



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

**И.Г. Шубин**

## **ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ И ВОЛОЧИЛЬНЫЕ СТАНЫ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск  
2018

**Рецензенты:**

кандидат технических наук, доцент,  
советник по технологической подготовке кадров  
АНО ДПО «Корпоративный центр подготовки кадров «Персонал»»  
**В.Л. Корнилов**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры проектирования  
и эксплуатации металлургических машин и оборудования,  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»  
**А.В. Анцупов**

**Шубин И.Г.**

**Основы процесса волочения и волочильные станы** [Электронный ресурс] : учебное пособие / Игорь Геннадьевич Шубин ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,31 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.  
ISBN 978-5-9967-1280-9

Учебное пособие составлено в соответствии с типовыми программами дисциплин «Технология производства металлоизделий», «Технологические процессы ОМД», «Технология глубокой переработки материалов», «Оборудование цехов ОМД», «Металлургические технологии», «Технология производства металлоизделий», «Физические свойства материалов», «Моделирование и оптимизация технологических процессов».

Представлен анализ выбора способа волочения и оборудования для его осуществления. Приведены материалы по основным типам волочильных машин для производства проволоки из черных и цветных металлов и сплавов. Представлен кинематический и прочностной расчеты прямоточных волочильных станов, а также прочностные расчеты тяговых деталей.

Предназначено для студентов-бакалавров, обучающихся по образовательным программам (ОП) ФГОС ВО по направлению 22.03.02 Металлургия, и для студентов-магистрантов, обучающихся по направлению 22.04.02 Металлургия, аспирантов, инженерно-технических работников, технологов и конструкторов метизных и машиностроительных заводов.

УДК 621.77

ISBN 978-5-9967-1280-9

© Шубин И.Г., 2018

© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова», 2018

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ.....	6
2. РАСЧЕТ СИЛЫ ВОЛОЧЕНИЯ.....	7
2.1. Формулы для определения силы волочения при протяжке стали.....	7
2.2. Определение напряжения противонатяжения.....	10
3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА.....	14
4. ВЫБОР СТАНА ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ.....	17
4.1. Прямоточные станы.....	18
4.2. Станы с накоплением проволоки и сдвоенными барабанами.....	18
4.3. Проволочно-волочильные станы с накоплением проволоки и верхним съемом.....	19
4.4. Станы многократного волочения со скольжением.....	20
5. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ, РАБОТАЮЩИХ БЕЗ СКОЛЬЖЕНИЯ И СО СКОЛЬЖЕНИЕМ.....	20
5.1 Прямоточные станы.....	21
5.2. Станы магазинного типа.....	21
5.3. Станы с накоплением проволоки и системой сдвоенных барабанов (Баркро).....	21
5.4. Станы многократного волочения со скольжением.....	22
6. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА.....	23
6.1. Выбор единичных и суммарных обжатий.....	23
6.2. Выбор кратности стана.....	26
6.3. Выбор кинематических вытяжек между тяговыми барабанами.....	27
6.4. Станы со скольжением.....	31
6.5. Скорости тяговых деталей.....	35
6.6. Скорость волочения.....	43
7. ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ.....	49
7.1. Разработка маршрутов волочения.....	50
7.2. Расчет на прочность узлов и деталей волочильного стана.....	51
7.3. Расчет коэффициента полезного действия волочильного стана.....	53
7.4. Расчет динамических нагрузок на тяговых деталях волочильных станов.....	55
8. ТЯГОВЫЕ ДЕТАЛИ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ.....	57
8.1. Расчет диаметра тяговых деталей волочильных станов.....	59

8.2. Прочностной расчет тягового барабана.....	64
8.3. Профиль галтели тягового барабана .....	66
9. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА .....	69
9.1. Выбор способа волочения .....	69
9.2. Проверка суммарного и выбор единичного обжатий.....	69
9.3. Расчет кратности стана .....	69
9.4. Выбор схемы движения проволоки по тяговым шайбам.....	69
9.5. Выбор кинематических вытяжек между тяговыми шайбами.....	71
9.6. Разработка кинематической схемы стана .....	71
9.7. Выбор скорости волочения .....	73
9.8. Расчет маршрутов волочения.....	73
9.9. Расчет коэффициента полезного действия .....	76
9.10. Определение мощности двигателя .....	76
9.11. Прочностной расчет деталей и узлов стана.....	77
9.12. Прочностной расчет тяговых шайб .....	78
9.13. Расчет угла нуклона образующей галтели тяговой шайбы (параграф 8.3) .....	79
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	80

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие ряда отраслей промышленности, таких как электромашиностроение, приборостроение, кабельная, автотракторная и авиационная, связано с потреблением продукции проволочного производства. Выпуск этой продукции в значительной мере зависит от состояния существующего оборудования и рационального построения технологических процессов производства проволоки, от развития новых высокоскоростных и автоматизированных волочильных станков.

Важнейшим резервом повышения производительности труда проволочного производства является увеличение обжатый и скоростей волочения. Статистические данные показывают, что при многократном волочении проволоки потери времени на смену износившихся деталей в среднем составляют 10-12% машинного времени.

Улучшение коэффициента использования машинного времени, разработка новых технологических маршрутов и создание высокопроизводительного оборудования тесно связаны с расчетом основных несущих узлов станков и технологического процесса в целом.

Расчет волочильного стана состоит в определении основных параметров деформации, расчетов мощности двигателя, разработки кинематической схемы стана и проверке на прочность наиболее нагруженных деталей.

Накопившийся к настоящему времени опыт проектирования, расчета, освоения и эксплуатации волочильных станков позволяет обобщить, имеющийся материал. В учебном пособии выполнена систематизация существующих разрозненных разработок по расчету волочильных машин и построению технологических маршрутов волочения.

При написании этой работы автор использовал труды А.Й. Целикова, И.Л. Перлина, И.А. Юхвеца, Б. Горловского, М. Когоса и других ученых.

## 1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

Волочением называется способ обработки металлов давлением, при котором обрабатываемый металл в виде заготовки постоянного поперечного сечения вводится в канал волочильного инструмента (волоки) и протягивается, (проволакивается) через него. Форма поперечного сечения канала одинакова или близка к форме поперечного сечения протягиваемого металла. Сечение канала плавно уменьшается от места входа металла в инструмент к месту выхода из него. Выходное сечение канала всегда меньше поперечного сечения протягиваемой заготовки. Поэтому заготовка, проходя через волоку, деформируется, поперечное сечение ее изменяется, и она после выхода из волоки принимает форму и размеры наименьшего сечения канала. Длина полосы при этом возрастает прямо пропорционально уменьшению поперечного сечения.

Волочение можно вести через одну волоку либо одновременно через несколько. В первом случае волочение называют однократным, во втором - многократным. Соответственно этому различают две группы волочильных станков - однократные и многократные.

Процесс волочения принято характеризовать следующими основными геометрическими показателями, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Показатели		Показатель, выраженный через					
Название	Обозначение	$F_n u F_k$	$L_n u L_k$	$\mu$	$i_l$	$\delta$	$\lambda$
Вытяжка	$\mu$	$F_n / F_k$	$L_k / L_n$	$\mu$	$\exp i_l$	$\frac{1}{1-\delta}$	$1+\lambda$
Интегральная деформация удлинения	$i_l$	$\frac{F_n}{\ln F_k}$	$\frac{L_k}{\ln L_n}$	$\ln \mu$	$i_l$	$\frac{1}{\ln 1-\delta}$	$\ln(1+\lambda)$
Относительное обжатие	$\delta$	$\frac{F_n - F_k}{F_n}$	$\frac{L_k - L_n}{L_k}$	$\frac{\mu-1}{\mu}$	—	$\delta$	$\frac{\lambda}{1+\lambda}$
Относительное удлинение	$\lambda$	$\frac{F_n - F_k}{F_k}$	$\frac{L_k - L_n}{L_n}$	$\mu-1$	—	$\frac{\delta}{1-\delta}$	$\lambda$

Где:

$F_n$  - площадь поперечного сечения до волочения,

$F_k$  - площадь поперечного сечения после волочения,

$L_n$  - начальная длина протягиваемого изделия,

$L_k$  - конечная длина протягиваемого изделия.

При волочении различают единичное обжатие (обжатие за протяжку)  $\delta_{ед}$  и суммарное (за ряд переходов)  $\delta_{сум}$ .

Процесс пластической деформации сопровождается упрочнением металла. О степени упрочнения, характеризуемого увеличением предела прочности проволоки, судят по общему обжатию  $\delta_{сум}$ . За исходное сечение для определения  $\delta_{сум}$  принимают сечение заготовки.

Кривые изменения  $\sigma_b$  в зависимости от  $\delta_{\text{сум}}$  для стали, меди и медных сплавов приведены на рис. 3 и 4.

## 2. РАСЧЕТ СИЛЫ ВОЛОЧЕНИЯ

Сила волочения является внешней силой, которую нужно приложить к переднему концу протягиваемой проволоки для того, чтобы осуществить процесс ее протягивания через волоку.

Деформация при волочении происходит в результате воздействия на проволоку внешних деформирующих сил:

- а) активных (сила волочения), прилагаемых к переднему концу проволоки;
- б) реактивных сил давления, возникающих в итоге противодействия стенок канала волочильного инструмента;
- в) сил внешнего трения, возникающих между стенками волочильного канала и протягиваемой проволокой.

Основными параметрами, определяющими силу волочения, являются: усилие деформации, трение между протягиваемой проволокой и инструментом и противонатяжение

$$P = f(p; Q; T), \quad (1)$$

где:  $P$  – сила волочения,

$p$  – удельное усилие деформации,

$Q$  – противонатяжение,

$T$  – сила трения на контактной поверхности очага деформации.

Указанные параметры находятся в сложной функциональной зависимости от многих факторов, к которым прежде всего относятся; прочностные свойства протягиваемого металла, степень деформации за переход, форма продольного профиля канала, свойства и качества поверхностей скольжения, противонатяжение, скорость волочения, диаметр протягиваемой проволоки.

Проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследований с целью разработки аналитического метода определения силы волочения. Ниже приводятся некоторые формулы для определения силы волочения. При их выводе сделан ряд допущений с целью упрощения вывода. Это снижает их точность, но последней вполне достаточно для практических расчетов.

### 2.1. Формулы для определения силы волочения при протяжке стали

Формула А.Н. Целикова [1, 2]:

$$P = kF_1 \left(1 + \frac{tg\alpha}{f}\right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\sigma_s}{k} \frac{1}{1 + \frac{tg\alpha}{f}} \right) \left( \frac{d_1}{d_0} \right)^{\frac{2f}{tg\alpha}} \right], \quad (2)$$

где:  $P$  – сила волочения, н;

$k$  – сопротивление пластической деформации при простом растяжении, н/мм<sup>2</sup>.

Условно принимаемое как среднее арифметическое из пределов прочности металла до и после волочения:

$$k = \frac{\sigma_{в.н} + \alpha_{в.к}}{2}$$

$\alpha$  – угол наклона образующей волочильного канала к его оси;

$\sigma_g$  – напряжение противонапряжения, н/мм<sup>2</sup>;

$f$  – коэффициент трения между поверхностью волоки и протягиваемой проволокой;

$F_0$  и  $F_1$  – площади сечения проволоки до и после волочения, мм<sup>2</sup>;

$d_0$  и  $d_1$  – диаметры проволоки до и после волочения, мм.

Формула И.Л. Перлина [2, 3]:

$$P = F_1 \left\{ k \left[ 1 + \frac{tg \alpha^1}{f} \right] \left[ 1 - \left( \frac{F_1}{F_0} \right)^{\frac{f}{tg \alpha^1}} \right] + \sigma_g \left( \frac{F_1}{F_0} \right)^{\frac{f}{tg \alpha^1}} \right\}, \quad (3)$$

где:  $\alpha^1$  – приведенный угол, условно включающий в длину обжимающего конуса длину калибрующей части волоки (рис.1). Указанный угол вводится для упрощения расчета и определяется по формуле:

$$tg \alpha^1 = \frac{(d_0 - d_1) tg \alpha}{d_0 - d_1 + tg \alpha * l_1}, \quad (4)$$

где:  $l_1$  – длина калибрующей зоны волоки.

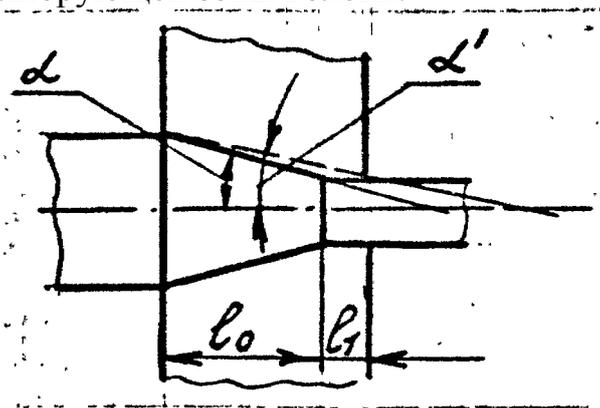


Рис. 1. Схема для определения приведенного угла  $\alpha^1$ .

Формула И.Л. Перлина упрощенная:

$$P = F_1 \left\{ \ln \frac{F_0}{F_1} \left[ k + f * ctg \alpha^1 (k - \sigma_g) \right] + \sigma_g \right\} \quad (5)$$

Формула Р.Б. Красильщикова [4].

Применяется при определении силы волочения в случае отсутствия противонапряжения.

$$P = 0,6 * d_0^2 * \sigma_{\text{ср}} * \sqrt{\frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2}} \quad (6)$$

где:  $\sigma_{\text{ср}}$  - средний предел прочности, н/мм<sup>2</sup>

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{в.н}} - \sigma_{\text{в.к}}}{2} \quad (7)$$

где:  $\sigma_{\text{в.н}}$  - предел прочности до протяжки, н/мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{\text{в.к}}$  - предел прочности после протяжки, н/мм<sup>2</sup>.

Проведенные расчеты показывают, что формула Красильщикова может быть применена для расчета силы волочения и при наличии противонапряжения. Для этого в указанную формулу вводится числовой коэффициент 1,3 и формула принимает вид:

$$P = 1,3 * 0,6 * d_0^2 * \sqrt{\frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2}} \quad (8)$$

Выражение (8) дает результаты, точность которых не уступает формулам А.Н. Целикова и И.Л. Перлина.

Вышеприведенные формулы применяются для определения силы волочения при протяжке сталей.

Влияние противонапряжения на изменение силы волочения может быть учтено по формуле Клубиной Т.Г., Винницкого А.А. [5].

$$K_q = K_0 + \left( \mu - \frac{K_0}{\sigma_{\text{в.0}}} \right) \sigma_g \quad (9)$$

где:  $K_g$  - напряжение волочения с противонапряжением, н/мм<sup>2</sup>;

$\mu$  - вытяжка;

$K_0$  - напряжение волочения без противонапряжения, н/мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{\text{в.0}}$  - предел прочности проволоки перед протяжкой, н/мм<sup>2</sup>;

$\sigma_g$  - напряжение противонапряжения, н/мм<sup>2</sup>.

Силу волочения при протяжке меди и медных сплавов рекомендуется определять по формуле Зибеля:

$$P = k * F_1 * \ln \frac{F_0}{F_1} [1 + A * f(\text{ctg} \alpha + \text{tg} \alpha)] \quad (10)$$

где:  $A = \frac{a+b}{1,76\sqrt{ab}}$  - для полосы (а – высота полосы, b – ширина),

$A = \frac{2}{1,76}$  - для круга,

Значения величин  $\sigma_{\text{в.н}}$  и  $\sigma_{\text{в.к}}$  в зависимости от суммарного обжатия  $\sigma_{\text{сум}}$

приведены в диаграммах на рисунках 3,4. Значения величин  $\alpha$ ,  $f$ ,  $l$  приведены в таблицах 2, 3, 4, 5.

## 2.2. Определение напряжения противонатяжения

Для уменьшения внешнего трения и повышения стойкости канала часто применяют метод волочения с противонатяжением (рис.2).

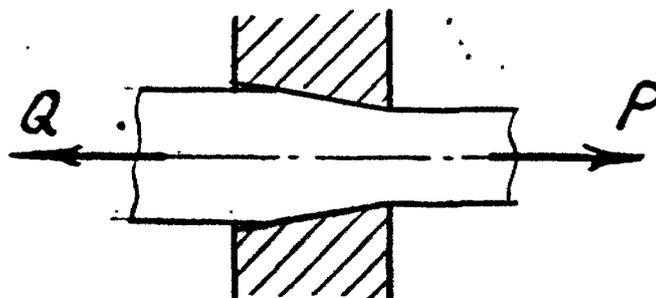


Рис. 2. Схема волочения с противонатяжением

Сущность его заключается в следующем. К протягиваемому металлу со стороны входа его в волоку прикладывают силу  $Q$ , направленную в сторону, противоположную движению металла, и поэтому называемому противонатяжением. От этого в проволоке еще до ее входа в волочильный канал в осевом направлении создаются растягивающие напряжения. Они вызывают уменьшение давления на стенки канала, что, естественно, увеличивает стойкость последнего.

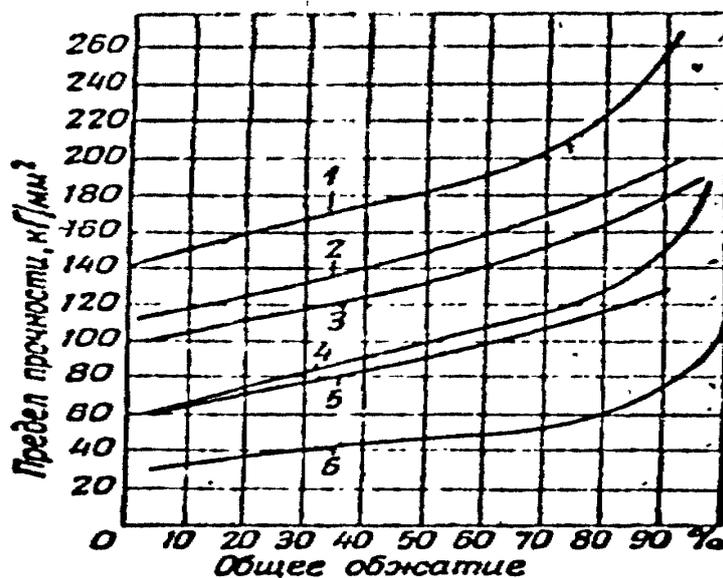


Рис. 3. Предел прочности стальной проволоки в зависимости от обжатия: 1 - патентованная проволока, содержащая 0,9 % С; 2 - патентованная пружинная проволока, содержащая 0,7 % С; 3 - патентованная канатная проволока, содержащая 0,4 % С; 4 - патентованная канатная проволока, содержащая 0,3 % С; 5 - отожженная игольная проволока, содержащая 0,9% С; 6 - желе-

зо Армко, содержащее 0,02 % С.

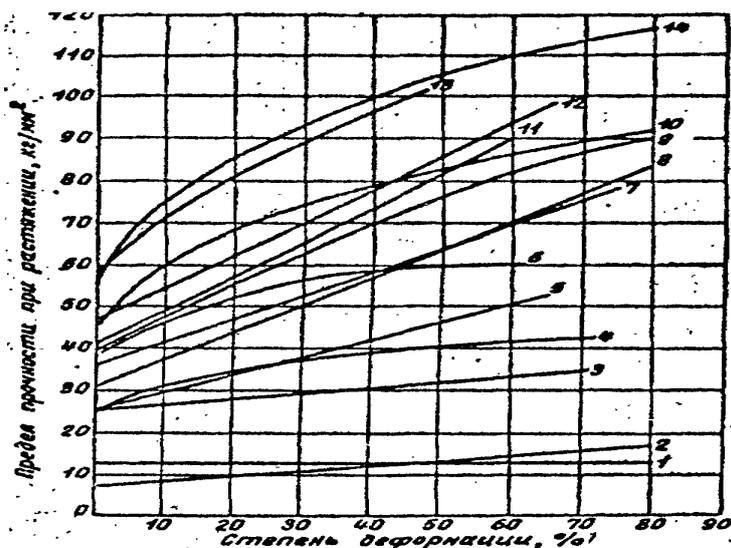


Рис. 4. Влияние степени холодной деформации на предел прочности некоторых цветных металлов и сплавов:

1-цинк; 2-алюминий; 3-дуралюминий Д1 (отожженный); 4-медь; 5-латунь Л96; 6-мельхиор МН70-30; 7-латунь ЛС59-1; 8-латунь ЛС62; 9-латунь никелевая ЛН65-5; 10-монель-металл НИЖМц 28-2,5-1,5; 11-бронза кремнемарганцовистая БрКМЦ 3-1; 12-бронза оловяннофосфористая БроФ 6,5-0,4; 13-бронза бериллиевая БрБ2; 14-хромель Нх 9,5.

Таблица 2

Расчетные средние величины коэффициента контактного трения (по нормальному давлению) при волочении сплошных круглых профилей при отсутствии гидродинамического или гидростатического вводов смазки

Протягиваемый металл или сплав	Материал волокни			
	Состояние металла	Сталь	Твердый сплав	Технич. алмаз
Малоуглеродистые стали	Отож.	0,07	0,06	0,05
	Упрочн.	0,06	0,05	0,04
Высокопрочные стали	Отож.	--	0,05-0,08	--
	Гор. Вол.	--	0,13-0,18	--
Медь и сплавы на медно-цинковой основе	Отож.	0,08	0,07	0,06
	Упрочн.	0,07	0,06	0,05
Бронзы, никель и сплавы на никелевой и медноникелевой основе	Отож.	0,07	0,06	0,05
	Упрочн.	0,06	0,05	0,04
Алюминий	Отож.	0,11	0,10	0,09
	Упрочн.	0,10	0,09	0,08
Дуралюмины	Отож.	0,09	0,08	0,07
	Упрочн.	0,08	0,07	0,07
Титан и его сплавы	Отож.	--	0,10	--

	Упрочн.	--	0,08	--
	Гор. вол.	--	0,17-0,21	--

Окончание табл. 2

Протягиваемый металл или сплав	Материал волокни			
	Состояние металла	Сталь	Состояние металла	Технич. алмаз
Цинк и его сплавы	--	0,11	0,10	
Свинец	--	0,15	0,12	
Вольфрам и молибден	Нагрев до 700-900 С	--	0,25	0,20
Молибден	холодный	--	0,15	0,12
Цирконий	Отож.	--	0,11-0,13	--
	Упрочн.	--	0,08-0,09	--

Таблица 3

Величина углов наклона образующей волоочильного канала применяемых при волочении в условиях отсутствия гидродинамического (\*) и гидростатического (^) вводов смазки

Протягиваемый металл или сплав	Форма поперечного сечения	Материал волокни	(*) α, град	(^) α, град
Медноникелевые сплавы, бронзы, среднеуглеродистые стали, медь, латунь, дуралюмин, алюминий, никелевые сплавы	Прутки круглые	сталь	6 - 12	12 - 15
Никелевые, медноникелевые сплавы, бронза, высоко и среднеуглеродистые стали. Медь, латунь, мягкие стали, алюминий и его сплавы Свинец и его сплавы Титан и его сплавы Вольфрам и молибден (700, .900)	Проволока круглая диаметром > 0,25мм	твердые сплавы	б 7 - 9 7 - 8	18 9 - 12 6 - 10
Никелевые, медноникелевые сплавы, бронза, стали высоко и среднеуглеродистые Медь, латунь, мягкие стали, алюминий и его сплавы Вольфрам и молибден (700...900)	Проволока, круглая диаметром <0,25мм	технический алмаз	5 6 - 7	7 8 - 9
Цирконий и цирколой	Проволока круглая	твердые сплавы	5	6 - 8

Медь, латунь, медноникелевые сплавы, алюминий и его сплавы	Прутки, проволока некруглой формы	Сталь, твердые сплавы	7 - 8	15 - 14
--	-----------------------------------	-----------------------	-------	---------

Таблица 4

Зависимость геометрии канала чистовых волок от величины средних единичных обжатий при волочении стальной проволоки с сухими и жидкими смазками

При сухом волочении			При волочении с жидкими смазками			
$\delta_{ед}, \%$	$2\alpha^0$	$2\gamma^0$	$\delta_{ед}, \%$	$2\alpha^0$	$2\gamma^0$	$2\gamma^0$
5-8			6	40	60	40
8-12	8	40	8-12	10	60	40
12-16	10	40	12-16	12	60	40
16-25	12	40	16-22	15	60	40
25-35	15	40	22-28	18	60	40
35-45	18	40	-	-	-	

Таблица 5

Зависимость геометрии канала чистовых волок из твердых сплавов от диаметра протягиваемой высокоуглеродистой стальной проволоки для двух заводов

Россия				США			
Диаметр проволоки, мм	$2\alpha^0$	Отношение высоты калибрующей зоны к диаметру d, %	$2\gamma^0$	Диаметр проволоки, мм	$2\alpha^0$	Отношение высоты калибрующей зоны к диаметру, d%	$2\gamma^0$
0.3-1	6	100	70				
1-3	8	80	70	1,3-3,4	12	30	90
3-5	10	65	70	3,5-5,3	16	30	90
5-12	12	50	70	5,4-7,7	18	30	90
>12	14	30	70	>7,7	18	20	90

Следует различать минимальное противонатяжение и допустимое.

Минимальная величина противонатяжения должна быть такой, чтобы:

а) обеспечить определенное натяжение проволоки с целью установления устойчивого режима работы стана;

б) создавать достаточные силы трения между проволокой и рабочей поверхностью тяговой детали для обеспечения надежной передачи движения от тяговой детали к проволоке.

Величину противонатяжения можно приближенно определить из формулы Эйлера.

$$Q = \frac{P}{e^{2\pi n f}}, \quad (11)$$

где:  $P$  - сила волочения, н;

$f$  - коэффициент трения между тяговой деталью и проволокой;  
 $m$  - число витков.

