно прокатываемых заготовок N ;

Длительность паузы, необходимой для отвода от клетки готового проката и подачи следующей заготовки $t_{п\ o}$;

Величины переднего и заднего натяжения полосы при прокатке σ_1 и σ_0 задаются преподавателем.

Условия прокатки указываются преподавателем в задании на проект по модулю.

Допускается использование в качестве исходных данных для выполнения проекта по модулю нормативно-технической документации (не имеющей грифов о конфиденциальности использования) конкретных металлургических заводов.

1.5 Использование пакетов прикладных программ

При выполнении всего проекта модулю или его отдельных частей, с целью автоматизации проектирования технологического процесса на основании теории прокатки и режимов работы оборудования, рекомендуется использовать средства программирования и графического построения, которыми владеет студент. К таким средствам можно отнести программные комплексы:

- Microsoft Excel,
- MahtCad,
- MahtLab,
- Компас,
- AutoCad,
- другие.

Таблица 1

Техническая характеристика реверсивных листовых станов горячей прокатки

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Характеристика заготовок и готового проката			Скорость нажимного механизма, мм/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Обрабатываемые сплавы	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода	толщина и ширина заготовки, мм	вид и масса заготовки	толщина готового проката, мм				
1200 НЛМЗ, Амур-сталь	черн.	Э	600	-	900						150..210 x 880..1000	слябы до 4,5 т	1,75.. 4,0			эл/техн. стали	1
	унив.	Д	850	-	1200	Гр	2400	0-100-220	скол	1,0				1..30			
	с моталками в печах	К	620	1250	1200	Гр	3070	0-180-440	кач.	1,0				1..15			
1300	черн.	Э	600	-	900						150..210 x 880..1000	слябы до 4,5 т	1,75.. 4,0			эл/техн. стали	4
	унив.	Д	850	-	1200	Гр	2400	0-100-220	скол	1,0				1..30			
	с моталками в печах	К	620	1250	1200	Гр	3070	0-180-440	кач.	1,0				1..15			
1500 Кир. ОЦМ	реверсивная	Д	850	-	1500	Гр	1900	0-40-80	ПДЖТ	1,0	200 x 1000	слит. до 2,0 т	6..12	1..35		Сл, Ni сплавы	2
2000 ВСМПО	верт.	Э	-	-	-	Гр	300				200 x 850	слябы до 1,2 т				Ti сплавы	3
	черн.	К	750	1400	2000	Гр	5500	0-60-120	кач.	1,0			6..30	1..13			
	чист.	К	500.. 600	1500	2000	Инд	3000	0-100-200	кач.	1,0			1..5	1..13			

Продолжение табл. 1

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Характеристика заготовок и готового проката			Скорость нажимного механизма, мм/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Обрабатываемые сплавы	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода	толщина и ширина заготовки, мм	вид и масса заготовки	толщина готового проката, мм				
2000 всмп	про- глад.	К	650	1300	2000	Гр	610	0-190-400	кач.	3,5	0,5..5,0 x 600..1700	листы 0,275 кг	0,5..5,0			Ti сплавы	2
2000 всмп	с моталками в катушках	К	500	1400	2000	Инд	1100	0-180-440	кач.	1,0	4,0..6,0 x 850..1800	рул. до 8,0 т	1..4		32	Ti сплавы	2
2300 (1700) Челяб МЗ	верт.	Э	1000	-	600	Гр	900	0-150-350		5,2	90..190 x 600.. 1060	слябы до 4,0 т				углер., легир. стали	4
	черн.	Д	1150	-	2800	Гр	2600	0-30-75	скол	1,0			15..60	1..50			
	чист.	Э	700	-	150	Гр	200	0-200-500		5,2							
	унив.	К	800	1400	2800	Гр	5600	0-60-120	кач.	1,0			4..50	1..50			
2800 охмк	верт.	Э	1000	-	600	Гр	900	0-150-350		5,2	100..250 x 1000.. 1600	слябы до 8,0 т				углер., легир. стали	4
	черн.	Д	1150	-	2800	Гр	2600	0-30-75	скол	1,0			15..60	1..50			
	чист.	Э	700	-	150	Гр	200	0-200-500		5,2							
	унив.	К	800	1400	2800	Гр	5600	0-60-120	кач.	1,0			4..50	1..50			
2800 КомМЗ	верт.	Э	700	-	1000	Гр	850	0-70-210		5,2	100..250 x 1000.. 1600	слябы до 8,0 т				углер., легир. стали	1
	черн.	Д	1150	-	2800	Инд	2950	0-30-60	скол	1,0			15..60	1..50			
	чист.	Э	700	-	150	Гр	200	0-200-500		5,2							
	унив.	К	800	1400	2800	Гр	7360	0-80-160	кач.	1,0			4..50	1..50			

Продолжение табл. 1

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Характеристика заготовок и готового проката			Скорость нажимного механизма, мм/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Обрабатываемые сплавы	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность кажда-го э/двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода	толщина и ширина заготовки, мм	вид и масса заготовки	толщина готового проката, мм				
2800 (1700) Чер МК	верт.	Э	900	-	1400	Гр	2х1800	0-60-120			130..350 х	слит. 37 т			45	углер., легир. стали	7
	черн.	К	1130	1800	3600	Инд	6920	0-40-80	ПЖТ	1,0	1100..1900		50..200	1..45			
	чист.	К	1030	1800	3600	Инд	7360	0-80-160	ПЖТ	1,0			5..50	1..45			
2800 Самар МЗ	черн.1	К	900	1400	2800	Гр	4000	0-30-60	кач.	1,0	200..400 х 1200..2000	слябы до 6,0 т	65..85	1..15	30	Al сплавы	2, 3
	черн.2	К	750	1400	2800	Гр	5500	0-50-120	кач.	1,0			20..30	1..15	30		
2840 КУМЗ	верт.	Э	900	1400	2800	Гр	4000	0-30-60	кач.	1,0	200..400 х 1200..2000	слябы до 6,0 т	65..85	1..15	30	Al сплавы	2, 3
	реверсивная	К	750	1400	2840	Гр	5500	0-50-120	кач.	1,0			20..30	1..15	30		
2850 Аша МЗ	нереверсивная	Т	850	650	2850	Гр	2000	370	скол	1,0	180 х 680..710	слябы до 4,5 т	10..30			углер., легир. стали	5, 6
3000 Мариуп	черн.	К	940	1950	2980	Инд	8000	0-50-80	ПЖТ	1,0	200..315х 1250..1900	слябы слит. 13 т	47..50	1..50	49..69	углер., легир. стали	7
	чист.	К	1000	2100	3100	Инд	2х6300	0-90-125	ПЖТ	1,0			5..25	1..30			
3600 Азов сталь	верт.	Э	900	-	1400	Гр	2х1800	0-60-120			130..350 х	слит. 37 т			45	углер., легир. стали	7
	черн.	К	1130	1800	3600	Инд	6920	0-40-80	ПЖТ	1,0	1100..1900		50..200	1..45			
	чист.	К	1030	1800	3600	Инд	7360	0-80-160	ПЖТ	1,0			5..50	1..45			

Продолжение табл. 1

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Характеристика заготовок и готового проката			Скорость нажимного механизма, мм/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Обрабатываемые сплавы	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода	толщина и ширина заготовки, мм	вид и масса заготовки	толщина готового проката, мм				
3600 Запорожье	черн.	К	1180	2360	3600	Инд	2х6250	0-63-90	ПЖТ	1,0	120..350х1500..2200	слябы до 20,5 т	50..120	1..50	60	легир., нерж. стали	4
	чист.	К	1180	2360	3600	Инд	2х5000	0-90-110	ПЖТ	1,0			6..40	1..30			
4000	верт.	Э	1100	-	1000	Гр	1100				120..350х1500..2200	слябы слит. 40 т				броневая сталь	1
	ревер	К	1000	1800	4000	Инд	3680	0-40-80	ПЖТ	1,0			12..160	1..50			
5000 Ижора	ок/лом	Д	1400	-	4000	Инд	6700	0-45	ПЖТ	1,0	130..350 х 1100..1900	слит. до 60 т	50..200	1..45	35	углер., легир. стали	4, 7
	верт.	Э	1100	-	1100	Гр	2х2000								10		
	чист.	К	1150	2200	5000	Инд	6700	0-45	ПЖТ	1,0			8..50	1..45	80		

Сокращения принятые в таблице:

Тип клеток: Э - эдзерная, Д - двухвалковая (ДВО), Т - трехвалковая (ТРИО), К - четырехвалковая (КВАРТО).

Тип привода: Гр - групповой привод валков клетки, Инд. - Индивидуальный привод валков клетки.

Тип подшипников: скол - скольжения, кач. - качения, ПЖТ - подшипники жидкостного трения.

Наименование предприятий: НЛМЗ - Новолипецкий металлургический завод, Амурсталь - завод "Амурсталь", Кир. ОЦМ - Кировский завод по обработке цветных металлов, ВСМПО - Верхне-Салдинское металлургическое производственное объединение, Челяб. МЗ - Челябинский металлургический завод, ОХМК - Орско-Халиловский металлургический комбинат, Ком МЗ - Коммунарский металлургический завод, Чер. МК - Череповецкий металлургический комбинат, Самар. МЗ - Самарский металлургический завод, Аша -Ашинский металлургический завод, Мариуп. - Мариупольский металлургический завод, Азовсталь - комбинат "Азовсталь", Запорожье - завод "Запорожсталь", Ижора - Ижорский завод.

Таблица 2

Техническая характеристика непрерывных листовых станов горячей прокатки

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Размеры, мм и масса, т заготовки	Размеры проката, мм	Расстояние до предыдущего технологического агрегата, мм	Скорость прокатки, м/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Допустимый момент прокатки, МН*м	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода							
НППС 2000 Череповецкий МК (III поколение)	ВОК	Э	1200	-	650	Инд	630	365	кач.	23,0	230..300 x 930..1850 x 4500..10500 (до 36 т)	1,2..16 x 900..1850 (углеродистые стали)	31800	1,0	6	1,2	1, 4, 6
	1	К	1400	-	2000	Гр	5000	375	ПДЖТ	23,3			18200	1,25	24	4,8	
	2	Э	1000	-	470	Гр	640		кач.				22000	1,5	2,6		
		К	1180	1600	2000	Гр	5000	375	ПДЖТ	15,4					33	4,3	
	3	Э	1000	-	470	Гр	640		кач.				29300	0,5..1,75	2,6		
		К	1180	1600	2000	Гр	6300	0-110-240	ПДЖТ	3,4					33	4,3	
	4	Э	1000	-	470	Гр	640		кач.				11000	1,0..3,5	2,6		
		К	1180	1600	2000	Гр	6300	0-110-240	ПДЖТ	3,4					33	4,3	
	5	Э	1000	-	470	Гр	640		кач.				11000	2,0..5,0	2,6		
		К	1180	1600	2000	Гр	2x6300	0-55-140	ПДЖТ	1,0					33	4,3	
	ОК	Д	500	-	2000	Гр	95	0-220-440	кач.	5,7			132000	max 21,0 (30,0)			
	6,7	К	800	1600	2000	Гр	2x6000	0-55-140	ПДЖТ	1,0			6000		32	2,3	
	8,9	К	800	1600	2000	Гр	2x6300	0-110-220	ПДЖТ	1,0					32	2,3	
	10,1	К	800	1600	2000	Гр	2x6300	0-190-380	ПДЖТ	1,0					32	2,3	
	12, (13)	К	800	1600	2000	Гр	2x4800	0-250-600	ПДЖТ	1,0					32	2,3	
моталки		850*	3 шт. для смотки тонких полос								97500	шаг установки 9000 мм					
моталки		850*	2 шт. для смотки толстых полос								135000	шаг установки 9000 мм					

Продолжение табл.2

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Размеры, мм и масса, т заготовки	Размеры проката, мм	Расстояние до предыдущего технологического агрегата, мм	Скорость прокатки, м/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Допустимый момент прокатки, МН*м	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода							
НППС 2000 Новолипецкий МЗ (II поколение)	ВОК	Э	1200	-	800	Инд	630	360	кач.	23,0	150..300 x 930..1850 x 4500..10500 (до 36 т)	1,2..16 x 900..1850 (углеродистые стали)	35300	1,0			1, 6
	1	К	1200	-	2000	Гр	5000	100	ПДЖТ	5,0			18200	1,25			
	2	Э	900	-	420	Инд	420	0-500-700	кач.				19050	1,54			
		К	1200	1600	2000	Гр	5000	100	ПДЖТ	4,1							
	3	Э	900	-	420	Инд	420	0-500-700	кач.				29300	2,0			
		К	1200	1600	2000	Гр	10000	150	ПДЖТ	4,7							
	4	Э	900	-	420	Инд	420	0-500-700	кач.				41300	2,5			
		К	1200	1600	2000	Гр	10000	150	ПДЖТ	3,8							
	5	Э	900	-	420	Инд	420	0-500-700	кач.				65300	3,2			
		К	1200	1600	2000	Гр	10000	150	ПДЖТ	2,9							
	ОК	Д	800	-	2000	Гр	520	0-110-220	кач.				119450	max 20,0			
	6,7	К	800	1600	2000	Гр	2x5700	0-50-100	ПДЖТ	1,0			6000				
	8,9	К	800	1600	2000	Гр	2x5700	0-50-100	ПДЖТ	1,0							
	10,1	К	800	1600	2000	Гр	2x5700	0-175-350	ПДЖТ	1,0							
	12	К	800	1600	2000	Гр	2x4200	0-250-475	ПДЖТ	1,0							
моталки		850*	3 шт. для смотки тонких полос										206700	шаг установки 9000 мм			
моталки		850*	2 шт. для смотки толстых полос										105400	шаг установки 9000 мм			

Продолжение табл. 2

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Размеры, мм и масса, т заготовки	Размеры проката, мм	Расстояние до предыдущего технологического агрегата, мм	Скорость прокатки, м/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Допустимый момент прокатки, МН*м	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода							
НШПС 1700 Карагандинский МК (II поколение)	ВОК	Э	1000	-	700	Инд	400	360	кач.	23,0	165..240 x 730..1550 x 3700..9500 (до 23 т)	1,2..12 x 700..1550 (углеродистые стали)	35300	1,0			1, 6, 14
	ОК	Д	1150	-	1700	Гр	4200	375		22,6							
	1	К	1000	1400	1700	Гр	4200	375	ПДЖТ	19,6				1,0			
	2	Э	800	-	250	Инд	200	500-1000	кач.					1,68			
		К	950	1400	1700	Гр	4600	428	ПДЖТ	12,7							
	3	Э	800	-	250	Инд	200	500-1000	кач.					2,1			
		К	950	1400	1700	Гр	4600	428	ПДЖТ	10,1							
	4	Э	800	-	250	Инд	200	500-1000	кач.					2,66			
		К	950	1400	1700	Гр	4600	428	ПДЖТ	8,0							
	5	Э	800	-	250	Инд	200	500-1000	кач.					3,14			
		К	950	1400	1700	Гр	4600	428	ПДЖТ	6,8							
	ОК	Д	600	-	1700	Гр	140	610	кач.				195500				
	6	К	700	1400	1700	Гр	2x3150	0-37,5-95	ПДЖТ	3,0			104680				
	7	К	700	1400	1700	Гр	2x3600	0-58-150	ПДЖТ	1,2			6000				
	8	К	700	1400	1700	Гр	2x3600	0-85-190	ПДЖТ	1,0							
	9	К	700	1400	1700	Гр	2x3600	0-118-270	ПДЖТ	1,0							
	10	К	700	1400	1700	Гр	2x3600	0-150-330	ПДЖТ	1,0							
	11	К	700	1400	1700	Гр	2x3600	0-200-400	ПДЖТ	1,0							
	12	К	700	1400	1700	Гр	2x3600	0-200-500	ПДЖТ	1,0							
	масталки	850*	3 штуки											149880	max 18,0	шаг установки 9000 мм	

Продолжение табл.2

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Размеры, мм и масса, т заготовки	Размеры проката, мм	Расстояние до предыдущего технологического агрегата, мм	Скорость прокатки, м/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Допустимый момент прокатки, МН*м	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода							
НШПС 2500 Магнитогорский МК (I поколение)	ОК	Д	900	-	2000	Гр	600	500			106..172 x 1250..1740 x 2300..5500 (до 10 т)	2..10 x 1250..2300 (углеродистые стали)	25600	1,0			6, 13
	1	К	1100	1400	3200	Гр	4000	428		24,6				1,0			
	2	Э	600	-	300	Гр	300	500-1000						1,7			
		К	900	1500	2500	Гр	4000	428		11,9				1,7			
	3	Э	600	-	300	Гр	300	500-1000						2,4			
		К	900	1500	2500	Гр	4000	428		8,4				2,4			
	4	Э	600	-	300	Гр	300	500-1000						2,4			
		К	900	1500	2500	Гр	4000	428		8,4			74420	2,4			
	ОК	Д	700	-	2500	Гр	100..400	250-1000					53775	0,6..2,4			
	5	К	700	1500	2500	Гр	4200	150		4,5			6000	1,2			
	6	К	700	1500	2500	Гр	4200	150		3,0				1,8			
	7	К	700	1500	2500	Гр	4200	100		1,2				3,0			
	8	К	700	1500	2500	Гр	4200	0-100-200		1,0				3,5..7,0			
	9	К	700	1500	2500	Гр	4200	0-150-300		1,0				4,5..9,0			
10	К	700	1500	2500	Гр	4200	0-150-300		1,0	5,25..10,5							
моталки		850*	3 штуки									111700	шаг установки 9000 мм				
ПНШПС (2300) 1700 Чалаб МЗ	ОК	Д	600	-	1700						легир. стали	2..8 x до 1250	162020				6
	3..8	К	700	1400	1700								6000	max 10,0			
	моталки		850*	3 штуки									93000	шаг установки 9000 мм			

Продолжение табл. 2

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Размеры, мм и масса, т заготовки	Размеры проката, мм	Расстояние до предыдущего технологического агрегата, мм	Скорость прокатки, м/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Допустимый момент прокатки, МН*м	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения ротора эл. дв., об/мин	тип подшипников валков	передаточное число привода							
ПНППС (2800) 1700 Череповецкий МК	ОК	Д	600	-	1700						углеродистые и легированные стали	2..8 x 900..1500	119010				
	3	К	665	1250	1700								6000	1,5..1,7			
	4	К	665	1250	1700									2,1..2,7			
	5	К	665	1250	1700									3,0..4,4			
	6	К	665	1250	1700									4,0..5,9			
	7	К	665	1250	1700									4,5..7,4			
	8	К	665	1250	1700									5,0..8,5			
	моталки		850*	2 штуки									98900	шаг установки 9000 мм			
ПНППС 2800 Самарский МЗ	3	К	650	1500	2800	Гр	4200		ПДЖТ		Al сплавы	3..6 x 1000..2500	6000		30,0		
	4	К	650	1500	2800	Гр	4200		ПДЖТ						30,0		
	5	К	650	1500	2800	Гр	4200		ПДЖТ						30,0		
	6	К	650	1500	2800	Гр	2500		ПДЖТ	1,0					30,0		
	7	К	650	1500	2800	Гр	2500		ПДЖТ	1,0					30,0		
	моталки		850*	2 штуки											max 6,0	30,0	
														шаг установки мм			

