



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

С.М. Головизнин

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

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

Магнитогорск
2019

УДК 621.778.1.01
ББК 34.622

Рецензенты:

кандидат технических наук,
начальник управления информационных технологий,
АО «Белорецкий металлургический комбинат»
О.А. Сарапулов

кандидат технических наук,
директор ГБПОУ «Белорецкий металлургический колледж»
Г.К. Хубетдинов

Головизнин С.М.

Основные положения теории и технологии волочения проволоки [Электронный ресурс] : учебное пособие / Сергей Михайлович Головизнин ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,70 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 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 978-5-9967-1681-4

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Технология производства проволоки», «Теория обработки металлов давлением», «Технология производства металлоизделий», «Технология глубокой переработки стали», «Технологические процессы ОМД» и других дисциплин, включающих знание теории и технологии изготовления металлоизделий методом обработки металлов давлением, в частности, волочения стальной проволоки.

В учебном пособии приведены основные положения теории и технологии волочения проволоки, в том числе, используемые величины, терминология, методы расчёта деформационных и температурных режимов волочения, условий смазки, анализ явлений высокоскоростного волочения, помогающие усвоить теоретический материал и получить практические навыки расчёта режимов волочения. Приведены задания и вопросы для самопроверки обучающегося. Пособие составлено на основе зарубежных публикаций в области теории волочения и призвано облегчить обучающимся понимание положений современной теории волочения и подготовить их к практическому применению полученных знаний.

Учебное пособие «Основные положения теории волочения проволоки» предназначено для студентов, обучающихся по направлению 22.03.02, «Металлургия».

УДК 621.778.1.01
ББК 34.622

ISBN 978-5-9967-1681-4

© Головизнин С.М., 2019

© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ	6
2. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОВОЛОКУ И ВОЛОКУ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ	8
2.1. Обжатие	8
2.2. Пример расчёта	8
2.3. Удлинение	9
2.4. Пример расчёта	9
2.5. Угол волоки	9
2.6. Форма зоны деформации и параметр Δ	10
2.7. Напряжение волочения и противонатяжение	11
2.8. Давление на волоку	11
2.9. Осевое напряжение	11
2.10. Задания	11
3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ВОЛОЧЕНИЯ	12
3.1. Напряжение волочения и работа на единицу объёма	12
3.2. Однородная работа	13
3.3. Неоднородная или дополнительная работа	13
3.4. Работа сил трения	16
3.5. Формула напряжения волочения	16
3.6. Предельное обжатие	17
3.7. Пример расчета	17
3.8. Оптимальный угол волоки и параметр Δ	18
3.9. Давление на волоку	19
3.10. Растяжение в центре проволоки	20
3.11. Пластическое течение за пределами волочильного конуса	21
3.12. Эффект противонатяжения	22
3.13. Задания	22
4. ТЕМПЕРАТУРА ПРОВОЛОКИ	23
4.1. Вклад различных факторов в температуру проволоки	23
4.1.1. Температура входящей проволоки	23
4.1.2. Суммарный рост температуры за волочильный проход	23
4.1.3. Пример расчёта	24
4.1.4. Тепло однородной деформации	24
4.1.5. Тепло неоднородной деформации	25
4.1.6. Суммарное тепло деформации	25
4.1.7. Вклад трения в тепловыделение	25
4.1.8. Пример расчета	26
4.2. Измерение температуры	27
4.3. Охлаждение между проходами	28
4.4. Практические примеры влияния температуры на процесс волочения ..	28
4.4.1. Смазка	28
4.4.2. Остаточные напряжения	29
4.5. Задания	30