Для осуществления процесса волочения, например в  $n$  волоке (рис.5) необходимо создать противонапряжение перед  $n+1$  волокой равное  $Q_{n+1}$ , определяемое выражением

$$Q_{n+1} = \frac{P_n}{e^{2\pi m f}} \quad (12)$$

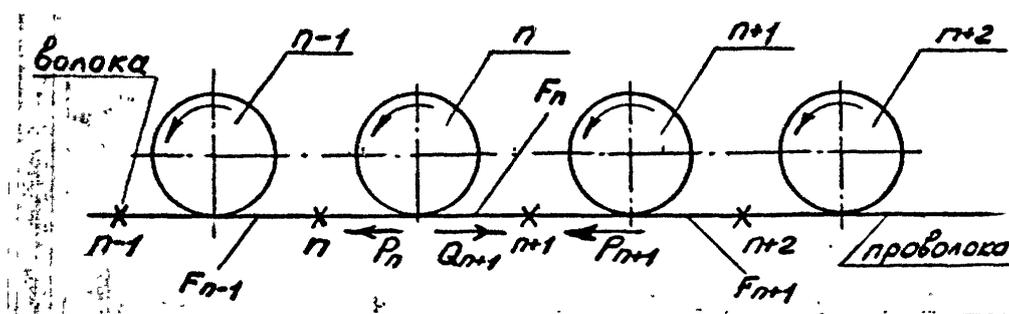


Рис. 5. Схема волочения на прямоточном стане

При определении силы волочения в  $n+1$  волоке, равное  $P_{n+1}$ , в вышеприведенные формулы необходимо подставлять напряжение противонапряжения

$$\sigma_{gn+1} = \frac{Q_{n+1}}{F_n}, \quad (13)$$

где;  $F_n$  - площадь сечения проволоки после  $n$  волоки,  $\text{мм}^2$ .

Максимальное напряжение противонапряжения ограничивается пределом текучести материала проволоки  $\sigma_T$  после каждой протяжки.

### 3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА

Наиболее полно все виды энергетических затрат отражаются в процессе многократного волочения со скольжением. Поэтому расчет потребной мощности двигателя начнем с рассмотрения этого вида волочения.

По мнению И.Л. Перлина мощность двигателя расходуется на [3]:

- а) осуществление процесса волочения;
- б) потери на трение, возникающее между витками проволоки и шайбами;
- в) изгиб проволоки около шайбы, происходящий при набегании проволоки на шайбу и сбегании с нее;
- г) потери на трение в механизмах стана;
- д) холостой ход стана.

Для осуществления процесса волочения с помощью тяговой шайбы необходимо к сбегавшему концу проволоки приложить усилие противонапряжения, определяемое по формуле (11).

В момент полного сцепления проволоки с цилиндрической поверхностью тяговой шайбы (в данном случае при идеальном процессе многократного воло-

чения со скольжением, т.е. в отсутствии скольжения) тяговое усилие, равное окружной силе, определится соотношением (рис.6):

$$P_0 = P - Q \quad (14)$$

Мощность, потребная на осуществление процесса волочения вращающейся тяговой шайбы, равна:

$$N_n = (P_n - Q_n) \cdot B_n = P_n \left( 1 - \frac{1}{e^{2 \cdot \pi \cdot m \cdot f}} \right) B_n \quad (15)$$

где:  $P_n$  - сила волочения "n" шайбы, н;

$Q_n$  - противонапряжение "n" шайбы, н;

$B_n$  - скорость движения проволоки "n" шайбы, м/с;

$e$  - основание натурального логарифма.

Мощность, потребляемая всеми шайбами с учетом того, что  $Q_x = 0$ :

$$N_{\text{гол}} = \sum_{n=1}^{n=k} (P_n - Q_n) B_n = \sum_{n=1}^{n=k-1} P_n \left( 1 - \frac{1}{e^{2 \cdot \pi \cdot m \cdot f}} \right) B_n + P_k \cdot B_k \quad (16)$$

где:  $P_n$  - сила волочения n-ой шайбы, н;

$Q_n$  - противонапряжение n-ой шайбы, н;

$B_n$  - скорость движения проволоки n-шайбы, м/с.

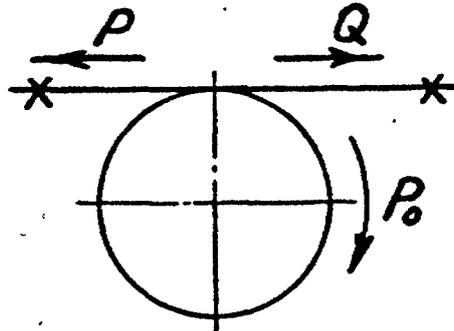


Рис. 6. Схема сил, действующих при многократном волочении со скольжением

Поскольку скорость взаимного перемещения шайбы относительно проволоки равна  $V_n - B_n$ , а сила трения, согласно формулы Эйлера, есть разность между силами на набегающем и сбегавшем участках гибкого тела, в данном случае  $P_n - Q_n$ , то потери на трение на каждой шайбе составляют:

$$(P_n - Q_n)(V_n - B_n) = P_n \left( 1 - \frac{1}{e^{2 \cdot \pi \cdot m \cdot f}} \right) (V_n - B_n) \quad (17)$$

где:  $V_n$  - линейная скорость рабочей поверхности n-ой шайбы, м/с.

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения на всех шайбах, с учетом того, что на чистовой шайбе  $V_n = B_n$ , равна:

$$N_{\text{тр}} = \sum_{n=1}^{n=k-1} (P_n - Q_n)(V_n - B_n) = \sum_{n=1}^{n=k-1} P_n \left( 1 - \frac{1}{e^{2 \cdot \pi \cdot m \cdot f}} \right) (V_n - B_n) \quad (18)$$

Мощность, затрачиваемая на изгиб или разгибание витка проволоки около

одной шайбы, определится следующим образом: окружное усилие  $M$  (рис.7), необходимое для изгиба проволоки, имеющей момент сопротивления  $W_s$ , определится из равенства моментов:

$$M \cdot r = \sigma_T \cdot W_s, \quad (19)$$

где:  $r$  - радиус шайбы, мм;

$\sigma_T$  - предел текучести проволоки, н/мм<sup>2</sup>.

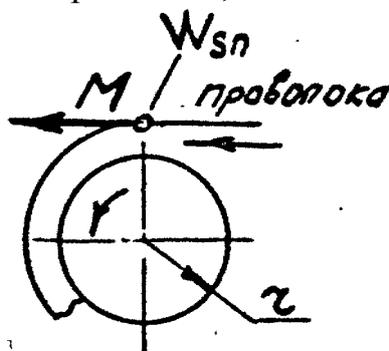


Рис. 7. Схема к определению мощности, расходуемой на изгиб проволоки около шайбы.

Мощность, необходимая для изгиба проволоки, движущейся со скоростью  $B_n$  на  $n$ -ой шайбе, определится выражением

$$M \cdot B_n = \frac{\sigma_{Tn} \cdot W_{sn}}{r_n} \cdot B_n \quad (20)$$

Мощность, расходуемая на изгиб и разгибание проволоки на всех шайбах и тяговом конусе, определится выражением

$$N_{изг} = \sum_{n=1}^{n=k-1} 2 \cdot \frac{\sigma_{Tn} \cdot W_{sn}}{r_n} \cdot B_n + \frac{\sigma_{Tk} \cdot W_{sk}}{r_{кон}} \cdot B_k \quad (21)$$

В случае приема проволоки на катушку намоточного аппарата выражение (21) принимает вид

$$N_{изг} = \sum_{n=1}^{n=k} 2 \cdot \frac{\sigma_{Tn} \cdot W_{sn}}{r_n} \cdot B_n \quad (22)$$

Множитель 2 учитывает изгиб и разгиб проволоки на каждой шайбе. Последний член выражения (21) - только изгиб на тяговом конусе ( $r_{кон}$  - средний радиус тягового конуса).

Мощность, необходимая на преодоление сил трения в механизмах волочильного стана учитывается коэффициентом  $\eta$  (кпд), определяемым на основании кинематической схемы стана. Методика определения КПД волочильного стана приведена далее.

Необходимая мощность на валу двигателя определится из следующего выражения

$$N = \frac{N_{\text{вол}} + N_{\text{мп}} + N_{\text{изз}}}{\eta} + N_{\text{xx}} = \frac{1}{\eta} \left[ \sum_{n=1}^{n=k-1} P_n \left( 1 - \frac{1}{e^{2 \cdot \pi \cdot m \cdot f}} \right) B_n P_k \cdot B_k + 2 \cdot \sum_{n=1}^{n=k-1} \frac{\sigma_{Tn} \cdot W_{sn}}{r_n} \cdot B_n + \frac{\sigma_{Tk} \cdot W_{sk}}{r_{\text{кон}}} \cdot B_k \right] + N_{\text{xx}} \quad (23)$$

где:  $N_{\text{xx}}$  - мощность холостого хода стана, определяемая на основании кинематической схемы стана, качественных характеристик передающих механизмов и массы вращающихся деталей;

$W_s$  - момент сопротивления пластическому изгибу, равный  $W_s = c \cdot W$ ,

где:  $W$  - момент сопротивления упругого изгиба;

$c$  - коэффициент, равный 1,7 для круглого и 1,5 для прямоугольного сечений.

Для определения мощности на валу двигателя волочильных станов без скольжения с синхронизацией скоростей достаточно в предлагаемой И.Л. Перлиным [3] формуле (23) величинам  $B_n$  придать значения средних скоростей каждого тягового барабана.

Для определения мощности на валу двигателя волочильных станов без скольжения магазинного типа достаточно в формуле (25) исключить член

$\frac{1}{e^{2 \cdot \pi \cdot m \cdot f}}$ , т.к. при большом количестве витков он практически превращается в нуль.

Для определения мощности на валу двигателя однократного волочильного стана  $k = 1$  формула (23) преобразуется следующим образом:

$$N = \frac{1}{\eta} \left( PB + \frac{\sigma_{Tk} \cdot W_{sk}}{r_n} \right) + N_{\text{xx}} \quad (24)$$

#### 4. ВЫБОР СТАНА ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ

Оборудование, проектируемое для волочения проволоки, классифицируется следующим образом [6, 7, 8, 9]:

А. Волочильные станы работающие без скольжения проволоки (линейные скорости рабочей поверхности тяговой детали и проволоки совпадают). К этой группе относятся как однократные, так и многократные станы. К последним относятся:

а) прямоточные;

б) станы с накоплением проволоки и системой сдвоенных барабанов /Баркро/;

в) станы с накоплением проволоки и верхним ее съемом (магазинные).

Б. Волочильные станы, работающие со скольжением (линейная скорость рабочей поверхности тяговой шайбы больше линейной скорости проволоки). Станы со скольжением изготавливаются только многократными.

## 4.1. Прямоточные станы

Под прямоточными волочильными станами (станами "жесткого" волочения) понимаются многократные станы, работающие без накопления проволоки на тяговых барабанах (на каждый барабан наматывается не более 10 витков). Проволока подается тангенциально (рис.5) с предыдущих барабанов на последующие без закручивания. Число оборотов барабанов устанавливается и регулируется в соответствии с вытяжкой проволоки.

Благодаря отсутствию закручивания проволоки, прямоточные станы проектируются главным образом для волочения высокоуглеродистой стальной проволоки диаметром свыше 2 мм. В последнее время они проектируются так же и для скоростного волочения других материалов - латуни, никеля, бронзы и т.д.

Исходный диаметр проволоки, подвергаемой волочению, на прямоточных станах колеблется в пределах от 14 мм до 2 мм [10]. Имеются данные о волочении проволоки с исходного диаметра 18 мм. Предел прочности заготовки колеблется в пределах от 400 н/мм<sup>2</sup> до 1400 н/мм<sup>2</sup> [10].

Скорость волочения в зависимости от диаметра заготовки и предела прочности колеблется от 2,5 м/с до 20 м/с [10].

## 4.2. Станы с накоплением проволоки и сдвоенными барабанами

Это вариант стана с накоплением, применяемый для высоких скоростей волочения.

Принцип работы станков Баркро: на каждой ступени волочения имеется два соосных барабана, сидящих на одном валу и расположенных один над другим (рис.8). Нижний барабан (приводной) посажен неподвижно на вал, верхний - имеет свободу вращения относительно вала. Между барабанами установлен обводной ролик. Проволока приводным (нижним) барабаном протягивается через волоку и перемещается по нему вверх. С помощью обводного ролика она переводится в обратном направлении на верхний барабан, с которого тангенциально снимается на следующий приводной барабан.

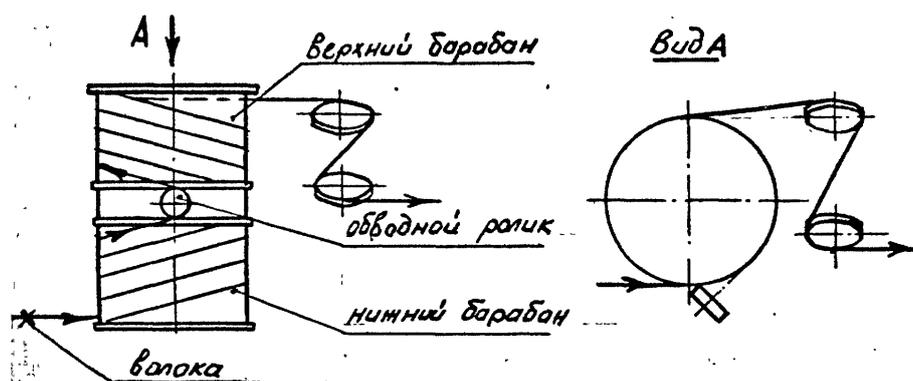


Рис. 8. Схема движения проволоки на волочильном стане

### со сдвоенным барабаном

Оба барабана заполнены примерно одинаковым числом витков проволоки. Верхний барабан, приводимый в движение проволокой вращается в направлении обратном нижнему барабану. При равенстве скоростей набегающего и сбегающего концов проволоки обводной ролик стоит неподвижно. При увеличении запаса проволоки на приводном барабане (приводной барабан вращается с большей скоростью, чем верхний) ролик движется в направлении вращения последнего. При уменьшении запаса - направление движения ролика - обратное. Этот принцип действия обеспечивает волочение проволоки без скручивания, и благодаря запасу ее на системе барабанов способствует лучшему ее охлаждению по сравнению с прямоточными станами. Кроме того, при такой конструкции не требуется точное регулирование скоростей барабанов в соответствии с фактическими вытяжками проволоки, т.к. наличие запаса проволок допускает значительное рассогласование скоростей, вплоть до остановки одного из них.

Для привода применяются двигатели переменного тока, что значительно удешевляет конструкцию волочильных станов описываемого типа.

Станы проектируются для высокоскоростного волочения (до 17,5 м/с.) высоко и низкоуглеродистой стальной проволоки.

Диаметр заготовки от 7 мм до 1,2 мм, предел прочности заготовки от 400 до 1400 н/мм<sup>2</sup>. Диаметр готовой проволоки колеблется от 2 мм до 0,45 мм. Кроме того, станы указанного типа проектируют и для волочения алюминиевой проволоки с диаметра 9,5 мм на диаметр 2,5 мм со скоростью 15 м/с на выходе, и с диаметра 5,9 мм на диаметр 1,57 мм со скоростью 17,5 м/с на выходе.

### **4.3. Проволочно-волочильные станы с накоплением проволоки и верхним съемом**

На станах указанного типа каждый волочильный барабан имеет определенный запас проволоки (не менее 7-12 витков). Передача проволоки на последующий барабан идет не по кратчайшему пути, а через верх барабана и отклоняющий ролик (рис.9). Указанный метод перехода проволоки допускает независимую друг от друга работу барабанов, т.е. каждый барабан в единицу времени может принимать на себя и отдавать на последующий разное количество витков проволоки - большее, меньшее или равное. В том случае, когда процесс волочения идет с увеличением или уменьшением числа витков на барабане, проволока закручивается относительно своей оси. Если же число витков проволоки на барабане, постоянно, то закручивание отсутствует (идеальный процесс). На практике такой процесс волочения трудно достижим вследствие износа волок. При снятии проволоки с неподвижного барабана поводок, делая полный оборот, закручивает проволоку относительно своей оси на 360 градусов. Через небольшой промежуток времени проволока может разрушиться от перекручивания.

Указанные станы проектируются для волочения высоко и низкоуглеродистой проволоки и проволоки из мягких металлов и сплавов. Воз-

возможность закручивания витка проволоки на 360 градусов, о чем говорилось выше, вызывает много трудностей, особенно при волочении высокопрочной стальной проволоки для пружин, т.к. проволока приобретает остаточные внутренние напряжения. Максимальная скорость волочения 10 м/с. [10]. Повышение скорости осложнено наличием поводка, являющегося причиной частых обрывов проволоки, и большой длиной проволоки до следующей волюки.

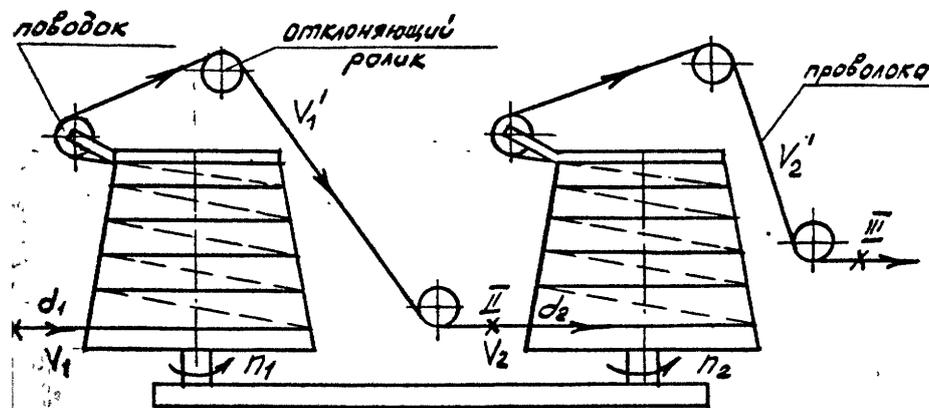


Рис. 9. Схема движения проволоки на волочильном стане магазинного типа

На станах магазинного типа перерабатывают проволоку с исходный диаметром от 10 мм до 2 мм, проволока диаметром более 10 мм не поддается или поддается с трудом пропуску через отклоняющие ролики.

#### 4.4. Станы многократного волочения со скольжением

Волочильные станы со скольжением проектируются для многократного волочения стальной, алюминиевой, медной, а так же проволоки из других цветных металлов и сплавов.

Особенностью процесса волочения на указанных станах является неравенство окружных скоростей тяговых деталей (шайб) и проволоки навитой на эти шайбы. Наличие скольжения необходимо для поддержания постоянства секундного объема проволоки при волочении.

Волочильные станы со скольжением используются для волочения:

- медной проволоки с диаметра 15 мм со скоростью до 50 м/с;
- низкоуглеродистой стальной проволоки с диаметра 2 мм до диаметра 0,8 - 0,46 мм со скоростью от 6,16 м/с до 12,5 м/с;
- высокоуглеродистой стальной проволоки с  $\sigma_b = 1400 \text{ н/мм}^2$  с диаметра 3,3 мм - 1,6 мм до диаметра 1,2 мм - 0,75 мм со скоростью от 6,16 м/с до 10 м/с.

### 5. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ, РАБОТАЮЩИХ БЕЗ СКОЛЬЖЕНИЯ И СО СКОЛЬЖЕНИЕМ

В предыдущей главе дана классификация станов по способу волочения,

приведены исходные и конечные размеры проволоки, ее прочностные характеристики. На основании материала представленного в 4-ом разделе можно также заключить, что определенный типоразмер проволоки может перерабатываться на различных станах (табл.6). Таблица составлена на основании данных, приведенных в работах [6, 10].

При выборе способа волочения необходим тщательный анализ достоинств и недостатков основных типов волочильных станов. Рассмотрим их подробнее.

### **5.1 Прямоточные станы**

#### Преимущества:

- а) отсутствие скручивания протягиваемой проволоки;
- б) простая схема движения проволоки от барабана к барабану;
- в) пригодность для волочения толстой проволоки (до 18 мм);
- г) надежное волочение при высоких скоростях;
- д) простая и легкая заправка стана.

#### Недостатки:

- а) плохое охлаждение проволоки вследствие малого числа витков проволоки на барабане;
- б) высокая стоимость;
- в) сложная конструкция привода с регулировкой скорости;
- г) длительные простои при обрыве проволоки.

### **5.2. Станы магазинного типа**

#### Преимущества:

- а) простая конструкция привода;
- б) несложное управление;
- в) незначительные простои при обрыве;
- г) хорошее охлаждение проволоки;
- д) относительно низкая стоимость.

#### Недостатки:

- а) волочение проволоки с перекручиванием;
- б) сложная схема движения проволоки от барабана к барабану;
- в) ограничение скорости волочения вследствие верхнего съема проволоки;
- г) сложная заправка больших диаметров проволоки;
- д) возможность волочения только ограниченного диапазона размеров проволоки.

### **5.3. Станы с накоплением проволоки и системой сдвоенных барабанов (Баркро)**

Эти конструкции объединяют в себе существенные преимущества прямоточных волочильных машин и станов магазинного типа.

Преимущества в сравнении со станами магазинного типа:

- а) отсутствие перекручивания проволоки;
- б) схема движения проволоки от барабана к барабану более простая;
- в) более высокая скорость волочения.

Преимущества в сравнении с прямоточными станами:

- а) лучшее охлаждение проволоки благодаря запасу ее на системе барабанов;
- б) более простая схема электропривода;
- в) более низкая стоимость.

Недостатки:

- а) ограничение по верхнему диапазону диаметров перерабатываемой проволоки;
- б) сложная заправка больших диаметров проволоки;
- в) относительно невысокие скорости волочения.

#### **5.4. Станы многократного волочения со скольжением**

Преимущества:

- а) простая схема движения проволоки;
- б) хорошее охлаждение проволоки, благодаря жидкой технологической смазке;
- в) возможность волочения с высокими скоростями;
- г) простая схема электропривода;
- д) компактность стана.

Недостатки:

- а) потери энергии на трение между проволокой и тяговой шайбой;
- б) интенсивный износ рабочей поверхности тяговых шайб;
- в) жесткая зависимость величин обжатий в волоках от скоростей тяговых шайб, т.е. ограничение технологических вытяжек кинематикой стана.

Из таблицы 6 видно так же, что станы со скольжением используются для волочения низкоуглеродистой стальной проволоки с начальным диаметром 5 мм. Проволоку с такого же диаметра перерабатывают и на станах без скольжения. При выборе способа волочения стальной проволоки с указанных диаметров до диаметра 1 мм и ниже предпочтение следует отдать волочильным станам со скольжением, т.к. они по всем показателям (коэффициент использования оборудования (КИО): масса и стоимость, занимаемая площадь, расход электроэнергии, скорость, производительность), превосходят волочильные станы многократного волочения без скольжения.

Из двух типов волочильных станов многократного волочения без скольжения (прямоточные и магазинные) по массе и стоимости, при прочих равных показателях при волочении проволоки с диаметра 2 мм и ниже на скорости 13 м/с, предпочтительнее станы магазинного типа. На более высоких скоростях до 20 -

25 м/с волочильные станы магазинного типа существующих конструкций неработоспособны и предпочтение следует отдать волочильным станам прямоточного типа. Волочение высокоуглеродистой проволоки с выходным диаметром более 6 мм, закручивание которой не допускается техническими условиями, производится только на прямоточных станах. Волочение медной проволоки исходного диаметра 1,2-1,0 мм и менее производится на станах со скольжением. Такой способ переработки экономически выгоднее, чем использование для этой цели прямоточных и магазинных станов.

После выбора способа волочения, производятся кинематический и прочностной расчеты волочильного стана.

## 6. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА

В исходных данных для проектирования волочильного стана, как правило, оговаривается: материал проволоки подвергаемой волочению, ее прочностные характеристики, диаметры заготовки и готовой проволоки. Остальные параметры стана: единичные и суммарные обжатия, кратность стана, скорости тяговых барабанов, скорость волочения подлежат определению при кинематическом расчете.

### 6.1. Выбор единичных и суммарных обжатий

#### Суммарные (общие) обжатия:

Характеризуют деформацию при волочении за несколько переходов, и выбор этой характеристики зависит от ряда факторов: качества готового металла, его механических свойств, пластичности металла и др.

Максимальное суммарное обжатие предполагает ускорение процесса волочения, получение высокого предела прочности проволоки, но в то же время предельные значения максимальных суммарных обжатий дают резкое снижение пластичности протянутой проволоки (появление хрупкости). Применение минимальных суммарных обжатий обуславливается требованиями, предъявляемыми к качеству готового металла и к качеству поверхности проволоки. Поэтому при выборе суммарных обжатий надо стремиться к оптимальному варианту, характеризующему тем, что указанное обжатие дает высокий предел прочности проволоки, высокие пластические свойства и отсутствие хрупкости. В работе [10] отмечается, что увеличение суммарного обжатия до известных пределов ( $\delta_{\text{сум}} = 60 \%$ ) приводит к выравниванию механических свойств центральных и поверхностных слоев изделия.

Суммарные обжатия условно классифицируются в зависимости от их величины следующим образом:

Калибровка	менее 20%
малые обжатия	20-40%
средние "	41-65%
большие "	66-85%
особо большие "	86-95%

сверхбольшие " более 95%

При производстве стальной низкоуглеродистой проволоки ( $C < 0,3\%$ ) суммарные обжатия могут достигать до 99% и более, однако для уменьшения обрывов и получения удовлетворительных механических свойств проволоки, практически применяют меньшие величины суммарных обжатий - от 60% до 92% [10].

В пособие приведены маршруты, составленные для волочения низкоуглеродистой стальной проволоки, применяемые на Череповецком сталепрокатном и Магнитогорском метизно-металлургическом заводах. Величины суммарных обжатий, заложенные в этих маршрутах, лежат в пределах от 62 % до 98,8 %. Маршрут с  $\delta_{\text{сум}} = 90,8\%$  используется при волочении стали марки ст1кп и ст2кп на стане фирмы "Грюна" магазинного типа. Указанный маршрут представляет следующие переходы 6,5 - 5,24 - 4,11 - 5,31 - 2,74 - 2,27 - 1,97 (цифрами обозначены диаметры проволоки после каждой протяжки, мм).

При производстве стальной средне и высокоуглеродистой проволоки ( $C = 0,4 - 0,9\%$ ) суммарное обжатие, обеспечивающее сочетание высокого предела прочности с высокими вязкими свойствами при производстве канатной проволоки составляет  $\delta_{\text{сум}} = 75 - 60\%$ . Однако, на практике применяют и большие обжатия (табл.7).

"Маршрут" - установленный на многократном волочильном стане ряд волок, с последовательно уменьшающимися поперечными сечениями от входного к выходному барабану через которые осуществляется процесс волочения проволоки.