Таблица 3

Техническая характеристика одноклетьевых листовых станов холодной прокатки

Тип стана	Тип рабочих клетей		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Характеристика заготовок и готового проката			Скорость нажимного механизма, мм/сек	Допустимое усилие (монт) прокатки, МН(*мм)	Обрабатываемые сплавы	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения вала эл/дв, об/мин (скорость прок., м/с)	тип подшипников валков	передаточное число привода	толщина и ширина заготовки, мм	вид и масса заготовки	толщина готового проката, мм				
160	реверсивная	20	8..10	20/ 35/ 60*	160	Гр	42	(до 2,5 м/с)	кач.		0,2 х 70..130	х/к рулон	0,005	-	0,1 / -	трудно дефор. сплавы	16
1000 Кир. ОЦМ	реверсивная	Д	600	-	1000	Гр	1100	0-300-600	ГДЖТ	-	6..12 х 950..2000	г/к лист	0,3..6,0	0,5.. 5,0		Сu, Ni сплавы	2
1200	реверсивная	К	500	1300	1200	Гр	6100	(до 15,0 м/с)	кач.	1,0	2..4 х 500..1050	г/к лист	0,2..2,5				6
1200 всмпо, виз	реверсивная	20	55.. 120	160/ 225/ 360*	1200	Гр	2 х 2400		кач.	0,5							
1200	реверсивная	20	55	100/ 175/ 300*	1200	Гр	2 х 1050	0-190-415 (до 7,5 м/с)	кач.	0,5		х/к рулон до 15т				трансф. сталь	1, 7
1400	реверсивная	К	250	1320	1400	Гр	8100		кач.	1,0							6

Продолжение табл. 3

Тип стана	Тип рабочих клеток		Размеры валков			Техническая характеристика главного привода					Характеристика заготовок и готового проката			Скорость нажимного механизма, мм/сек	Допустимое усилие прокатки, МН	Обрабатываемые сплавы	Литературный источник
	наименование	тип	диаметр рабочего валка, мм	диаметр опорного валка, мм	длина бочки, мм	тип привода	мощность каждого двигателя, кВт	частота вращения вала эл/дв, об/мин (скорость прок., м/с)	тип подшипников валков	передаточное число привода	толщина и ширина заготовки, мм	вид и масса заготовки	толщина готового проката, мм				
1600 Мих. ОЦМ	неревверсивная	К	280	800	1600	Гр	2 х 800	0-500-1400 (10..25 м/с)	кач.	-	0,26 х 500..1000	х/к рулон до 8 т	до 0,007	-	5,88	Al сплавы	2
2000 ВСМПО	реверсивная	К	500	1300	2000	Гр	4000	0-145-320	кач.	1,0							
1700	дрессировочная	К	600	1500	1700	Инд.	2 х 1000	(до 25 м/с)	кач.	1,0	0,4..2,0 х 700..1550	х/к рулон до 45т			25/ -	углер. стали	7
2000	дрессировочная	К	600	1600	2000	Инд.	2 х 1000	(15..25 м/с)	кач.	1,0					15/ -	углер. стали	1
2300 Самар МЗ	неревверсивная	К	560	1550	2300	Гр	1100	0-300-600	ПЖТ	-	до 4 х 700..2100	г/к лист	до 0,15	-	25/ -	Al сплавы	2

Сокращения принятые в таблице:

Тип клеток: Э - эджерная, Д - двухвалковая (ДУО), Т - трехвалковая (ТРИО), К - четырехвалковая (КВАРТО).

Тип привода: Гр - групповой привод валков клетки, Инд. - Индивидуальный привод валков клетки.

Тип подшипников: скол - скольжения, кач. - качения, ПЖТ - подшипники жидкостного трения.

Наименование предприятий: НЛМЗ - Новолипецкий металлургический завод, Амурсталь - завод "Амурсталь", Кир. ОЦМ - Кировский завод по обработке цветных металлов, ВСМПО - Верхне-Салдинское металлургическое производственное объединение, СамарМЗ - Самарский металлургический завод

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРОЕКТА ПО МОДУЛЮ

2.1 Описание технологического процесса

Выполнение данного раздела основывается на широком использовании литературных источников, содержащих описание технологических линий прокатного производства (см. табл. 1 и 2). Допускается также применение для составления данного раздела технологических инструкций и другой технической документации на производство прокатной продукции в условиях конкретных прокатных станов.

В данном разделе должны быть освещены следующие вопросы:

- ◆ назначение стана;
- ◆ характеристика исходной заготовки;
- ◆ характеристика готовой продукции;
- ◆ последовательность и режимы осуществления основных технологических операций;
- ◆ техническая характеристика основного оборудования стана;
- ◆ схема расположения оборудования стана.

2.2. Расчет схемы обжатий

Расчет схемы обжатий выполняют в зависимости от типа прокатного стана.

Для толстолистого стана, при отсутствии уширительных проходов, толщину полосы после каждого i -го прохода определяют либо из условия равномерной вытяжки по проходам, либо из условия равномерного абсолютного обжатия (при большой толщине заготовки). Для реверсивных листовых станов холодной прокатки листов принимается только схема равномерной вытяжки по проходам (число проходов не более 5 ... 7, редко 9).

В случае равномерности вытяжки металла в каждом проходе, методика расчета схемы обжатий следующая.

Находят общую вытяжку полосы за n проходов, считая уширение полосы незначительным:

$$\lambda = \frac{h_0}{h_n}.$$

Далее вычисляют среднюю вытяжку за проход:

$$\lambda_{cp} = \sqrt[n]{\lambda}.$$

Толщину полосы после каждого i -го прохода (за исключением последнего) определяют по следующей формуле:

$$h_i = \frac{h_{i-1}}{\lambda_{cp}}, \text{ мм.}$$

В случае, если принимается схема равномерных абсолютных обжатий, вычисляют среднее обжатие за проход:

$$\Delta h_{cp} = \frac{h_0 - h}{n}, \text{ мм.}$$

А толщину полосы после каждого i -го прохода (за исключением последнего) определяют по следующей формуле:

$$h_i = h_{i-1} - \Delta h_{cp}, \text{ мм.}$$

Расчет схемы обжатий в черновых группах клеток непрерывных и полунепрерывных полосовых станов горячей прокатки листа аналогичен рассмотренному выше расчету для толстолистовых станов.

В непрерывных группах клеток станов горячей прокатки листа толщину полосы после каждой i -й клетки определяют, исходя из условия равномерной (или заранее заданной) загрузки электродвигателей главного привода клеток по формуле И.Имаи:

$$h_i = \frac{h_0 \cdot h_n}{\left[\beta_i \cdot h_0 + (1 - \beta_i) \cdot h_n \right]^{\frac{1}{m}}}, \text{ мм,}$$

где β_i – коэффициент загрузки клетки, определяемый как отношение суммы потребляемой на прокатку мощности N_j , в клетях от первой ($j = 1$) до рассматриваемой ($j = i$), к общей мощности прокатки, расходуемой всеми клетями чистовой группы:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^i N_j}{\sum_{j=1}^n N_j}$$

(мощность N_j выражается в процентах или долях единицы, за 100% или за 1,0 принимается мощность первой клетки);

m – коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$m = 0.30 + \frac{0.21}{h_n}$$

При расчете режима обжатий в непрерывных группах клеток обычно принимают, что мощность расходуемая на прокатку в каждой клетке чистовой группы одинакова, за исключением двух-трех последних клеток, где для получения полосы точных размеров ее постепенно уменьшают на 20..40 % относительно мощности первой клетки.

2.3 Расчет геометрических и деформационных параметров очага деформации

Расчет параметров очага деформации ведут последовательно по каждому проходу. Методику расчета и его результаты для 1-го прохода (или 1-й клетки) приводят в тексте курсовой работы, а результаты расчета по всем остальным проходам (клетям) в итоговой таблице, образец которой приведен в приложении 3.

Первым расчетным параметром для каждого i -го прохода (i -й клетки) является абсолютное обжатие в данном проходе:

$$\Delta h_i = h_{i-1} - h_i, \text{ мм}.$$

Далее находят относительное обжатие полосы по толщине в i -м проходе (i -й клетки):

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h_{i-1}}.$$

После этого вычисляют среднюю высоту очага деформации в i -м проходе (i -й клетки):

$$h_{ср i} = \frac{h_i + h_{i-1}}{2}, \text{ мм}.$$

Определяют угол захвата полосы валками в i -м проходе (i -й клетки):

$$\alpha_i = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h_i}{D_p} \right).$$

где D_p – диаметр рабочего вала, мм.

Далее находят коэффициенты трения металла по валку в очаге деформации в момент захвата $\mu_{3 i}$ и при установившемся режиме прокатки $\mu_{y i}$ с учетом условий деформирования для каждого i -го прохода или i -й клетки. Методика определения коэффициента трения различна для случаев горячей и холодной прокатки.

Для случая горячей прокатки коэффициенты трения вычисляют по следующим формулам Б.П. Бахтинова:

$$\mu_{3 i} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1.05 - 0.0005 \cdot t_i),$$

$$\mu_{y i} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (0.55 - 0.00024 \cdot t_i) ,$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий состояние поверхности и материал валков;

k_2 – коэффициент, учитывающий скорость прокатки;

k_3 – коэффициент, учитывающий химический состав прокатываемого металла;

t_i – температура металла в i -м проходе (i -й клетки), град С.

Для 1-го прохода или 1-й клетки температура металла принимается равной температуре исходного нагрева, приведенной в исходных данных, для остальных проходов (клетей) температура металла определяется по методике приведенной в подразделе. 2.6 «Расчет температурного режима прокатки».

Значение коэффициента k_1 рекомендуется принимать следующим в зависимости от материала валка и способа обработки его рабочей поверхности:

$k_1 = 0,9$ - при прокатке металла в чугунных закаленных валках со шлифованной поверхностью;

$k_1 = 1,0$ - при прокатке металла в чугунных валках с точеной поверхностью;

$k_1 = 1,1..1,2$ - при прокатке металла в стальных валках со шлифованной или точеной поверхностью;

$k_1 = 1,3..1,6$ – при прокатке металла в стальных валках с закругленной поверхностью (насечка, накатка, наплавка).

Значение коэффициента k_2 рекомендуется принимать следующим в зависимости от скорости прокатки:

$k_2 = 1,0$ - при скорости прокатки 0..1 м/с;

$k_2 = 1,0..0,9$ - при скорости прокатки 1..2 м/с;

$k_2 = 0,9..0,75$ - при скорости прокатки 2..2,5 м/с;

$k_2 = 0,75..0,65$ - при скорости прокатки 2,5..3 м/с;

$k_2 = 0,65..0,55$ - при скорости прокатки 3..4 м/с;

$k_2 = 0,55..0,5$ - при скорости прокатки 4..5 м/с;

$k_2 = 0,5$ - при скорости прокатки более 5 м/с.

Значение коэффициента k_3 рекомендуется принимать следующим в зависимости от типа прокатываемого металла:

$k_3 = 1,0$ – для углеродистых сталей;

$k_3 = 1,1$ – для ледебуритных сталей;

$k_3 = 1,3$ – для перлитно-мартенситных сталей;

$k_3 = 1,4$ – для аустенитных сталей;

$k_3 = 1,47$ – для аустенитных сталей с включениями феррита и ледебурита ;

$k_3 = 1,55$ – для ферритных сталей;

$k_3 = 1,0$ – для аустенитных сталей с включением карбидов;

$k_3 = 0,9$ – для сплавов на основе меди;

$k_3 = 1,5$ – для алюминиевых и титановых сплавов.

Окружная скорость валков или скорость прокатки в установившемся режиме для реверсивных станов для всех проходов будет одинакова и вычисляется на основании параметров главного привода:

$$V = \frac{\pi \cdot n_y \cdot D_p}{60 \cdot 1000 \cdot i_{np}}, \text{ м/сек },$$

где, n_{yi} – частота вращения ротора электродвигателя главного привода клетки в установившемся режиме, об/мин;

i_{np} – передаточное число главного привода клетки.

Для непрерывных станов скорость прокатки в первой клетки задана в исходных данных, для остальных проходов (клетей) скорость прокатки определяется по методике приведенной в подразделе. 2.4 «Расчет скоростного режима прокатки».

Для случая холодной прокатки условие захвата полосы валками в начальный момент, как правило, не является ограничительным фактором, следовательно, не требуется проверка условия начального захвата и расчет коэффициента трения при захвате. Коэффициент трения в установившемся режиме для условий холодной прокатки находят по методике А.П. Грудева с учетом скорости прокатки, состояния поверхности валка и условий смазки:

$$\mu_{yi} = k_n \cdot k_c \cdot \left[0,07 - \frac{0,1 \cdot (V_i)^2}{2 \cdot (1 + V_i) + 3 \cdot (V_i)^2} \right],$$

где k_n – коэффициент, учитывающий качество обработки поверхности валков;

k_c – коэффициент, учитывающий условия смазки в очаге деформации.

Значение коэффициента k_n рекомендуется принимать следующим в зависимости от качества обработки поверхности валков:

$k_n = 1,5$ – для валков с обточенной поверхностью;

$k_n = 1,0$ – для валков со шлифованной поверхностью;

$k_n = 0,8$ – для валков с полированной поверхностью.

Значение коэффициента k_c рекомендуется принимать следующим в зависимости от условий смазки в очаге деформации:

$k_c = 1,55$ – при прокатке на сухих чистых валках;

$k_c = 1,0$ – при прокатке с использованием эмульсии, воды, керосина;

$k_c = 1,35$ – при прокатке с использованием машинных масел;

$k_c = 1,25$ – при прокатке с использованием веретенного масла;

$k_c = 0,9$ – при прокатке с использованием растительных масел (хлопкового, пальмового, касторового).

Далее определяем углы трения при захвате β_{3i} и в установившемся режиме β_{yi} для каждого i -го прохода или i -й клетки:

$$\beta_{3i} = \arctg(\mu_{3i}),$$

Для условий холодной прокатки определяется только угол трения в установившемся режиме:

$$\beta_{y i} = \arctg \cdot (\mu_{y i}) ,$$

Следующим шагом является проверка условий захвата полосы валками: для начального момента прокатки (только при горячей прокатке):

$$\beta_{z i} \geq \alpha_i ,$$

для установившегося процесса прокатки:

$$2 \cdot \beta_{y i} \geq \alpha_i .$$

В случае, если условия захвата полосы валками не выполняются, необходимо, либо изменить условия трения в очаге деформации, за счет изменения качества обработки поверхности, материала валков и (или) условий смазки, либо скорректировать схему обжатий в сторону увеличения числа проходов и соответствующего снижения деформации в каждом проходе.

Далее находим нейтральный угол очага деформации и величину опережения металла. Для станов, осуществляющих прокатку металла без натяжения (толстолистовые станы, черновые группы клетей непрерывных и полунепрерывных полосовых станов, обжимные станы, реверсивные, последовательные и линейные группы клетей заготовочных и сортовых станов), нейтральный угол γ_i и опережение металла S_i рассчитывают по следующим соотношениям:

$$\gamma_i = \arcsin \left[\frac{\left(\sin(\alpha_i) \right)}{2} - \frac{1 - \cos(\alpha_i)}{2 \cdot \mu_{y i}} \right] ,$$

$$S_i = \left(1 - \cos(\gamma_i) \right) \cdot \left(\frac{D_p}{h_i} \cdot \cos(\gamma_i) - 1 \right) .$$

В целом натяжение является фактором, стабилизирующим процесс прокатки, но при этом происходит смещение нейтрального сечения очага деформации. Для станов, на которых прокатка производится с использованием натяжения полосы (непрерывные группы клетей широкополосовых и полунепрерывных станов горячей прокатки, одно- и многоклетьевые станы холодной прокатки листа), нейтральный угол γ_i определяют по методике А.И. Целикова с учетом неравномерного распределения удельных давлений по дуге захвата и натяжения полосы:

$$\gamma_i = \arcsin \left[\frac{h_i}{\sqrt{\Delta h_i \cdot R}} \cdot \left(\frac{h_{Hi}}{h_i} - 1 \right) \right] ,$$

где R – радиус рабочего валка, мм;

h_{Hi} – толщина прокатываемой полосы в нейтральном сечении, мм.

Отношение h_{Hi} / h_i вычисляют по формуле:

$$\frac{h_{Hi}}{h_i} = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_{0i} \cdot \delta_i - 1) \cdot (\xi_{1i} \cdot \delta_i + 1) \cdot \left(\frac{h_{i-1}}{h_i}\right)^{\delta_i}}}{\xi_{1i} \cdot \delta_i + 1} \right]^{\frac{1}{\delta_i}},$$

где ξ_{0i} – коэффициент заднего удельного натяжения полосы;

ξ_{1i} – коэффициент переднего удельного натяжения полосы;

δ_i – параметр очага деформации, рассчитываемый по соотношению:

$$\delta_i = \frac{\mu_{yi}}{\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_i}{2} \right)}.$$

Коэффициенты ξ_{0i} и ξ_{1i} определяют, исходя из значений заднего σ_{0i} и переднего σ_{1i} удельного натяжения полосы при прокатке:

$$\xi_{0i} = 1 - \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{si}},$$

$$\xi_{1i} = 1 - \frac{\sigma_{1i}}{\sigma_{si}}.$$

Удельное натяжение σ_{0i} и σ_{1i} по межклетьевым промежуткам устанавливаются в зависимости от предела текучести прокатываемого металла σ_{si} с учетом термомеханических факторов: упрочнения, температуры и скорости деформации.

На станах горячей прокатки величина удельного межклетевого натяжения составляет (0,10..0,45) σ_{si} . Величина удельного натяжения возрастает по ходу прокатки, достигая наибольших значений в последних межклетевых промежутках (проходах). Более высокие значения натяжения принимаются при прокатке тонких и широких полос, а также при прокатке полос из высоколегированных сталей и труднодеформируемых сплавов.

На станах холодной прокатки величина удельного натяжения уменьшается по ходу прокатки и составляет (0,35..0,45) σ_{si} для первых межклетевых промежутков или проходов и (0,20..0,25) σ_{si} для последних, что обусловлено упрочнением металла.