5. СКОРОСТЬ ВОЛОЧЕНИЯ	30
5.1. Определения и основные формулы	30
5.2. Влияние скорости на условия волочения	31
5.2.1. <i>Мощность</i>	31
5.2.2. <i>Скорость деформации</i>	31
5.2.3. <i>Температура волочения</i>	31
5.3. Влияние скорости волочения на условия смазки	33
5.4. Некоторые практические вопросы высокоскоростного волочения	34
5.4.1. <i>Производительность волочильных машин</i>	34
5.4.2. <i>Запуск волочильной машины</i>	34
5.4.3. <i>Установившееся медленное волочение</i>	34
5.5. Задания	35
6. РЕЖИМЫ СМАЗКИ И УСЛОВИЯ ТРЕНИЯ	35
6.1. Отсутствие или малое количество смазки, режим прилипания	35
6.2. Локальное прилипание	36
6.3. Граничное трение	36
6.4. Гидродинамический или толстопленочный режим трения	37
6.5. Сравнение режимов трения	38
6.6. Использование постоянной величины для характеристики сдвигового напряжения трения	39
6.7. Состав смазок	40
6.8. Смазочная пленка	40
6.9. Захват смазки – особая роль первой волокни	41
6.10. Износ	42
6.10.1. <i>Адгезионный износ</i>	42
6.10.2. <i>Абразивный износ</i>	43
6.11. Подсмазочные покрытия	43
6.11.1. <i>Бура (в чистом виде или как добавка в соляной смеси)</i>	43
6.11.2. <i>Подсмазочные покрытия для нержавеющей катанки</i>	45
6.11.3. <i>Фосфатное покрытие катанки из углеродистой стали</i>	46
6.11.4. <i>Известкование</i>	47
6.12 Смазка при гидродинамическом сухом волочении	49
6.13. Смазки для граничного и промежуточного режима смазки	51
6.14. Смазки для мокрого волочения	52
6.15. Смазки при сухом волочении	53
6.15.1. <i>Смазки с насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами</i> ...	53
6.15.2. <i>Обедненные и насыщенные смазки</i>	53
6.15.3. <i>Проблема образования пыли при использовании смазки</i>	54
6.15.4. <i>Комплексы подсмазочных покрытий и мыл</i>	54
6.15.5. <i>Плавление – размягчение – в смазочной емкости</i>	54
6.15.6. <i>Выбор смазки для сухого волочения</i>	55
7. ЯВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ	56
ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ	62
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	64

ВВЕДЕНИЕ

Процесс волочения заключается в уменьшении площади поперечного сечения проволоки при протягивании её через волоку. Волочение – один из старейших способов обработки металлов давлением. Преимуществом волочения является высокое качество поверхности проволоки и возможность точно контролировать диаметр готовой проволоки. Деформация в волоке сопровождается комбинацией растягивающих и сжимающих напряжений, которые вызваны действием тянущей силы волочения и конфигурацией волоки.

При волочении скорость протягивания проволоки через волоку может достигать нескольких десятков метров в секунду. Геометрия волоки определяет конечный диаметр проволоки, площадь поперечного сечения волоки и обжатие по сечению проволоки. Для изделий, полученных другими способами обработки металлов давлением, волочение может применяться с целью обеспечения точных размеров, уменьшения допусков, повышения качества поверхности, увеличения прочности проволоки. В этом случае может применяться единственная протяжка при комнатной температуре. Гораздо чаще волочение применяется для получения проволоки малого диаметра, которую нельзя получить методами горячей обработки металлов. В этом случае обычно применяется многократное волочение при температуре холодной обработки с использованием промежуточных термообработок. Иногда, для материалов с ограниченной пластичностью, применяют тёплое или горячее волочение. Волочение обычно проводят при комнатной температуре, используя несколько проходов, или обжатий через последовательно расположенные волоки. Часто возникает необходимость в промежуточном отжиге до окончания операции волочения. За исключением этапов разгона и торможения волочильной машины, волочение – установившийся процесс как с точки зрения механики, так и с точки зрения трибологии. Заготовка имеет большую длину, и она последовательно протягивается через волоки. Неустановившиеся процессы имеют место при ускорениях проволоки и длительность их невелика. Если нет перебоев в подаче смазки, то значения напряжений и температур остаются стабильными на протяжении длительного времени. Условия смазки имеют существенное значение для стабильности и качества процесса волочения. В отличие от прокатки, для волочения проволоки необходимо, чтобы трение было как можно меньше. Смазка выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимум трения и износа волочильного инструмента. Существенным для волочения является необходимость отвода выделяемого тепла, особенно при высокоскоростном волочении. Если эффективность охлаждения недостаточна, условия смазки могут ухудшиться и это может отразиться на свойствах готовой продукции.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Сила. В системе СИ сила измеряется в ньютонах (Н), иногда в практике волочения используется внесистемная единица килограмм силы (кгс). Когда сила выражена в килограммах, её можно перевести в ньютоны умножением на 9,8066.