Таблица 7

Практически применяемые обжатия при волочении канатной проволоки из патентованной заготовки

Диаметр готовой проволоки, мм	Суммарные обжатия, %
0,2 – 0,5	90 – 95
0,6 – 0,9	85 – 90
1,0 – 1,6	80 – 85
1,8 – 2,0	75 – 80
>3,0	50 – 70

При производстве проволоки особо высокой прочности  $\sigma_b = 3000 \text{ н/мм}^2$  - суммарные обжатия достигают до 93% и выше. При этом единичные обжатия малы. При волочении меди суммарные обжатия достигают до 99%, алюминия - до 96,5%.

#### Единичные обжатия:

В процессе проектирования стана, после выбора оптимального суммарного обжатия, необходимо установить величину единичных обжатий. Последняя в конечном счете определяет кратность стана (число ступеней деформации) Например, при одном и том же суммарном обжатии проволоки с диаметра 6 мм до диаметра 3 мм, т.е.  $\delta_{\text{сум}} = 75\%$ , ступени деформации ( величина единичных об-

жаций ), а следовательно и число протяжек ( волок ) могут быть различными:

Малые единичные обжатия (менее 5 – 6%):

- а) увеличивают кратность стана, а следовательно, его площадь и вес;
- б) дают низкую производительность стана;
- в) способствуют неоднородности металла по сечению.

$\delta_{ед}$ , %	Число протяжек
5	27
10	13
20	6
35	3

Большие единичные обжатия – снижают пластичность металла и допустимое суммарное обжатие. Следовательно, необходимо стремиться к оптимальным величинам единичных обжатий.

Таблица 8

Единичные вытяжки и единичные обжатия, применяемые при обычной технологии волочения проволоки

Название металла или сплава	$\mu_{ед}$		$\delta_{ед}$ , %	
	Диаметр менее 1мм	Диаметр более 1мм	Диаметр менее 1мм	Диаметр более 1мм
Медь	1,60 – 1,25	1,64 – 1,15	37,5 – 20	29 – 13
Латунь	1,60 – 1,20	1,40 – 1,15	37,5 – 17	29 – 13
Бронза	1,41 – 1,15	1,27 – 1,15	29,0 – 13	21 – 13
Никель	1,55 – 1,20	1,30 – 1,15	35,5 – 17	23 – 13
Алюминий	1,40 – 1,20	1,25 – 1,15	29,0 - 17	20 - 13

Максимальная величина единичного обжатия зависит от ряда факторов: пластичности металла, структуры, предшествующего наклепа, остаточных напряжений и усилий деформации, специфики волочильного инструмента, смазки, температуры, скорости волочения, способа волочения и прочих факторов. При определенных условиях волочения  $\delta_{ед}^{max}$  для среднеуглеродистой проволоки может достигать 60%, для меди 56 – 58%, для латуни 65 – 68%. Фактически применяемые единичные обжатия гораздо ниже и лежат в пределах: для низкоуглеродистой стали – максимальные 35 – 40 %, минимальные 20 – 25%; для высокоуглеродистой проволоки 35 - 15%.

По мнению Р.Б. Красильщикова [4] величины единичных обжатий при волочении углеродистой стали в сущности лимитирует средняя температура металла при выходе из очага деформации. Предельно допустимая температура нагрева лежит в области температур искусственного старения (около 250°C).

Для определения оптимальных единичных обжатий при волочении стальной углеродистой проволоки сорбитного класса (канатная, пружинная проволока с высоким пределом прочности и повышенными вязкими и упругими свой-

ствами, содержание углерода 0,4 - 0,9%, марганца 0,3- 0,8%) в работе [3] рекомендуется следующая формула

$$\delta_{\text{ед}} = \frac{45}{\sigma_{\text{в}}} \cdot 100\% \quad (25)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  - предел прочности н/мм<sup>2</sup>.

На рис.10 показана зависимость оптимального единичного обжатия, рекомендуемого при волочении стальной проволоки, от предела прочности металла и средней температуры проволоки  $t_{\text{ср}}^{\circ}$ .

Величины единичных обжатий рассчитаны на основании формулы (25).

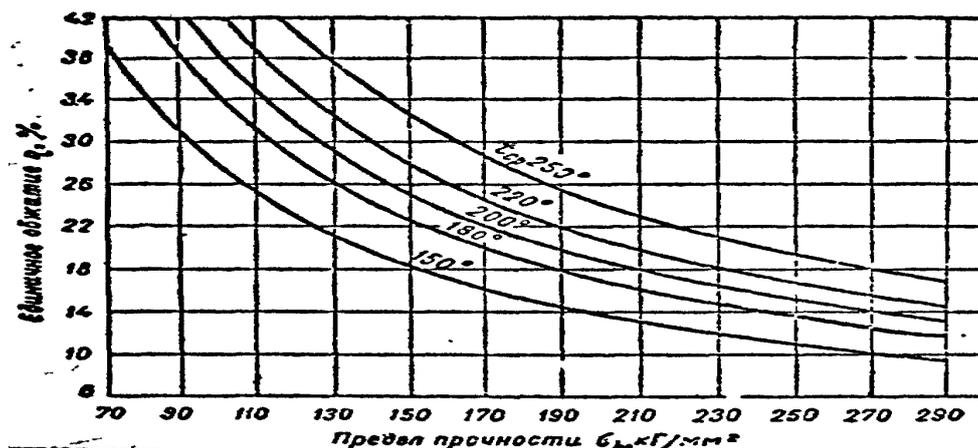


Рис. 10. Зависимость допустимых единичных обжатий от предела прочности металла для различных средних температур проволоки

Единичные обжатия при волочении стальной проволоки можно условно классифицировать в зависимости от их величины по следующей схеме:

весьма малые	6 – 9%
малые	10 – 15%
средние	16 – 24%
повышенные	25 – 35%
большие	36 – 40%
весьма большие	41 – 45%
сверхбольшие	более 45%.

При волочении цветных металлов и сплавов рекомендуются единичные обжатия и вытяжки предложенные в табл.8.

В зависимости от требований, предъявляемых к протянутому металлу, величина оптимального единичного обжатия может значительно меняться.

## 6.2. Выбор кратности стана

Кратность стана при заданных диаметрах заготовки и готовой проволоки является определенной величиной, поддающейся расчету. Кратность стана связана с единичными и суммарными обжатиями следующей математической зависимостью

$$\delta_{\text{сум}} = 1 - (1 - \delta_{\text{ед}})^n, \quad (26)$$

где:  $\delta_{\text{сум}}$  - суммарное обжатие;

$\delta_{\text{ед}}$  - единичное обжатие

$n$  - кратность волочильного стана.

В настоящее время проектируются универсальные станы, предназначенные для волочения проволоки различных диаметров с различными механическими характеристиками. Предел прочности заготовки колеблется от 400 н/мм<sup>2</sup> до 1100 н/мм<sup>2</sup> и более. Поэтому, при определении кратности стана, желательно брать средние значения суммарных и единичных обжатий.

Пример: определить кратность прямоточного волочильного стана для волочения низко и высокоуглеродистой проволоки с пределом прочности заготовки  $\sigma_{\text{в}} = 400$  н/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_{\text{в}} = 1400$  н/мм<sup>2</sup> соответственно, с диаметра 7 мм до 3 мм - низкоуглеродистой проволоки, и с диаметра 7 мм до 4 мм - высокоуглеродистой проволоки.

Суммарное обжатие для низкоуглеродистой проволоки рекомендовано в пределах от 60 % до 92 % - выбираем 80 %. Для высокоуглеродистой проволоки (табл.7) при  $d_{\text{пр}} \geq 3,0$  мм,  $\delta_{\text{сум}} = 50 - 70$  % - принимаем  $\delta_{\text{сум}} = 65$  %. Единичные обжатия для низкоуглеродистой проволоки колеблются в пределах 20 - 40%, принимаем 30 %. Для высокоуглеродистой проволоки  $\delta_{\text{ед}} = 15 - 35$  %. Уточняем по формуле (25), подставляя в нее  $\sigma_{\text{в,ср}}$  - среднее значение предела прочности, определяемое, как среднее арифметическое между  $\sigma_{\text{в}}$  заготовки и  $\sigma_{\text{в}}$  готовой проволоки. По рисунку 3 при  $\delta_{\text{сум}} = 65$  %,  $\sigma_{\text{в}}$  готовой проволоки равно 2100 н/мм<sup>2</sup>, тогда

$$\sigma_{\text{в}}^{\text{ср}} = \frac{2100 + 1400}{2} = 1750 \text{ н/мм}^2$$

Принимая среднюю температуру нагрева проволоки 180°C, по рис.10 находим  $\delta_{\text{ед}} = 20$  %.

Для определения кратности принимаем:

$$\delta_{\text{сум}}^{\text{ср}} = \frac{65\% + 80\%}{2} = 72,5\%$$

$$\delta_{\text{ед}}^{\text{ср}} = \frac{20\% + 30\%}{2} = 25\%$$

На основании формулы (26) определяем кратность стана  $0,725 = 1 - (1 - 0,25)^n$ , после преобразования получим  $0,75^n = 0,275$ , логариф-

мируя, находим  $n \cdot \lg 0,75 = \lg 0,275$  или  $n = \frac{\lg 0,275}{\lg 0,75} = 4,5$  принимаем кратность стана  $n=5$ .

### 6.3. Выбор кинематических вытяжек между тяговыми барабанами

Определив кратность стана, необходимо выбрать кинематические вытяжки между барабанами, характеризующие возрастание линейных скоростей тяговых

барабанов от приемного к чистовому

$$\gamma = \frac{V_{n+1}}{V_n}, \quad (27)$$

где  $V_{n+1}$  - линейная скорость  $n+1$  барабана (рис.2);  
 $V_n$  - линейная скорость  $n$ -ного барабана.

Следует отличать кинематические вытяжки ( $\gamma$ ) от технологических ( $\mu$ ) определяющих деформацию проволоки при волочении.

Существует несколько вариантов построения кинематических вытяжек волочильных станов (рис.11):

- 1) равные кинематические вытяжки;
- 2) постепенно уменьшающиеся;
- 3) комбинированные (возрастающие, равные и уменьшающиеся);
- 4) чередующиеся (возрастающие и уменьшающиеся);
- 5) комбинированные (равные и уменьшающиеся).

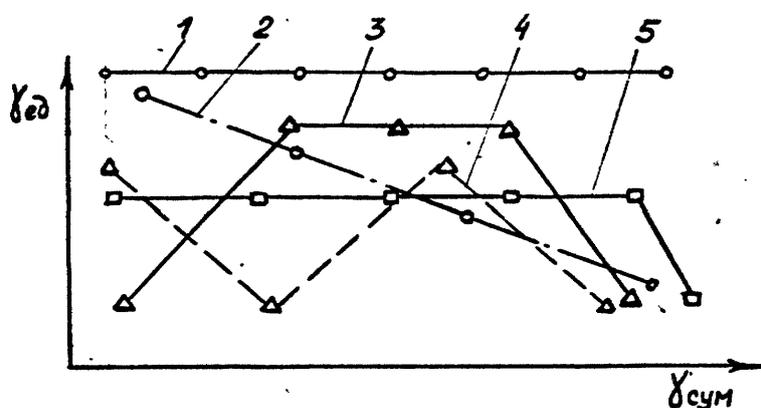


Рис. 11. Схема построения кинематических вытяжек волочильных станов

Из вариантов, схематически изображенных на рисунке 11 достаточно эффективен вариант, характеризуемый кривой 3, при котором величина первого единичного обжатия дается пониженной для того, чтобы обеспечить лучшее закрепление слоя смазки на проволоке, Затем следуют повышенные единичные обжатия - зона высокой пластичности металла (до  $\delta_{сум} = 75 - 85 \%$ ). Когда же металл становится малопластичным ( $\delta_{сум} > 85 \%$ ) даются малые, все уменьшающиеся единичные обжатия.

По мнению Р.Б. Красильщикова [4], предпочтение следует отдать варианту, описываемому кривой 2, т.к. одновременно с увеличением  $B_v$  протягиваемой проволоки (влияние наклепа), происходит и снижение единичных обжатий.

По указанным схемам заложены кинематические вытяжки на прямоточных и магазинных станах (табл.9) для волочения стали и алюминия.

С целью экономии площади, прямоточные станы проектируются со сдвоенными приемными (первым) барабаном. Например, стан 7 - 6/350-имеет шесть блоков с диаметрами барабанов 350 мм.

Сдвоенный приемный барабан имеет ступени 350 и 240 мм. Вытяжка между ступенями барабана считается как отношение диаметров большей и меньшей

ступени.

Конструктивно прямоточные и магазинные станы выполняются из отдельных блоков с однотипными индивидуальными приводами и вертикальными барабанами. Блоки представляют собой двухступенчатые редукторы, отличающиеся друг от друга передаточными числами. На рисунке 12 приведена схема прямоточного стана ВС 3-4/550.

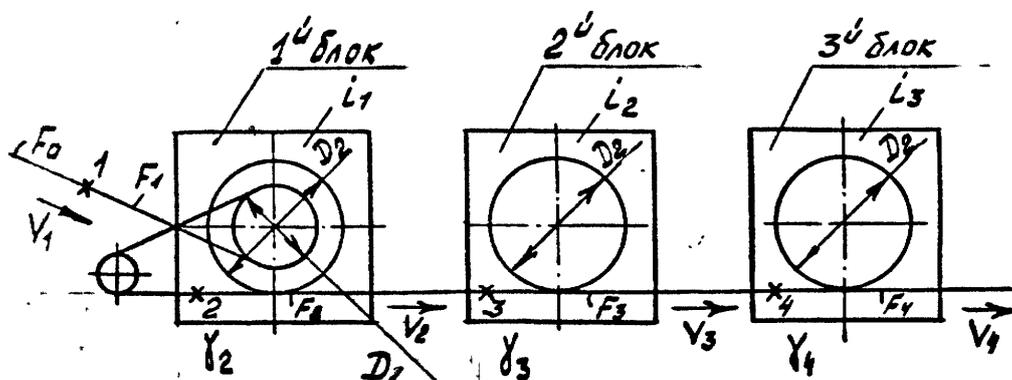


Рис. 12. Схема волочильного стана ВС 3-4/550

Выбрав кинематические вытяжки по вышеуказанной методике и согласно рекомендаций параграфа 6.1.2. можно определить скорости барабанов, задавшись скоростью чистового. Пусть выбраны кинематические вытяжки (рис.12)  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$  и известна скорость волочения проволоки на чистовом барабане  $V_4$ . В таком случае скорость чистового барабана  $V_4^1 = V_4$  (стан работает без скольжения). Связь между скоростями 1-го, 2-го и 5-го блоков выражается следующими зависимостями:

$$V_3^1 = \frac{V_4^1}{\gamma_4}; V_2^1 = \frac{V_3^1}{\gamma_3}; V_1^1 = \frac{V_2^1}{\gamma_2}, \quad (28)$$

где:  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$  - кинематические вытяжки между 1-м, 2-м и 3-м барабанами;  $V_1^1$ ,  $V_2^1$ ,  $V_3^1$ ,  $V_4^1$  - линейные скорости рабочих поверхностей тяговых барабанов 1-го; 2-го; 3-го блоков, или, переходя к числам оборотов и диаметрам барабанов, зависимость (28) принимает вид:

$$n_3 = \frac{n_4}{\gamma_4}; \quad n_2 = \frac{n_3}{\gamma_3}; \quad D_1 = \frac{D_2}{\gamma_2}. \quad (29)$$

Передаточные числа блоков определяются известным способом:

$$i_3 = \frac{n_{\text{дв}}}{n_4}; \quad i_2 = \frac{n_{\text{дв}}}{n_3}; \quad i_1 = \frac{n_{\text{дв}}}{n_2}. \quad (30)$$

Кинематические вытяжки прямоточного стана могут значительно отличаться от технологических, определяемых маршрутом волочения.

Например: прямоточный стан 5 - 6/550 имеет кинематические вытяжки 1,295-1,33-1,630-1,29-1,295 (табл.9). Рекомендуемый маршрут волочения с диаметра 7 мм до 2,7 мм следующий: 7,0-6,25-5,45-4,45-3,65-3,10-2,7. Технологические вытяжки заложенные в указанном маршруте: 1,27-1,3-1,5-1,48-1,38-1,3.

Бесступенчатое регулирование скоростей вращения двигателя постоянного тока у станов прямоточного типа дает возможность установить характер изменения скоростей вращения тяговых барабанов в точном соответствии с технологическим маршрутом.

При волочении проволоки на станах магазинного типа (рис.9) кинематические вытяжки так же не совпадают с технологическими, но расхождение между ними желательно закладывать минимальным - в противном случае наблюдается перекручивание проволоки.

Таблица 9

К построению кинематических вытяжек волочильных станов

Стан	Кинематические вытяжки	Материал и размер проволоки	Вариант построения кинематических вытяжек рис.11
6/550 Грюна* магазинный	1,54-1,16-1,55- 1,08-1,48-1,52	Сталь низко и высокоуглеродистая $d_{\text{заг}} = 7,0$ мм $d_{\text{пр}} = 3,0 - 1,6$ мм	4
6/250 Грюна магазинный	1,54-1,305- 1,267-1,23-1,21- 1,22	-“-	2
6/630 Грюна магазинный	1,26-1,26-1,25- 1,26-1,24-1,24	-“-	1
4/550 Кратос магазинный	1,38-1,23-1,215- 1,205	Сталь высоко и низкоуглеродистая $d_{\text{пр}} = 4,0 - 2,8$ мм	2
ВМА 6/450 магазинный	1,14-1,368- 1,374-1,334- 1,33-1,28	Алюминий $d_{\text{заг}} = 9,0$ мм $d_{\text{пр}} = 4,0 - 2,0$ мм	3
6-7/350 АЗТМ** магазинный	1,46-1,34-1,33- 1,295-1,3-1,3	Сталь $d_{\text{заг}} = 4,0 - 2,0$ мм $d_{\text{пр}} = 1,9 - 0,8$ мм	2
5-6/550 АЗТМ прямоточный	1,295-1,33-1,30- 1,29-1,295	Сталь $d_{\text{заг}} = 7,0$ мм $d_{\text{пр}} = 4,0 - 2,7$ мм	3
3-4/550 АЗТМ прямоточный	1,29-1,32-1,28	Сталь $d_{\text{заг}} = 7,0$ мм $d_{\text{пр}} = 5,0 - 3,4$ мм	3
6-7/350 ВНИИ- МЕТМАШ пря- моточный	1,23-1,32-1,3- 1,29-1,29-1,32	Низкоуглеродистая сталь $d_{\text{пр}} = 1,3 - 0,75$ мм	1

\* Обозначение стана: 6 - число протяжек, 550- диаметр тягового барабана в мм.

\*\* Обозначение стана: 6-7 - число протяжек 6 или 7, 6-число барабанов,

350-диаметр тягового барабана в мм.

И.А.Юхвец [10] считает, что нормальным следует считать процесс, при котором

$$\mu = 1,05 \gamma, \quad (31)$$

где:  $\mu$  - технологическая вытяжка;

$\gamma$  - кинематическая вытяжка.

Т.е. должен идти процесс волочения с накоплением проволоки на барабанах. На практике при составлении маршрута расхождение между  $\mu$  и  $\gamma$  может быть и большим.

Например: стан магазинного типа ВМА 6/450 имеет кинематические вытяжки 1,14-1,368-1,374-1,33-1,28. Рекомендованный маршрут волочения с диаметра 9 мм до 4 мм следующий: 9,0-8,16-7,21-6,16-5,25-4,55-4,0. Технологические вытяжки по маршруту 1,21-1,28-1,37-1,38-1,33-1,3.

Ниже приведенный маршрут волочения алюминия с диаметра 9 мм до 2,8 мм - 9,0-7,8-6,38-5,15-4,15-3,35-2,8 имеет еще большие технологические вытяжки: 1,33-1,50-1,54-1,54-1,53-1,43.

#### 6.4. Станы со скольжением

Кратность стана определяется по формуле (26). Рекомендации по выбору вариантов построения кинематических вытяжек приведены в разделе 6.3 и на рисунке 11. В таблице 10 приведены кинематические вытяжки станов со скольжением.

При проектировании станов для волочения меди кинематические единичные вытяжки  $\gamma$  закладываются в пределах от 1,3 до 1,36. Вытяжка между чистой и предпоследней тяговой шайбой  $\gamma_{\text{чист}}$  принимается равной 1,25 - 1,26, что дает возможность в чистой волоке давать меньшие обжатия. Если стан предназначен для волочения меди и алюминия (например стан ВСК-13 АЗТМ) единичные кинематические вытяжки принимаются равными 1,3, т.е. возможно волочение и того и другого материала (табл.8). Чистовая кинематическая вытяжка равна 1,25. Если предполагается волочение только меди, то единичные кинематические вытяжки принимаются 1,36, а чистовая - 1,26 (стан ВСК-9 АЗТМ). В случае волочения фасонных профилей (полоса, троллейный провод), кинематические вытяжки принимают в пределах 1,03 - 1,16 (станы СМВ-1-5М, СМВ-1-9М АЗТМ).

Стан для волочения стальной высокоуглеродистой проволоки (ВСКТ-10/350 АЗТМ), с пределом прочности  $\sigma_B = 1200 \text{ н/мм}^2$ , имеет единичные кинематические вытяжки  $\gamma_{\text{ед}} = 1,2$  и  $\gamma_{\text{чист}} = 1,17$ .

Как уже говорилось выше, основной особенностью процесса волочения со скольжением, является неравенство окружных (линейных) скоростей тяговых шайб и скоростей движения проволоки по указанным шайбам. Для осуществления устойчивого процесса волочения необходимо, чтобы окружная скорость тяговой шайбы могла быть несколько больше скорости движения проволоки по ней.

$$V_n^m > V_n^n \quad (32)$$

Скорость проволоки на чистой тяговой шайбе всегда совпадает с окружающей скоростью последней

$$V_k^m = V_k^n \quad (33)$$

Для обеспечения условия (32), технологические вытяжки по маршруту ( $\mu$ ) должны быть больше кинематических вытяжек ( $\gamma$ )  $\mu > \gamma$  при этом:

$$\mu = (1,015 + 1,06) \gamma \quad (34)$$

Таблица 10

К построению кинематических вытяжек волочильных станов

Стан	Кинематические вытяжки	Материал и размер проволоки	Вариант построения кинематических вытяжек (рис.11)
СМВ-11-9М АЗТМ*	1,341-1,343-1,341-1,342- 1,341-1,343-1,341-1,228	Медь $d_{\text{заг}} = 7,0$ мм $d_{\text{пр}} = 3,0 - 1,6$ мм	5
ВМ-13 АЗТМ**	1,247-1,237-1,247-1,25- 1,247-1,241-1,247-1,237- 1,247-1,249-1,247-1,183	Медь $d_{\text{заг}} = 7,2$ мм $d_{\text{пр}} = 2,3 - 1,37$ мм	4
ВСК-13	1,3-1,3-1,3-1,3-1,3-1,3-1,3- 1,3-1,3-1,3-1,3-1,25	Медь $d_{\text{заг}} = 7,2 - 9,0$ мм $d_{\text{пр}} = 1,0 - 2,7$ мм	5
ВСК-9 АЗТМ	1,35-1,35-1,35-1,35-1,35- 1,35-1,35-1,26	Медь $d_{\text{заг}} = 8,0 - 9,0$ мм $d_{\text{пр}} = 4,0 - 1,6$ мм	5
СМВ-1-9 АЗТМ	1,1628-1,1498-1,153- 1,1622-1,1207-1,1513- 1,579-1,067	Медь $d_{\text{заг}} = 10,0 - 7,2$ мм полоса 1,16x4,1 мм	4
СВМ-1-5 АЗТМ***	1,091-1,102-1,118-1,03	Медь $d_{\text{заг}} = 10,0$ мм полоса 4,1x5,9 мм	3
10/250 «ГРЮНА»	1,2-1,2-1,2-1,2-1,21,2-1,2- 1,2-1,17	Сталь, медь $d_{\text{заг}} = 2,0 - 1,6$ мм $d_{\text{пр}} = 1,0 - 0,5$ мм	5
15/200 «ГРЮНА»	1,2-1,1-чистовая	Сталь, медь $d_{\text{заг}} = 1,2 - 0,8$ мм $d_{\text{пр}} = 0,46 - 0,2$ мм	5
ВСКТ-10-350 АЗТМ****	1,2-1,17-чистовая	Высокоуглеродистая сталь $d_{\text{заг}} = 3,0 - 2,2$ мм $d_{\text{пр}} = 1,4 - 0,9$ мм	5

\* Обозначение стана: II – двухрядное расположение тяговых шайб; 9 – число протяжек.

\*\* ВМ – волоочильная машина; 13 – число протяжек.

\*\*\* 1-однорядное расположение тяговых шайб; 5 – число протяжек.

\*\*\*\* - число в числителе(15;22;10;) – количество протяжек, число в знаменателе – диаметр чистовой шайбы.

Известно, что окружные (линейные) скорости тяговых шайб связаны между собой кинематическими вытяжками (27). Пусть кинематические вытяжки  $n$ -кратного стана ( $\gamma$ ) равны между собой. Вытяжка между чистовой (конечной) и предпоследней ( $n-1$ ) тяговой шайбой равна  $\gamma_k$ , тогда окружные скорости тяговых шайб связаны между собой следующей зависимостью:

$$\begin{aligned}
 &V_n^w \text{ - скорость чистовой шайбы,} \\
 &V_{n-1}^w = V_n^w / \gamma_k \text{ - скорость (n-1)-ой шайбы,} \\
 &V_{n-2}^w = V_{n-1}^w / \gamma = V_n^w / \gamma_k \cdot \gamma \text{ - скорость (n-2)-ой шайбы,} \\
 &V_{n-3}^w = V_{n-2}^w / \gamma = V_n^w / \gamma_k \cdot \gamma^2 \text{ - скорость (n-3)-ей шайбы} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &V_{n-i}^w = V_n^w / \gamma_k \cdot \gamma^{i-1} \text{ - скорость (n-i)-ой шайбы} \tag{35}
 \end{aligned}$$

Скорости проволоки по маршруту волочения так же связаны между собой технологическими вытяжками  $\mu$ .