Следующим этапом расчета является определение для каждого прохода или клетки длины очага деформации l_{di} , которую находят в зависимости от температуры прокатываемого металла. Для условий горячей прокатки ее находят только из геометрических соотношений:

$$l_{di} = \sqrt{R \cdot \Delta h_i} \quad , \text{ мм} ,$$

а для холодной прокатки методом последовательных итераций (приближений) с учетом сплющивания рабочего валка в контактной зоне:

$$l_{di} = \sqrt{R \cdot \Delta h_i + (x_{1i})^2} + x_{1i} \quad , \text{ мм} ,$$

где x_{1i} – длина очага деформации в направлении прокатки за осевой плоскостью валков, которая в свою очередь вычисляется из соотношения:

$$x_{1i} = 1.375 \cdot C \cdot R \cdot p_{cpi} \quad , \text{ мм} ,$$

где C – константа упругости рабочего валка, 1/МПа;

p_{cpi} – среднее контактное давление в очаге деформации в i -м проходе (i -й клетки), МПа.

Константа упругости рабочего валка зависит только от механических свойств материала валка и может быть рассчитана по формуле:

$$C = 8 \cdot \frac{1 - (\mu_B)^2}{\pi \cdot E_B} \quad , \text{ 1/МПа} ,$$

где μ_B – коэффициент Пуассона (поперечной деформации) рабочего валка;

E_B – модуль упругости рабочего валка.

Для стальных валков $E_B = 210\,000$ МПа, $\mu_B = 0,3$;

для чугунных валков $E_B = 100\,000$ МПа, $\mu_B = 0,25$;

для чугунных закаленных валков $E_B = 126\,000$ МПа, $\mu_B = 0,25$;

для твердосплавных валков $E_B = 651\,000$ МПа, $\mu_B = 0,3$.

Длину очага деформации в направлении прокатки за осевой плоскостью валков можно вычислить, если известна величина среднего контактного давления металла в очаге деформации, которая пока не определена. Поэтому расчет ведется итерационным методом:

1. В первом приближении считают, что упругое сплющивание валка пренебрежимо мало и, следовательно, $x_{1i} = 0$.
2. Далее, с учетом принятого допущения, определяют все оставшиеся деформационные и геометрические параметры, сопротивление металла деформации, контактное давление и усилие прокатки (подраздел 2.4).
3. Следующий шаг итерационного расчета начинают, приняв p_{cpi} равным среднему контактному давлению, полученному на предыдущем этапе расчета. Снова вычисляют деформационные и геометрические параметры, сопротивление металла деформации, контактное давление и усилие прокатки (подраздел 2.4).

4. Итерационный расчет заканчивают, если разница усилий прокатки, полученных в двух последовательных итерациях не превышает 5% :

$$\frac{P_k - P_{k-1}}{P_{k-1}} \cdot 100 \% \leq 5 \%$$

где P – усилие прокатки, МН;

k – номер итерации.

Если данное условие не выполняется, то расчет продолжают, приняв P_{cpi} равным среднему контактному давлению, полученному в ходе последней итерации, и повторяют пункты 2,3,4 методики расчета.

Далее, для каждого прохода или клетки станов горячей прокатки листа находят уширение металла при прокатке по формуле Б.П. Бахтинова:

$$\Delta b_i = 1,15 \cdot \left(l_{di} - \frac{\Delta h_i}{2 \cdot \mu_{yi}} \right) \cdot \frac{\varepsilon_i}{2}, \text{ мм}.$$

При холодной прокатке листов уширение полосы незначительно и им пренебрегают.

С учетом уширения, ширина полосы после каждого прохода или клетки составит:

$$b_i = b_{i-1} + \Delta b_i, \text{ мм}.$$

Средняя ширина очага деформации для каждого прохода или клетки:

$$b_{cpi} = \frac{b_{i-1} + b_i}{2}, \text{ мм}.$$

Площадь очага деформации или площадь контактной поверхности металла с валком в каждом проходе рассчитывают из соотношения:

$$F_i = l_{di} \cdot b_{cpi}, \text{ мм}^2.$$

Реальный коэффициент вытяжки полосы при прокатке для каждого прохода (клетки):

$$\lambda_i = \frac{h_{i-1} \cdot b_{i-1}}{h_i \cdot b_i}.$$

Длина полосы после каждого прохода (клетки):

$$l_i = \lambda_i \cdot l_{i-1}, \text{ мм}.$$

Средняя скорость деформации в каждом проходе (клетки) необходимо рассчитывать только для условий горячей прокатки:

$$u_{cpi} = \frac{V_i \cdot \varepsilon_i \cdot 10^3}{l_{di}}, \text{ 1/сек}.$$

По результатам данного подраздела необходимо сформулировать вывод о возможности или невозможности производства заданного вида прокатной продукции по условию захвата полосы валками.

2.4 Расчет контактных давлений и усилия прокатки

Усилие прокатки рассчитывается как произведение среднего нормального контактного давления на площадь контактной поверхности металла с валком:

$$P_i = p_{cpi} \cdot \frac{F_i}{10^6}, \text{ МН}.$$

Среднее нормальное контактное давление зависит от двух групп факторов:

1. факторы, определяющие механические свойства металла при пластической деформации (степень и скорость деформации, температура);
2. факторы, влияющие на характер напряженного состояния металла в очаге деформации (контактное трение, внешние зоны, ширина полосы, натяжение).

Совокупное влияние названных факторов выражается следующей формулой:

$$p_{cpi} = j_i \cdot n_{\sigma i} \cdot \sigma_{si}, \text{ МПа}.$$

где j_i – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние второго главного напряжения;

$n_{\sigma i}$ – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние других факторов;

σ_{si} – истинное сопротивление металла деформации, МПа.

Истинное сопротивление металла деформации в процессах обработки металлов давлением, в первую очередь, зависит от температурного интервала, в котором происходит деформация металла:

- холодная (теплая) деформация;
- горячая (неполная горячая) деформация.

В каждом из названных случаев истинное сопротивление металла деформации находят на основании экспериментальных данных, представленных в виде графиков или аппроксимирующих зависимостей с учетом конкретных условий прокатки.

Основным фактором, влияющим на изменение механических свойств металлов и сплавов в холодном состоянии, является суммарная степень обжатия. С увеличением степени деформации происходит упрочнение металла, обусловленное отсутствием процессов рекристаллизации и возврата в его структуре (рис. 1). Математическая зависимость, аппроксимирующая условный

предел текучести металла, в зависимости от накопленной степени деформации, представляется в следующем виде:

$$\sigma_{s\ i} = \sigma_{0.2} + g \cdot (\varepsilon_{\Sigma\ i})^n$$

где $\sigma_{0.2}$ – базовое сопротивление металла деформации в ненаклепанном (отожженном) состоянии, МПа;

g – модуль упрочнения, МПа;

n – степень упрочнения;

$\varepsilon_{\Sigma i}$ – накопленная степень деформации.

Значения коэффициентов для различных сталей и сплавов приведены в таблице 10. Накопленная степень деформации в каждом i -м проходе (i -й клетки) определяется с учетом линейного закона упрочнения металла по длине очага деформации (второе слагаемое) и накопленной степени деформации к началу данного прохода (первое слагаемое):

$$\varepsilon_{\Sigma\ i} = \left(\sum_{k=1}^{i-1} \varepsilon_k \right) + \frac{\varepsilon_i}{2}$$

В условиях горячей деформации истинное сопротивление металла деформированию находят с учетом совместного действия упрочняющих процессов, численно характеризуемых величинами степени и скорости деформации, и разупрочняющих процессов, интенсивность которых зависит от температуры. Наибольшее распространение получил метод термомеханических коэффициентов, разработанный В.И. Зюзиным. Согласно этому методу, расчетное значение сопротивления металла деформации в каждом i -м проходе (i -й клетки) определяют по формуле:

$$\sigma_{s\ i} = \sigma_0 \cdot k_{\varepsilon\ i} \cdot k_{ui} \cdot k_{ti} \quad , \text{ МПа } .$$

где σ_0 – базовое сопротивление металла деформации, при постоянных значениях термомеханических параметров (например, при $\varepsilon = 0,1$, $u = 10$ 1/с $t = 1000^\circ \text{C}$), МПа;

$k_{\varepsilon i}$ – деформационный коэффициент;

k_{ui} – скоростной коэффициент;

k_{ti} – температурный коэффициент.

Значения термомеханических коэффициентов находят, либо по графикам (см. рис. 2), либо на основании аппроксимирующих зависимостей:

$$k_{\varepsilon\ i} = A_1 \cdot (\varepsilon_i)^{m_1} \quad k_{ui} = A_2 \cdot (u_{spi})^{m_2} \quad k_{ti} = A_3 \cdot e^{-m_3 \cdot t_i}$$

где $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$ – коэффициенты аппроксимации.

Таблица 4

**Таблица коэффициентов уравнения регрессии, описывающего
механические свойства металлов при холодной деформации**

Сплав	$\sigma_{0,2}$ исх , МПа	σ , МПа	n	Сплав	$\sigma_{0,2}$ исх , МПа	σ , МПа	n
Конструкционные стали				20Х23Н18	353	166,8	0,46
Ст 1	255	13,0	0,73	ХН75МБТЮ	530	71,6	0,65
Ст2	294	30,0	0,62	ХН78Т	491	69,7	0,58
08кп	226	33,9	0,60	11Х11Н2В2МФ	589	39,2	0,64
10	294	28,9	0,64	12Х5МА	471	22,6	0,72
20	368	31,0	0,64	03Х12Н9М2С	687	3,7	1,10
40	343	82,0	0,48	Специальные стали			
45	343	85,0	0,48	1211 (Э11), 1212 (Э12)	368	33,4	0,63
50	392	98,1	0,47	1411 (Э11), 1412 (Э12)	392	109,9	0,38
85	491	144,2	0,43	1511 (Э41), 1512 (Э42)	491	47,1	0,62
09Г2	314	57,9	0,46	0Х20Н4АГ10 (НН3)	491	24,5	0,92
10Г2	343	43,2	0,59	0Х17Н5Г9АБ (ЭП 55)	589	57,9	0,69
12ГС	491	98,1	0,34	Х22Н5АГ9 (ЭП 20)	540	50,0	0,78
65Г	392	172,7	0,35	ЭИ 659	687	3,7	1,10
25ХГСА	373	55,9	0,57	ЭИ 712	387	35,3	0,62
30ХГСА	466	84,4	0,45	ЭИ 763	461	13,7	0,80
Инструментальные стали				ЭИ 846	324	53,0	0,74
У8А	383	17,7	0,84	ЭИ 852	324	190,3	0,26
У8ГА	392	111,8	0,44	Алюминиевые сплавы			
У9А	294	124,6	0,41	А00	18	2,7	0,74
У10	392	24,5	0,79	А1	59	6,3	0,62
У10А	392	62,8	0,60	АМц	49	5,9	0,71
У12	540	26,5	0,76	АМг1	98	12,8	0,59
У12А	608	7,5	1,03	АМг3	74	62,8	0,30
Р9	265	77,5	0,61	Д1	86	34,3	0,41
9ХФ	343	88,3	0,49	АСМ	39	15,7	0,45
50ХФА	441	31,4	0,66	АМг5П	147	44,1	0,42
Высоколегированные стали				Медноцинковые сплавы (латуни)			
08Х13	319	70,6	0,45	М0	74	54,9	0,41
20Х13Н4Г9	334	17,7	0,84	Л90	226	28,4	0,52
12Х21Н5Т	657	26,5	0,68	Л80	98	29,4	0,70
10Х14Г14Н3Т	334	32,4	0,78				
Х14Г14Н	294	91,2	0,62				
15Х17АГ14	441	35,3	0,86				
17Х18Н9	589	37,3	0,70				
12Х18Н9Т	402	23,5	0,91				
36Х18Н25С2	589	35,3	0,76				

Продолжение табл. 4

Сплав	$\sigma_{0,2}$ исх, МПа	σ , МПа	n	Сплав	$\sigma_{0,2}$ исх, МПа	σ , МПа	n
Л70	118	19,6	0,78	Титановые сплавы			
Л68	118	35,3	0,62	технич. Ti	491	65,7	0,36
Л62	147	30,4	0,65	Вт 1-1	412	51,0	0,48
Л59	172	28,4	0,64	Вт 1-2	432	41,2	0,54
ЛН65-5	280	43,2	0,53	Вт 6	981	10,8	0,76
ЛО62-1	196	74,6	0,43	От 4	628	23,5	0,68
ЛО60-1	196	14,7	0,85	ИМП-7	819	11,8	0,86
ЛС63-3	172	18,6	0,73	ИМП-1А	613	39,2	0,61
ЛС60-1	147	54,9	0,51	Другие сплавы			
ЛС59-1	172	68,7	0,37	Ni	147	134,4	0,38
Бронзы и мельхиоры				п/фабрикатный МОНЕЛЬ			
БрБ2	392	30,4	0,75	НМЖМц28-2,5- 1,5	196	111,8	0,41
БрМц5	88	59,8	0,46	Тантал	564	49,1	0,54
Мельхиор	128	91,2	0,34				

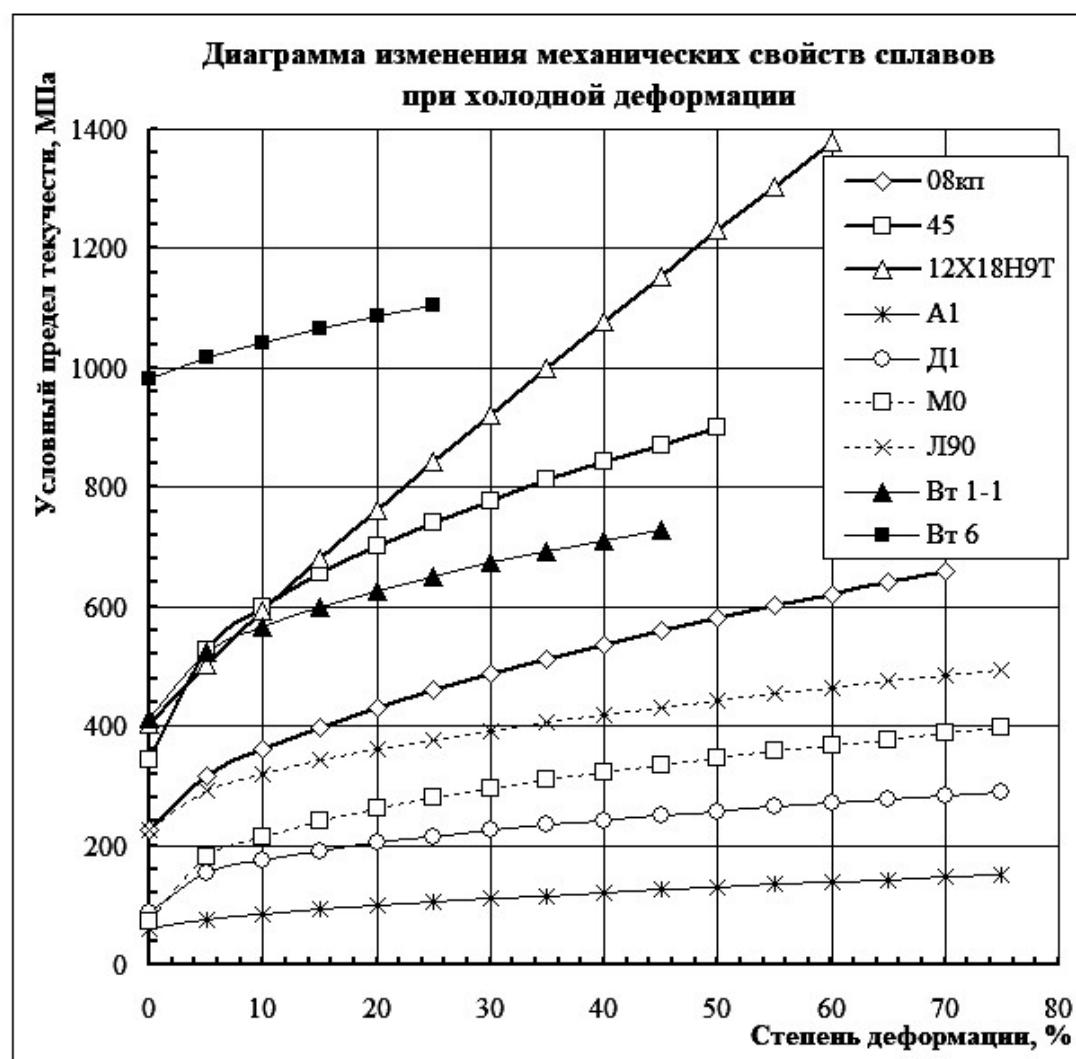
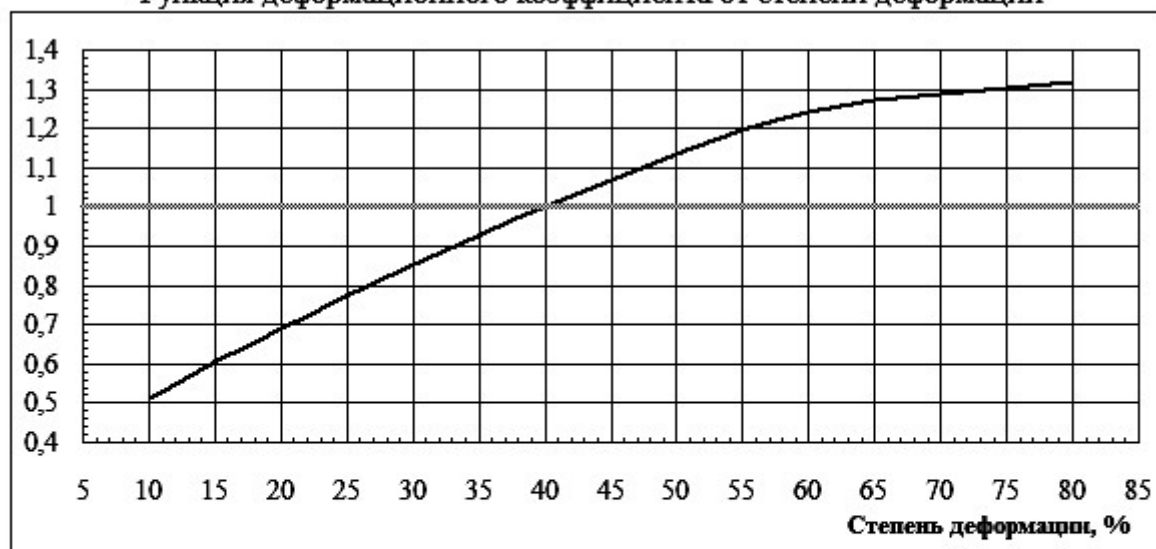