Напряжение – это сила, делённая на площадь, к которой эта сила приложена. В системе СИ единица изменения напряжения - паскаль [Па], который эквивалентен силе в 1 ньютон, приложенной к площадке в 1 квадратный метр. Так как большинство напряжений при волочении намного больше паскаля, обычно используют мегапаскаль [МПа], который равен 10^6 Па. На практике часто используют внесистемную единицу [кг/мм²]. $1 \text{ кг/мм}^2 = 9,8066 \text{ МПа}$.

Волочительные или тянущие напряжения являются растягивающими напряжениями и обозначаются положительным знаком. Сжимающие напряжения обозначаются отрицательным знаком. Сжимающее напряжение часто называют давлением, например, давление на волоку при волочении. Растягивающие и сжимающие напряжения (или давление) называют нормальными напряжениями, так как эти силы направлены перпендикулярно к поверхности. Когда сила параллельна поверхности, такое напряжение называется напряжением сдвига. Трение при волочении является примером напряжения сдвига. Часто нормальные напряжения обозначаются греческой буквой σ , а сдвиговые напряжения греческой буквой τ .

Иногда необходимо учитывать изменения площади, к которой приложена сила. Напряжение, приложенное к текущей, изменяемой площади называется истинным напряжением, в то время, как напряжение, отнесённое к начальной площади, пренебрегая её изменением, называется условным напряжением.

Деформация. Когда образец деформируется, важно определить изменение в размерах образца, то есть отношение новых размеров к первоначальным. Степень деформации – это относительное изменение размеров тела, то есть отношение изменений в размерах к первоначальным размерам. Например, отношение приращения длины стержня к его первоначальной длине при испытаниях на растяжение. Степень деформации безразмерна, так как мы делим длину на длину, ширину на ширину и т.д. Нормальная деформация включает изменения в размерах, которые параллельны исходному размеру. Деформация сдвига включает изменения в размерах, которые перпендикулярны исходному направлению.

Деформация растяжения широко используется в анализе волочения. Деформация растяжения, основанная на исходных размерах, то есть, если изменения площади поперечного сечения образца не учитываются, называется условной деформацией:

$$\varepsilon_e = (l_1 - l_0) / l_0, \quad (2.1)$$

где l_1 – новая длина и l_0 – первоначальная длина проволоки. При волочении деформация часто рассматривается как большая, поэтому предпочтительным является представление о деформации как сумме последовательных изменений.

Такая деформация называется истинной деформацией и представляется в виде натурального логарифма отношения длин:

$$\varepsilon_t = \ln(l_1 / l_0) \quad (2.2)$$

При анализе процесса волочения полезно учитывать, что произведение длины и площади поперечного сечения проволоки остаётся постоянной, даже если длина увеличивается и поперечное сечение уменьшается. Поэтому:

$$A_0 l_0 = A_1 l_1 \text{ и } l_1 / l_0 = A_0 / A_1 \text{ и } \varepsilon_t = \ln(A_0 / A_1), \quad (2.3)$$

где A_0 - исходная площадь поперечного сечения и A_1 - новая площадь поперечного сечения проволоки. Поперечное сечение круглой проволоки равно $(\pi/4)d^2$ и (A_0/A_1) равно $(d_0/d_1)^2$, d_0 исходный диаметр и d_1 новый диаметр проволоки.

Обжатие по площади поперечного сечения, r , часто используют в качестве количественной меры величины деформации при волочении. Но для расчетов маршрута волочения и упрочнения стали этот показатель не очень удобен, так как суммарное обжатие за несколько проходов не является суммой единичных обжатий в каждом проходе. Например, 30% обжатия за первый проход и 25% обжатия за второй, дают в сумме 47% общего обжатия, а не 55%.