Возьмем технологические вытяжки (вытяжки в волок), равные между собой ( $\mu$ ), тогда скорости проволоки определяются следующей зависимостью:

$$\begin{aligned}
 &V_n^n \text{ - скорость проволоки на чистовой шайбе, согласно (33):} \\
 &V_n^n = V_n^w ; \\
 &V_{n-1}^n = V_{n-1}^w / \mu = V_n^n / \mu_k \cdot \mu \text{ - скорость проволоки на (n-1)-ой шайбе;} \\
 &V_{n-2}^n = V_{n-2}^w / \mu = V_n^n / \mu_k \cdot \mu^2 \text{ - скорость проволоки на (n-2)-ой шайбе;} \\
 &V_{n-3}^n = V_{n-3}^w / \mu = V_n^n / \mu_k \cdot \mu^2 \text{ - скорость проволоки на (n-3)-ей шайбе,} \\
 &\text{тогда } V_{n-i}^n = \frac{V_n^n}{\mu_k \cdot \mu^{i-1}} \text{ или } V_{n-i}^n = \frac{V_n^w}{\mu_k \cdot \mu^{i-1}} . \tag{36}
 \end{aligned}$$

По условию (32) скорость проволоки на ( $n-i$ )-ой шайбе  $V_{n-i}^n$  должна быть меньше скорости ( $n-i$ ) шайбы  $V_{n-i}^w$ ,

$$V_{n-i}^n < V_{n-i}^w \text{ или } \frac{V_n^w}{\mu_k \cdot \mu^{i-1}} < \frac{V_n^w}{\gamma_k \cdot \gamma^{i-1}} . \tag{37}$$

Проведя преобразования (37) получаем

$$\frac{\mu_k \cdot \mu^{i-1}}{\gamma_k \cdot \gamma^{i-1}} > 1 \quad (38)$$

т.к.  $\mu_k$  и  $\gamma_k$  незначительно меньше  $\mu$  и  $\gamma$ , то можно написать

$$\mu_k = a \mu, \quad \gamma_k = a \gamma, \quad (39)$$

тогда выражение (38) принимает вид:

$$a\mu^i / a\gamma^i > 1 \text{ или } (\mu / \gamma)^i > 1, \quad (40)$$

а так как  $i > 1$  то и  $\mu / \gamma > 1$  или  $\mu > \gamma$  математическое подтверждение условия (34).

Так как при волочении на станах со скольжением скорости тяговой шайбы и проволоки не совпадают, то для оценки величины скольжения используют величины относительного и абсолютного скольжения  $C_{к.отн}$ ;  $C_{к.абс}$ :

$$C_{к.отн.} = \frac{V^ш - V^n}{V^ш} \cdot 100\% \quad (41)$$

$$C_{к.абс.} = V^ш - V^n \quad (42)$$

Физический смысл имеет абсолютная величина скольжения.

Так, например, величина относительного скольжения 10% будет наблюдаться если окружная скорость тяговой шайбы  $V^ш$  равна 50 м/мин и скорость проволоки  $V^n$  равна 45 м/мин, а так же, если указанные величины скоростей равны:  $V^ш = 500$  м/мин и  $V^n = 450$  м/мин. Абсолютная же величина скольжения, в первом случае 5 м/мин, а во втором 50 м/мин, по разному сказывается на стойкости тяговой шайбы, качестве поверхности проволоки и т.д.

На каждой тяговой шайбе, при заданном маршруте волочения, можно определить величину относительного и абсолютного скольжения. На рисунке 13 приведен график соотношения скоростей тяговых шайб и медной проволоки при ее волочении на стане ВМ-13 с диаметра 7,2 мм на диаметр 1,5 - 2,1 мм. Отрезки между линиями В и Б дают величину абсолютного скольжения на шайбах.

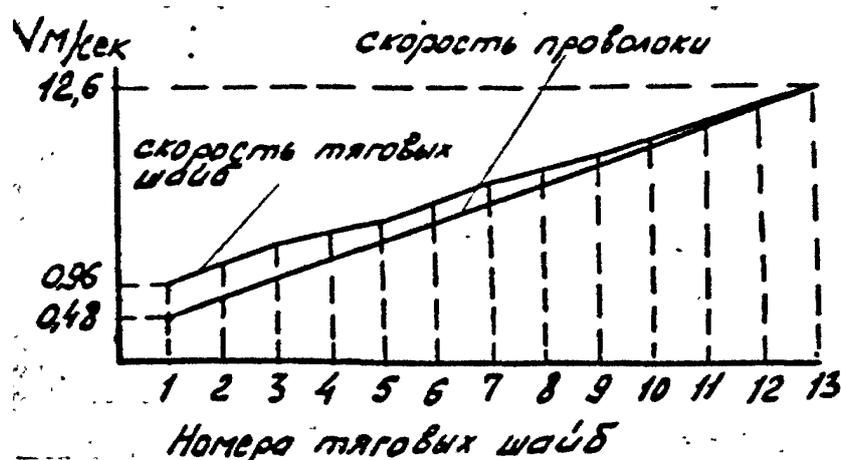


Рис. 13. График соотношения скоростей тяговых шайб и медной проволоки на волочильной машине ВМ-13

Согласно выводам И.Л. Перлина [3], при правильно составленных маршрутах, относительное скольжение максимально на первой шайбе и постепенно

уменьшается к последней. И.А. Юхвец [10] приводит маршруты, имеющие иной характер изменения относительного скольжения на шайбах (рис.14).

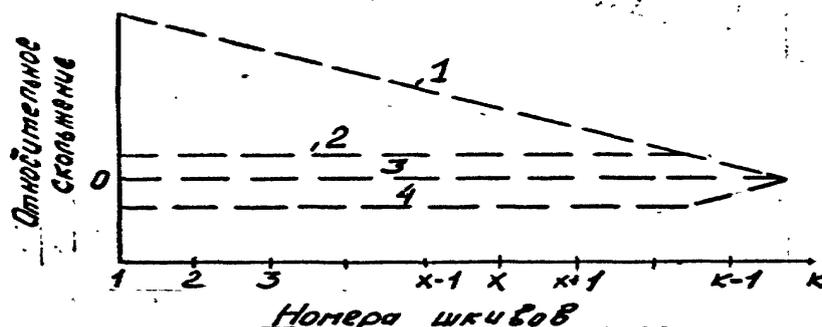


Рис. 14. Схема маршрутов относительного скольжения при многократном волочении со скольжением

Наиболее рациональным является маршрут 1 с постепенным уменьшением относительного скольжения от первой шайбы к последней. Маршрут 2 менее рационален - относительное скольжение постоянно. Маршрут 3 - идеальный процесс волочения - волочение без скольжения. Такой процесс в течение длительного времени не осуществим вследствие неравномерного износа волок. По маршруту 4 волочение проволоки невозможно, из-за обрывов проволоки.

Исходя из рекомендации И.Л.Перлина, а так же согласно рисунку 14, построены маршруты волочения медной проволоки на стане ВМ-13М (табл. 11, 12).

### 6.5. Скорости тяговых деталей

Исходя из зависимости (27) можно сказать, что окружные скорости тяговых деталей связаны между собой кинематическими вытяжками. В случае равенства тяговых деталей по диаметру, что наблюдается в станах прямоточного и магазинного типов, а так же в станах со скольжением (СМВ-1-9М. СМВ-1-6 АЗТМ), числа оборотов и скорости тяговых деталей определяются по методике, приведенной в разделе 6.3 формула (28), (29). Определение диаметра меньшей ступени сдвоенного барабана, применяемого на приемном блоке прямоточных станов, производится по формуле (29).

В случае большой кратности волочения ( $n > 9$ ), станы со скольжением, для уменьшения площади, проектируются с многоступенчатыми шайбами. В некоторых станах (рис.16,17,18: ВСКТ-10/550 АЗТМ, 15/200 "Грюна" и др.) шайбы делятся на тяговые, создающие силу волочения, и холостые, переводящие проволоку на большую ступень тяговой шайбы. Такая компоновка упрощает кинематику стана, позволяет проектировать шайбы с большим числом ступеней, но, в то же время, увеличивает габариты стана за счет холостых шайб. Станы с холостыми и тяговыми шайбами применяются на станах среднего и тонкого волочения.

Станы грубого волочения (ВМ-13, ВСК-13, СМВ-2-9 АЗТМ) проектируются без холостых шайб (рис.19,20). Указанная компоновка уменьшает количество тяговых шайб и сокращает площадь машины, однако число ступеней на тяговых шайбах ограничено, и обычно не превышает трех. Кроме того, на станах

грубого волочения (ВМ-13, СМВ-2-9), имеющих все многоступенчатые шайбы, прием наибольшего диаметра проволоки производится на наименьшую ступень тяговой шайбы, что отрицательно сказывается на структуре протягиваемой проволоки.

Определение диаметров ступеней тяговых шайб станом со скольжением.

При проектировании волочильного стана со скольжением, диаметры ступеней тяговых шайб подлежат определению.

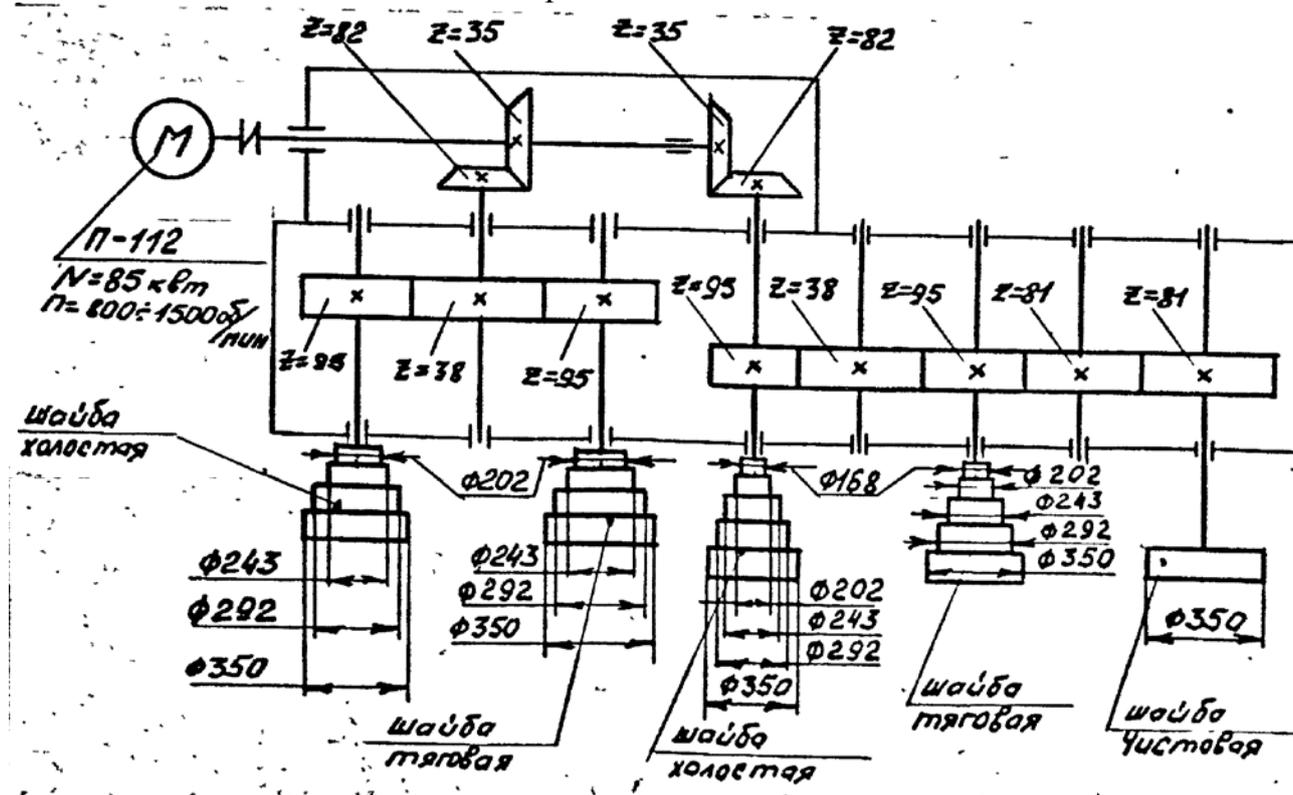


Рис. 15. Кинематическая схема волочильного стана ВСКТ – 10/55



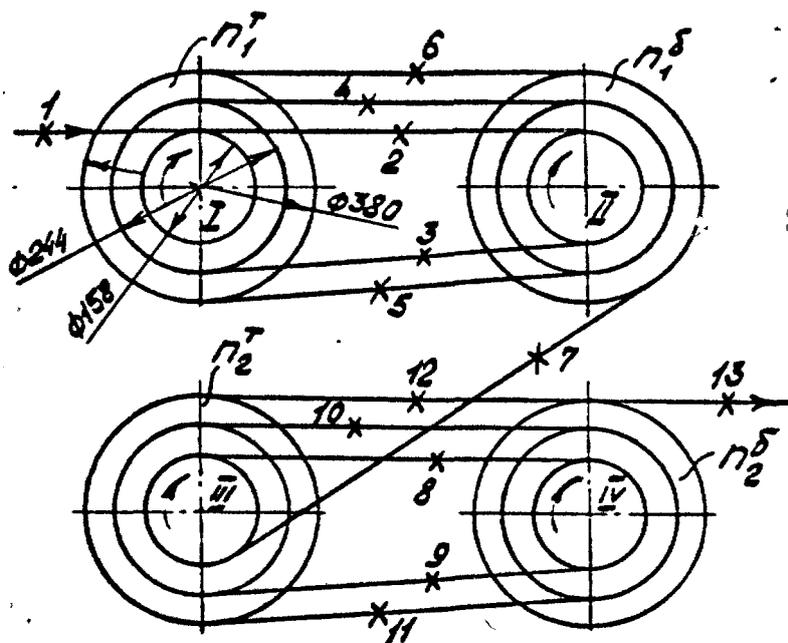


Рис. 18. Схема движения проволоки на волочильной машине VM-13

Станы с холостыми и тяговыми многоступенчатыми шайбами.

В станах с указанной схемой волочения шайбы разбиваются на пары. Число пар определяется кратностью волочения. Парой считается тяговая и парная ей холостая шайба (рис.16,17,18). Числа оборотов, диаметры и количество ступеней шайб пары равны. Такая конструкция применяется на волочильном стане ВСКТ-10/550 АЗТМ (рис.18). На волочильных станах "Грюна" число ступеней холостой шайбы на одну ступень меньше, т.е. если тяговая шайба имеет  $n$  ступеней с диаметрами  $D_1 < D_2 < D_3 < \dots < D_{n-1} < D_n$ , то холостая имеет  $n-1$  ступеней с диаметрами  $D_1 < D_2 < D_3 < \dots < D_{n-1}$  (рис.17).

Схема компоновки пар на ВСКТ-10/550 предпочтительнее с точки зрения эксплуатации, т.к. тяговая шайба, испытывая большие нагрузки, быстрее изнашивается, чем холостая, и при достижении критического износа, шайбы меняют местами.

Конструктивно приняв диаметр  $D_1$  и выбрав  $\gamma_{ед}$  определение последующих диаметров ступеней производится по следующей зависимости:

$$\begin{aligned}
 D_2 &= D_1 \cdot \gamma_{ед}; \\
 D_3 &= D_2 \cdot \gamma_{ед} = D_1 \cdot \gamma_{ед}^2; \\
 &\dots\dots\dots \\
 D_n &= D_1 \cdot \gamma_{ед}^n
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Число ступеней пары выбираются конструктивно и зависят от кратности стана и числа пар тяговых шайб.

Переход проволоки с одной пары шайб на другую идет с наибольшего диаметра ступени предыдущей пары на наименьший диаметр последующей, т.е. с  $D_n$  на  $D_n^1$  (рис.18). Если число оборотов одной пары (первой) " $n$ ", а последующей " $n+1$ ", то должно соблюдаться равенство:

$$\frac{V_{n+1}}{V_n} = \frac{\pi \cdot D_1^1 \cdot n_1}{\pi \cdot D_n \cdot n} = \gamma_{ед} \quad (44)$$

Условие (44) достигается передаточными числами зубчатых пар блока тяговых роликов (рис. 16, 17). Ниже в качестве примера приведен кинематический расчет стана ВСКТ-10/350. Исходные данные: материал проволоки - высокоуглеродистая сталь, заготовка с пределом прочности  $\sigma_b = 1200 \text{ н/мм}^2$ . Диаметр заготовки 2,2 мм, диаметр готовой проволоки - 0,9 мм. Необходимое суммарное обжатие при волочении проволоки с диаметра 2,2 мм до диаметра 0,9 мм равно 83%, рекомендованное 85-90% (табл.7). Для высокоуглеродистой проволоки рекомендуемое единичное обжатие от 15-35%. Учитывая, что волочение производится на станах со скольжением, во избежание больших нагрузок на тяговые ролики, принимаем нижний предел единичного обжатия 15-16%, что соответствует вытяжке равной 1,2. На основании формулы (26) определяем кратность стана:

$$n = \frac{\lg 0,17}{\lg 0,84} = 10,2$$

$$0,83 = 1 - (1 - 0,16)^n \text{ откуда}$$

принимаем кратность стана  $n = 10$ .

Число пар шайб и количество ступеней на шайбе находится в прямой зависимости от кратности стана. Хотя при одной и той же кратности стана, например, 10, может быть и три пары шайб 10/250 "Грюна" (рис.17), и две - ВСКТ 10/350 АЗТМ (рис.16). При этом число ступеней на шайбе в первом случае меньше, чем во втором. Каждая из указанных схем имеет свои преимущества и недостатки.

Стан 10/250 "Грюна" в сравнении с ВСКТ 10/350.

Недостатки:

- а) большее число валов и шестерен; чем у ВСКТ 10/550,
- б) большая площадь,
- в) большее число волокодержателей.

Достоинства:

- а) меньшая нагрузка на валы, шестерни,
- б) более удобная заправка.

При конструировании необходим тщательный анализ возможных вариантов разбивки шайб на пары.

В рассматриваемом случае закладываем две пары шайб с одинаковыми количествами ступеней. Первая пара имеет 4 ступени, вторая - 5, т.е. первая пара осуществляет 4 протяжки, вторая - 5 протяжек, и одну протяжку осуществляет чистовая шайба. Диаметр наибольшей ступени тяговых, холостых, а так же диаметр числовой шайбы, исходя из опыта эксплуатации, принимаем 350 мм. В этом случае диаметры ступеней определяются по видоизмененным зависимостям (43).

Первая пара:  $D_4 = 350 \text{ мм}$ ;

$$D_3 = \frac{D_4}{\gamma} = \frac{350}{1,2} = 292 \text{ мм}; D_2 = \frac{D_3}{\gamma} = \frac{292}{1,2} = 243 \text{ мм}; D_1 = \frac{D_2}{\gamma} = \frac{243}{1,2} = 202 \text{ мм}.$$

Вторая пара:

Диаметры четырех ступеней совпадают с первой парой, а

$$D_5 = \frac{D_4}{\gamma} = \frac{202}{1,2} = 168 \text{ мм.}$$

Соотношение угловых скоростей валов, на которые насажены тяговые шайбы определится из равенства (44) (рис. 15, 17):

$$\frac{\pi \cdot 168 \cdot 95 \cdot 82 \cdot 35}{\pi \cdot 350 \cdot 38 \cdot 35 \cdot 82} = 1,2$$

### Станы с тяговыми многоступенчатыми шайбами

Методика определения диаметров ступеней тяговых шайб, в силу отсутствия холостых шайб, несколько отличается от описанной в разделе 6.5. В станах рассматриваемого типа, можно так же выделить рабочую пару шайб, это I – II; III – IV; V - VI (рис.19), и шайбы I – II; III - IV (рис. 18). Диаметры и количество ступеней в шайбах пары равны. Если в такой паре числа оборотов валов обозначить через  $n^T$  и  $n^6$  то они будут связаны зависимостью

$$n^T = n^6 \gamma_{ед} \quad (45)$$

где:  $n^6$  - число оборотов быстроходного вала пары;

$n^T$  - число оборотов тихоходного вала пары.

Определение диаметров ступеней шайб ведется исходя из условия (27). В этом случае, если тяговые шайбы пары имеют "n" ступеней, и диаметр большей  $D_3 = D_n$  известен, то исходя из схемы заправки стана, например, (рис.19) шайбы V - VI, имеем:

$$\frac{V_{D_3^T}}{V_{D_2^6}} = \gamma_{ед}, \quad (46)$$

где:  $V_{D_3^T}$  - окружная скорость наибольшей ступени тихоходной тяговой шайбы;

$V_{D_2^6}$  - окружная скорость "2-ой" ступени быстроходной тяговой шайбы, выразив в формуле (46) окружные скорости через диаметры ступеней и числа оборотов получаем:

$$\frac{\pi \cdot D_3^T \cdot n^T}{\pi \cdot D_2^6 \cdot n^6} = \gamma_{ед},$$

приняв во внимание (45), окончательно формула (46) принимает вид:

$$D_2^6 = \frac{\pi \cdot D_3^T \cdot n^T}{\pi \cdot \gamma_{ед} \cdot \gamma_{ед} \cdot n^T} = \frac{D_3^T}{\gamma_{ед}^2}. \quad (47)$$

Рассуждая таким же образом относительно последующих ступеней тяговой шайбы, например  $D_1^6$ , получаем:

$$D_1^{\delta} = \frac{D_2^T}{\gamma_{e\delta}^4}. \quad (48)$$

Учитывая, что диаметры ступеней быстроходной и тихоходной шайб равны  $D_1^T = D_1^{\delta}; D_2^T = D_2^{\delta}; D_3^T = D_3^{\delta}$ , условия (47) и (48) можно записать следующим образом, обозначив  $D_3 = D_n; D_2 = D_{n-1}; D_1 = D_{n-2}$  и т.д. при этом  $D_3 = D_n; D_n > D_{n-1} > D_{n-2} > D_{n-3} > \dots > D_{n-i}$ , тогда

$$D_{n-1} = \frac{D_n}{\gamma_{e\delta}^2};$$

$$D_{n-2} = \frac{D_n}{\gamma_{e\delta}^4};$$

.....

$$D_{n-i} = \frac{D_n}{\gamma_{e\delta}^{2i}}. \quad (49)$$

Приняв "i" равное n-1 получаем  $D_1 = \frac{D_n}{\gamma_{e\delta}^{2n-2}}$  или:  $D_n = D_1 \cdot \gamma_{e\delta}^{2n-2}$  (50)

Из сравнения формул (43) и (50) видно, что закономерность изменения диаметров рабочих шайб зависит от принятой схемы волочения, т.е. от наличия или отсутствия холостых шайб.

При переходе проволоки с одной пары на другую сохраняется схема, рассмотренная в разделе 6.5. Необходимое передаточное число между валами рассматриваемых шайб, определяется исходя из условия (44).

Ниже в качестве примера приведен кинематический расчет волочильного стана ВСК-13. Исходные данные: материал проволоки - медь, диаметр заготовки 8 мм, диаметр готовой проволоки 1 мм. Необходимое суммарное обжатие  $\delta_{\text{сум}} = 98,4 \%$ , по данным [3]  $\delta_{\text{сум}}$  может быть 99 %. Единичное обжатие рекомендуется 37,5 - 20 %, (табл.8). Принимаем  $\delta_{\text{сум}} = 23 \%$ . На основании формулы (26) определяем кратность стана:

$$0,984 = 1 - (1 - 0,23)^n \text{ откуда } n = \frac{\lg 0,16}{\lg 0,77} = 12,8$$

принимаем кратность стана n=13.

Разбивка числа протяжек по ступеням шайб производится согласно схеме на рисунке 19. Преимущества указанной схемы по сравнению со схемой стана ВМ-13 (рис.18) описано в параграфе 6.5. Единичная кинематическая вытяжка стана, соответствующая  $\delta_{\text{ед}} = 23 \%$ , составит 1,5. Максимальный диаметр тяговой шайбы  $D_3 = 380$  мм. Рабочие пары шайб 1-П; Ш-1У; У-У1.