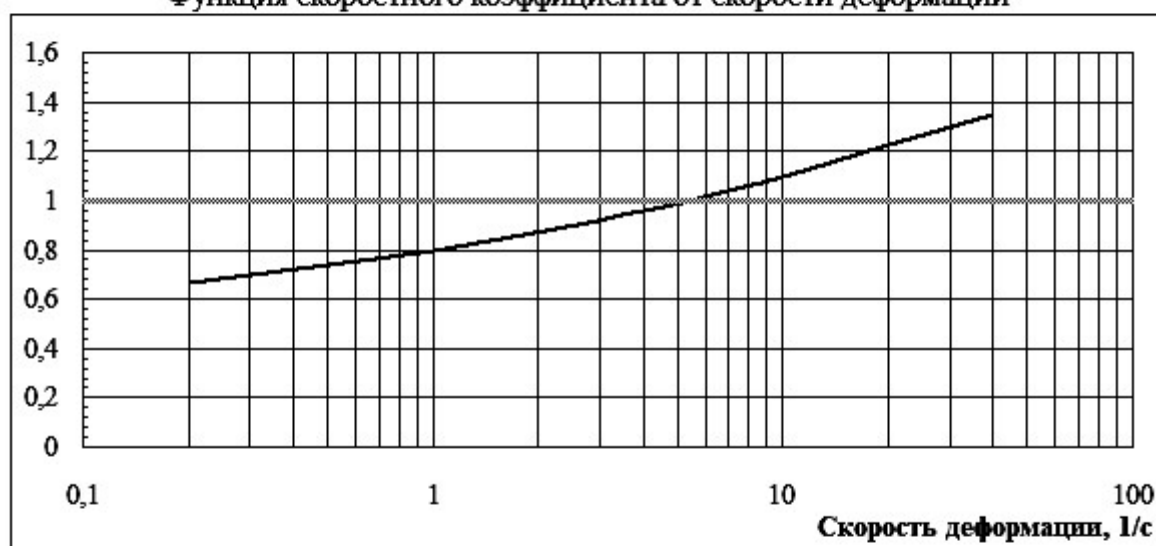
Рис. 1

Графики термомеханических коэффициентов для латуни Л70

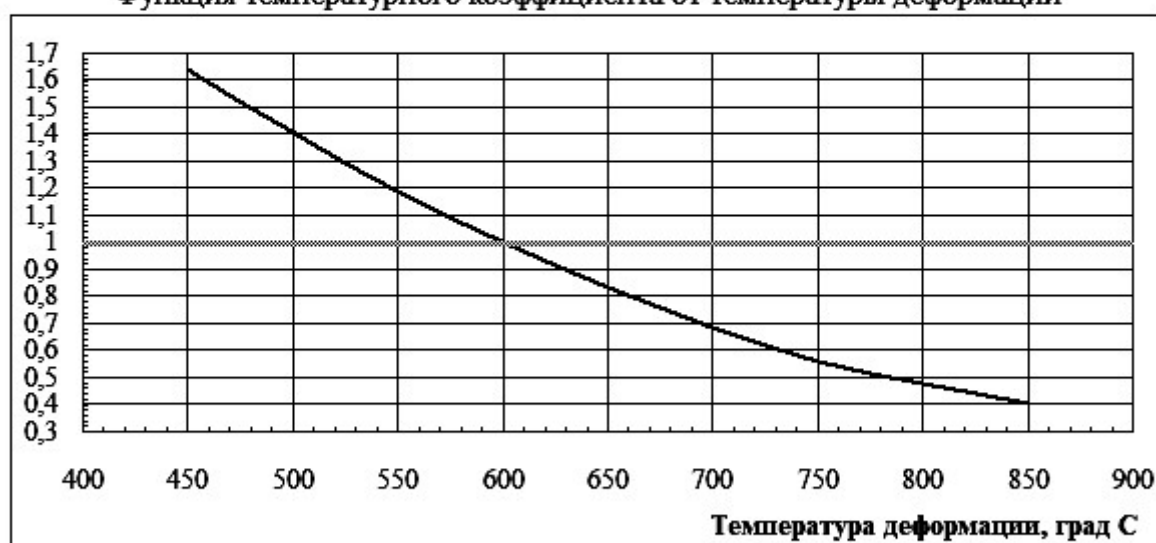
Функция деформационного коэффициента от степени деформации



Функция скоростного коэффициента от скорости деформации



Функция температурного коэффициента от температуры деформации



Базовое сопротивление деформации $\sigma_0 = 107,9$ МПа

Рис. 2

С учетом данных аппроксимирующих зависимостей формула для определения сопротивления металла горячей деформации принимает следующий вид:

$$\sigma_{si} = A \cdot \sigma_0 \cdot \frac{(\varepsilon_i)^{m_1} \cdot (u_{cpi})^{m_2}}{e^{m_3 \cdot t_i}}, \text{ МПа}.$$

Для титановых сплавов соотношение для определения сопротивления металла горячей деформации учитывает наличие максимума на кривой упрочнения и представляется одним из двух вариантов (А или В):

$$\sigma_{si} = \sigma_0 \cdot (\varepsilon_i)^{m_1} \cdot e^{m_2 \cdot \varepsilon_i} \cdot (u_{cpi})^{m_3} \cdot e^{m_4 \cdot t_i}, \text{ МПа} \quad (\text{А})$$

$$\sigma_{si} = \sigma_0 \cdot (\varepsilon_i)^{m_1} \cdot e^{m_2 \cdot \varepsilon_i} \cdot (u_{cpi})^{m_3} \cdot e^{m_4 \left(\frac{t_i}{1000} \right)^{-3}}, \text{ МПа} \quad (\text{В}).$$

Значения базового сопротивления металла деформации σ_0 и коэффициентов аппроксимации $A = A_1 \times A_2 \times A_3$, m_1 , m_2 , m_3 , m_4 для различных сталей и сплавов приведены в таблицах 5 и 6.

Коэффициенты напряженного состояния зависят от соотношений геометрических параметров очага деформации, условий трения и натяжения полос при прокатке.

Коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние второго главного напряжения j_i зависит от соотношения средней ширины к средней высоте очага деформации и принимает следующие значения:

для прокатки узких полос (трехмерная деформация):

$$j_i = 1 + \frac{\mu_{yi} \cdot b_{cpi}}{3 \cdot h_{cpi}}, \quad 0 < \frac{b_{cpi}}{h_{cpi}} \leq \frac{0.465}{\mu_{yi}},$$

для прокатки широких полос (плоская деформация):

$$j_i = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.155, \quad \frac{b_{cpi}}{h_{cpi}} \geq \frac{0.465}{\mu_{yi}}.$$

Коэффициент напряженного состояния $n_{\sigma i}$ учитывает целый ряд факторов, и его представляют произведением четырех коэффициентов:

$$n_{\sigma i} = n_{bi} \cdot n_{1\sigma i} \cdot n_{2\sigma i} \cdot n_{3\sigma i},$$

где n_{bi} – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий изменение влияния внешнего трения в связи с уширением полосы;

$n_{1\sigma i}$ – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние внешнего трения;

Таблица 5

**Таблица коэффициентов уравнения регрессии, описывающего
механические свойства металлов при горячей деформации**

Сплав	Коэффициенты регрессии					Условия получения коэффициентов регрессии		
	A	σ_0 , МПа	m_1	m_2	m_3	темпера- тура, град С	скорост ь дефор- мации, 1/сек	степень дефор- мации
Углеродистые стали								
Ст 3	8,569	84,4	0,2217	0,1453	0,0029	900-1200	0,1-100	0,05-0,5
Ст 6	9,968	90,3	0,2485	0,1535	0,0032	900-1200	0,1-100	0,05-0,5
08 кп	4,711	82,4	0,2258	0,1573	0,0024	700-1200	0,01-100	0,05-0,5
20	6,852	83,4	0,2337	0,1473	0,0028	900-1200	0,1-100	0,05-0,5
45	15,11	86,3	0,252	0,143	0,0025	800-1200	0,1-100	0,05-0,4
Легированные стали								
12ХН3А	23,00	98,1	0,252	0,143	0,0029	900-1200	0,1-100	0,05-0,4
40Х13	39,45	106,9	0,280	0,087	0,0033	900-1200	0,1-100	0,05-0,4
Х17Н2	62,95	109,9	0,280	0,087	0,0037	900-1200	0,1-100	0,05-0,4
12Х18Н9Т	26,64	119,7	0,280	0,087	0,0028	900-1200	0,1-100	0,05-0,4
ХН78Т	45,41	192,3	0,350	0,098	0,0032	900-1200	0,1-100	0,05-0,25
ХН75МБТЮ	49,55	217,8	0,350	0,098	0,0032	900-1200	0,1-100	0,05-0,25
ХН70Ю	50,00	260,9	0,350	0,098	0,0033	900-1200	0,1-100	0,05-0,25
Алюминиевые сплавы								
А00	3,54	35,3	0,219	0,0943	0,0047	300-500	0,5-60	0,05-0,5
АМц	1,64	47,1	0,215	0,090	0,0028	300-500	0,5-60	0,05-0,5
Д16	2,65	89,3	0,183	0,100	0,0039	300-450	0,5-60	0,05-0,5
АМг6	2,01	103,0	0,233	0,103	0,0035	300-450	0,5-60	0,05-0,5
Медные сплавы								
Медь М1	0,81	93,2	0,374	0,101	0,0022	450-950	0,2-40	0,1-0,8
Латунь Л70	1,12	107,9	0,483	0,133	0,0036	450-850	0,2-40	0,1-0,8

Таблица 6

**Таблица коэффициентов уравнений регрессии, описывающих
механические свойства титановых сплавов при горячей деформации**

Сплав	Коэффициенты регрессии					Условия получения			Тип фор- мулы
	σ_0 , МПа	m_1	m_2	m_3	m_4	t , град С	u , 1/сек	ε	
ВТ 1-0	5,97	0,2725	-0,5228	0,0756	1,700	800 - 1000	0,3 – 16,6	0,05 – 0,7	В
ОТ 4	12,1	0,0552	-0,0031	0,1307	1,501	850 - 1050	4,0 – 35,0	0,1 – 0,8	В
ВТ 3-1	18,2	0,1275	-0,5881	0,2103	1,701	850 - 1130	0,01 – 35,0	0,1 – 0,8	В
ВТ 5-1	6,5	0,3195	-0,8584	0,2131	3,034	800 – 1180	4,1 – 31,4	0,1 – 0,8	В
ВТ 6	98814	0,1444	-0,8223	0,1147	-0,0069	700 - 1100	0,01 – 100	0,05 – 0,6	А
ВТ 8	8864	0,1958	-0,6516	0,2326	-0,0044	850 - 1130	4,5 – 30,0	0,1 – 0,8	А
ВТ 9	26	0,1233	-0,3890	0,1805	1,440	850 - 1050	4,0 – 36,0	0,1 – 0,8	В
ВТ 14	34,7	0,1483	-0,5492	0,0565	1,240	800 - 1100	0,3 – 16,6	0,05 – 0,7	В
ВТ 20	27	0,3327	-0,9963	0,2340	1,639	750 - 1050	5,5 – 31,5	0,1 – 0,8	В
ВТ 22	7512	0,1683	-0,6501	0,2329	-0,004	750 - 1050	5,5 – 24,0	0,1 – 1,0	А
ТС 6	3112	0,0048	-0,2594	0,1137	-0,0028	900 - 1200	0,15 – 7,6	0,01- 0,7	А

$n_{2\sigma i}$ – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние внешних зон;

$n_{3\sigma i}$ – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние натяжения или подпора.

Коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий изменение влияния внешнего трения в связи с уширением полосы n_{bi} учитывают только при прокатке сравнительно узких полос. Критерием этого является отношение средней ширины полосы к длине очага деформации. Если $b_{cpi}/l_{di} > 5,0$, то $n_{bi} = 1,0$, если $b_{cpi}/l_{di} < 5,0$, то n_{bi} вычисляют следующим образом:

$$n_{bi} = \frac{1 + \frac{3 \cdot b_{cpi} - l_{di}}{6 \cdot b_{cpi}} \cdot \mu_{yi} \cdot \frac{l_{di}}{h_{cpi}}}{1 + \mu_{yi} \cdot \frac{l_{di}}{h_{cpi}}}$$

Коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние внешнего трения $n_{1\sigma i}$ учитывают только при прокатке сравнительно низких полос, характеризуемым отношением длины очага деформации к его средней высоте:

если $l_{di} / h_{cpi} < 1,0$, то $n_{1\sigma i} = 1,0$;

если $l_{di} / h_{cpi} > 1,0$, тогда:

$$n_{1\sigma i} = 1 + \frac{\mu_{yi}}{2} \cdot \frac{l_{di}}{h_{cpi}} .$$

Коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние внешних зон $n_{2\sigma i}$ учитывают только при прокатке высоких полос, характеризуемым отношением длины очага деформации к его средней высоте:

если $l_{di} / h_{cpi} > 1,0$, то $n_{2\sigma i} = 1,0$;

если $l_{di} / h_{cpi} < 1,0$, тогда:

$$n_{2\sigma i} = \left(\frac{l_{di}}{h_{cpi}} \right)^{-0.4} .$$

Коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации, учитывающий влияние натяжения или подпора, учитывают только для станов, прокатка полос на которых, производится с натяжением. При этом величина коэффициента напряженного состояния учитывает как переднее, так и заднее натяжение:

$$n_{3\sigma i} = \frac{\xi_{0i} + \xi_{1i}}{2} .$$

При отсутствии натяжения $n_{3\sigma i} = 1,0$.

Рассчитанное значение усилия прокатки необходимо сравнить с допускаемым усилием, указанным в технической характеристике рабочей клетки. При отсутствии числового значения данного параметра его можно определить, исходя из прочности валков.

Для двух- трехвалковых листовых станов ограничивающими факторами являются прочность валков в середине бочки рабочего валка или в месте перехода шейки валка в бочку. Допускаемое усилие прокатки, рассчитанное из условия прочности в середине бочки, пренебрегая напряжениями кручения вследствие их малости:

$$|P| = \frac{0.787 \cdot (D_p)^3 \cdot |\sigma| \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (L + l_s) - b_{cpi}} , \text{ МН} ,$$

где $|\sigma|$ – допускаемое эквивалентное напряжение материала валка, МПа;

L – длина бочки валка, мм;

l_s – длина шейки валка, мм.

Допускаемое усилие прокатки, рассчитанное из условия прочности в месте перехода шейки рабочего валка в бочку с учетом напряжений кручения и концентрации напряжений в ступенчатом переходе:

для стальных валков:

$$|P| = \frac{0.787 \cdot (d_p)^3 \cdot |\sigma| \cdot 10^{-6}}{\sqrt{(k_\sigma \cdot l_s)^2 + 0.75 \cdot (l_d \cdot \psi \cdot k_\tau)^2}}, \text{ МН},$$

для чугуновых валков:

$$|P| = \frac{(d_p)^3 \cdot |\sigma| \cdot 10^{-6}}{0.955 \cdot (k_\sigma \cdot l_s) + 0.796 \cdot \sqrt{(k_\sigma \cdot l_s)^2 + (l_d \cdot \psi \cdot k_\tau)^2}}, \text{ МН},$$

где d_p – диаметр шейки рабочего валка, мм;

k_σ , k_τ – эффективные коэффициенты концентрации напряжений в месте ступенчатого перехода шейки валка в бочку;

ψ – коэффициент плеча приложения равнодействующей усилия прокатки;

l_d – наибольшая длина очага деформации по проходам, мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений возрастают с увеличением перепада диаметров, уменьшением радиуса сопрягающей галтели, ростом прочностных свойств металла валка и составляют $k_\sigma = 1,35..2,65$, $k_\tau = 1,30..2,40$.

При расчете допускаемого усилия прокатки для клетки рекомендуется принимать коэффициент плеча приложения равнодействующей равным 0,45..0,5 для условий горячей прокатки, и 0,25..0,4 при холодной прокатке (меньшие значения относятся к прокатке более тонких полос).

Для четырехвалковых листовых станов практически полностью усилие прокатки воспринимается опорными валками, и ограничивающими факторами являются прочность валков в середине бочки опорного валка или в месте перехода шейки валка в бочку. Допускаемое усилие прокатки, рассчитанное из условия прочности в середине бочки:

$$|P| = \frac{0.787 \cdot (D_{on})^3 \cdot |\sigma| \cdot 10^{-6}}{L + 2 \cdot l_s}, \text{ МН},$$

где D_{on} – диаметр опорного валка, мм;

Допускаемое усилие прокатки, рассчитанное из условия прочности в месте перехода шейки опорного валка в бочку с учетом концентрации напряжений в ступенчатом переходе:

$$|P| = \frac{0.393 \cdot (d_{on})^3 \cdot |\sigma| \cdot 10^{-6}}{k_\sigma \cdot l_s}, \text{ МН}.$$

Для обжимных и сортовых станов равнодействующая усилия прокатки смещена относительно центра валка и поэтому шейки валка загружены неравномерно. Наиболее опасные напряжения будут возникать в шейке валка наиболее близко расположенной к рассматриваемому калибру. В этом случае, допускаемое усилие прокатки, рассчитанное из условия прочности в месте перехода шейки фасонного валка в бочку с учетом концентрации напряжений в ступенчатом переходе, будет составлять:

$$|P| = \frac{0.981 \cdot (d_p)^3 \cdot |\sigma| \cdot (L + l_s) \cdot 10^{-6}}{(L + l_s - c_p) \cdot c_p}, \text{ МН},$$

где c_p – расстояние от центра калибра до середины ближайшей подшипниковой опоры, мм.

Диаметры шеек валков принимают равными:

$d_p = (0,55..0,63) D_p$ – для обжимных и сортовых станов,

$d_p = (0,70..0,75) D_p$; $d_{on} = (0,60..0,80) D_{on}$ – для листовых станов.

Большие значения относятся к валкам установленным на подшипниках жидкостного трения.

Длина шейки валков принимается приблизительно равной диаметру шейки.

Значения допускаемых напряжений для различных материалов, из которых изготавливаются рабочие валки, приведены в таблице 7.

Для каждой рабочей клетки в качестве допускаемого усилия прокатки принимается наименьшее из рассчитанных значений в середине бочки и в месте перехода шейки валка в бочку.

По результатам данного подраздела необходимо сформулировать вывод о возможности или невозможности производства заданного вида прокатной продукции по условию отсутствия перегрузки рабочей клетки стана по усилию прокатки.