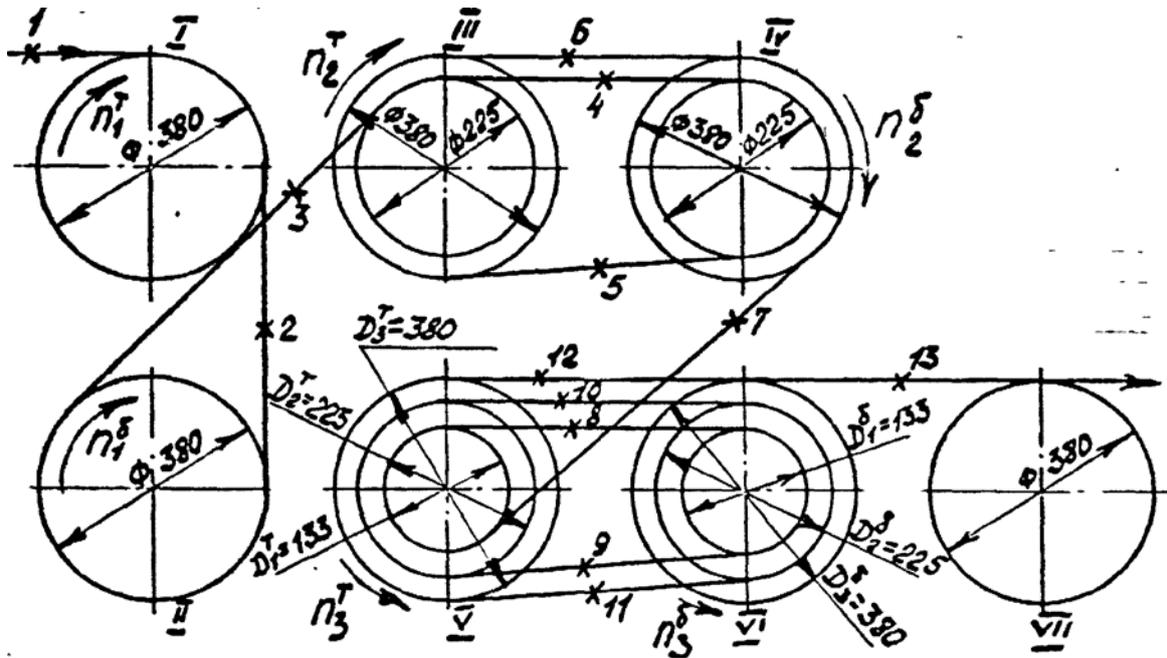


Рис. 19. Схема движения проволоки на волочильном стане ВСК-13

Вытяжки между указанными шайбами согласно (45) равны передаточному отношению (рис.20):

$$\text{I - II} \quad \gamma = i = \frac{52}{56} \cdot \frac{63}{49} = 1,3;$$

$$\text{III - IV} \quad \gamma = i = \frac{63}{52} \cdot \frac{59}{55} = 1,3;$$

$$\text{V - VI} \quad \gamma = i = \frac{63}{52} \cdot \frac{59}{55} = 1,3;$$

$$\text{VI - VII} \quad \gamma = i = \frac{55}{44} = 1,25.$$

Диаметры ступеней тяговых шайб III - IV и V - VI по (49):

$$D_2 = \frac{380}{1,3^2} = 225 \text{ мм}$$

$$D_1 = \frac{380}{1,3^4} = 133 \text{ мм.}$$

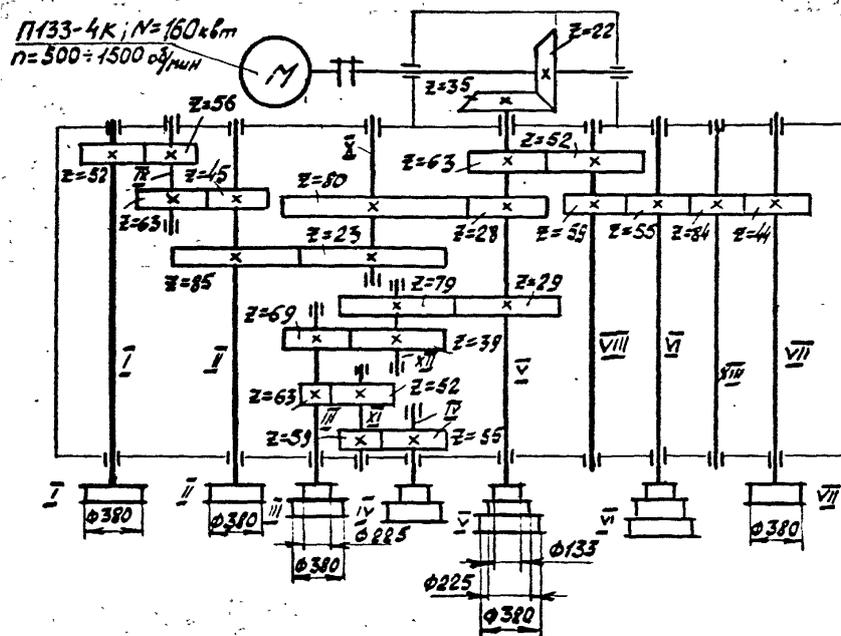


Рис. 20. Кинематическая схема волочильного стана ВСК-13

При переходе проволоки с одной пары на другую (шайбы II - III и IV - V) должно выполняться условие (44), представленное в виде:

$$\gamma = i \frac{D_{n+1}}{D_n},$$

где:  $D_n$  - диаметр шайбы, с которой сходит проволока, мм;

$D_{n+1}$  - диаметр шайбы, на которую поступает проволока, мм.

$$\text{II - III} \quad \gamma = \frac{85}{23} \cdot \frac{80}{28} \cdot \frac{29}{79} \cdot \frac{39}{69} \cdot \frac{225}{380} = 1,3;$$

$$\text{IV - V} \quad \gamma = \frac{55}{59} \cdot \frac{52}{63} \cdot \frac{69}{39} \cdot \frac{79}{29} \cdot \frac{133}{380} = 1,3.$$

## 6.6. Скорость волочения

Скорость волочения в большой степени влияет на производительность волочильного стана. Поэтому обоснованный выбор оптимальной скорости при проектировании волочильных станков должен быть в центре внимания конструкторов.

Скорость волочения определяется тремя группами факторов: технологическими, техническими и экономическими [3].

Основным технологическим фактором является напряжение волочения, меняющееся в зависимости от скорости. Действительно, с ростом скорости волочения повышается скорость деформирования, в результате чего при отсутствии физических изменений металла в общем случае увеличивается сопротивление деформации. Но с повышением скорости волочения все более начинает проявляться тепловой эффект, как результат преобразования механической энергии в тепловую (тепло деформации и тепло внешнего трения) в результате

чего повышается температура и уменьшается сопротивление деформации протягиваемого металла.

Одновременно с этим изменяется и коэффициент контактного трения, как от влияния изменения скорости скольжения, так и от влияния температуры контактной поверхности на физическое состояние смазки и, следовательно, на ее активность и способность не выжиматься из очага деформации. Кроме того, необходимо добавить, что на касательные напряжения влияют также и изменения физического состояния протягиваемого металла [11 - 14].

Однако с повышением скорости волочения несмотря на возможное понижение сопротивления деформации металла из-за теплового эффекта, и следовательно, понижения напряжения волочения, оно может превысить не только предел текучести, но и предел прочности, соответствующий состоянию металла в момент выхода его из волоки, и это неизбежно приведет к обрыву. Скорость, при которой наступит обрыв, и будет предельной для данных условий процесса.

Из сказанного следует, что при заданных параметрах волочения имеется максимум скорости, при переходе за пределы которого процесс становится не устойчивым и зачастую технически не осуществимым. Этот максимум можно считать технологическим максимумом скорости.

Технический максимум скорости, определяемый мощностью двигателя, прочностными характеристиками деталей и "термическим коэффициентом стана\*" (характеризует интенсивность охлаждения проволоки на стане в процессе волочения), на вновь проектируемых станах может быть очень высоким.

Экономические факторы (заработная плата, расход электроэнергии, амортизация оборудования) также зависят от скорости волочения [15]. Однако с увеличением скорости изменение указанных факторов не однозначно: до определенной величины скорости, они уменьшаются (рис.21), затем кривая цеховой стоимости продукции (кривая 4) возрастает. Это возрастание обусловлено такими объективными факторами, как несоответствие снижения потребления электроэнергии с увеличением скорости, удорожание электропривода, усложнение конструкции и т.д.

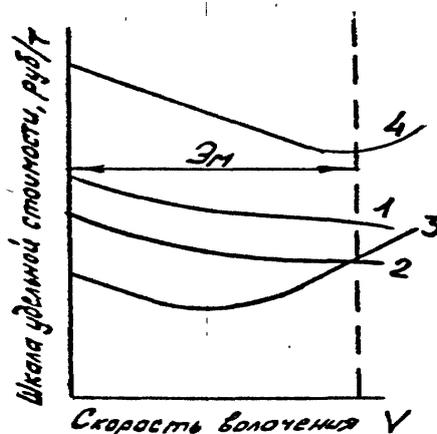


Рис. 21. Схема изменения зарплаты (1), стоимости электроэнергии(2), амортизации(3) и цеховой стоимости(4) падающих на единицу продукции в зависимости от изменения скорости волочения. Э<sub>м</sub>- экономический максимум скорости волочения.

Как видно из рисунка 21, кривая 4 имеет минимум, который определяет ту максимальную скорость волочения, при которой цеховая стоимость продукции минимальна. Это и есть экономический максимум скорости.

Технологический, технический и экономический максимумы скорости в общем случае не совпадают, поэтому оптимальной скоростью считается такая скорость волочения, которая технологически и технически осуществима и экономически целесообразна.

Из перечисленных максимумов расчетному определению поддается технический, остальные определить расчетом трудно. Поэтому оптимальные скорости волочения приходится подбирать на основании изучения и анализа действующих станов, руководствуясь положениями о связи скорости волочения с технологическими и техническими условиями процесса волочения и его экономическими результатами (рис. 22).

В методике приведены данные, которые следует рассматривать лишь как исходные, определяющие порядок величин скоростей волочения (табл. 13) [3].

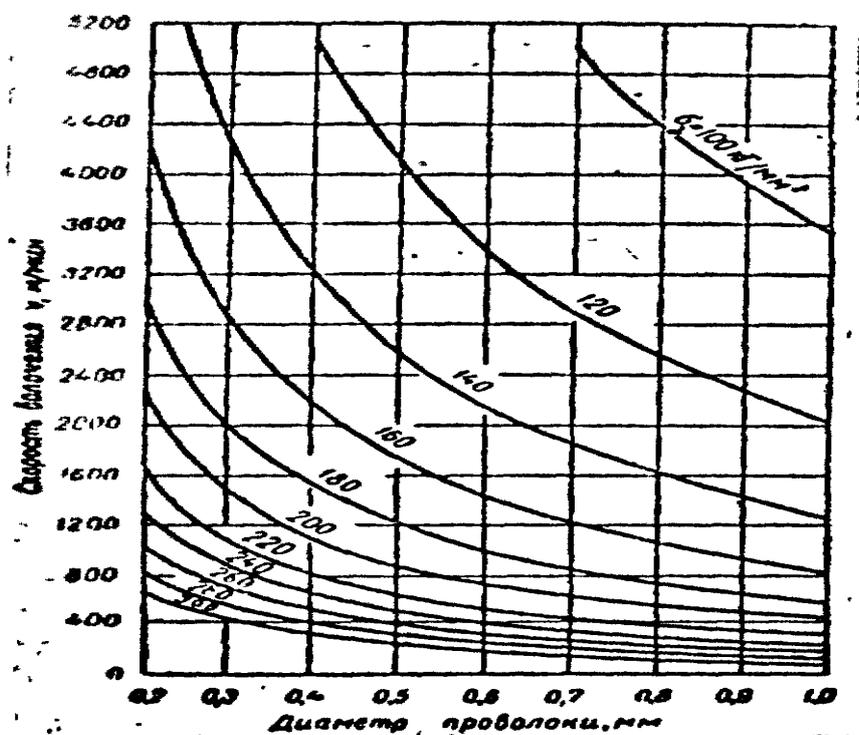


Рис. 22. График оптимальных скоростей волочения тончайшей и тонкой проволоки

С дальнейшим ростом скорости приращение производительности стана падает. При волочении проволоки с различными скоростями на любом маршруте можно выделить определенное значение скорости, разграничивающее количественный прирост производительности стана. Для низкоуглеродистой проволоки (маршрут с диаметра 2,0 мм до 1,15мм), такое значение скорости равно 800 м/мин. В диапазоне скоростей < 800 м/мин прирост скорости на 100 м/мин дает повышение производительности на 0,045 т/час, при скоростях > 800 м/мин и более такой же прирост скорости дает только 0,0062 т/час. На маршруте с диаметра 6,5 мм до 2,0, разграничивающая скорость равна 1000 м/мин, т.к. в

области скоростей < 1000 м/мин. прирост на 100 м/мин. дает повышение производительности 0,06 – 0,1 т/час, при скорости >1000 м/мин такому же приросту скорости соответствует повышение производительности только 0,04т/час.

Таблица 13

Скорость волочения  $V_{\text{вол}}$ , м/с

Тип стана	Диаметр проволок, мм.								
	15	10	7,5	5	4	3	2	1,5	1
Однократные	1	1,25	1,67	2	2,5	3	3,3	3,3	
Магазинные						5	6	11	18
Прямоточные и со скольжением									
Медь						5	8		15
Алюминий						5	8		12
Никель						5	8		10
Латунь						5	6		10
Бронза						4	5		6
Ст. мягкая						4	8		15
Ст. высокопрочная						2	3		5

При увеличении скорости волочения низкоуглеродистой проволоки на волочильных станах без скольжения свыше 800 - 1000 м/мин. происходит значительное (в 2 - 7 раз) снижение приращения производительности.

В таблице 14 приведены фактически применяемые скорости волочения и температуры проволоки на выходе при протягивании низко и высокоуглеродистой проволоки.

Как уже говорилось выше, при повышении скорости волочения все более проявляется тепловой эффект. Работа деформации при волочении переходит в тепло, являющееся результатом внутреннего и внешнего трения. Тепло, появляющееся при внутреннем трении, равномерно нагревает проволоку по всему сечению до температуры  $t_{\text{ср}}$ . А теплота внешнего трения кратковременно нагревает поверхность проволоки до очень высокой температуры  $t_{\text{к}}$ . Что бы процесс волочения проходил нормально, средняя температура проволоки  $t_{\text{ср}}$  и температура контактной поверхности  $t_{\text{к}}$  не должны превосходить предельных значений.

Если средняя температура проволоки после волочения не зависят от скорости, а определяется пределом прочности металла, величиной единичного обжатия и температурой изделия до протяжки ( $t_0$ ):

$$t_{\text{ср}} = t_0 = 5 \delta_{\text{ед}} \sigma_{\text{в}} \quad (51)$$

то температура на контактной поверхности пропорциональна корню кубическому скорости [4].

Возможные предельные скорости в таблице даны при действующих конструкциях системы охлаждения, достигнутом уровне качества смазки и инструменте.

При волочении низкоуглеродистой проволоки достигнута кратковременно максимальная скорость волочения 1500 м/мин. на волочильной машине ВС 6-7/550 АЗТМ.

$$t_k = t_0 = 3\delta_{ед} \cdot \sigma_\epsilon = 0,06 \cdot \sigma_\epsilon \sqrt{\frac{V \cdot d_k}{\delta_{ед}}} = K \cdot \sqrt[3]{V} \quad (52)$$

Таблица 14

Фактически применяемые скорости волочения

Материал	Тип машины	Диам. заготовки, мм	Диам. проволоки, мм	$\delta_{сум}$ , %	Температура на выходе, град, С	$V_{вол}$ факт. м/мин	$V_{пред}$ возможная, м/мин
в/у							
Ст. 60,70	магазин	3,3	1,2	87	185	415	400
Ст. 60,70	магазин	3,0	1,3	81	170	400	600
Ст. 60,70	магазин	3,5	1,4	84	190	400	600
Ст. 60,70	магазин	3,5	1,45	83	188	600	700
Ст. 60,70	магазин	3,8	1,65	81	195	360	600
Ст. 60,70	петлевой	2,6	1,01	85	195	720	700
н/у							
08кп, Г2С	прямоточный	6,5	1,9	91,5	208	1080	До 1500
08КП	магазин	6,5	2,19	88,5	200	860	До 1500
08КП	прямоточный	2,0	1,17	66,0	167	660	До 1500
08КП	прямоточный	2,0	1,18	65,0	127	800	До 1500
08КП	прямоточный	2,0	1,17	66,0	108	460	До 1500

На основе положений, разработанных Р.Б. Красильщиковым [4], допустимая скорость волочения стальной проволоки, при которой не возникает фазовых превращений (образование мартенсита) поверхностных слоев проволоки ( $t_k = 700^\circ\text{C}$ ;  $t_{cp} = 250^\circ\text{C}$ ;  $t_0 = 50^\circ\text{C}$ ) определится выражением

$$V = \frac{80 \cdot 10^6 \cdot \delta_{ед}}{d_k \cdot \sigma_\epsilon^2}, \quad \text{м/мин} \quad (53)$$

где:  $\delta_{ед}$  - единичное обжатие, определяемое (табл.1);  
 $d_k$  - диаметр проволоки после протяжки, мм.

$\sigma_B$  – предел прочности материала проволоки, кг/мм<sup>2</sup>.

Оптимальную скорость волочения стальной проволоки так же можно определять из рисунков 23 и 24. По утверждению И.А. Юхвеца [2] почти вся механическая работа, затраченная на волочение, преобразуется в очаге деформации в тепло, и лишь частично, не более 10% аккумулируется в проволоке в виде потенциальной энергии.

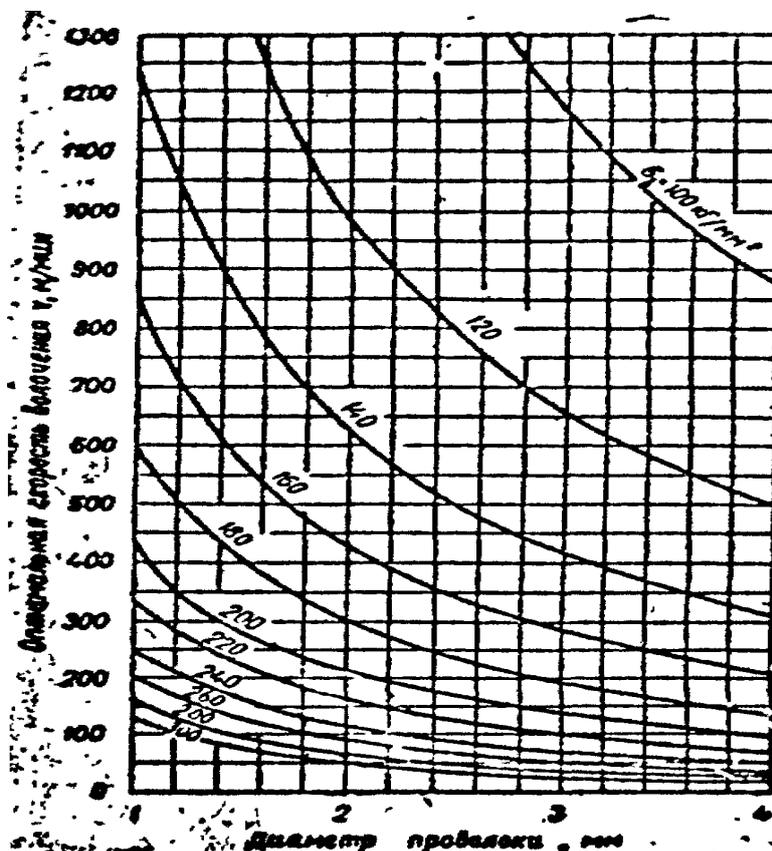


Рис.23. График оптимальных скоростей волочения тонкой и средней проволоки

В очаге деформации выделяется большое количество тепла около 800 ккал/час на каждый киловатт использованной мощности. Отвод столь большого количества тепла представляет определенные трудности. Причем в системе «проволока-волокна» последней отводится всего лишь 5-10% тепла внешнего трения, остальное поглощается проволокой [4]. Поэтому усиленное охлаждение волок не может привести к существенному увеличению допустимых скоростей волочения. По данным опытов А.Е. Рейнджа, увеличение расхода воды, охлаждающей волоку, в пять раз снизило температуру поверхности раздела в очаге деформации только на 10% [16].

Для ощутимого увеличения скорости волочения стальной углеродистой проволоки необходимо уменьшить влияние внешнего трения. Однако указанный путь эффективен при условии достаточно интенсивного отвода тепла, между протяжками.

Во время многократного волочения при недостаточном охлаждении проволоки на барабанах, температура проволоки перед последующей протяжкой

( $t_0$ ) может постепенно повышаться.

Это явление характерно для прямоточных станов, т.к. проволока идет из волоки в волоку по наикратчайшему пути, и запас проволоки на барабанах невелик. И хотя данная система станов благодаря простой траектории движения проволоки и отсутствию скручивания имеет высокий технический максимум скорости, фактическая величина скорости обработки металла относительно невелика (таб.14).

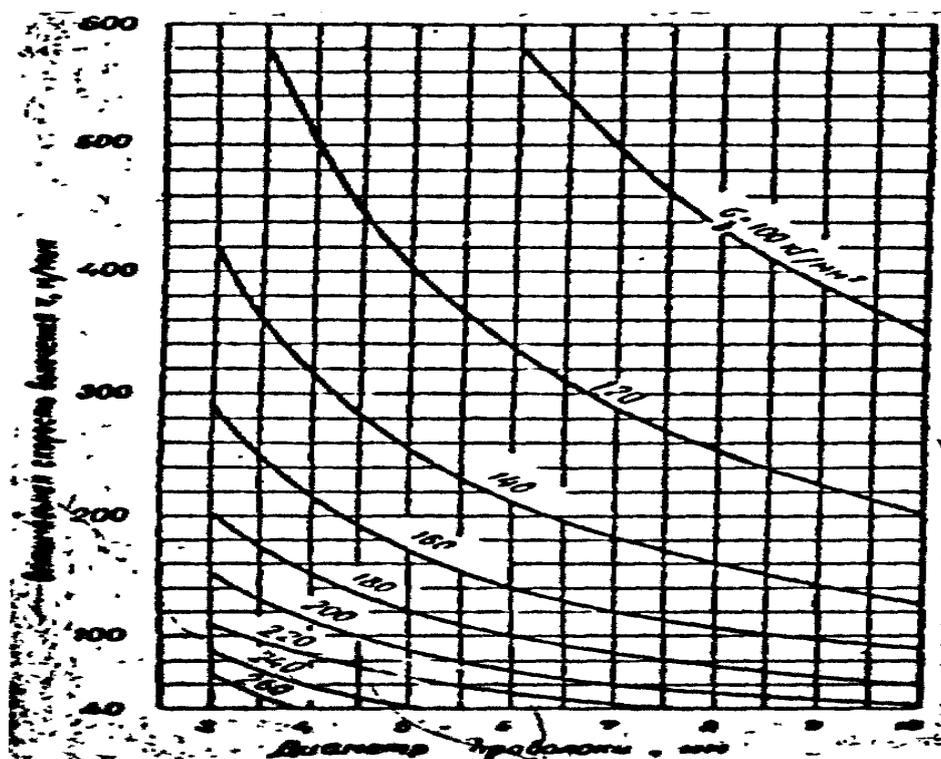


Рис. 24. График оптимальных скоростей волочения грубой проволоки

В настоящее время как у нас, так и за рубежом ведутся работы направленные на улучшение охлаждения проволоки в промежутках времени между последующими протяжками. Большое внимание уделяется улучшению охлаждения проволоки на барабане. Перспективное направление - создание стана объединяющего преимущества станов мокрого волочения (со скольжением) и прямоточных.

Явление повышения температуры проволоки по маршруту не характерно для станов мокрого волочения и станов магазинного типа. В первом случае проволока интенсивно охлаждается технологической эмульсией, во втором - благодаря запасу проволоки на барабане.

## 7. ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ

Конструктивно волочильные станы выполняются в виде одного многоступенчатого редуктора (однократные станы и станы со скольжением), или нескольких редукторов, скомпонованных в один агрегат на общей плите (станы

прямоточные и магазинные).

В станах со скольжением указанный редуктор называется "блоком тяговых роликов". Блок имеет один "выходной" вал, соединяемый с электродвигателем, и несколько (в зависимости от кратности стана) "выходных" валов, на которые насажены тяговые детали (рис. 16, 17, 21). Система зубчатых пар передает крутящий момент от электродвигателя к тяговым деталям.

В станах без скольжения редуктор называется "блоком барабана". Обычно это многоступенчатый зубчатый редуктор (рис. 25) с одним выходным валом, передающим крутящий момент тяговой детали.

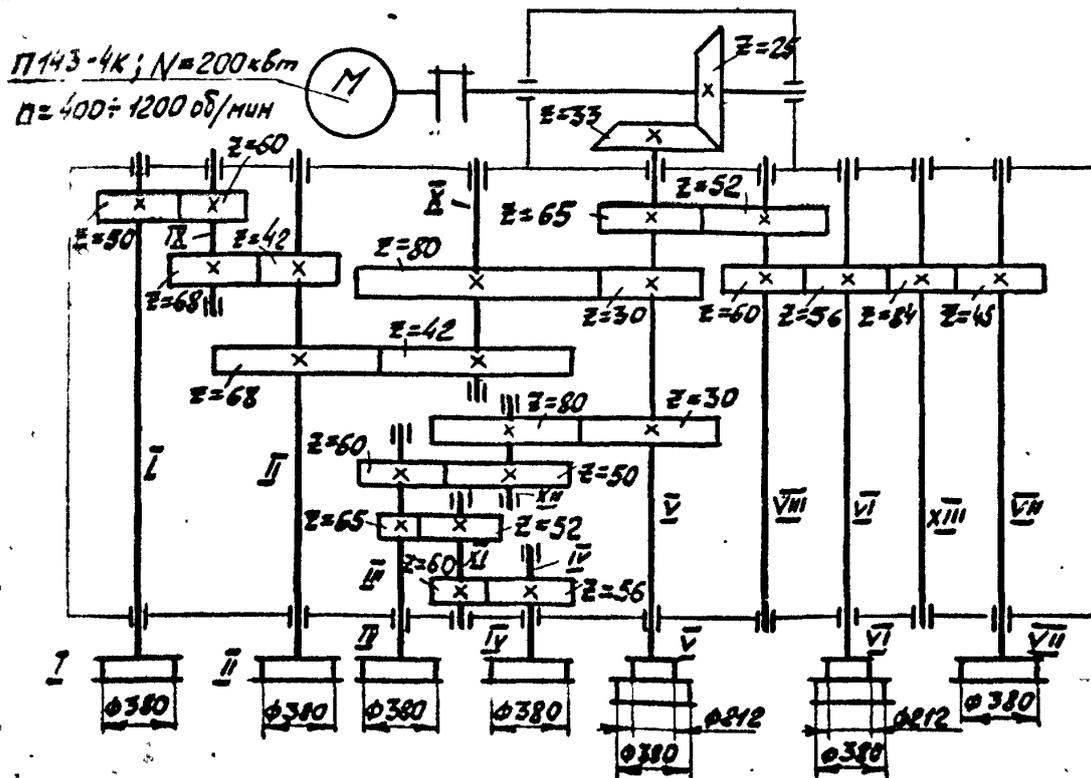


Рис. 25. Кинематическая схема волочильного стана ВСК-9

Прочностной расчет волочильного стана включает:

- а) разработку маршрутов волочения;
- б) определение сил волочения;
- в) определение мощности двигателя;
- г) расчет на прочность узлов и деталей.

Методика определения сил волочения и мощности двигателя даны выше.

### 7.1. Разработка маршрутов волочения

Маршрут волочения - последовательное уменьшение площади сечения проволоки при протяжке.

Известно, что линейные скорости тяговых деталей волочильных станов возрастают в определенной последовательности и связаны между собой кинематическими вытяжками. Другими словами, кинематические вытяжки это от-

ношение линейных скоростей двух смежных барабанов (27).

При составлении маршрута волочения оперируют технологическими обжатиями и вытяжками, которые в большинстве своем не совпадают с кинематическими, а расчет маршрутов волочения заключается в подборе таких значений  $\mu_{\text{тех}}$  и  $\delta_{\text{тех}}$ , которые обеспечивали бы требуемое качество и размеры обрабатываемой проволоки и соответствовали бы кинематике волочильного стана.

При составлении маршрутов волочения на прямоточных станах за основу принимаются средние кинематические вытяжки стана.

На станах магазинного типа соотношение кинематических и технологических вытяжек должно соответствовать условию (31).

При составлении маршрутов для станов со скольжением необходимо руководствоваться условием (34), при этом стремиться к минимальной величине скольжения. Однако с условием, что при разработке волок скорость тяговой детали всегда была бы несколько больше скорости проволоки (подробнее параграф 6.4).