Таблица 7

Допускаемые напряжения материалов валков прокатных станов

Вид материала валков	Предел прочности, МПа	Допускаемое эквивалентное напряжение, МПа	Допускаемое напряжение кручения, МПа
1. Чугунные валки	350..400	70..80	56..64
2. Чугунные легированные валки	400..450	80..90	64..72
3. Стальные литые валки	500..600	100..120	58..70
4. Кованые валки из углеродистой стали	600..650	120..130	70..75
5. Кованые валки из легированной стали	700..750	140..150	81..87

* Допускаемые напряжения приведены исходя из пятикратного запаса прочности.

2.5 Расчет скоростного режима прокатки

Методики расчета скоростного режима прокатки существенно различаются для реверсивных, линейных, последовательных и непрерывных станов, поэтому они будут изложены друг за другом.

При выборе скоростного режима прокатки на реверсивных станах стремятся обеспечить минимальный ритм (цикл) прокатки, что обеспечит максимальную производительность.

Характер изменения скорости прокатки или частоты вращения валков определяется технической характеристикой привода и длиной прокатываемой полосы и может быть треугольным или трапецеидальным (рис. 3). В общем случае, при достаточной длине полосы, характер изменения скорости (частоты вращения валков) имеет трапецеидальную форму и включает следующие временные периоды (см. схему скоростного режима № III на рис. 3):

1. Повышение частоты вращения валков от нуля или скорости холостого хода n_{xx} до скорости захвата n_3 , при которой полосу задают в валки и начинают ее деформацию. Этот период называют разгоном главного привода без полосы и обозначают t_{p0} . Этот временной интервал не входит в машинное время прокатки и является частью паузы.
2. После захвата частоту вращения валков увеличивают до максимального значения n_y . Этот период называют разгоном главного привода с металлом и обозначают t_p .
3. Достигнув максимального значения скорости, прокатку ведут при частоте вращения валков равной n_y . Этот период называют прокаткой на установившейся скорости и обозначают $t_{уст i}$.
4. Следующий период характеризуется торможением (замедлением) скорости прокатки и частоты вращения валков до уровня n_B , при котором происходит выброс металла из валков клетки. Этот период называют прокаткой с торможением (замедлением) и обозначают t_T .
5. Последний период соответствует дальнейшему снижению частоты вращения валков от скорости выброса n_B до их полной остановки или скорости холостого хода n_{xx} . Этот период называют торможением (замедлением) стана без металла в валках и обозначают t_{T0} . Этот временной интервал не входит в машинное время прокатки и является частью паузы.

Паузы между проходами t_{ni} зависят от соотношения времени реверсирования электродвигателя стана t_{PEB} , времени срабатывания нажимного устройства t_{Hy} , времени на реверсирование раската рольгангами, кантовку раската и перемещение (установку) раската в поперечном направлении при помощи манипулятора t_{Kp} .

Частными случаями являются треугольные схемы изменения частоты вращения валков. В данных схемах отсутствует период прокатки на установившейся скорости.

**Диаграммы скоростей и крутящих моментов на валу
электродвигателя для реверсивных прокатных станов**
скоростная диаграмма

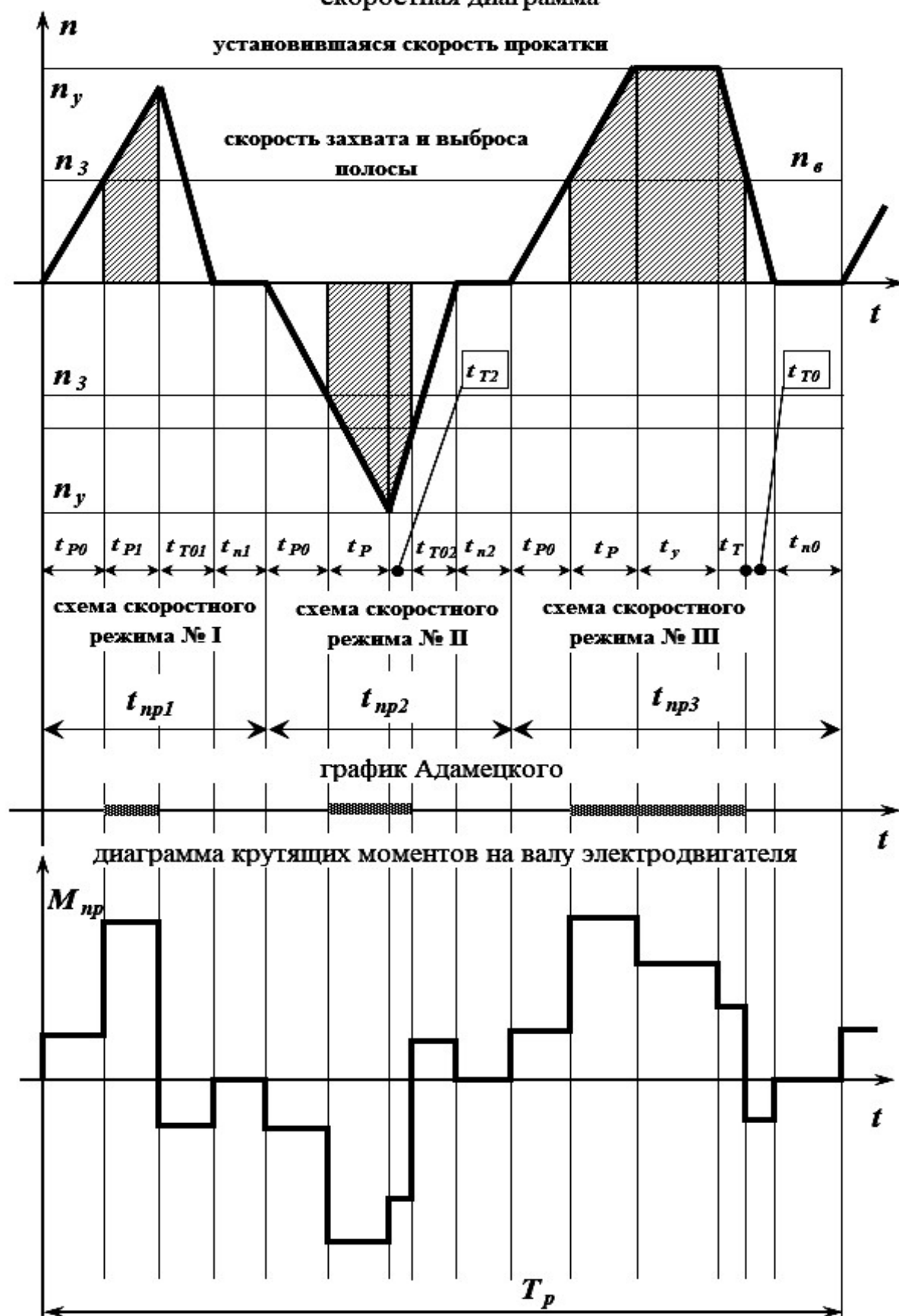


Рис. 3

При незначительной длине раската, что характерно для первых проходов, может возникать схема скоростного режима № I, состоящая только из трех характерных участков (рис. 3):

1. Разгон главного привода без полосы t_{p0} - повышение частоты вращения валков от нуля или скорости холостого хода n_{xx} до скорости захвата n_3 , при которой полосу задают в валки и начинают ее деформацию.
2. Разгон главного привода с металлом t_{p1} - повышение частоты вращения валков от скорости захвата n_3 до максимального значения n_{max} , которое ниже установившейся скорости n_y . В течение рассматриваемого временного интервала прокатывается вся полоса.
3. Торможение (замедление) стана без металла в валках t_{T01} - снижение частоты вращения валков от максимальной скорости n_{max} до их полной остановки или скорости холостого хода n_{xx} .

При увеличении длины раската в последующих проходах может возникать схема скоростного режима № II, состоящая из четырех характерных участков (рис. 3):

1. Разгон главного привода без полосы t_{p0} - повышение частоты вращения валков от нуля или скорости холостого хода n_{xx} до скорости захвата n_3 , при которой полосу задают в валки и начинают ее деформацию.
2. Разгон главного привода с металлом t_{p0} - повышение частоты вращения валков от скорости захвата n_3 до максимального значения равного установившейся скорости n_y .
3. Прокатка с торможением (замедлением) скорости прокатки и частоты вращения валков от максимального значения, равного установившейся скорости n_y , до уровня n_{B2} , при котором происходит выброс металла из валков клетки. Скорость выброса металла n_{B2} выше, чем в трапецеидальной схеме скоростного режима n_B .
4. Торможение (замедление) стана без металла в валках t_{T02} - снижение частоты вращения валков от скорости выброса n_{B2} до их полной остановки или скорости холостого хода n_{xx} .

Вначале определяют номер схемы скоростного режима (рис. 3) на основе сравнения общей длины полосы и частей длины полосы, которые прокатываются в периоды разгона и торможения по схеме № III. Длины частей полосы, которые можно прокатать за периоды разгона и торможения главного привода с металлом по схеме скоростного режима № III:

$$L_{Pi} = \frac{\pi \cdot D_P \cdot (1 + S_i)}{60 \cdot i_{np}} \cdot \frac{(n_3 + n_y)}{2} \cdot \frac{(n_y - n_3)}{a_P}, \text{ мм},$$

$$L_{Ti} = \frac{\pi \cdot D_P \cdot (1 + S_i)}{60 \cdot i_{np}} \cdot \frac{(n_B + n_y)}{2} \cdot \frac{(n_y - n_B)}{a_T}, \text{ мм},$$

где a_P , a_T – угловые ускорения главного привода прокатной клетки соответственно при разгоне и торможении, (об/мин)/с.

Величины угловых ускорений главного привода зависят от типа и режима работы стана. Ускорения стремятся принять наиболее высокими, так как это приводит к повышению производительности прокатного стана.

Для толстолистовых и обжимных прокатных станов значения угловых ускорений составляют:

при разгоне $a_P = 25..75$ (об/мин)/с;

при торможении $a_T = 40..95$ (об/мин)/с.

В работах В.А. Тягунова показано, что с точки зрения минимального нагрева электродвигателя (минимального среднеквадратичного момента) ускорения при разгоне и торможении должны быть одинаковы.

При предварительных расчетах частота вращения валков, при которой происходит выброс полосы n_B , обычно принимается равной частоте вращения валков, при которой происходит захват полосы n_3 , и составляет 30..70 % частоты вращения валка при установившемся процессе прокатки n_y . В свою очередь, частоту вращения валков в установившемся режиме находят, исходя из основной скорости электродвигателя привода валков (см. табл. 8) и передаточного числа привода.

Схема № I скоростного режима возникает, если длина полосы после прохода меньше длины полосы, которую можно прокатать за время разгона главного привода с металлом по схеме № III:

$$l_i < L_{Pi} \quad , \text{ мм} .$$

Схема № II скоростного режима возникает, если длина полосы после прохода больше длины части полосы, которую можно прокатать за время разгона главного привода с металлом по схеме № III, но меньше суммы длин частей полосы, которые можно прокатать за время разгона и торможения главного привода с металлом:

$$L_{Pi} < l_i < L_{Pi} + L_{Ti} \quad , \text{ мм} .$$

Схема № III скоростного режима возникает, если длина полосы после прохода больше суммы длин частей полосы, которые можно прокатать за время разгона и торможения главного привода с металлом:

$$l_i > L_{Pi} + L_{Ti} \quad , \text{ мм} .$$

В приведенных соотношениях необходимо также учитывать возможность одновременной прокатки двух или трех слитков. В этом случае, для получения полной длины полосы, длину одного раската необходимо умножить на число одновременно прокатываемых заготовок.

Далее рассчитывают длительность характерных участков скоростного режима прокатки. Длительность разгона главного привода без полосы является постоянной для всех проходов и вычисляется из соотношения:

$$t_{P0} = \frac{n_3 - n_{xx}}{a_P} \quad , \text{ сек} .$$

Таблица 8

Техническая характеристика электродвигателей прокатных станов

Тип электро- двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения ротора, об/мин	Номи- нальный крутящий момент, кН*м	Маховый момент якоря, кН*м ²	Допускае- мый коэф- фициент перегрузки
электродвигатели серии П					
П-26-140	10175	0-65-90	1490,7	4624,0	2,3
П-25-150	9100	0-68-70	1275,0	3432,4	2,3
П-24-160-9К	7250	0-65-90	1069,0	2942,1	2,3
электродвигатели серии ПБК					
ПБК-380/125	7400	0-60-90	1176,8	4462,2	2,3
ПБК-250/145	4600	0-70-120	627,8	1324,4	2,5
ПБК-215/65	2000	0-125-300	153,0	365,1	2,25
ПБК-180/95	1840	0-100-275	176,1	284,5	2,25
ПБК-120/70	1600	0-400-650	38,3	320,8	2,25
ПБК-180/65	1100	0-100-220	105,0	162,8	2,3
2ПБК-285/120	4560	0-80-180	559,2	1814,9	2
ПБК-215/55	3200	0-250-420	122,3	320,8	2,25
ПБК-250/160	3320	0-50-120	637,7	1510,7	2,5
ПБК-285/45	2100	0-90-180	223,7	819,1	2,5
ПБК-180/45	1200	0-200-500	57,4	137,3	2,25
электродвигатели серии МП					
2МП-7000-60	2x4800	0-60-100	1520,6	2697,8	2,5
МП-12000-65	8800	0-65-70	1294,5	4413,1	2,5
МП-11000-65	8100	0-60-90	1081,7	2942,1	2,5
2МП-8700-60	2x3200	0-60-120	1030,1	2158,2	2,5
МП-7900-70	5800	0-70-120	730,6	1686,8	2,5
МП-7500-60	5500	0-60-120	879,0	2697,8	2,5
МП-7000-50	5100	0-50-120	981,0	3776,9	2,5
МП-6500-50	4800	0-50-120	882,9	3776,9	2,5
МП-6200-80	4600	0-80-160	545,4	2550,6	2,5
МП-5700-100	4200	0-100-200	402,2	941,8	2,5
МП-5000-110	3700	0-110-220	318,8	1569,6	2,5
МП-4000-40	2900	0-40-80	702,4	2354,4	2,5
МП-3500-30	2600	0-30-60	819,1	2648,7	2,5
МП-3100-75	2300	0-75-150	290,4	1618,7	2,5
МП-3000-100	2200	0-100-200	209,9	1618,7	2,5

Продолжение табл. 8

Тип электро- двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения ротора, об/мин	Номи- нальный крутящий момент, кН*м	Маховый момент якоря, кН*м ²	Допускае- мый коэф- фициент перегрузки
МП-2500-80	1800	0-80-160	220,7	608,2	2,5
МП-1800-200	1300	0-200-360	63,3	147,2	2,5
МП-1700-400	1250	0-400-750	29,9	63,8	2,5
МП-1500-300	1100	0-300-600	35,0	63,8	2,5
МП-1200-400	880	0-400-750	21,1	19,6	2,5
МП-1000-530	735	0-530-1000	13,2	8,8	2,5
МП-735-750	540	0-735-1500	6,9	5,9	2,1
МП-600-300	440	0-300-600	14,0	10,3	2,5
МП-500-280	370	0-280-750	12,6	9,8	2,5
МП-350-450	250	0-450-900	5,4	4,4	2,1
МП-250-400	180	0-400-800	4,4	3,8	2,0
электродвигатели серии МС-320 (синхронные)					
324-20/10	6550	600	104,3	184,4	-
324-16/10	5400	600	86,0	152,1	-
324-18/12	5400	500	103,2	193,3	-
324-15/12	4420	500	84,5	165,8	-
324-12/10	4050	600	64,5	119,7	-
323-18/8	3850	750	49,0	63,3	-
324-12/12	3450	500	65,9	138,3	-
324-10/10	3380	600	53,8	104,0	-
323-14/8	3050	750	38,9	51,5	-
322-16/6	2700	1000	25,8	19,1	-
324-8/10	2670	600	42,5	87,7	-
324-12/16	2600	375	66,2	156,0	-
323-11/8	2300	750	29,3	42,7	-
324-12/20	1970	300	62,7	176,6	-
322-12/6	1920	4000	4,6	15,2	-
323-10/10	1900	600	30,3	43,5	-
323-7/8	1500	750	19,1	30,9	-
322-8/6	1370	1000	13,1	11,3	-
322-7/6	1170	1000	11,2	10,3	-
321-7/6	750	1000	7,2	4,7	-

При остановке привода в периоды пауз частоту вращения холостого хода n_{xx} следует принимать равной нулю. В том случае, если в периоды пауз производится вращение валков на пониженной скорости для равномерного их охлаждения, то величина частоты вращения холостого хода, как правило, не превышает 10 % от установившейся частоты вращения.

Длительность разгона главного привода с металлом является постоянной для тех проходов, вид скоростного режима которых, соответствует схемам № II и III:

$$t_P = \frac{n_y - n_3}{a_P}, \text{ сек.}$$

Для скоростного режима № I в каждом проходе длительность разгона главного привода с металлом, в течение которого прокатывается вся полоса, определяют из выражения:

$$t_{P1i} = \frac{1}{a_P} \cdot \sqrt{(n_3)^2 + \frac{120 \cdot a_P \cdot l_i \cdot i_{np}}{\pi \cdot D_P \cdot (1 + S_i)}} - \frac{n_3}{a_P}, \text{ сек.}$$

За данный временной интервал в данном проходе частота вращения валков возрастет от скорости захвата n_3 до максимального значения $n_{max i}$, которое ниже установившейся скорости n_y :

$$n_{max i} = n_3 + a_P \cdot t_{P1i}, \text{ об/мин.}$$

Для скоростного режима № I длительность торможения (замедления) стана без металла в валках от максимальной скорости $n_{max i}$ до их полной остановки или скорости холостого хода n_{xx} вычисляют по формуле:

$$t_{T01i} = \frac{n_{max i} - n_{xx}}{a_T}, \text{ сек.}$$

Для скоростного режима № II в каждом проходе длительность торможения (замедления) скорости прокатки и частоты вращения валков от максимального значения, равного установившейся скорости n_y , до уровня $n_{B2 i}$, при котором происходит выброс металла из валков клетки находят из соотношения:

$$t_{T2i} = \frac{n_y}{a_T} - \frac{1}{a_T} \cdot \sqrt{(n_y)^2 - \frac{120 \cdot a_T \cdot (l_i - L_{Pi}) \cdot i_{np}}{\pi \cdot D_P \cdot (1 + S_i)}}, \text{ сек.}$$

Собственно частота вращения валков, при которой в данном проходе произойдет выброс металла составит:

$$n_{B2 i} = n_y - a_T \cdot t_{T2i}, \text{ об/мин.}$$

Для скоростного режима № II в каждом проходе длительность торможения (замедления) стана без металла в валках от скорости выброса $n_{B2 i}$

до их полной остановки или скорости холостого хода n_{xx} определяют из выражения:

$$t_{T02i} = \frac{n_{B2i} - n_{xx}}{a_T}, \text{ сек.}$$

Прокатка на установившейся скорости характерна только для скоростного режима № III. Длительность данного временного интервала вычисляют по формуле:

$$t_{yi} = \frac{60 \cdot (l_i - L_{Pi} - L_{Ti}) \cdot i_{np}}{\pi \cdot D_p n_y \cdot (1 + S_i)}, \text{ сек.}$$

Для скоростного режима № III длительность прокатки с торможением (замедлением), в течение которой происходит снижение частоты вращения валков от установившегося значения n_y до уровня n_B , будет оставаться постоянной для всех проходов и составит:

$$t_T = \frac{n_y - n_B}{a_T}, \text{ сек.}$$

Также для скоростного режима № III будет оставаться постоянной и длительность торможения (замедления) стана без металла в валках, в течение которой частота вращения валков снизится от скорости выброса n_B до их полной остановки или скорости холостого хода n_{xx} :

$$t_{T0} = \frac{n_B - n_{xx}}{a_T}, \text{ сек.}$$

Согласно тройному условию В.А. Тягунова на реверсивных станах для обеспечения минимальной длительности паузы между проходами и соответствующего повышения производительности стана необходимо совмещать операции реверсирования главного привода $t_{РЕВ}$, отработки нажимного устройства $t_{НУ}$, реверсирования раската рольгангами, кантовки раската и перемещения (установки) раската в поперечном направлении при помощи манипулятора $t_{КР}$:

$$t_{РЕВ} = t_{НУ} = t_{КР}, \text{ сек}$$

Длительность операции реверсирования главного привода стана после i -го прохода для скоростного режима № III определяется из выражения:

$$t_{РЕВи} = t_{P0} + t_{T0} + \frac{n_{xx}}{a_P} + \frac{n_{xx}}{a_T}, \text{ сек.}$$

Для скоростных режимов № I и II в приведенной формуле вместо длительности торможения главного привода без металла t_{T0} следует подставлять соответствующие временные интервалы t_{T01i} и t_{T02i} .

В случае если реверсирование происходит с остановкой привода, то в приведенных выше формулах следует принимать частоту вращения валков на холостом ходу n_{xx} равной нулю.

Длительность отработки нажимного устройства после окончания i - го прохода, в результате чего происходит установка межвалкового зазора для следующего $i+1$ - го прохода, вычисляется по формуле:

$$t_{HYi} = \frac{\Delta h_{i+1}}{V_{HY}}, \text{ сек.},$$

где V_{HY} – средняя скорость перемещения валка (нажимного устройства), принимаемая на основании технической характеристики стана, мм/с.

По окончании последнего n - го прохода раствор валков увеличивается до размера соответствующего первому проходу для начала прокатки следующего раската. Длительность выполнения данной операции составляет:

$$t_{HYn} = \frac{h_1 - h_n}{V_{HY}}, \text{ сек.}.$$

Длительность реверсирования раската рольгангами для скоростного режима № III подсчитывают на основании предельного ускорения, исключаяющего проскальзывание между полосой и роликами рольганга:

$$t_{KPi} = \frac{\pi \cdot D_p}{60 \cdot \mu \cdot g} \cdot (n_3 + n_B), \text{ сек.},$$

где μ – коэффициент трения между полосой и роликами рольганга;

g – ускорение свободного падения (9810 мм/с²).

Для скоростных режимов № I и II в приведенной формуле вместо частоты вращения валков, при которой происходит выброс полосы n_B , следует подставлять соответствующие числа оборотов валков n_{maxi} и n_{B2i} .

Рекомендуется принимать следующие значения коэффициента трения между полосой и роликами рольганга:

$\mu = 0,15..0,20$ – для холодного металла;

$\mu = 0,3$ – для горячего металла.

Длительность паузы с учетом кантовки раската составляет 3,5..4,0 секунды.

Если длительность реверсирования главного привода t_{PEB} превышает время отработки нажимного устройства t_{HY} и длительность реверсирования раската рольгангами и кантовки t_{KP} , то остановки главного привода рабочей клетки или его работы на скорости холостого хода не будет, а длительность паузы после i - го прохода будет равна нулю $t_{ni} = 0$.

В случае, когда длительность реверсирования главного привода t_{PEB} меньше времени отработки нажимного устройства t_{HY} или длительности

реверсирования раската рольгангами и кантовки t_{KP} , то длительность паузы (остановки привода или его работы на скорости холостого хода) после каждого i - го прохода, кроме последнего n - го будет определяться разностью наибольшего из указанных временных промежутков и времени реверсирования t_{PEB} :

$$t_{ni} = t_{HYi} - t_{PEBi}, \text{ сек,} \quad (\text{если, } t_{HYi} > t_{KPi}),$$

$$t_{ni} = t_{KPi} - t_{PEBi}, \text{ сек,} \quad (\text{если, } t_{HYi} < t_{KPi}).$$

Длительность паузы по окончании последнего n - го прохода определяется на основании сравнения длительности работы нажимного устройства t_{HYn} для установки калибра 1-го прохода и длительности паузы, необходимой для отвода от клетки готового раската и подачи следующей заготовки t_{n0} :

$$t_{nn} = t_{HYn} - t_{PEBn}, \text{ сек,} \quad (\text{если, } t_{HYi} > t_{n0}),$$

$$t_{nn} = t_{n0} - t_{PEBn}, \text{ сек,} \quad (\text{если, } t_{HYi} < t_{n0}).$$

Длительность паузы, необходимой для отвода от клетки готового проката и подачи следующей заготовки t_{n0} зависит от способа нагрева и подачи заготовок, планировки стана, протяженности и скорости подающих и отводящих рольгангов. В тех случаях, когда вспомогательное оборудование не является “узким местом”, т.е. не сдерживает производительность рабочей клетки, длительность данной паузы составляет 3,5..4,5 секунды (для обжимных станов).

Под машинным временем прокатки понимают время прокатки (нахождения) полосы в валках стана. Для каждого i - го прохода длительность машинного времени обработки раската в рабочей клетки подсчитывают по следующим соотношениям в зависимости от схемы скоростного режима:

$$t_{маш i} = t_{P1i}, \text{ сек} \quad (\text{для скоростного режима № I}),$$

$$t_{маш i} = t_P + t_{T2i}, \text{ сек} \quad (\text{для скоростного режима № II}),$$

$$t_{маш i} = t_P + t_{yi} + t_T, \text{ сек} \quad (\text{для скоростного режима № III}),$$

Полная длительность i - го прохода определяется суммой составляющих его временных интервалов:

$$t_{npi} = t_{P0} + t_{P1i} + t_{T01i} + t_{ni}, \text{ сек} \quad (\text{для скоростного режима № I}),$$

$$t_{npi} = t_{P0} + t_P + t_{T2i} + t_{T02i} + t_{ni}, \text{ сек} \quad (\text{для скоростного режима № II}),$$

$$t_{npi} = t_{P0} + t_P + t_{yi} + t_T + t_{T0} + t_{ni}, \text{ сек} \quad (\text{для скоростного режима № III}),$$

),

Для реверсивных одноклетевых станов длительность ритма прокатки, определяемого как время между одинаковыми моментами обработки двух последовательных раскатов, совпадает с длительностью цикла прокатки, т.е. временем полной обработки одной заготовки:

$$T_P = \sum_{i=1}^n t_{npi}, \text{ сек.}$$

На основании выполненного расчета строится график Адамецкого для одноклетьевого стана (рис. 3), который показывает затраты машинного времени и времени пауз на прокатку в каждом проходе.

Схема скоростного режима прокатки на одноклетьевом реверсивном стане холодной прокатки листов приведена на рисунке 4. Отличие данной схемы от предыдущей состоит в том, что вначале осуществляется заправка переднего конца полосы в моталку на пониженной (заправочной) скорости величина которой составляет 1,5..2,5 м/с, а затем начинается реверсивная прокатка. Длительность прокатки на заправочной скорости определяется расстоянием, которое должен пройти передний конец полосы от рабочей клетки до моталки, а также необходимостью создания на барабане моталки 1,5..2,0 витков для надежной фиксации полосы при дальнейшей прокатке с натяжением. Расстояние от рабочей клетки от моталки и диаметр барабана моталки устанавливаются на основе имеющейся планировки прокатного стана и технической характеристики моталки. Собственно прокатка производится при значениях скоростей в установившемся режиме до 20..40 м/с, а величины ускорений главного привода рабочей клетки при разгоне и торможении составляют:

при разгоне $a_P = 5,0..9,5$ (об/мин)/с;

при торможении $a_T = 7,0..10,5$ (об/мин)/с.

Схема скоростного режима прокатки на многоклетьевом непрерывном стане холодной прокатки листов приведена на рисунке 4. Эта схема по своей структуре и методике расчета аналогична одноклетьевому стану, на котором осуществляется только один проход. Длительность прокатки на установившейся скорости также определяется расстоянием, которое должен пройти передний конец полосы от рабочей клетки до моталки, а также необходимостью создания на барабане моталки 1,5..2,0 витков для надежной фиксации полосы при дальнейшей прокатке с натяжением. Распределение скоростей прокатки по клетям непрерывного стана должно соответствовать условию постоянства секундных объемов металла, проходящих через осевую

$$V_{i+1} = \frac{V_i \cdot (1 + S_i) \cdot \lambda_{i+1}}{(1 + S_{i+1})}, \text{ м/сек.}$$

плоскость валков каждой из клеток:

Для станов линейного, последовательного и непрерывного типов прокатка происходит с постоянной скоростью или с небольшим ускорением, как для непрерывных широкополосовых станов (рис. 5, 6). Для условий прокатки с постоянной скоростью, длительность машинного времени обработки проката в любом из проходов составит:

Длительность пауз между проходами для каждого типа стана определяется его планировкой и режимом работы.

$$t_{mawi} = \frac{l_i}{V_i}, \text{ сек.}$$

Диаграммы скоростей и моментов электродвигателей станов холодной прокатки листов

диаграммы скоростей и моментов для одноклетьевого реверсивного стан

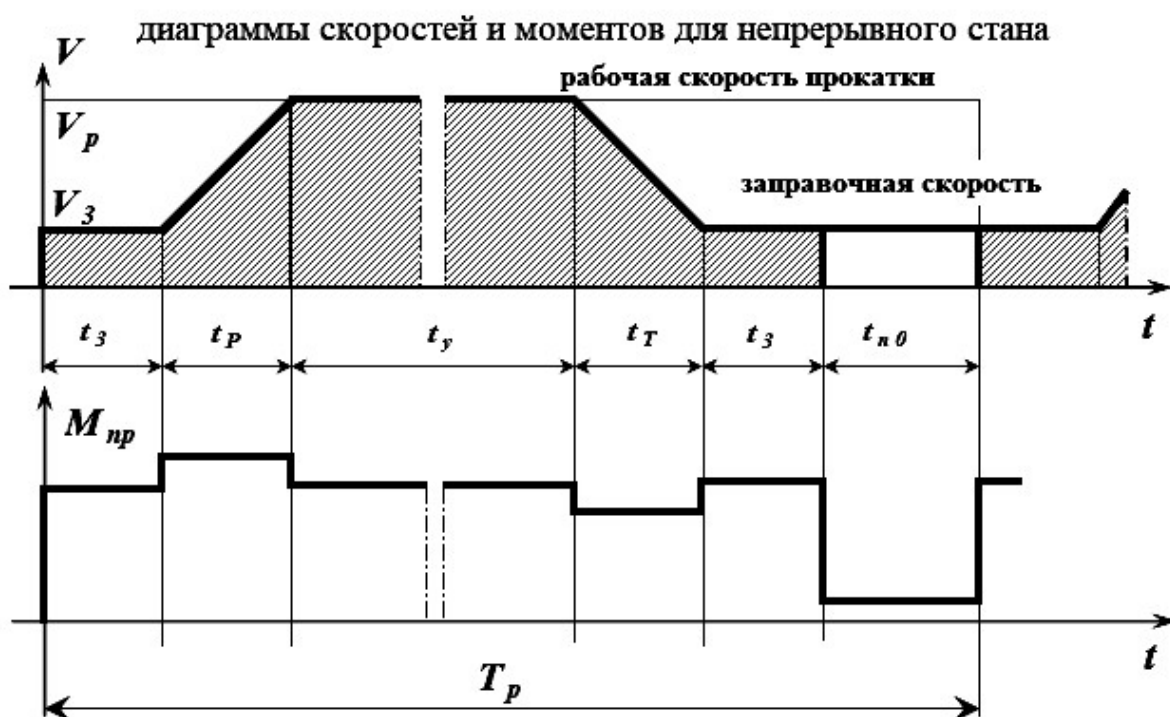
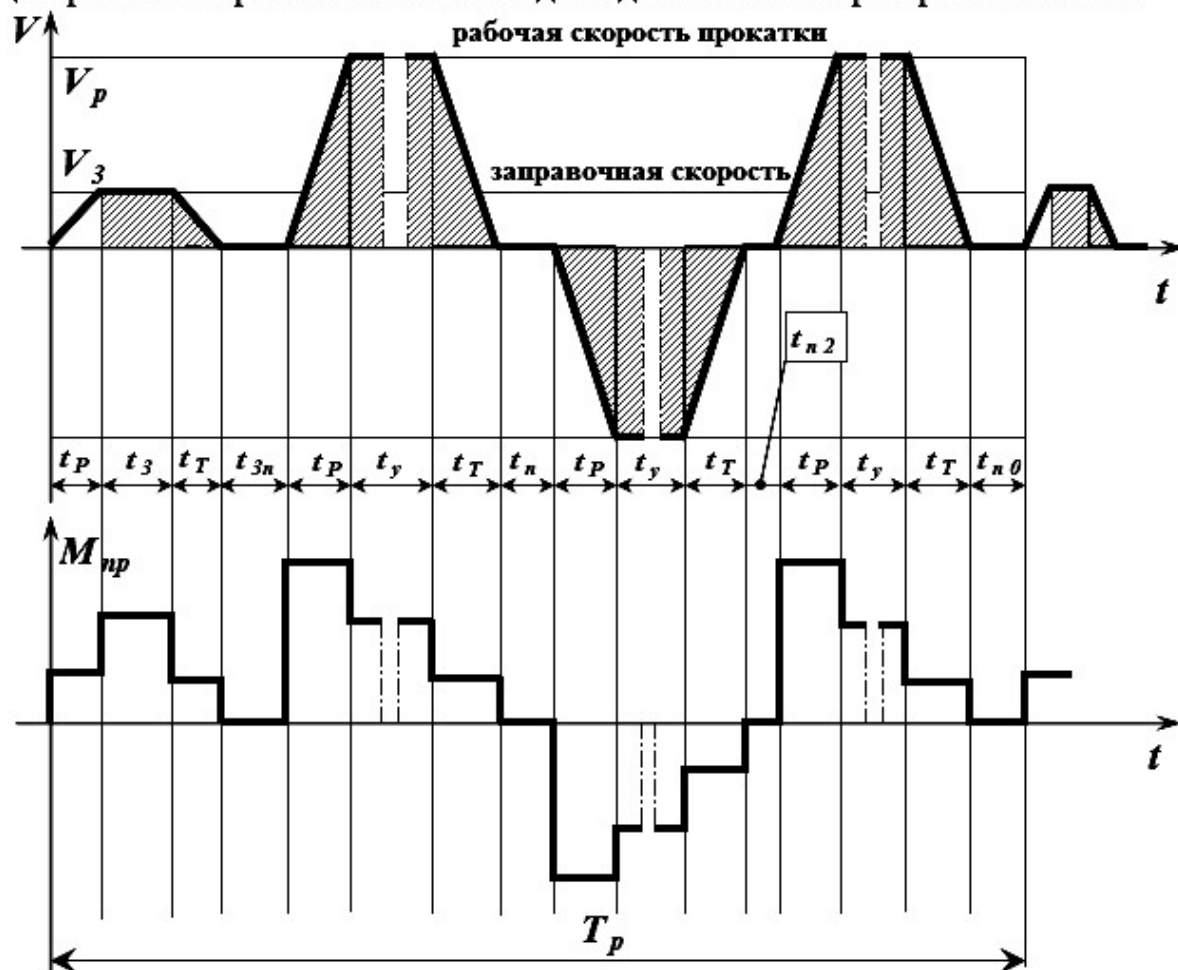


Рис. 4

Схема расположения оборудования и график Адамецкого для последовательных и непрерывных групп

Схема расположения оборудования непрерывного широкополосового стана 2000 Новолипецкого
металлургического завода

черновая группа клетей (последовательное расположение)