Так как волочильные станы являются, как правило, универсальными агрегатами, предназначенными для обработки проволоки различных сечений и марок, то составляется несколько маршрутов волочения, на каждый из которых определяются силы волочения и мощности двигателя.

## **7.2. Расчет на прочность узлов и деталей волочильного стана**

Конструктивные особенности волочильных станов со скольжением и без скольжения накладывают свой отпечаток на методику прочностных расчетов указанных типов станов. Рассмотрим их подробнее.

### Станы без скольжения

В настоящее время станы многократного волочения конструируются блочного типа. Блок стана представляет собой зубчатый многоступенчатый редуктор с тяговой деталью посаженной на выходной вал. Прочностной расчет стана сводится к расчету одного наиболее тяжело нагруженного блока,

По составленным маршрутам волочения определяются силы волочения и мощности на выходном валу блоков стана. По наибольшей мощности подбирается соответствующий двигатель, который и закладывается на все блоки стана. Прочностной расчет блока ведется по двигателю, т.е. из условия создания двигателем наибольшего крутящего момента. Методика прочностного расчета зубчатых зацеплений, узлов и деталей блока стана аналогична общепринятой методике курса "Детали машин".

### Станы со скольжением

Конструктивно редуктор (блок тяговых роликов) указанных станов значительно отличается от рассмотренных выше блоков барабанов станом скольжения (рис.20). Блок тяговых роликов имеет общий двигатель на все тяговые ролики. По этой причине способ определения нагрузки на детали блока, исходя из наибольшего крутящего момента двигателя, представляется весьма затрудни-

тельными и мало точным.

В этом случае целесообразно вести расчет на истинную нагрузку, т.е. на крутящие моменты, возникающие на тяговых шайбах в процессе, волочения. Последовательность определения нагрузки следующая:

а) по нижеприведенной методике определяется КПД блока тяговых роликов;

б) по составленным маршрутам определяются силы волочения, назначается скорость чистой шайбы и определяются скорости рабочих поверхностей остальных тяговых шайб, (35);

в) определяется мощность двигателя, (55).

В некоторых случаях для определения мощности двигателя пользуются упрощенным методом, заключающимся в следующем: определяется мощность на каждую протяжку по формуле:

$$N_i = \frac{P_i \cdot V_i}{102}, \text{ кВт} \quad (55)$$

где:  $P_i$  - сила волочения, кг;

$V_i$  - линейная скорость поверхности принимающей шайбы, м/с.

Затем найденные мощности суммируются

$$N_{\Sigma} = \sum N_i \quad (56)$$

и определяется мощность двигателя

$$N_{дв} = \frac{N_{\Sigma}}{\eta \cdot a}, \text{ кВт} \quad (57)$$

где:  $\eta$  - КПД блока тяговых роликов;

$a$  - коэффициент, учитывающий потери мощности на изгиб проволоки около шайбы и трение возникающее между витками проволоки и шайбами, численно равный 0,80-0,90.

Большее значение принимается при меньшей кратности стана, меньшее при большей.

Данные расчетов по каждому маршруту сводят в таблицу, построенную по принципу таблицы 15.

г) на каждый маршрут определяют, крутящие моменты на тяговых шайбах:

$$M_{кр}^{III} = \sum_{n=1}^{n=k} P_n \cdot \frac{D_n}{2}, \quad (58)$$

где:  $P_n$  - сила волочения в "n"-ой волоке, н;

$D_n$  - диаметр "n" тяговой шайбы, мм;

$k$  - количество ступеней тяговой шайбы.

Затем по  $M_{кр}^{III}$  находят крутящие моменты на валах блока тяговых роликов. Расчеты сводят в таблицу (например табл.16). Указанную таблицу рассматривать совместно с рисунком 25. При анализе такой таблицы выделяют наибольшие крутящие моменты на каждом валу. По этим моментам и производят прочностной расчет зубчатых зацеплений, деталей и узлов стана.

### 7.3. Расчет коэффициента полезного действия волочильного стана

Коэффициент полезного действия волочильного стана (КПД) определяется как произведение КПД отдельных звеньев:

$$\eta_{ст} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n, \quad (59)$$

где:  $\eta_{ст}$  - КПД стана;

$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$  - звеньев стана (подшипники, зубчатые передачи, червячные передачи, ременные передачи и т.д.).

Значения коэффициентов полезного действия элементов стана приведены в таблице 17.

Таблица 17

Значения КПД звеньев стана

Тип звена		КПД
Подшипники	Качения	0,995
	скольжения	0,98
Клиноременная передача		0,96
Зубчатые зацепления	Цилиндрические	0,98
	конические	0,97
Червячные передачи при обильной смазке	Однозаходная	0,61
	Двухзаходная	0,76
	трехзаходная	0,81

Ниже приведены примеры расчета КПД стана без скольжения (прямоточного) и стана со скольжением.

Пример 1.

Определение КПД прямоточного стана ВС 3-4/550 (кинематическая схема рис. 26).

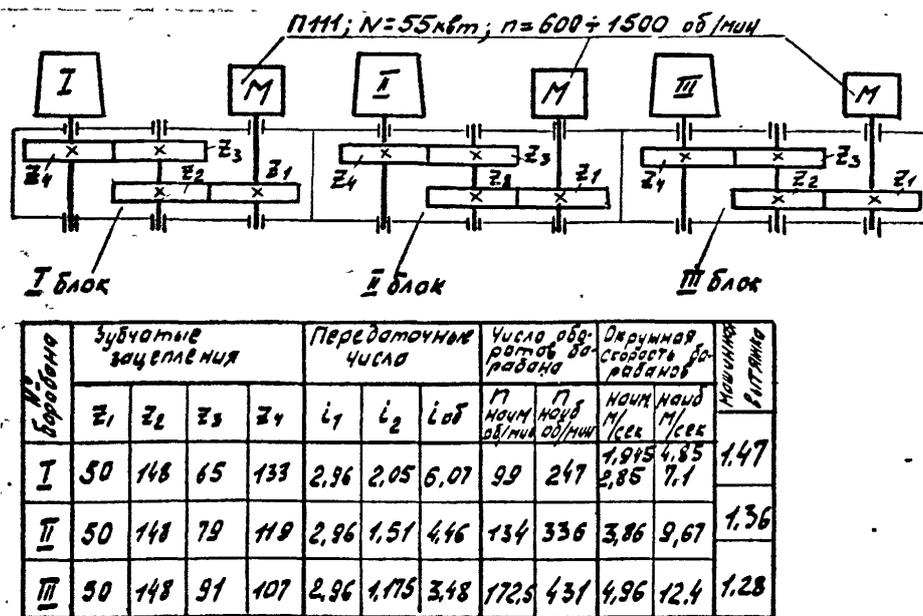


Рис. 26. Кинематическая схема волочильного стана ВС 3-4/550

В силу того, что указанный стан скомпонован из отдельных блоков, определение КПД стана сводится к определению КПД блока.

$$\eta_{ст} = \eta_{цк}^2 \cdot \eta_{пк}^3 = 0,98^2 \cdot 0,995^3 = 0,94$$

где:  $\eta_{ст}$  - КПД блока стана;

$\eta_{цк}$  - КПД цилиндрических зубчатых колес, 0,98;

$\eta_{пк}$  - КПД подшипников качения, 0,995;

2, 3 - степени, показывающие число однотипных звеньев в рассматриваемом блоке.

### Пример 2.

Определение КПД стана со скольжением ВСК-13 (кинематическая схема рис.20).

Если рассматриваемый стан имеет общий привод тяговых шайб и несколько, например, "К", кинематических цепей от источника энергии до рабочих органов (тяговых шайб), то КПД стана определяется по следующей формуле:

$$\eta_{ст} = \eta_{об} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad \eta_k \quad (60)$$

где:  $\eta_{ст}$  - КПД стана;

$\eta_{об}$  - КПД общей кинематической цепи от двигателя до последнего общего звена;

$\eta_1$  - КПД 1-й кинематической цепи;

$\eta_2$  - КПД 2-й кинематической цепи;

$\eta_3$  - КПД 3-й кинематической цепи;

$\eta_k$  - КПД n-й кинематической цепи.

Коэффициент полезного действия кинематической цепи определяется по формуле:

$$\eta_k = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad \eta_n \quad (61)$$

где:  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_n$  - КПД звеньев кинематической цепи (зубчатые передачи, подшипники, червячные передачи и т.д.).

Стан ВСК-13 имеет общий привод и три кинематические цепи от двигателя до тяговых шайб. Для определения КПД стана используем формулы (61, 60).

КПД общей, 1-й, 2-й и 5-й кинематических цепей определяется по формуле (61).

1-я кинематическая цепь: I тяговая шайба – Z52 – Z56 – Z63 – Z45 – Z85 – Z23 – Z80 – Z28

$$\eta_1 = \eta_{ц.к}^4 \cdot \eta_{п.к}^4 = 0,98^4 \cdot 0,995^4 = 0,904$$

где:  $\eta_{ц.к}$  - КПД цилиндрических зубчатых колес, 0,98;

$\eta_{п.к}$  - КПД подшипников качения, 0,995;

4;4 - степени, показывающие число однотипных звеньев в кинематической цепи.

2-я кинематическая цепь: IV тяговая шайба— Z55 – Z59 – Z63 – Z69 – Z39 – Z79 – Z29

$$\eta_2 = \eta_{ц.к}^4 \cdot \eta_{п.к}^4 = 0,98^4 \cdot 0,995^4 = 0,904$$

где:  $\eta_{ц.к}$  - КПД цилиндрических зубчатых колес, 0,98;

$\eta_{п.к}$  - КПД подшипников качения, 0,995.

3-я кинематическая цепь. (В кинематической цепи не учитываем два червячных зацепления:  $Z_4 = 1$ ;  $Z_к = 47$  и  $Z_4 = 1$ ;  $Z_к = 63$  т.к. они не силовые) VII тяговая шайба – Z44 – Z84 – Z55 – Z59 – Z52 – Z63

$$\eta_3 = \eta_{ц.к}^4 \cdot \eta_{п.к}^4 = 0,98^4 \cdot 0,995^4 = 0,904$$

где:  $\eta_{ц.к}$  - КПД цилиндрических зубчатых колес, 0,98.

$\eta_{п.к}$  - КПД подшипников качения, 0,995.

Общая кинематическая цепь: Двигатель – Z22 – Z35

$$\eta_{об} = \eta_{кк}^1 \cdot \eta_{пк} = 0,97 \cdot 0,995 = 0,965$$

где:  $\eta_{кк}$  - КПД конических зубчатых колес, 0,97;

$\eta_{пк}$  - КПД подшипников качения, 0,995.

КПД стана определяется по формуле(60):

$$\eta_{ст} = \eta_{об} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_{пк} = 0,965 \cdot 0,904^3 \cdot 0,995 = 0,7$$

где:  $\eta_{об}$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  - КПД общий, 1-ой, 2-ой и 3-ей кинематических цепей;

$\eta_{пк}$  - КПД подшипников качения вала V= 0,995.

Полученные при расчете КПД справедливы для нормального режима работы стана. Вместе с тем на коэффициент полезного действия значительное влияние оказывают условия работы стана, нарушение работы смазочной системы или же неправильно выбранное качество смазочных веществ. Кроме того, существенное влияние на КПД стана оказывает качество сборки узлов и деталей.

#### 7.4. Расчет динамических нагрузок на тяговых деталях волоочильных станов

В некоторых случаях тяговые детали волоочильных станов выполняют роль аккумуляторов проволоки (барабаны однократных станов, барабаны станов магазинного типа, чистовые барабаны прямоточных станов, а так же тяговые ко-

нуса станов со скольжением). При вращении системы барабан-проволока возникают силы инерции, которые можно разделить на две группы.

а) Уравновешенные силы инерции, возникающие от вращения самого барабана;

б) неуравновешенные силы инерции, возникающие от вращения проволоки.

Уравновешенные силы инерции, при существующих скоростях волочения, не представляют особой опасности для стана и проволоки, т.к. они вызывают во вращающейся массе напряжения растяжения, которые учитываются при выборе материала барабана. Неуравновешенные силы инерции при неблагоприятных условиях могут представлять опасность для целостности стана. Исключить это явление практически невозможно, т.к. витки накопленной проволоки имеют некоторую свободу движения и, следовательно, центр тяжести мотка проволоки не совпадает с осью вращения барабана.

Величина неуравновешенной центробежной силы инерции определяется по формуле:

$$P_{ц} = m \cdot r \cdot \omega^2, \quad (62)$$

где:  $\omega$  - угловая скорость;

$P_{ц}$  - центробежная сила инерции, н;

$r$  - расстояние от центра тяжести мотка проволоки до оси вращения (эксцентриситет), м;

$m$  - масса мотка проволоки,  $m = G / g$ , кг;

$G$  - вес мотка, н;

$g$  - ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ .

Из формулы (62) видно, что при прочих равных условиях ( $m$  и  $r$ ) наибольшая центробежная сила инерции ( $P_{ц}$ ) возникает при наибольшей скорости волочения, т.е. действию неуравновешенной динамической нагрузки в большей степени подвержены чистовые барабаны.

При особо неблагоприятных условиях (большая скорость волочения, большая масса проволоки, плохое бунтообразование, большой эксцентриситет), возникающая динамическая нагрузка может быть настолько велика, что вызовет в шпинделе барабана напряжения, превосходящие допускаемые. Поскольку барабан закреплен консольно, то от действия силы  $P_{ц}$  возникает изгибающий момент  $M = P_{ц} \cdot L$  (рис.27), который необходимо учитывать при расчете вала барабана на прочность, суммируя его с изгибающим моментом от силы волочения.

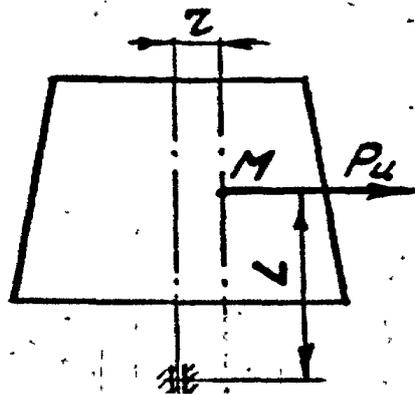


Рис. 27. Схема действия неуравновешенных инерционных сил на волочильный барабан.

Ниже приводится расчет неуравновешенной нагрузки, возникающей на чистовом барабане стана ВС 6/350, при  $n = 650$  об/мин,  $G = 80$  кг,  $r = 0,01$  м. Подставляя данные в (62) получаем

$$P_{ц} = \frac{80}{9,81} \cdot 0,01 \left( \frac{3,14 \cdot 650}{30} \right)^2 = 338 \text{ кг}$$

Неуравновешенные динамические нагрузки ограничивая вес мотка проволоки на чистовом барабане, снижают производительность стана. Прием проволоки на катушку намоточного аппарата разгружает чистовой барабан волочильного стана от неуравновешенных динамических нагрузок и увеличивает его производительность.

## 8. ТЯГОВЫЕ ДЕТАЛИ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ

В данной методике рассматривается расчет волочильных станов для проволоки, наматываемой на вращающиеся тяговые детали.

Способ волочения (без скольжения или со скольжением) во многом определяет конструкцию тяговой детали. Но, несмотря на различие конструкции шайб и барабанов (рис. 28 и рис. 29), рабочие участки, принимающие на себя проволоку и называемые галтелью, у них подобны.

Галтель состоит из приемного участка, выполняемого радиусом равным двум диаметрам наибольшей предполагаемой к волочению проволоки и конусного участка, выполняемого с углом уклона от  $0^{\circ}55'$  до  $2^{\circ}50'$ . Обычно высота галтели равна 10 - 40 кратному диаметру проволоки (рис. 28).

Одной из основных величин, характеризующих тяговую деталь, является её диаметр, определяемый по галтели (рис. 28, 29, табл. 18, 19).

Совокупность профиля галтели, диаметра и конфигурации внутренней полости, определяющей интенсивность охлаждения проволоки на тяговой детали, называется геометрией тяговой детали. (Все нижеследующие расчеты проводятся применительно к барабанам, т.к. геометрия тяговых шайб является частным случаем последних).

х) Тяговые детали станом со скольжением принято называть шайбами станом без скольжения - барабанами.

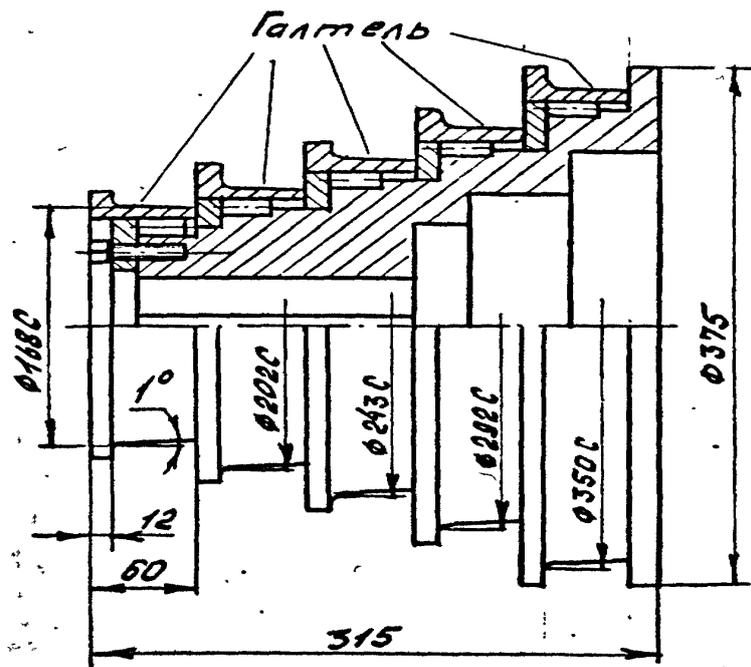


Рис.28. Тяговая шайба волочильного стана

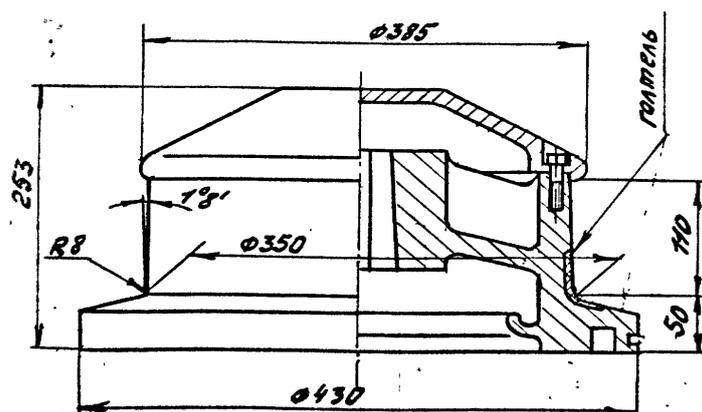


Рис. 29. Тяговый барабан волочильного стана.

Таблица 18

Классификация волочильных станов по диаметру протягиваемой проволоки

стан для волочения проволоки	диаметр протянутой проволоки, мм	диаметр чистового барабана, мм
1. Толстой	> 6	650...750
2. Утолщенной (грубой)	6...3	550...650
3. Средней	3...1,8	550
4. Тонкой	1,8...0,8	350
5. Тончайшей	0,8...0,5	200...250
6. Наитончайшей	< 0,5	150...200

Нормальный ряд диаметров барабанов и основных параметров станов  
однократного волочения

Диаметр барабана, мм	Мах диаметр, мм		Мах предел прочности		Скорость волочения, м/сек	
	Готовой проволоки	заготовки	Кн/мм <sup>2</sup>	кг/мм <sup>2</sup>	мягкие и твердые металлы	труднодеформируемые сплавы
1000	25	27	0,49	50	0,5 – 1,5	--
750	20	22	0,78	80	0,5 – 1,5	--
650	12	14	0,98	100	1,0 – 3,0	0,5 – 1,5
550	6	8	1,07	110	1,0 – 3,0	0,5 – 1,5
450	4	6	1,17	120	1,0 – 3,0	--
350	1,6	3	1,37	140	1,5 – 4,5	0,5 – 1,5
250	0,8	2,0	1,56	160	1,5 – 4,5	0,5 – 1,5
200	0,4	1,6	1,96	200	1,5 – 4,5	0,5 – 1,5

Геометрия барабанов оказывает большое влияние на работоспособность волочильных станов и на качество получаемой проволоки [3, 10]. Однако до настоящего времени основные геометрические параметры барабанов (диаметр и угол уклона конусного участка галтели) выбираются конструктивно без достаточного теоретического обоснования.

Весьма большое значение имеет правильный выбор диаметра барабана, обусловленного величиной суммарных напряжений, возникающих в проволоке в результате пластических деформаций при волочении и изгибе её вокруг данного барабана.

Необоснованно назначенный профиль галтели повышает обрывность проволоки, нарушает нормальный подъем её витков и ускоряет износ приемного участка галтели, выражающийся в образовании кольцевой канавки, ухудшает охлаждение проволоки.

Сделана попытка установить аналитические зависимости основных геометрических параметров волочильных барабанов.

### 8.1. Расчет диаметра тяговых деталей волочильных станов

Согласно схемы изгиба, предложенной в работе [3], любой участок витка проволоки можно уподобить изогнутому брусу, в поперечных сечениях которого произошли пластические деформации (рис.30).

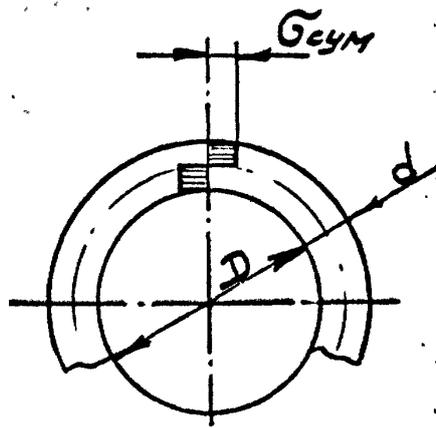


Рис. 30. Схема изгиба проволоки около тяговой детали

Наибольшие пластические формоизменения испытывают участки сечения проволоки близко расположенные к внешней и внутренней окружности витка.

С уменьшением отношения  $D/d$ , напряжения изгиба в поперечных сечениях проволоки будут расти, при увеличении отношения  $D/d$  уменьшается.

Для определения диаметра волоочильного барабана необходимо установить граничные условия состояния внешнего слоя проволоки.

Так как наибольшие растягивающие напряжения при изгибе проволоки вокруг барабана испытывают наружные её слои, то их состояние и будет критерием при определении диаметра волоочильного барабана.

Используя теорию пластического изгиба [17], можно установить связь между напряжениями изгиба ( $\sigma_{из}$ ) и радиусом кривизны нейтрального слоя ( $\rho_{ц}$ ). Для чего необходимо убедиться в возможности использования зависимостей выражающих закон связи и между обобщенными напряжением и деформацией для случая чистого изгиба.

Известно, что проволока поступает на барабан нагруженная продольной силой - силой волочения, при этом в процессе намотки на барабан нейтральный слой проволоки смещается относительно серединной поверхности в направлении внутренней поверхности на величину «с», определяемую нижеприведенной зависимостью:

$$c = \frac{P_v}{2\sigma_s}, \quad (63)$$

где  $P_v$  - продольная сила (сила волочения);

$\sigma_s$  - предел текучести проволоки.

Представив силу волочения через напряжения  $\sigma_{вол}$  и приняв во внимание, что в общем случае  $\sigma_{вол} = (0,5 - 0,7) \sigma_s$  получим:

$$P_v = (0,5 - 0,7) \sigma_s d \quad (64)$$

где  $d$  - диаметр проволоки (следует учесть, что все силы рассматриваются в плоскости).

Подставив (64) в (63) получаем

$$c = (0,5 - 0,7) \sigma_s \cdot d/2 \cdot \sigma_s = d/4 - d/3 \quad (65)$$

Иными словами смещение нейтрального слоя относительно серединной

поверхности проволоки составит от 25% до 35%, что дает возможность использовать нижеследующие зависимости из теории чистого изгиба.

Известно, что задача о чистом изгибе решается как одномерная (рис. 31), т.е. считают длину бруса значительно больше его высоты. При этом равенство, выражающее закон связи между обобщенными напряжением и деформацией, имеет следующий вид [17]:

$$\sigma_x = \sigma_s \left( \frac{l_{xx}}{l_s} \right)^n = \frac{\sigma_s}{l_s^n} \cdot l_{xx}^n, \quad (66)$$

где  $l_{xx}$  - относительное удлинение,

$l_s$  - деформация, соответствующая пределу текучести,

$n$  - численный коэффициент лежащий в пределах от 0 до 1;

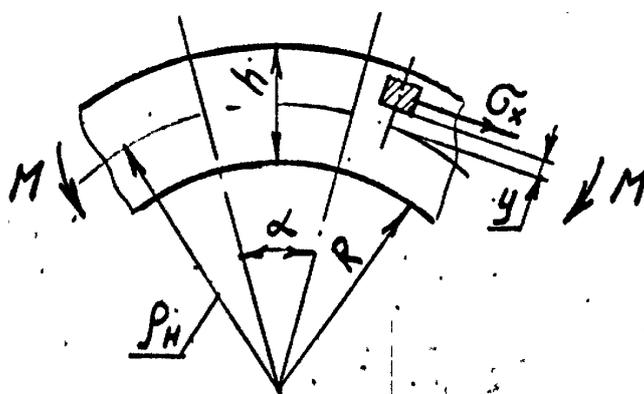


Рис. 31. Действие сил в сечении проволоки при изгибе

Из рисунка 31 следует, что:

$$l_{xx} = \frac{\alpha \cdot (\rho_n + y) - \rho_n \cdot \alpha}{\rho_n \cdot \alpha} = \frac{y}{\rho_n}. \quad (67)$$

Приняв в (67)  $y = h/2 = d/2$ , где  $d$  - диаметр наматываемой проволоки, и выразив  $\rho_n$  через  $R + d/2$ , где  $R$  - радиус волочильного барабана. Зависимость (67) можно представить следующим образом

$$l_{xx} = d/2 \cdot (R + d/2) \quad (68)$$

Подставляя (68) в (66) получим зависимость напряжений изгиба ( $\sigma_{из}$ ) в наружном слое проволоки от величины радиуса волочильного барабана:

$$\sigma_{из} = \left[ \frac{d}{2 \cdot (R + d/2)} \right]^n \cdot \frac{\sigma_s}{e_s^n}. \quad (69)$$

Учитывая (65) для упрощения (69) можно принять  $R + d/2 = R$  так как  $d/2$  в (69) величина весьма малая по сравнению с  $R$  тогда:

$$\sigma_{из} = \left( \frac{d}{D} \right)^n \cdot \frac{\sigma_s}{e_s^n} \quad (70)$$

Но  $\sigma_s / e_s^n$  есть ни что иное, как модуль пластичности  $E'$ . В этом случае (70) принимает вид

$$\sigma_{из} = \left(\frac{d}{D}\right)^n \cdot E' \quad (71)$$

Для упрощения этого уравнения, кривую связи между напряжением и деформацией за пределом текучести аппроксимируем касательной к ней, проведенной через точку ( $e_s$  ;  $\sigma_s$  ). Это означает, что в выражении  $(d/D)^n$  принимаем  $n=1$ . В результате выражение (71) приобретает вид

$$\sigma_{из} = \frac{d}{D} \cdot E' \quad (72)$$

Откуда

$$D = \frac{d \cdot E'}{\sigma_{из}} \quad (73)$$

В работах [2, 4, 6] указывается на необходимость учета растягивающих напряжений волочения в проволоке при выборе диаметра барабана, т.к. суммарные напряжения изгиба и волочения могут принять значительные размеры иногда превосходящие предел прочности.