чистовая непрерывная группа клетей участок смотки

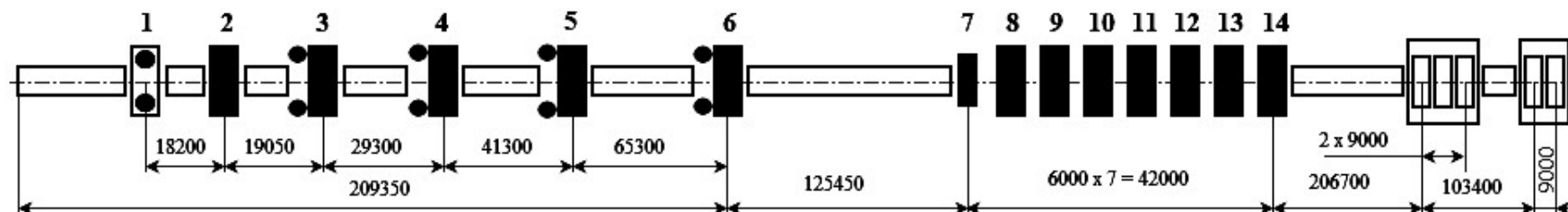


График Адамецкого для стана 2000 НЛМЗ

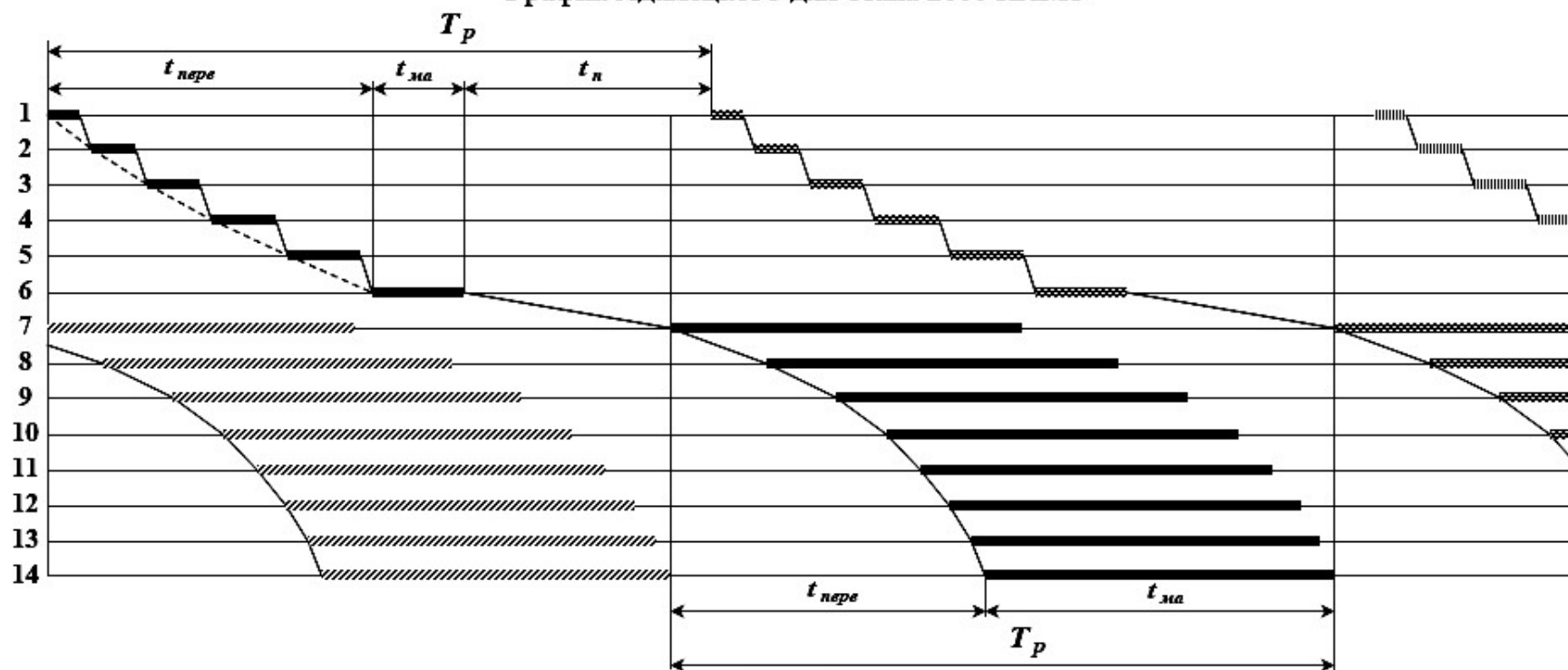


Рис. 5

Диаграммы скоростей и моментов электродвигателей непрерывных групп листовых станов горячей
скоростная диаграмма

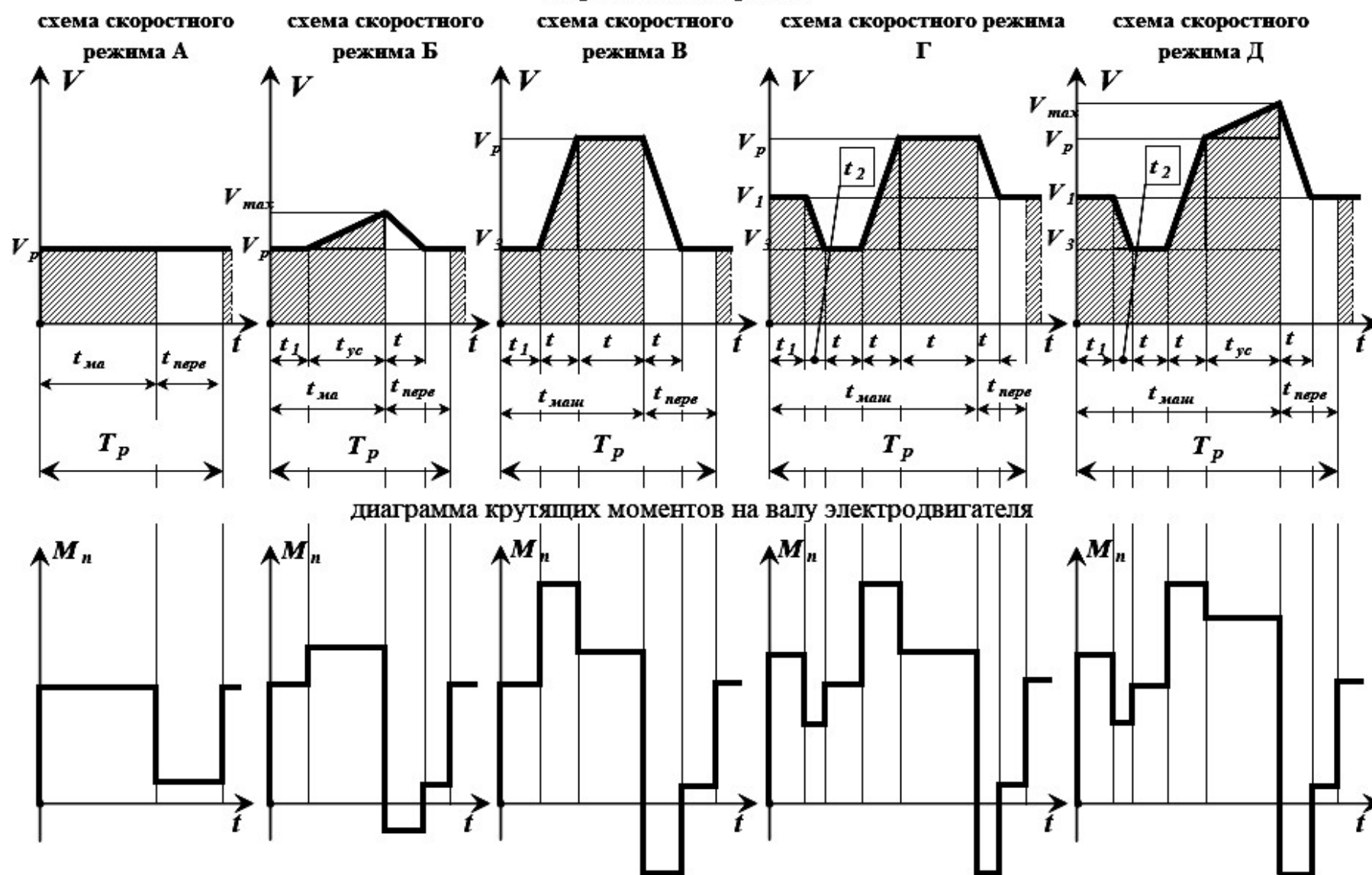


Рис. 6

2.6 Расчет температурного режима прокатки

При расчете изменений температуры металла при прокатке необходимо учитывать следующие факторы:

1. Падение температуры вследствие контакта полосы с валками в каждом пропуске (проходе) Δt_b ;
2. Падение температуры на рабочих и раскатных рольгангах, обусловленное конвекцией и излучением, в периоды пауз между прокаткой Δt_{uk} ;
3. Прирост температуры полосы вследствие пластической деформации Δt_w .

Температуру, которую имеет раскат в начале $i+1$ – го пропуска (прохода), рассчитывают из уравнения баланса потерь тепла и прироста температуры от деформационного разогрева с учетом температуры в

$$t_{i+1} = t_i - (\Delta t_{Bi} + \Delta t_{uki}) + \Delta t_{wi} \quad , \text{ град С} .$$

предыдущем проходе:

Падение температуры вследствие контакта с валками вычисляется по формуле Ю.Д. Железнова:

В данной формуле величину арккосинуса следует подставлять в радианах.

$$\Delta t_{Bi} = 1.83 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{R \cdot \arccos \left(1 - \frac{\Delta h_i}{2 \cdot R} \right)}}{\Delta h_i} \cdot (t_i - 60) \cdot \sqrt{\frac{1 + S_i}{V_i}} \quad , \text{ град С} .$$

Падение температуры между пропусками, учитывающее главным образом излучение, но с поправкой на конвекцию и теплопередачу тепла деталям рольганга и проводок рассчитывают по формуле Г.П. Иванцова:

$$\Delta t_{uki} = T_i - \frac{1000}{3 \sqrt{\frac{1000}{\left(\frac{T_i}{100} \right)^3} + 0.055 \cdot \frac{t_{npi}}{h_i}}} \quad , \text{ град С} .$$

где T_i – абсолютная температура полосы в данном проходе, град К.

Прирост температуры вследствие пластической деформации вычисляется по формуле Ю.Д. Железнова:

$$\Delta t_{wi} = 0.42 \cdot p_{cpi} \cdot \log \left(\frac{h_{i-1}}{h_i} \right) \quad , \text{ град С} .$$

В данной формуле значение среднего контактного давления подставляется в размерности МПа.

2.7 Расчет моментов и мощности прокатки

Момент прокатки определяет загрузку главных линий прокатных станов и электродвигателей привода валков. Момент прокатки, подводимый от главных электродвигателей рабочей клетки в общем случае, в различные периоды прокатки, направлен на преодоление следующих сопротивлений вращению элементов главного привода:

- ❖ момента прокатки, т.е. момента препятствующего вращению валков со стороны прокатываемой полосы;
- ❖ момента сил трения в подшипниковых опорах рабочей клетки при действии на нее усилия прокатки;
- ❖ момента добавочных сил трения в элементах главной линии прокатного стана (шпинделях, шестеренных клетях, редукторах, муфтах, промежуточных валах и опорах);
- ❖ динамического момента, связанного с разгоном и торможением элементов главной линии стана.

Суммарный момент прокатки для двух валков, необходимый для преодоления сопротивления деформируемой полосы с учетом влияния переднего и заднего натяжения для каждого i -го прохода или клетки вычисляется по следующему соотношению:

$$M_{np\ i} = 2 \cdot P_i \cdot \psi_i \cdot l_{di} + (Q_{0\ i} - Q_{1\ i}) \cdot (R + h_i) \quad , \text{ кН*м} \quad ,$$

где ψ_i – коэффициент плеча приложения равнодействующей усилия прокатки;

$Q_{0\ i}$ – величина заднего натяжения полосы, МПа;

$Q_{1\ i}$ – величина переднего натяжения полосы, МПа.

Величины переднего и заднего натяжений для каждого i -го прохода или клетки рассчитывают через удельные натяжения и площади поперечного сечения полос на входе и на выходе очага деформации:

$$Q_{0\ i} = h_{i-1} \cdot b_{i-1} \cdot (1 - \xi_{0\ i}) \cdot \sigma_{s\ i} \cdot 10^{-6} \quad , \text{ МПа} \quad ,$$

$$Q_{1\ i} = h_i \cdot b_i \cdot (1 - \xi_{1\ i}) \cdot \sigma_{s\ i} \cdot 10^{-6} \quad , \text{ МПа} \quad .$$

Для случая горячей прокатки коэффициент плеча приложения равнодействующей усилия прокатки можно определить по формуле:

$$\psi_i = 0.498 - 0.0283 \cdot \frac{l_{di}}{h_{spi}} \quad .$$

При холодной прокатке листов, коэффициент плеча приложения равнодействующей находится в пределах 0,25 ... 0,4 (чем тоньше подпоса, тем меньше коэффициент за счет сплющивания валков).

Момент сил трения в подшипниковых опорах рабочих валков рассчитывается в зависимости от типа рабочей клетки. В двухвалковых клетях ДУО и клетях типа ТРИО усилие прокатки воспринимается подшипниковыми опорами рабочих валков, а в четырехвалковых клетях КВАРТО –

подшипниками опорных валков. Суммарный момент сил трения в подшипниковых опорах всех валков клетки для каждого i -го прохода или клетки можно найти по соотношениям:

для клеток без опорных валков:

$$M_{noi} = P_i \cdot f_{no} \cdot d_p, \text{ кН*м},$$

для четырехвалковых клеток:

$$M_{noi} = P_i \cdot f_{no} \cdot d_{on}, \text{ кН*м},$$

где f_{no} – коэффициенты трения в подшипниковых опорах валков, которые принимают в зависимости от типа подшипникового узла:

$f_{no} = 0,04...0,08$ – для подшипников скольжения с неметаллическими (текстолитовыми) вкладышами;

$f_{no} = 0,06...0,1$ – для подшипников скольжения с бронзовыми вкладышами;

$f_{no} = 0,002...0,005$ – для роликовых подшипников качения;

$f_{no} = 0,001...0,005$ – для подшипников жидкостного трения (ПЖТ).

Размеры шеек валков были определены ранее в подразделе 2.4.

По сумме рассчитанных моментов прокатки и моментов сил трения в подшипниковых узлах валков проверяют выполнение условия прочности валков по напряжениям кручения:

для рабочих клеток ДУО и ТРИО (приводные рабочие валки):

$$|M| \geq M_{npi} + M_{noi}, \text{ кН*м},$$

для рабочих клеток КВАРТО (приводные рабочие валки):

$$|M| \geq M_{npi} + M_{noi} \cdot \frac{D_p}{D_{on}}, \text{ кН*м},$$

для рабочих клеток КВАРТО (приводные опорные валки):

$$|M| \geq M_{npi} \cdot \frac{D_{on}}{D_p} + M_{noi}, \text{ кН*м},$$

Допускаемый скручивающий момент валков, рассчитывается из условия прочности в месте перехода шейки рабочего валка в приводной концевик с учетом напряжений кручения и концентрации напряжений в ступенчатом переходе:

для приводного концефика круглого поперечного сечения:

$$|M| = \frac{0.196 \cdot (d_{np})^3 \cdot |\tau| \cdot 10^{-6}}{k_\tau}, \text{ кН*м},$$

для приводного концефика тrefового поперечного сечения:

$$|M| = \frac{0.0706 \cdot (d_{np})^3 \cdot |\tau| \cdot 10^{-6}}{k_\tau}, \text{ кН*м},$$

для приводного концевика с лопастью для универсального шпинделя:

$$|M| = 0.7 \cdot (S_{np})^3 \cdot |\sigma| \cdot 10^{-6} \quad , \text{ кН*м} \quad ,$$

где d_{np} – наружный диаметр приводного концевика вала, мм;

S_{np} – толщина лопасти под универсальный шпиндель приводного концевика вала, мм;

$|\tau|$ – допускаемое напряжение кручения материала вала, МПа;

k_τ – эффективный коэффициент концентрации напряжений в месте ступенчатого перехода шейки вала в приводной концевик.

Наружный диаметр приводного концевика прокатного вала, как правило, составляет $d_{np} = 0,9 d_p$, а толщина лопасти $S_{np} = (0,25..0,28) D_p$.

Значения допускаемых напряжений кручения для различных материалов валков приведены в таблице 7.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений в зависимости от перепада диаметров, радиуса сопрягающей галтели, прочностных свойств металла вала составляет $k_\tau = 1,30..2,40$.

Приведенный к валу электродвигателя момент добавочных сил трения, возникающий в механических передающих элементах главной линии привода (шпиндели, шестеренная клеть, редукторы, муфты, промежуточные валы и т.д.), обычно рассчитывают через к.п.д. механической передачи с учетом того, какие валки являются приводными рабочие или опорные (для станков КВАРТО): для рабочих клеток ДУО и ТРИО (приводные рабочие валки):

$$M_{npi} = \left(\frac{1}{\eta_{nep}} - 1 \right) \cdot \frac{M_{npi} + M_{noi}}{i_{np}} \quad , \text{ кН*м} \quad ,$$

для рабочих клеток КВАРТО (приводные рабочие валки):

$$M_{npi} = \left(\frac{1}{\eta_{nep}} - 1 \right) \cdot \frac{M_{npi} + M_{noi} \cdot \frac{D_p}{D_{on}}}{i_{np}} \quad , \text{ кН*м} \quad ,$$

для рабочих клеток КВАРТО (приводные опорные валки):

$$M_{npi} = \left(\frac{1}{\eta_{nep}} - 1 \right) \cdot \frac{M_{npi} \cdot \frac{D_{on}}{D_p} + M_{noi}}{i_{np}} \quad , \text{ кН*м} \quad ,$$

где η_{nep} – общий к.п.д. механической передачи от электродвигателей до валков прокатного стана.

При известном составе главной линии прокатной клетки, включающей m элементов, общий к.п.д. передачи определяют по известному соотношению, как произведение к.п.д. отдельных узлов:

$$\eta_{пер} = \prod_{j=1}^m \eta_j .$$

Рекомендуется принимать следующие значения коэффициентов полезного действия устройств, входящих в состав главной линии прокатного стана:

$\eta = 0,94..0,96$ – для треховых шпинделей;

$\eta = 0,96..0,98$ – для зубчатых шпинделей;

$\eta = 0,96..0,98$ – для универсальных шпинделей при угле наклона не более 3° ;

$\eta = 0,94..0,96$ – для универсальных шпинделей при угле наклона более 3° ;

$\eta = 0,96..0,98$ – для шестеренных клеток и одноступенчатых редукторов;

$\eta = 0,92..0,94$ – для комбинированных шестеренных клеток - редукторов и многоступенчатых редукторов;

$\eta = 0,98..0,99$ – для муфт и промежуточных валов.

Суммарный статический момент на валу электродвигателя, возникающий в процессе прокатки полосы, находят также с учетом схемы привода валков:

для рабочих клеток ДУО и ТРИО (приводные рабочие валки):

$$M_{сми} = \frac{M_{npi} + M_{noi}}{i_{np}} + M_{nepi} , \text{ кН*м} ,$$

для рабочих клеток КВАРТО (приводные рабочие валки):

$$M_{сми} = \frac{M_{npi} + M_{noi} \cdot \frac{D_p}{D_{on}}}{i_{np}} + M_{nepi} , \text{ кН*м} ,$$

для рабочих клеток КВАРТО (приводные опорные валки):

$$M_{сми} = \frac{M_{npi} \cdot \frac{D_{on}}{D_p} + M_{noi}}{i_{np}} + M_{nepi} , \text{ кН*м} ,$$

В периоды пауз между прокаткой валки, как правило, вращаются на пониженной скорости для обеспечения режима охлаждения, а возникающий на валу электродвигателя момент - момент холостого хода, необходимый для вращения элементов главного привода стана и валков принимается равным 5% номинального момента всех электродвигателей главного привода:

$$M_{xx} = 0.05 \cdot M_{НОМ} \quad , \text{ кН*м } ,$$

где $M_{НОМ}$ - номинальный момент всех электродвигателей главного привода, принимаемый на основании их паспортной характеристики, кН*м.

Техническая характеристика электродвигателей, применяемых для привода рабочих клеток прокатных станов, приведена в таблице 8.