Известно, что проволока перед поступлением на волочильный барабан уже находится в напряженном состоянии под действием силы волочения ( $P_v$ ). Следовательно, минимальный диаметр волочильного барабана должен быть таким, чтобы суммарные напряжения во внешнем слое проволоки ( $\sigma_{из} + \sigma_{вол}$ ) не превышали бы предела прочности ( $\sigma_v$ ),

$$\sigma_{из} + \sigma_{вол} = \sigma_{сум} \ll \sigma_v \quad (74)$$

а минимальный - чтобы  $\sigma_{сум}$  были не ниже предела текучести

$$\sigma_{из} + \sigma_{вол} = \sigma_{сум} \geq \sigma_s \quad (75)$$

или иными словами, граничные значения величины  $\sigma_{сум}$  равны

$$\sigma_s \leq \sigma_{сум} \ll \sigma_v \quad (76)$$

Учитывая выше изложенное, зависимость (73) можно представить следующим образом

$$D = \frac{d \cdot E'}{\sigma_{сум} - \sigma_{вол}} \quad (77)$$

Приведенная зависимость связывает один из основных геометрических параметров волочильного барабана - его диаметр ( $D$ ) с механическими характеристиками, размером проволоки ( $E'$  ;  $d$ ), силой волочения, выраженной через напряжения ( $\sigma_{вол}$ ) и напряжениями в поверхностном слое проволоки ( $\sigma_{сум}$ ).

### Примеры расчета.

Пример 1. Определить диаметр чистового волочильного барабана, принимающего высокоуглеродистую проволоку из стали 70, диаметром 1 мм с пределом прочности  $\sigma_v = 2000$  н/мм<sup>2</sup>. При намотке в поверхностном слое проволоки не должно быть пластических деформаций, т.е. проволока должна быть равновесной. Маршрут волочения с диаметра 3 мм на диаметр 1 мм. Суммарное обжатие  $\sigma_{сум}$  равно 89%.

Исходя из заданных условий  $\sigma_{\text{сум}} < \sigma_s$  в этом случае в (77)  $E' = E = 2,2 \cdot 10^5$ , н/мм<sup>2</sup>. Для указанной марки проволоки зависимость  $\sigma_s$  от  $\delta_{\text{сум}}$  выражается уравнением  $\sigma_{\text{сум}} = 40 + 10 \cdot \delta_{\text{сум}}^{0,47}$ , откуда  $\sigma_s = 1500$  н/мм<sup>2</sup>.

Учитывая, что в поверхностном слое проволоки не должно возникать пластических деформаций, принимаем  $\sigma_{\text{сум}} = 1000$  н/мм<sup>2</sup>. Для определения напряжения волочения  $\sigma_{\text{вол}} = P_{\text{вол}} / F_1$ , где  $P_{\text{вол}}$  - сила волочения (н),  $F_1$  - площадь сечения проволоки (мм<sup>2</sup>) принимаемой на барабан. Необходимо определить силу волочения  $P_{\text{вол}}$ .

Воспользуемся формулой Красильщикова Р.Б. [4]:

$$P_{\text{в}} = 0,6 \cdot d_0^2 \cdot \sigma_{\text{в.ср}} \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед}}^{\text{ср}}} \quad (78)$$

Определим величины, входящие в (78). Единичное обжатие ( $\delta_{\text{ед}}$ ) для высокоуглеродистой проволоки рекомендуется 15% - 35% принимаем  $\delta_{\text{ед}} = 15\%$ , отсюда  $d_0 = 1,09$  мм. Для определения среднего предела прочности ( $\sigma_{\text{в.ср}}$ ) необходимо определить предел прочности проволоки до деформации ( $\sigma_{\text{в.н}}$ ). Согласно кривой изменения  $\sigma_{\text{в}}$  в зависимости от  $\delta_{\text{сум}}$  получим  $\sigma_{\text{в.н}} = 1900$  н/мм<sup>2</sup>, так как  $\delta_{\text{сум}}$  при волочении с диаметра 3 мм до диаметра 1,09 мм равно 87%,  $\sigma_{\text{в.к}} = 2000$  н/мм<sup>2</sup> (из условия примера). Тогда

$$\sigma_{\text{в.ср}} = \frac{\sigma_{\text{в.н}} + \sigma_{\text{в.к}}}{2} = \frac{1900 + 2000}{2} = 1950 \text{ н/мм}^2.$$

Подставляя данные в (78) получаем

$$P_{\text{в}} = 0,6 \cdot 1,09^2 \cdot 1950 \cdot \sqrt{0,15} = 538 \text{ н};$$

$$\sigma_{\text{вол}} = P_{\text{в}} / F_1 = 686 \text{ н/мм}^2.$$

По (77) определяем диаметр барабана

$$D = \frac{1 \cdot 2,2 \cdot 10^5}{1000 - 686} = 700 \text{ мм}.$$

Пример 2. Определить диаметр барабана однократного волочильного стана предназначенного для волочения проволоки

а) по маршруту с диаметра 12мм – до диаметра 10,4мм,  $\sigma_{\text{в.н}} = 950$  н/мм<sup>2</sup>;

б) по маршруту с диаметра 20мм - до диаметра 17,3мм,  $\sigma_{\text{в.н}} = 600$  н/мм<sup>2</sup>.

Для нормального бунтообразования витки проволоки на барабане должны претерпеть пластическую деформацию, т.е.  $\sigma_{\text{сум}} > \sigma_s$ .

Вариант (а).

Из задания  $\delta = 25\%$ ,  $\sigma_{\text{в.н}} = 950$  н/мм<sup>2</sup> (из условия).  $\sigma_{\text{в.к}} = 1200$  н/мм<sup>2</sup>.

$$\sigma_{\text{в.ср}} = \frac{950 + 1200}{2} = 1075 \text{ н/мм}^2$$

Сила волочения согласно формуле (78)  $P_{\text{вод}} = 0,6 \cdot 12^2 \cdot 1075 \cdot \sqrt{0,25} = 464400 \text{ н}$ .

Напряжение волочения:

$$\sigma_{\text{вол}} = P_{\text{вол}} / F_1 = 547 \text{ н/мм}^2$$

Предел текучести  $\sigma_s = 1100$  н/мм<sup>2</sup> [17].

Определим  $E'$ , для чего диаграмму деформации материала проволоки представим в виде ломаной состоящей из прямолинейных участков (рис.32),

как предложено в работе [17], тогда  $E'$  можно представить, как отношение напряжения  $\sigma_i$ , лежащего в пластической области и соответствующей ему относительной деформации  $\varepsilon_i$ , то есть  $E' = \operatorname{tg} \beta$ . Для нахождения  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  воспользуемся кривыми упрочнения материала проволоки [17].

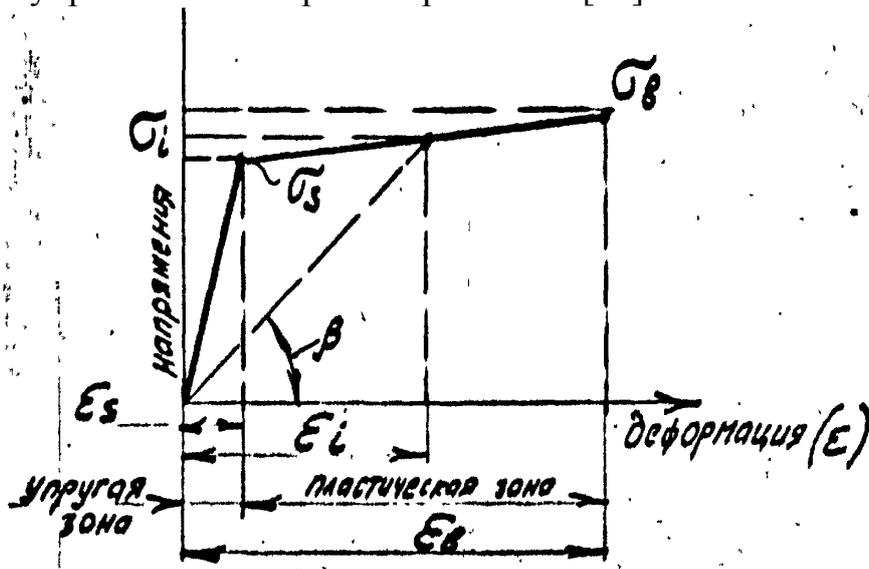


Рис. 32. Диаграмма деформации материала проволоки

Предположим, что  $\sigma_i = (\sigma_B - \sigma_s)/2 + \sigma_s$ , и соответственно  $\varepsilon_i = \varepsilon_B / 2$  тогда  $\sigma_i = (1200 - 1100)/2 + 1100 = 1150 \text{ н/мм}^2$ ,  $\varepsilon_i = 0,028$ . В рассматриваемом случае  $E' = 1150/0,028 = 41071 \text{ н/мм}^2$ . Подставляя полученные данные в (77) получим:

$$D = \frac{10,4 \cdot 41071}{1150 - 547} = 708 \text{ мм}$$

Вариант(в).  $\delta = 25\%$ ,  $\sigma_{в.н} = 600 \text{ н/мм}^2$ ,  $\sigma_{в.к} = 800 \text{ н/мм}^2$ ,  $d = 20 \text{ мм}$ .

$$\sigma_{в.ср} = \frac{600 + 800}{2} = 700 \text{ н/мм}^2$$

Сила волочения согласно формуле (78)

$$P_{вод} = 0,6 \cdot 20^2 \cdot 700 \sqrt{0,25} = 84000 \text{ н}$$

Напряжение волочения:

$$\sigma_{вол} = P_{вол} / F_1 = 357,5 \text{ н/мм}^2$$

Предел текучести  $\sigma_s = 750 \text{ н/мм}^2$  [26].

$\sigma_i = (800 - 700)/2 + 750 = 775 \text{ н/мм}^2$ ,  $\varepsilon_i = 0,08/2 = 0,04$ ,  $E' = 775/0,04 = 19375 \text{ н/мм}^2$ . Подставляя данные в (77) получаем

$$D = \frac{17,3 \cdot 19375}{775 - 357,5} = 803 \text{ мм}$$

Исходные данные для примера 2 взяты из рекомендуемых маршрутов волочения стана ВСМ-1/750.

## 8.2. Прочностной расчет тягового барабана

В процессе работы тяговые барабаны волочильных станов испытывают

напряжения кручения и сжатия. Такие же напряжения испытывают барабаны грузоподъемных машин. Характер напряжений, возникающих в том и другом случае, качественно не отличается. Следовательно, для расчета тяговых барабанов волочильных станков можно использовать аналитические зависимости, применяемые для расчета грузоподъемных барабанов [18].

Основными напряжениями, которые испытывает барабан, являются напряжения сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{g \cdot R}{v \cdot \delta}, \quad (79)$$

где  $g$  - нормальное давление на единицу длины, н/мм;

$$g = 2 P/D \quad (80)$$

где  $P$  - сила натяжения проволоки (волочения), н;

$D$  - диаметр тягового барабана, мм;

$v$  - шаг навивки проволоки, мм;

$\delta$  - толщина стенки, мм;

$R$  - радиус барабана, мм.

Подставляя (80) в (79) получаем

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{v \cdot \delta}. \quad (81)$$

Напряжение кручения, испытываемое материалом барабана, можно определить по формуле:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}, \quad (82)$$

где  $M_{кр}$  - крутящий момент, н · мм,  $M_{кр} = P \cdot D/2$

$$W_p - \text{момент сопротивления, мм}^3, \quad W_p = \frac{\pi \cdot D^3}{16} (1 - \alpha^4),$$

где  $\alpha = \frac{D - 2\delta}{D}$ ;  $D$  - диаметр барабана, мм.

Окончательно формула (82) принимает вид

$$\tau = \frac{P \cdot D \cdot 16}{2\pi \cdot D^3 (1 - \alpha^4)} \quad \text{или} \quad \tau = \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot D^2 (1 - \alpha^4)} \quad (83)$$

Поскольку тяговая деталь находится в сложнапряженном состоянии, то условие прочности выражается зависимостью  $\sigma_{пр} \leq [\sigma]$  где  $\sigma_{пр}$  - приведенное напряжение, вычисляемое по нижеследующим формулам,  $[\sigma]$  - допускаемое напряжение при сжатии.

Значение  $\sigma_{пр}$  вычисляется по формулам выведенным для материалов пластичных (материал барабана литая сталь) и хрупких (материал барабана серый чугун).

Для пластичных материалов

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_{сж}^2 + 4\tau^2}. \quad (84)$$

Для хрупких материалов

$$\sigma_{пр} = \frac{\sigma_{сж}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{сж}^2}{4} + \tau^2} \quad (85)$$

### 8.3. Профиль галтели тягового барабана

В работе [6] указывается на наличие осевого скольжения проволоки на барабане. С этим явлением связывается интенсивный износ приемного участка галтели, который выражается в образовании кольцевой канавки. Последняя затрудняет, а в некоторых случаях вообще прекращает подъем витков проволоки по барабану. Причина возникновения осевого скольжения проволоки в литературе объясняется нарушением кинематических вытяжек. В данной методике предполагается, что обоснованно назначенный профиль барабана может повысить срок службы последнего.

При выводе аналитической зависимости, определяющей профиль галтели, исходили из следующего: процесс волочения осуществим при равенстве между силой волочения и силой трения, возникающей вследствие контакта витков проволоки с галтелью барабана. При отсутствии или нарушении указанного контакта, что может иметь место при перемещении витков проволоки вверх по образующей барабана, сила трения становится меньше силы волочения и протяжка проволоки прекращается.

Для возобновления процесса волочения необходимо восстановить контакт между проволокой и барабаном, т.е. "затянуть" проволоку. Затяжка проволоки на барабане у многократных станов сухого волочения производится последующим барабаном, а на однократных - самим барабаном. Указанный процесс длится до тех пор, пока витки не лягут на галтель, и величина сил трения между витками и галтелью не превысит или не будет равна силе волочения. "Затяжка" характеризуется наибольшей величиной осевого скольжения проволоки и, соответственно, наиболее интенсивным износом приемного участка галтели.

Нижеприведенный вывод построен на исключении явления "затяжки" проволоки на барабане в процессе волочения.

#### Вывод зависимости, определяющей профиль галтели тягового барабана

Проволока, выходящая из волоки, расположенной на расстоянии  $l$  от барабана, и поступающая на него, находится под действием силы волочения  $P$  (рис.33).

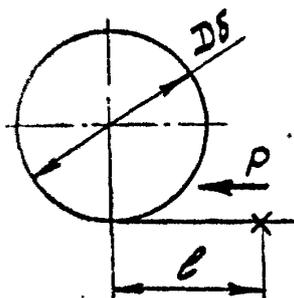


Рис. 33. Схема действия сил при движении проволоки

Поскольку напряжения в проволоке на участке длиной  $l$  не превышают предела пропорциональности, то удлинение  $\Delta l$  - определится по формуле Гука

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot F}. \quad (86)$$

В процессе волочения этот участок проволоки, поступает на галтель рабочего участка барабана и образует нулевой виток. Абсолютное удлинение последнего  $\Delta l'$  зависит от отношения длины окружности барабана в сечении по нулевому витку, равной  $\pi \cdot D_0$  к размеру  $l$  (рис. 33, 34).

$$\Delta l' = \frac{\pi \cdot D_0}{l} \cdot \Delta l. \quad (87)$$

Подставляя (86) в (87) получаем:

$$\Delta l' = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot P}{E \cdot F}. \quad (88)$$

При переходе нулевого витка на первую позицию (рис.34) в процессе намотки проволоки на барабан, сила  $P$  уменьшается согласно формулы Эйлера

$$P_1 = \frac{P}{e^{\alpha \cdot f}}. \quad (89)$$

Следовательно, нулевой виток длиной  $\pi \cdot D_0$  на первой позиции нагружен растягивающей силой  $P_1$ , меньшей, чем сила  $P$ . В этом случае должно произойти сокращение длины нулевого витка на величину  $\Delta l_c$ . Для того, чтобы отсутствовало осевое скольжение проволоки, длина окружности барабана в сечении по первой позиции нулевого витка так же должна быть меньше длины окружности барабана по нулевому витку на ту же величину:

$$\pi \cdot D_0 - \pi \cdot D_1 = \Delta l_c. \quad (90)$$

Выразим величину  $\Delta l_c$  через разность абсолютных удлинений нулевого витка, растянутого первоначально силой  $P$ , а затем силой  $P_1$ .

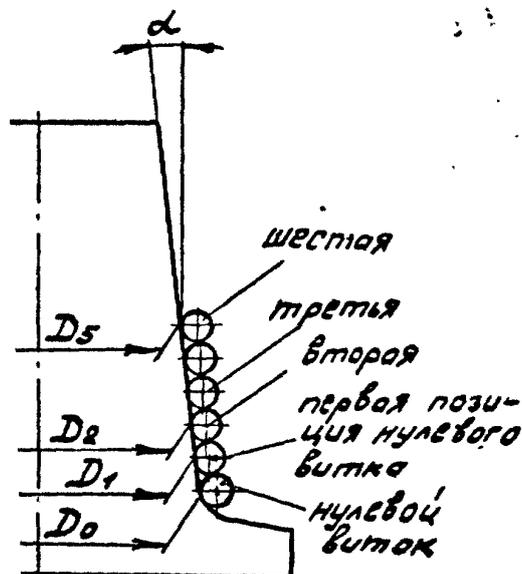


Рис. 34. Схема намотки проволоки на профиль галтели

$$\Delta l_c = \Delta l' - \Delta l'_1, \quad (91)$$

где  $\Delta l'_1$  - удлинение нулевого витка в первой позиции, нагруженного силой  $P_1$ .

$$\Delta l'_1 = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot D_0}{E \cdot F} \quad (92)$$

Подставляя выражение (89) в (92) получаем:

$$\Delta l'_1 = \frac{P \cdot \pi \cdot D_0}{E \cdot F \cdot e^{\alpha \cdot f}} \quad (93)$$

Подставляя (88) и (95) в (91) получаем:

$$\Delta l_c = \frac{P \cdot \pi \cdot D_0}{E \cdot F} \left( 1 - \frac{1}{e^{\alpha \cdot f}} \right) \quad (94)$$

Значение  $\Delta l_c$  по формуле (94) подставляем в выражение (90) и после преобразования получаем окончательно:

$$D_0 - D_1 = \frac{P \cdot D_0}{E \cdot F} \left( 1 - \frac{1}{e^{\alpha \cdot f}} \right) \quad (95)$$

Отсюда выражение для определения  $D_1$  принимает вид:

$$D_1 = D_0 - \frac{P \cdot D_0}{E \cdot F} \left( 1 - \frac{1}{e^{\alpha \cdot f}} \right) \quad (96)$$

Схему намотки проволоки на барабаны в процессе волочения можно представить как перемещение нулевого витка проволоки длиной  $\pi \cdot D_0$  по позициям 1 - 6 (рис.34). На каждой позиции нулевой виток нагружен силой  $P_i$ , меняющейся по закону:

$$P_i = \frac{P}{e^{\alpha \cdot f}} \quad (97)$$

и зависящей от угла охвата  $\alpha$ . Т.к. сила  $P_i$  на каждой позиции нулевого витка уменьшается, то рассуждения относительно уменьшения длины этого витка при переходе на 1-ю позицию, справедливы и для остальных.

Для исключения осевого скольжения проволоки по барабану, длины окружности последнего в сечениях по позициям нулевого витка так же должны отличаться друг от друга на величину сокращения этого витка.

Основываясь на вышесказанном, выражение определяющее изменение диаметра галтели в зависимости от угла охвата  $\alpha$ , принимает вид

$$D_T = D_0 - \frac{P \cdot D_0}{E \cdot F} \left( 1 - \frac{1}{e^{\alpha \cdot f}} \right) \quad (98)$$

Для удобства построения профиля галтели барабана целесообразно перейти к значениям текущего радиуса

$$R_T = R_0 - \frac{P \cdot R_0}{E \cdot F} \left( 1 - \frac{1}{e^{\alpha \cdot f}} \right) \quad (99)$$

## 9. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА

Спроектировать стан для волочения медной проволоки с диаметра 8 мм до диаметра  $1,6 \div 4,0$  мм.

### 9.1. Выбор способа волочения

Согласно таблицы 6 волочение меди с диаметра 8 мм целесообразно вести на станах со скольжением.

### 9.2. Проверка суммарного и выбор единичного обжатий

Расчет суммарного обжатия  $\delta_{\text{сум}}$  ведется на маршрут волочения с диаметра 8 мм. до диаметра 2 мм, т.к. это наиболее ходовой маршрут. В этом случае  $\delta_{\text{сум}} = 93,8 \%$ . Допустимое суммарное обжатие для меди согласно [3], равно 99,0%. Так как необходимое обжатие меньше допустимого, то возможно волочение без промежуточного отжига, т.е. на одном стане.

По таблице 8 при диаметре готовой проволоки более 1 мм, единичные обжатия для меди рекомендованы в пределах от 29 % до 13 %.

Назначается  $\delta_{\text{ед}} = 26 \%$ , величина близкая к предельной. Выбор такого обжатия объясняется тем, что назначение большей величины уменьшает кратность стана, уменьшает дробность деформации и позволяет получить металл с более высокими прочностными свойствами.

### 9.3. Расчет кратности стана

Кратность стана определяется по формуле (26):

$$\delta_{\text{сум}} = 1 - (1 - \delta_{\text{ед}})^n$$

Подставляя в (26)  $\delta_{\text{ед}}$  и  $\delta_{\text{сум}}$ , назначенные выше, получаем:

$$0,938 = 1 - (1 - 0,26)^n \quad \text{или} \quad n = \frac{\lg 0,062}{\lg 0,74} = 9,3$$

Принимаем кратность стана  $n = 9$ .

### 9.4. Выбор схемы движения проволоки по тяговым шайбам

При кратности волочения равной 9 можно заложить как однорядное (стан СМВ-1-9М АТЗМ), так и двухрядное (стан ВСК-13 АЗТМ, рис. 20) расположение тяговых шайб. Обе схемы имеют и преимущества и недостатки.

Однорядное расположение шайб.

Преимущества:

- а) несложная заправка проволоки;
- б) простая кинематическая схема;

Недостатки:

- а) большая площадь стана;

Двухрядное расположение тяговых шайб.

Преимущества:

- а) малая площадь стана;
- б) компактность.

Недостатки:

- а) несколько более сложная заправка стана.

Недостатком станов с двухрядным расположением роликов считалось охлаждение верхнего ряда роликов орошением, что при высоких скоростях волочения  $V_v > 25$  м/с, могло повысить термический коэффициент стана. Но с применением тяговых шайб со специальной внутренней полостью (конструкция АЗТМ, рис.35) термический коэффициент указанных станов находится на уровне станов с однорядным расположением роликов.

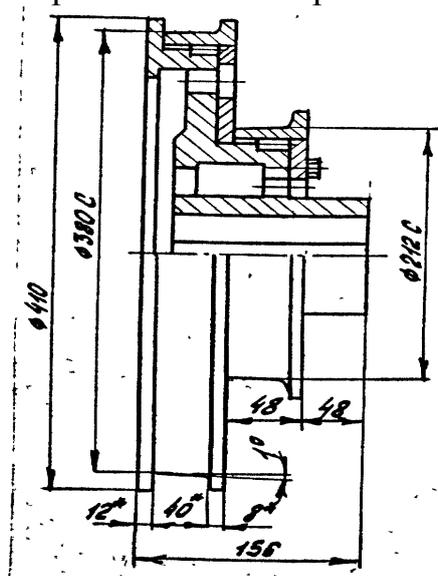


Рис. 35. Тяговая шайба со специальной внутренней полостью

В рассматриваемом случае целесообразно заложить двухрядное расположение роликов, т.к. при прочих равных условиях доминирующим фактором при выборе схемы движения проволоки является площадь, занимаемая станом.

Определив схему движения проволоки, необходимо выбрать количество тяговых роликов. Согласно рекомендаций параграфа б.5, закладываем 7 тяговых роликов - 3 в верхнем ряду, 4 - в нижнем (рис. 36). Так как проектируется стан грубого волочения проволоки, то холостые шайбы отсутствуют.