В случае если скорость валков изменяется в процессе прокатки (это справедливо для реверсивных прокатных станов, непрерывных групп клеток широкополосовых станов при прокатке с ускорением), необходимо также определять динамические моменты, действующие в период разгона торможения.

Динамический момент при разгоне главной линии стана:

$$M_P = \frac{\Sigma G \cdot D^2}{375} \cdot a_P \quad , \text{ кН*м } ,$$

Динамический момент при торможении главной линии стана:

$$M_T = \frac{\Sigma G \cdot D^2}{375} \cdot a_T \quad , \text{ кН*м } ,$$

где $\Sigma G D^2$ – приведенный к валу электродвигателя маховый момент главной линии прокатной клетки, кН*м².

Приведенный к валу электродвигателя маховый момент главной линии прокатной клетки включает суммарный маховый момент якорей электродвигателей и маховый момент других вращающихся деталей передающего механизма (рабочие, опорные, шестеренные валки, шпиндели, промежуточные валы, муфты):

$$\Sigma G \cdot D^2 = G \cdot (D_o)^2 + G \cdot (D_{nep})^2 \quad , \text{ кН*м}^2$$

где $G(D_o)^2$ – суммарный маховый момент якорей электродвигателей, кН*м²;

$G(D_{nep})^2$ – приведенный к валу электродвигателя маховый момент других вращающихся деталей передающего механизма, кН*м².

Маховый момент якоря электродвигателя принимается на основании его паспортной характеристики, приведенной в таблице 8.

Приведенный к валу электродвигателя маховый момент других вращающихся деталей передающего механизма главной линии прокатного стана, как правило, составляет 10..20% от махового момента якоря электродвигателя. С учетом этого приведенный к валу электродвигателя суммарный маховый момент главной линии прокатной клетки можно определить из соотношения:

$$\Sigma G \cdot D^2 = (1.1...1.2) \cdot \left[G \cdot (D_o)^2 \right] \quad , \text{ кН*м}^2 \quad ,$$

Таким образом, рассчитаны все составляющие крутящего момента на валу электродвигателя. Это позволяет построить, на основании ранее найденного графика скоростей главного привода (рис. 3), соответствующую

ему диаграмму крутящих моментов (рис. 3). Крутящие моменты в различные временные периоды работы привода будут составлять:

- * при остановленном приводе $M_{np} = 0$, кН*м ;
- * при холостом ходе $M_{np} = M_{xx}$, кН*м ;
- * при разгоне привода без металла в валках $M_{np} = M_{xx} + M_P$, кН*м ;
- * при разгоне привода с металлом в валках $M_{np i} = M_{xx} + M_{cm i} + M_P$, кН*м ;
- * при установившемся процессе прокатки $M_{np i} = M_{xx} + M_{cm i}$, кН*м ;
- * при торможении привода с металлом в валках $M_{np i} = M_{xx} + M_{cm i} - M_T$, кН*м ;
- * при торможении привода без металла в валках $M_{np} = M_{xx} - M_T$, кН*м .

После определения загрузки приводного электродвигателя по всем проходам проверяют электродвигатель на нагрев по среднеквадратичному моменту, эквивалентному току якоря:

$$M_{cp} = \frac{m_0 \sum_{j=1} (M_j)^2 \cdot \tau_j}{\sqrt{m_{уст} \sum_{j=1} \tau_{устj} + k_{PT} \left[m_{PT} \sum_{j=1} (\tau_{Pj} + \tau_{Tj}) \right] + k_{na} \sum_{j=1} \tau_{naj}}} , \text{ кН*м} ,$$

где $m_{уст}$ – количество участков прокатки на установившейся скорости за время ритма;

$\tau_{уст j}$ – длительность ведения процесса прокатки на установившейся скорости на каждом из участков, сек;

m_{PT} – количество участков разгона и торможения за время ритма прокатки (как с металлом, так и без него);

$\tau_{P j}$, $\tau_{T j}$ – длительность ведения процесса прокатки на каждом из характерных участков разгона и торможения, сек;

k_{PT} – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения обмоток электродвигателя в периоды разгона и торможения; рекомендуется принимать $k_{PT} = 0,75$;

m_{na} – количество участков пауз и работы стана на пониженной, заправочной скорости и скорости холостого хода за время ритма;

$\tau_{na j}$ – длительность ведения процесса прокатки на каждом из характерных участков пауз и работы стана на пониженной, заправочной скорости и скорости холостого хода, сек;

k_{na} – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения обмоток электродвигателя в периоды пауз, работы на пониженной, заправочной скорости и скорости холостого хода; рекомендуется принимать $k_{PT} = 0,5$;

m_0 – общее число характерных участков изменения скоростей и моментов за время ритма прокатки;

M_j , τ_j – соответственно , крутящий момент привода на каждом характерном участке, кН*м и его длительность, сек.

Среднеквадратичный момент рассчитывается для всех клеток прокатного стана имеющих индивидуальный привод клетки.

Для непрерывных широкополосовых станов, осуществляющих прокатку с ускорением для компенсации остывания полосы, длительность названного периода следует относить к установившемуся процессу прокатки, т.к. ускорение начинается после достижения рабочей скорости, а величина ускорения существенно ниже, чем ускорение привода при разгоне от заправочной до рабочей скорости.

Величина рассчитанного эквивалентного среднеквадратичного момента не должна превышать суммарного номинального момента электродвигателей главного привода данной клетки, в этом случае не будет происходить перегрев электродвигателя:

$$M_{cp} \leq M_{НОМ} \quad , \text{ кН*м } ,$$

На основании построенной диаграммы моментов привода электродвигатель также проверяют по перегрузке. Для этого по диаграмме моментов находят максимальный крутящий момент привода и сравнивают его с номинальным крутящим моментом электродвигателя, определяя коэффициент перегрузки:

$$\lambda_{пер} = \frac{M_{max}}{M_{НОМ}} \leq \left| \lambda_{пер} \right| \quad .$$

Рассчитанный коэффициент перегрузки не должен превышать допускаемого коэффициента перегрузки $|\lambda_{пер}|$ для данного электродвигателя, указанного в его паспортной характеристике (см. табл. 8).

Эквивалентную среднеквадратичную мощность электродвигателя вычисляют на основе эквивалентного среднеквадратичного момента и скорости электродвигателя в установившемся режиме:

$$N_{cp} = M_{cp} \cdot \frac{\pi \cdot n_{уст}}{30} \leq N_{пасп} \quad , \text{ кВт } .$$

Значение рассчитанной эквивалентной мощности не должно превышать суммарной паспортной мощности электродвигателей главного привода данной клетки $N_{пасп}$ (см. табл. 8).

По результатам данного подраздела необходимо сформулировать вывод о возможности или невозможности производства заданного вида прокатной продукции по следующим условиям:

- перегрузке главного привода стана по моменту прокатки;
- нагреву главного электродвигателя стана;
- перегрузке главного электродвигателя стана по крутящему моменту;

- перегрузке главного электродвигателя стана по мощности.

2.8 Расчет технико-экономических показателей работы прокатного стана

При расчетах производительности прокатных станов различают понятия:

- ◆ технически возможной часовой производительности по исходной заготовке;
- ◆ практически возможной часовой производительности по исходной заготовке;
- ◆ практически возможной часовой производительности по готовому прокату;
- ◆ годовой производительности.

Технически возможная часовая производительность по исходной заготовке при прокатке заданного вида прокатной продукции:

$$A_{ТВ} = 3600 \cdot \frac{G_0}{T_p}, \text{ т/час},$$

где G_0 – масса исходной заготовки, т;

T_p – ритм прокатки для рассматриваемого вида прокатной продукции, сек.

Ритм прокатки был рассчитан ранее в разделе 2.5 «Расчет скоростного режима прокатки».

Массу исходной заготовки находим, исходя из плотности материала и заданных размеров исходной заготовки:

$$G_0 = \frac{\rho \cdot h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{1000}, \text{ т},$$

где ρ – плотность материала исходной заготовки, т/см³.

Рекомендуется принимать следующие значения плотности материалов:

- стали углеродистые, легированные, коррозионно-стойкие - $\rho = 7,82 \times 10^{-6}$ т/см³;
- стали жаропрочные - $\rho = 8,2 \times 10^{-6}$ т/см³;
- алюминиевые сплавы - $\rho = 2,72 \times 10^{-6}$ т/см³;
- титановые сплавы - $\rho = 4,5$ т/см³;
- латуни (медно-цинковые сплавы) - $\rho = 8,5 \times 10^{-6}$ т/см³;
- бронзы оловянистые - $\rho = 8,7 \times 10^{-6}$ т/см³;
- бронзы алюминиевые $\rho = 7,5..8,2 \times 10^{-6}$ т/см³;
- бронзы кремнистые $\rho = 7,4 \times 10^{-6}$ т/см³;
- магниевые сплавы - $\rho = 1,78 \times 10^{-6}$ т/см³;
- никелевые сплавы (в том числе медно-никелевые) $\rho = 8,8 \times 10^{-6}$ т/см³.

Практически возможная часовая производительность по исходной заготовке учитывает снижение производительности стана относительно технически возможной из-за мелких различных нерегистрируемых задержек:

$$A_{\Pi B} = 3600 \cdot \frac{G_0}{T_p} \cdot k_u, \text{ т/час},$$

где k_u – коэффициент использования стана.

Коэффициент использования стана устанавливается по практическим данным работы наиболее производительных станов данного типа. Этот коэффициент неодинаков для различных станов и имеет тенденцию к увеличению за счет вносимых усовершенствований, улучшения организации труда, качества ремонта и обслуживания оборудования, снижения его отказов.

По данным Гипромеца рекомендуется принимать следующие значения коэффициента использования стана:

- * $k_u = 0,90$ для непрерывных и полунепрерывных групп клеток широкополосовых станов горячей прокатки, для обжимных станов, для непрерывных сортопрокатных и проволочных станов;
- * $k_u = 0,85$ для толстолистовых станов, а также балочных крупно- средне- и мелкосортных станов с линейным расположением клеток;
- * $k_u = 0,75$ для непрерывных листовых станов при горячей прокатке полосы толщиной менее 2 мм.

Практически возможная часовая производительность по готовому прокату учитывает возвратные и безвозвратные потери металла в технологическом процессе:

$$A_{\Pi P} = 3600 \cdot \frac{G_0}{T_p \cdot k_p} \cdot k_u, \text{ т/час},$$

где k_p – общий коэффициент расхода металла, определяемый как произведение коэффициентов расхода по отдельным технологическим операциям:

$$k_p = k_{ne} \cdot k_o \cdot k_{ок} \cdot k_{окр} \cdot k_k \cdot k_{np},$$

где k_{ne} – коэффициент расхода металла при нагреве в печах (угар, окалина) принимается в зависимости от типа нагревательного устройства равным $k_n = 1,01..1,03$;

k_o – коэффициент расхода металла вследствие образования вторичной окалины при прокатке принимается равным $k_o = 1,001..1,002$;

$k_{ок}$ – коэффициент расхода металла вследствие обрезки переднего и заднего концов полосы перед прокаткой в непрерывной группе клеток (только для непрерывных станов) принимается равным $k_{ок} = 1,01..1,02$;

$k_{окр}$ – коэффициент расхода металла вследствие обрезки кромок полосы при отделочных операциях принимается равным $k_{окр} = 1,05..1,1$ (для непрерывных

и полунепрерывных широкополосовых станов обрезка кромок не производится ($k_{окр} = 1,0$);

k_k – коэффициент расхода металла вследствие обрезки переднего и заднего концов полосы после прокатки при отделочных операциях принимается равным $k_k = 1,05..1,1$;

k_{np} – коэффициент расхода металла, учитывающий необходимость отбора проб для механических испытаний, принимается равным $k_{np} = 1,001..1,02$ (большие значения для прокатки на толстолистовых станах).

Годовую производительность прокатного стана определяют на основании часовой производительности и годового фонда рабочего времени:

$$A_G = A_{II} \cdot P \cdot T_G, \text{ т/год},$$

где T_G – годовой фонд рабочего времени (фактическое время работы) прокатного стана за год, час.

Годовой фонд рабочего времени вычисляют по следующему соотношению:

$$T_G = 24 \cdot (T_{НОМ} - T_{ПП}) = 24 \cdot T_{НОМ} \cdot \frac{(100 - K_{ПП})}{100}, \text{ час},$$

где $T_{НОМ}$ – номинальное время работы прокатного стана за год, сут;

$T_{ПП}$ – длительность плановых простоев прокатного стана за год (перевалки, передача смен и т.д.), сут;

$K_{ПП}$ – коэффициент плановых простоев прокатного стана за год определяемый в процентах от номинального времени работы стана, %.

Номинальное время работы стана находят как разницу календарного времени и длительности капитальных и планово-предупредительных ремонтов:

$$T_{НОМ} = 365 - T_{РЕМ}, \text{ сут},$$

где $T_{РЕМ}$ – длительность ремонтов прокатного стана за год, сут.

Нормативные значения времени на ремонты и плановые простои представлены в таблице 9.

2.9 Выводы

В выводах проекта по модулю необходимо оценить в целом, с учетом ранее сформулированных заключений по разделам, возможность производства заданного вида прокатной продукции на рассматриваемом стане.

Таблица 9

Нормативы для расчета годового фонда рабочего времени стана

Тип прокатного стана	Длитель- ность ремонтов, сут	Коэфф. плановых простоев, %
1. Блюминги	16	8,0
2. Слябинги	16	10,0
3. Непрерывно-заготовочные станы	16	10,0
4. Рельсобалочный, крупно- среднесортный линейные станы	20	18,0
5. Сортные непрерывные и полунепрерывные станы	16	16,0
6. Мелкосортные непрерывные и полунепрерывные станы	20	12,0
7. Штриповые станы	16	13,0
8. Листовые станы горячей прокатки	27	13,0
9. Листовые станы холодной прокатки трех- и четырёхклетевые, и дрессировочные	27	10,0
10. Листовые станы холодной прокатки пятиклетевые	27	7,5

3. ЗАЩИТА ПРОЕКТА ПО МОДУЛЮ

Законченный проект по модулю оформляется в соответствии с требованиями, приведенными выше (см. раздел 1 «Общие положения»), подписывается студентом, представляется на подпись руководителю проекта и далее передается для защиты в комиссии.

Проект по модулю оценивается по пятибальной системе. Оценка проекта по модулю учитывает:

- соответствие проекта по модулю заданию в целом и его отдельным разделам;
- степень достоверности полученных результатов;
- правильность применения расчетных соотношений и выбора нормативных коэффициентов;
- полноту использования программных комплексов для расчета параметров;
- качество оформления проекта;
- ответы при защите проекта по модулю.

В процессе защиты студент демонстрирует на компьютерной технике владение программными комплексами расчета и проектирования.

Отметка о выполнении проекта по модулю заносится в ведомость академической группы (или БРС) и в зачетную книжку студента, в том числе электронную.

При получении студентом неудовлетворительной оценки ему выдается новый вариант задания на проект по модулю, а защита ее производится в комиссии, назначаемой заведующим кафедрой.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокатное производство. Учебник для вузов. 3-е изд. Полухин П.И., Федосов Н.М., Королев А.А. и др. М.: Металлургия, 1982. 696 с.
2. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов: Учебное пособие для вузов/ Паршин В.С., Костров В.П., Сомов Б.С. и др. М.: Металлургия, 1988. 400 с.
3. Механическое оборудование заводов цветной металлургии: Учебник для вузов. В 3-х частях. Ч.3. Королев А.А., Навроцкий А.Г., Вердеревский В.А. и др. Механическое оборудование цехов по обработке цветных металлов. М.: Металлургия, 1989. 624 с.
4. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов: Учебник для вузов. –4-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 480 с.
5. Бахтинов В.Б. Прокатное производство. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 416 с.
6. Справочник прокатчика. Коновалов Ю.В., Налча Г.И., Савранский К.Н. М.: Металлургия, 1977. 312 с.
7. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т.3 Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для вузов/ Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988. 680 с.
8. Грудев А.П. Теория прокатки. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988. 240 с.
9. Федосов Н.М., Бринза В.Н., Астахов И.Г. Проектирование прокатных цехов. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1983. 303 с.
10. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инарович Ю.В. Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1987. 368 с.
11. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
12. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. Теория прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1982, 335 с.
13. Аналитические зависимости для определения сопротивления деформации титановых сплавов/Харитонин С.В., Степаненко В.И., Литвинов К.И. и др.// Кузнечно-штамповочное производство, 1994, №11, с.6-7.
14. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Металлургиздат, 1958. 350 с.
15. Коновалов Л.В., Остапенко А.В., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник. М.: Металлургия, 1986. 430 с.

Министерство науки и высшего образования РФ

Государственное образовательное учреждение высшего образования

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Институт новых материалов и технологий

Кафедра «Металлургические и роторные машины»

Проект по модулю
принят с оценкой

_____ 200__ г.

ПРОЕКТ

по модулю

«Автоматизированное проектирование технологических машин и оборудования»

Тема : _____

Студент

Фамилия И.О.

Группа

№ группы

Руководитель проекта

Фамилия И.О.

Город Год

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра «Металлургические и роторные машины»

З А Д А Н И Е

на проект по модулю

«Автоматизированное проектирование технологических машин и оборудования»

Студенту группы № _____

Фамилия И.О. _____

Тема _____

Исходные данные:

Вариант № _____

- Тип прокатного стана или рабочей клетки _____
- Размеры исходной заготовки (толщина, ширина, длина), мм
 $h_0 \times b_0 \times l_0 =$ _____
- Размеры готовой продукции или полуфабриката (толщина проката или размеры поперечного сечения после n -го прохода или клетки), мм h_n или $(h_n \times b_n) =$ _____
- Схема обжатий _____
- Марка сплава прокатываемого металла _____
- Температура исходного нагрева металла _____
- Размеры или калибровка валков _____
- Количество проходов (рабочих клеток) n _____
- Количество одновременно прокатываемых заготовок N _____
- Длительность паузы, необходимой для отвода от клетки готового проката и подачи следующей заготовки τ_0 , сек _____

Содержание проекта:

1. Описание технологического процесса производства проката на конкретном стане.
2. Расчет параметров технологического процесса прокатки.
 - 2.1 Расчет схемы обжатий;
 - 2.2 Расчет геометрических и деформационных параметров очага деформации;
 - 2.3. Расчет контактных давлений и усилия прокатки;
 - 2.4. Расчет скоростного режима прокатки;
 - 2.5. Расчет температурного режима прокатки;
 - 2.6. Расчет моментов и мощности прокатки.
3. Расчет технико-экономических показателей работы прокатного стана.

Выводы.

Приложения:

Итоговая таблица результатов расчета.

График Адамецкого.

Диаграмма скоростей и моментов.

Задание выдал _____

Дата _____