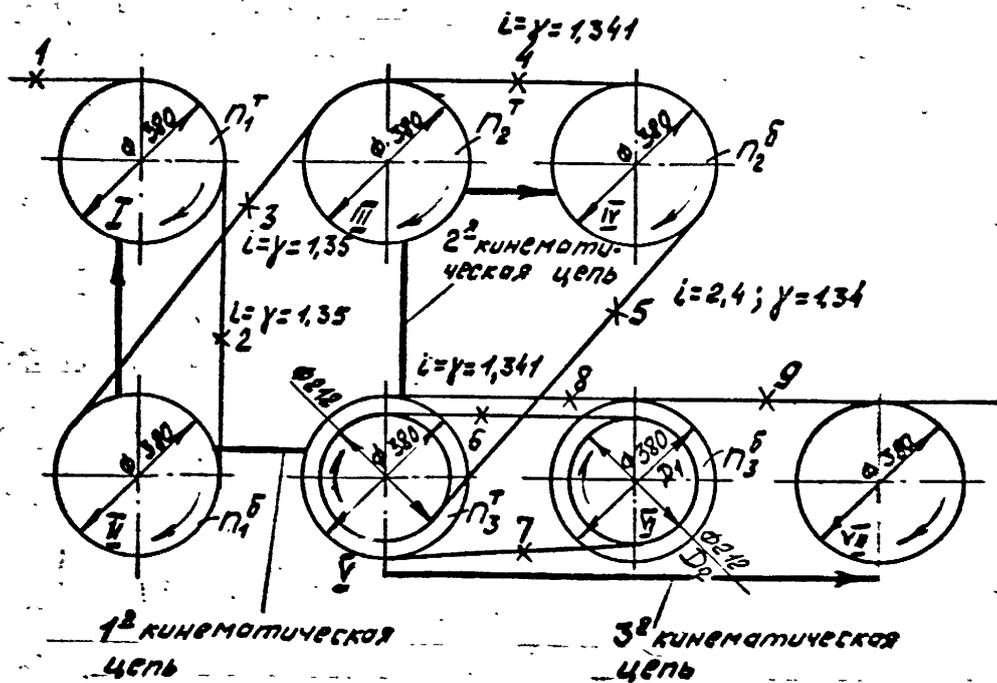


Рис. 36. Схема движения проволоки на волочильном стане ВСК-9

В силу того, что первые протяжки характеризуются наибольшей силой волочения, то I, II, III и IV шайбы с целью уменьшения изгибающего и крутящего моментов проектируются одноступенчатыми.

### 9.5. Выбор кинематических вытяжек между тяговыми шайбами

Варианты построения кинематических вытяжек приведены в параграфе 6.5. В рассматриваемом случае наиболее целесообразен вариант 5 с комбинированными кинематическими вытяжками (рис. 11, кривая 5). Выбор указанного варианта обусловлен незначительностью влияния степени деформации на предел прочности меди (рис.4, кривая 4).

### 9.6. Разработка кинематической схемы стана

На основании выбранной схемы движения проволоки (рис. 36), выделяются рабочие пары шайб.

В рассматриваемом случае это шайбы I – II; III – IV; V - VI. При этом, I, III и V шайбы - тихоходные с числами оборотов  $n_1^T$ ;  $n_2^T$ ;  $n_3^T$ , а II; IV и VI - шайбы быстроходные, с числами оборотов  $n_1^6$ ;  $n_2^6$ ;  $n_3^6$ .

Связь между окружными скоростями тихоходной и быстроходной шайб рабочей пары выражается зависимостью (45):

$$n^6 = \gamma_{ед} n^T,$$

где единичная кинематическая вытяжка  $\gamma_{ед}$ , соответствующая выбранному единичному обжатию  $\delta_{ед} = 26\%$ , (параграф 9.2) равна 1,35.

Так как диаметры шайб рабочей пары равны, то выражение (45) можно представить в виде:

$$\gamma_{ед} = n^{\delta} / n^{\Gamma} = i, \quad (100)$$

где  $i$  - передаточное отношение зубчатых колес кинематической цепи между тяговыми шайбами в рассматриваемой рабочей паре. Согласно формулы (100) назначаются числа зубьев колес<sup>^</sup>

$$I - II; \quad \gamma = i = \frac{50}{60} \cdot \frac{68}{42} = 1,35$$

$$III - IV; \quad \gamma = i = \frac{65}{52} \cdot \frac{60}{56} = 1,341$$

$$V - VI; \quad \gamma = i = \frac{65}{52} \cdot \frac{60}{56} = 1,341$$

$$VI - VII; \quad \gamma = i = \frac{56}{45} = 1,245$$

Вытяжка между VI и VII шайбами занижена с целью уменьшения обжатий в чистой волоке и получения высокого качества поверхности проволоки.

#### Определение диаметров ступеней тяговых шайб

Для установления кинематической связи между рабочими парами шайб (44) необходимо определить диаметры ступеней шайб.

Диаметр большей ступени определяется согласно зависимости:

$$50 < D_{ш}/d < 1000.$$

В рассматриваемом случае шайба диаметром  $D = 380$  мм принимает на себя проволоку после первой протяжки диаметром  $6,5 - 7$  мм. При этом  $D_{ш}/d = 380/7 = 54,5$ . При выборе числового значения  $D_{ш}/d$  необходимо стремиться к нижнему пределу указанного отношения, что позволяет сократить диаметр шайбы.

Определение диаметра меньших ступеней тяговой шайбы ведется по формуле (49).

Согласно рисунка 36 тяговые шайбы V и VI имеют 2 ступени ( $n = 2$ ). При этом  $D_1$  наибольшая ступень шайбы равна ( $D_n = 380$  мм). В этом случае:

$$D_2 = \frac{D_n}{\gamma^{2n-2}} = \frac{D_1}{\gamma^2} = \frac{380}{1,341^2} = 212 \text{ мм.}$$

Определив диаметры ступеней шайб, по формуле (44) определяется передаточное отношение между рабочими парами. Представив выражение (44) в виде

$$\gamma = \frac{D_{k+1}^{\Gamma} \cdot n_{k+1}^{\Gamma}}{D_k^{\delta} \cdot n_k^{\delta}}, \text{ где}$$

$D_{k+1}^{\Gamma}$ ,  $n_{k+1}^{\Gamma}$  - диаметр и число оборотов тихоходной шайбы в рабочей паре принимающей проволоку;

$D_k^{\delta}$ ,  $n_k^{\delta}$  - диаметр и число оборотов быстроходной шайбы в рабочей паре отдающей проволоку.

Заменив в формуле (44)  $n_{k+1}^{\Gamma} / n_k^{\delta}$  передаточным числом, получаем

$$\gamma = D_{k+1}^{\Gamma} / D_k^{\delta} \cdot i.$$

В рассматриваемом случае (рис.35)

$$\text{II – III; } \gamma = i = \frac{68}{42} \cdot \frac{80}{30} \cdot \frac{30}{80} \cdot \frac{50}{60} = 1,35; \quad \text{т.к. } D_{k+1}^T = D_k^6 = 380 \text{ мм}$$

$$\text{IV – V; } \gamma = \frac{212}{380} \cdot \frac{56}{60} \cdot \frac{52}{65} \cdot \frac{60}{50} \cdot \frac{80}{30} = 1,34$$

Согласно выше назначенных передаточных отношений производится построение кинематической схемы стана (рис. 25). Вал V, несущий на себе V-ю тяговую шайбу - коренной, через коническую пару он соединяется с двигателем (числа зубьев конической пары назначаются после выбора двигателя). От V-го вала идут 3 кинематические цепи, передающие крутящий момент от двигателя I - II; III – IV и VI - VII тяговым шайбам (рис. 36).

Кроме приведенного варианта могут быть и другие. При выборе наиболее оптимального необходимо учитывать такие факторы, как простота сборки, ремонтпригодность, величина коэффициента полезного действия, распределение крутящего момента по кинематическим цепям, шумовая характеристика и пр.

### 9.7. Выбор скорости волочения

Основываясь на материале параграфа 6.6, а также учитывая опыт эксплуатации отечественных и зарубежных станов подобного типа, можно сделать вывод, что экономический и технологический максимумы скорости при волочении медной проволоки до диаметра 1,6 – 4,0 мм лежат в пределах 20 – 30 м/сек. Приняв вышесказанное во внимание, технический максимум скорости на проектируемом стане можно назначить 30 м/сек.

### 9.8. Расчет маршрутов волочения

В предлагаемом диапазоне готовой проволоки (1,6 – 4,0 мм) при волочении с диаметра 8мм, рассчитывается пять маршрутов волочения: с диаметра 8мм до диаметров: 4.0мм; 3,5мм; 2,6мм; 2,0мм и 1,6мм.

Порядок выполнения расчета приводится на примере расчета маршрута волочения с диаметра 8,0мм до диаметра 1,6мм (табл. 22).

При расчете маршрута волочения должно соблюдаться условие  $\mu > \gamma$ . Число протяжек (переходов) должно быть не более 9 (кратность стана).

$\alpha = 8^\circ$  - угол наклона образующей волочильного канала.

$f = 0,06$ - коэффициент трения между проволокой и рабочим каналом волочки.

Таблица 22

Результаты расчета режимов волочения при изготовлении медной проволоки на стане ВСК-9 с диаметра 8 мм до диаметра 1,6 мм за 9 протяжек, со скоростью 30 м/сек

Диаметр проволоки, мм	Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	за	про	ка	за	про	цент	Сила воло-	ь	ша	я	МО
-----------------------	----------------------------------	----	-----	----	----	-----	------	------------	---	----	---	----

	До протяжки	После протяжки	До протяжки F <sub>0</sub>	После протяжки F <sub>1</sub>				чения, кг по ф-ле Зибеля		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	8,0	6,45	50,24	32,66	35	1,53	32	655,0	3,05	19,5
2	6,45	5,1	32,66	20,42	37,5	1,6	39,5	570,0	4,1	23,0
3	5,1	4,25	20,42	14,18	31	1,44	41,5	322,0	5,55	17,5
4	4,25	3,54	14,18	9,84	31	1,44	42	226,0	7,45	16,5
5	3,54	2,97	9,84	6,92	30	1,42	42	154,0	10,0	15,0
6	2,97	2,5	6,92	4,9	29,5	1,41	42	106,0	13,3	14,0
7	2,5	2,12	4,9	3,53	28	1,39	42	74	17,9	13,0
8	2,12	1,82	3,53	2,6	27	1,36	42	50	25,0	11,7
9	1,82	1,6	2,6	2,0	22,5	1,29	42	32,5	30,0	9,6

Общая мощность  $N_{\Sigma} = 139,8$  кВт.

$$N = \frac{139,8}{0,7 \cdot 0,9} = 220 \text{ кВт}; \quad \delta = \frac{F_0 - F_1}{F_0}; \quad \mu = \frac{F_0}{F_1};$$

КПД ( $\eta$ ) = 0,7;

а) составляется маршрут волочения:

8,0 – 6,45 – 5,1 – 4,25 – 3,54 – 2,97 – 2,5 – 2,12 – 1,82 – 1,6.

Приведенными значениями диаметров проволоки заполняются колонки 2 и 3 таблицы 22.

б) По приведенным диаметрам определяются площади сечения проволоки после каждой протяжки:

50,24 - 32,66 - 20,42 - 14,18 - 9,84 - 6,92 - 4,9 - 3,53 - 2,6 - 2,0. Заполняются колонки 4 и 5.

в) На маршрут определяются обжатия и вытяжки за протяжку:

Обжатия  $\delta$ , %: 35 - 37,5 - 31 - 31 - 30 - 29,5 - 28 - 27 - 22

Вытяжка  $\mu$ : 1,53–1,6–1,44–1,44–1,42– 1,41 - 1,39 – 1,36 -1,29.

Заполняются колонки 6 и 7.

г) По рисунку 4 согласно маршрута волочения и в зависимости от суммарного обжатия по переходам определяется "к" - сопротивление пластической деформации при протяжке (параграф 2.1).

Определение суммарного обжатия по переходам ведется по формуле, приведенной в таблице 1,

$$\delta = \frac{F_n - F_k}{F_n}$$

где  $F_n$  - площадь сечения заготовки (в рассматриваемом случае 50,24 мм<sup>2</sup>);

$F_k$  - площадь сечения проволоки после соответствующей протяжки.

Подставляя данные таблицы 22 в вышеприведенную формулу определяются суммарные обжатия по переходам:

$$\delta_1 = \frac{50,24 - 32,66}{50,24} \cdot 100\% = 35\%.$$

1-й переход

$$\delta_2 = \frac{50,24 - 20,42}{50,24} \cdot 100\% = 59\%.$$

2-й переход

$$\delta_3 = \frac{50,24 - 14,18}{50,24} \cdot 100\% = 71\%.$$

3-й переход

.....

$$\delta_9 = \frac{50,24 - 2,0}{50,24} \cdot 100\% = 96\%.$$

9-й переход

По рисунку 4 определяется предел прочности медной проволоки в зависимости от суммарного обжатия (степени деформации): заготовка  $\delta_{\text{сум}} = 0\%$ ,  $\sigma_{\text{в0}} = 260 \text{ н/мм}^2$

1-й переход  $\delta_{\text{сум}} = 35\%$ ,  $\sigma_{\text{в0}} = 380 \text{ н/мм}^2$ ;

2-й переход  $\delta_{\text{сум}} = 59\%$ ,  $\sigma_{\text{в0}} = 410 \text{ н/мм}^2$ ;

3-й переход  $\delta_{\text{сум}} = 71\%$ ,  $\sigma_{\text{в0}} = 420 \text{ н/мм}^2$ ;

4-й переход  $\delta_{\text{сум}} = 80\%$ ,  $\sigma_{\text{в0}} = 420 \text{ н/мм}^2$ ;

.....

9-й переход  $\delta_{\text{сум}} = 96\%$ ,  $\sigma_{\text{в0}} = 420 \text{ н/мм}^2$ .

Значение "к" определяется как среднее арифметическое из пределов прочности металла до и после волочения

$$k_1 = \frac{\sigma_{\epsilon,0} + \sigma_{\epsilon,1}}{2} = \frac{260 + 380}{2} = 320 \text{ н/мм}^2.$$

1-й переход

$$k_2 = \frac{\sigma_{\epsilon,1} + \sigma_{\epsilon,2}}{2} = \frac{380 + 410}{2} = 395 \text{ н/мм}^2.$$

2-й переход

$$k_3 = \frac{\sigma_{\epsilon,2} + \sigma_{\epsilon,3}}{2} = \frac{410 + 420}{2} = 415 \text{ н/мм}^2.$$

3-й переход

.....

$$k_9 = \frac{\sigma_{\epsilon,8} + \sigma_{\epsilon,9}}{2} = \frac{420 + 420}{2} = 420 \text{ н/мм}^2.$$

9-й переход

Полученными значениями "к" заполняется колонка 8 таблицы 22.

### Определение силы волочения

Расчет ведется по формуле 10. В указанную формулу входят значения  $\alpha$  - угла наклона образующей волоки, выбираемой по таблице 3 и  $f$  - коэффициента контактного трения между проволокой и волочильным каналом (табл.2). В рассматриваемом случае при волочении меди в волоке из твердого сплава  $\alpha$  может быть  $7^\circ$ ,  $8^\circ$ , коэффициент трения при этом равен 0,06.

При значениях  $\alpha = 8^\circ$ ,  $f = 0,06$  и  $A = 2/1,76 = 1,136$  (раздел 2.1), член формулы (10)  $[1 + A \cdot f (ctg \alpha + tg \alpha)]$  - величина постоянная при каждой протяжке,

т.к. сделано допущение, что коэффициент трения  $f$  не меняет своего значения по маршруту волочения. Данные расчетов заносятся в колонки 9 и 10 таблицы 22.

### 9.9. Расчет коэффициента полезного действия

Расчет ведется по формулам (60) и (61),

Проектируемый стан имеет три кинематические цепи от двигателя к тяговым шайбам (рис.27).

1-я: 1-я тяговая шайба - шестерни № 12-11-10-9-8-7-6-4;

II-я: IV-я тяговая шайба – шестерни 19-18-17-16-15-14-13-5;

III-я: VII-я тяговая шайба - шестерни №№ 24-23-22-21-20-3.

Общая кинематическая цепь: двигатель - шестерни 1-2.

КПД кинематических цепей согласно (61) равен:

$$\eta_I = \eta_{II} = \eta_{III} = \eta_{цк}^4 \cdot \eta_{пк}^4 = 0,98^4 \cdot 0,995^4 = 0,904$$

КПД общей кинематической цепи равен:

$$\eta_{об} = \eta_{кк} \cdot \eta_{пк} = 0,97 \cdot 0,995 = 0,965$$

В III-ей кинематической цепи не учтено два червячных зацепления, т.к. они не силового характера.

КПД стана определяется по формуле (60):

$$\eta_{ст} = 0,965 \cdot 0,904^3 = 0,7.$$

### 9.10. Определение мощности двигателя

Определяются линейные скорости рабочих поверхностей тяговых шайб (формула 27), результаты заносятся в колонку II, таблицы 22.

Мощность двигателя определяется по упрощенному методу (формулы 55, 56, 57).

а) по формуле (55) определяется мощность на каждый переход

$$\text{1-й переход} \quad N_1 = \frac{655 \cdot 3,05}{102} = 19,5 \text{ кВт};$$

$$\text{2-й переход} \quad N_2 = \frac{570 \cdot 4,1}{102} = 23 \text{ кВт};$$

.....

$$\text{9-й переход} \quad N_9 = \frac{32,5 \cdot 30}{102} = 9,6 \text{ кВт}.$$

Данные заносятся в колонку 12, таблицы 22.

б) Суммируются полученные мощности по переходам (формула 56)

$$N_{\Sigma} = 19,5 + 23 + 17,5 + 16,5 + 15 + 14 + 13 + 11,7 + 9,6 = 139,8 \text{ кВт}$$

в) Определяется мощность двигателя (формула 57)

При этом  $\eta_{ст} = 0,7$ . (раздел 9.9)

$a = 0,9$  (ввиду небольшой кратности стана)

$$N_{\Sigma} = 139,8 / (0,7 \cdot 0,9) = 220 \text{ кВт}$$

Выбирается ближайший по мощности двигатель постоянного тока П143-4К, мощностью 200 кВт с числом оборотов 400 ÷ 1200 об/мин. Недобор выбранной мощности по сравнению с расчетной, сказывается на уменьшении скорости волочения проволоки примерно на 10%, т.е. рассчитанный маршрут может быть протянут на скорости 27 ÷ 28 м/с.

Выбор двигателя постоянного тока обусловлен более широкими технологическими возможностями, которые получает стан, оснащенный указанной серией двигателей.

#### Определение передаточного числа конической пары №№ 1-2 (рис.25).

Расчет ведется из условия: при скорости двигателя 1200 об/мин, чистовая VII шайба должна иметь окружную скорость 30 м/сек. Согласно рисунка 27 уравнение кинематической цепи от двигателя к VII шайбе:

$$1200 \cdot i_k \cdot \frac{65}{52} \cdot \frac{60}{45} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ш}}{1000 \cdot 60} = 30(\text{м/сек}),$$

где  $i_k$ - передаточное отношение конической пары;

$D_{ш}$  - диаметр шайбы, 380 мм., откуда  $i = 0,76$  или, переходя к числам зубьев: шестерня № 1 имеет 25 зубьев, шестерня № 2 имеет 33 зуба.

По приведенной методике проводится расчет остальных 4-х маршрутов. Данные о возможной скорости волочения маршрутов и необходимой мощности заносятся в таблицу 23.

Таблица 23

Таблица потребляемой мощности главным двигателем в зависимости от маршрута и скорости волочения

Номера маршрутов по порядку	Маршрут, мм.	Число протяжек	Скорость проволоки на выходе, м/с	Потребляемая мощность, кВт
1	С 8,0 до 4,0	4	12,5	200
2	С 8,0 до 3,5	5	17,5	200
3	С 8,0 до 2,6	7	19,5	200
4	С 8,0 до 2,0	9	27	200
5	С 8,0 до 1,6	9	28	175

### 9.11. Прочностной расчет деталей и узлов стана

Расчет включает в себя: определение основных характеристик зубчатых зацеплений (модуль, ширина зубчатого венца), определение диаметров валов, проверку работоспособности подшипников, выбор муфт и т.д. Все эти расчеты проводятся по методике, изложенной в курсе "Детали машин".

#### Определение нагрузок на детали стана

Исходя из величин сил волочения на рассчитанные маршруты, по формуле (58) определяются крутящие моменты на тяговые шайбы. Затем по найденным крутящим моментам и согласно кинематической схеме (рис.27) рассчитываются крутящие моменты на валах стана.

Например: Определить крутящие моменты на валах 1-й кинематической цепи при волочении меди с диаметра 8 до диаметра 1,6 мм. Крутящие моменты на I-ой и II-ой тяговых шайбах (формула 58):

$$M_1^u = 6550 \cdot \frac{0,38}{2} = 1250_{нм};$$

$$M_2^u = 5700 \cdot \frac{0,38}{2} = 1080_{нм};$$

$$M^{IX} = \frac{M_1^u \cdot i}{\eta_{ц.к}} = \frac{1250 \cdot 60}{0,98 \cdot 50} = 1530_{нм},$$

на валу IX:

где  $i$  - передаточное отношение от вала I к валу IX;

$\eta_{ц.к}$  - КПД цилиндрических зубчатых колес, равный 0,98 на II валу. Указанный вал суммирует крутящие моменты вала IX и II - й тяговой шайбы. При этом крутящий момент вала IX передает пара шестерен № 10,9, а суммарный крутящий момент передает шестерня 8.

$$M^{II} = \frac{M^{IX} \cdot i}{\eta} + M_2^u = \frac{1530 \cdot 42}{0,98 \cdot 68} + 1080 = 2040_{нм};$$

на валу X:

$$M^X = M^{II} \cdot i \cdot \frac{1}{\eta} = 2040 \cdot \frac{42}{68} \cdot \frac{1}{0,98} = 1280_{нм}.$$

Подобным образом рассчитываются крутящие моменты на двух других кинематических цепях. Данные расчетов сведены в таблицу 16.

При анализе таблицы выделяются наибольшие нагрузки на валах, по которым и проводится прочностной расчет узлов и деталей стана.

Наибольшие нагрузки при любом маршруте волочения испытывает коническая пара, поэтому ее расчет ведется исходя из мощности двигателя.

Необходимость в расчете динамических нагрузок отпадает, т.к. готовая проволока принимается на катушку намоточного аппарата

## 9.12. Прочностной расчет тяговых шайб

Расчет ведется по формулам (81,83,84).

Наибольшую нагрузку испытывает I-я шайба, осуществляющая протяжку с наибольшей силой волочения  $P = 6550$  н, маршрут: с диаметра 8 мм – на диаметр 1,6 мм.

Напряжения сжатия формула (81):

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{v \cdot e} = \frac{6550}{6,45 \cdot 10} = 101,6_{н/мм^2},$$

где  $P$  - сила волочения, 6550 н;

$v$  - шаг навивки проволоки, равный диаметру проволоки, поступающей

на шайбу; 6,45 мм;

$e$  - толщина стенки тяговой шайбы, 10 мм.

Напряжения кручения, формула (83):

$$\tau = \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot D^2 (1 - \alpha^4)},$$

где  $D$  - диаметр тяговой шайбы, 380 мм  $\alpha = \frac{D - 2 \cdot e}{D} = \frac{380 - 20}{380} = 0,95$  ;

тогда 
$$\tau = \frac{8 \cdot 6550}{3,14 \cdot 380^2 (1 - 0,95^4)} = 0,623 \text{ (н/мм}^2\text{)}.$$

Приведенное напряжение вычисляется по формуле (84), т.к. материал бандажа тяговой шайбы - сталь X12M.

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_{сж}^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma]_{сж},$$

$$\sigma_{пр} = \sqrt{101,6^2 + 4 \cdot 0,623^2} = 101,61 \text{ н/мм}^2.$$

Допускаемое напряжение при сжатии находится по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{\sigma_T}{n},$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала, 600...700 н/мм<sup>2</sup> - сталь X12M;

$n$  - коэффициент запаса, 1,55...3.

$$[\sigma]_{сж} = \frac{600}{3} = 200 \text{ н/мм}^2.$$

$$\sigma_{пр} < [\sigma]_{сж}.$$

### 9.13. Расчет угла нуклона образующей галтели тяговой шайбы (параграф 8.3)

В данном случае можно не производить, т.к. расчет построен на исключении скольжения проволоки по тяговой детали, а в станах мокрого волочения явление скольжения - необходимость, являющаяся естественным регулятором скорости проволоки при износе волок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Целиков А.И. Энциклопедический справочник. М.: Машиностроение, Т. 5, Машгиз, 1949 г.
2. Юхвец И.А. Волоочильное производство. Часть 1. Metallurgizdat, 1965. – 272 с.
3. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Metallurgiya, 1971. - 448 с.
4. Красильщиков Р.Б. Нагрев при холодном волочении проволоки. Metallurgizdat, 1962. – 88 с.
5. Клубина Т.Г., Винницкий А.А. О влиянии противонапряжения на силовые параметры волочения проволоки // Изв. Вузов. Черная металлургия. 1975. № 9. С. 87 – 90.
6. Горловский М.Б. "Оборудование проволочных и канатных цехов" Metallurgiya, 1964. – 255 с.
7. Горловский М.Б., Меркачев В.Н. Справочник волочильщика проволоки. М.: Metallurgiya, 1993. – 336 с.
8. И.Л. Константинов, С.Б. Седельников, Е.В. Иванов. Прокатно - прессово – волоочильное производство. М.: Metallurgiya. 2015. – 512 с.
9. Красильников Л.А., Лысенко А.Г. Волоочильное и метизное производство. М.: Metallurgiya. 1987. – 296 с.
10. Юхвец И.А. Волоочильное производство. Часть 2. Metallurgizdat, 1960. – 287 с.
11. Шубин И.Г., Шубина М.В. Основы материаловедения: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос.техн.ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 193 с.
12. Основы теоретического материаловедения. Часть 1 [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.Г.Шубин, М.В.Шубина. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – 59 с. – Режим доступа: <http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp> – Загл. с титул. экрана.
13. Основы теоретического материаловедения. Часть 2 [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.Г.Шубин, М.В.Шубина. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – 55 с. – Режим доступа: <http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp> – Загл. с титул. экрана.
14. Основы теоретического материаловедения. Часть 3 [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.Г.Шубин, М.В.Шубина. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – 48 с. – Режим доступа: <http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp> – Загл. с титул. экрана.
15. Недовизий И.Н., Петрухин С.И., Комаров А.Г. Совмещение процессов производства проволоки. М.: Metallurgiya. 1979. – 224 с.
16. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник. 2-е изд. М.: Metallurgiya, 1973. – 224 с.
17. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть 1. М.: Машиностроение, 1972. – 472 с.
18. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. М. : Metallurgiya, 1973. – 497 с.

Учебное текстовое электронное издание

**Шубин Игорь Геннадьевич**

**ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ  
И ВОЛОЧИЛЬНЫЕ СТАНЫ**

Учебное пособие

1,31 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2018 год  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
Кафедра технологий обработки материалов  
Центр электронных образовательных ресурсов и  
дистанционных образовательных технологий  
e-mail: ceor\_dot@mail.ru