С технической точки зрения для расчетов более удобной характеристикой является истинная, эффективная или логарифмическая деформация, ε_t (уравнения 2.2 и 2.3).

$$\varepsilon_t = \ln(l_1 / l_f) = \ln(A_0 / A_f) = 2 \ln(d_0 / d_f), \quad (2.4)$$

где индекс f означает конечный диаметр.

Главное преимущество использования логарифмической деформации при расчетах - это то, что единичные деформации суммируются.

Соотношения между r и ε_t даны в формулах:

$$r = 1 - e^{-\varepsilon_t} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_t = -\ln(1 - r) \quad (2.6)$$

Расчет деформации при волочении по приведенным выше уравнениям, с учетом площади и диаметра проволоки, является обычной практикой. Такой подход учитывает только однородное течение металла в очаге волочения. Однако, в большинстве случаев при волочении в очаге деформации присутствует неоднородная деформация. Такая деформация называется дополнительной или избыточной и учитывается умножением степени однородной деформации на фактор дополнительной деформации.

Скорость деформации - это степень деформации в образце за единицу времени. Единица измерения скорости деформации - $1/s$ или s^{-1} , и средняя скорость деформации равна произведению степени деформации на скорость волочения, делённую на длину очага деформации, L_d .

2. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОВОЛОКУ И ВОЛОКУ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

На рисунке 3.1 представлена схема зоны деформации при волочении, проволока движется слева направо.

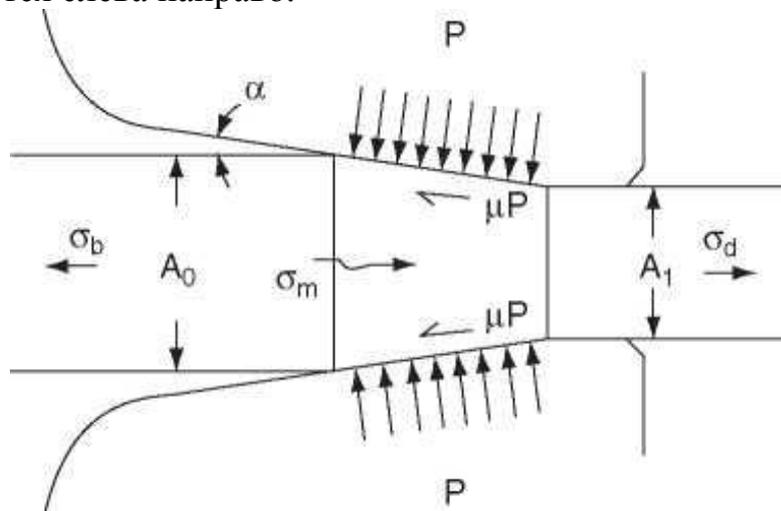


Рис. 3.1. Схема очага деформации при волочении

Площадь сечения проволоки слева на входе в волоку обозначена A_0 , а на выходе из волоки, справа, обозначена как A_1 .

2.1. Обжатие

$$r = (A_0 - A_1) / A_0 = 1 - (A_1 / A_0) \quad (3.1)$$

Или в процентах:

$$r = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100 = [1 - (A_1 / A_0)] \times 100 \quad (3.2)$$



Рис. 3.2. Проволока до и после волочения

Площадь сечения прутка/проволоки до волочения $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$, площадь сечения прутка/проволоки после волочения $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$.

2.2. Пример расчёта

2.2.1. Проволока протянута с 8 до 7 мм. Чему равно обжатие? Согласно формулам 3.1 и 3.2 обжатие $r=0,234=23,4\%$.

2.2.2. Катанка протянута (с промежуточной термообработкой) с 5,5 до 0,42 мм. Чему равно общее (суммарное) обжатие? Ответ: $r = 0,994 = 99,4\%$

2.2.3. Катанка диаметром 5,5 мм протянута с обжатием в первом проходе 27%. Чему равен диаметр первой волокни? Из формулы 3.1 следует $d = d_0 \sqrt{1-r} = 5,5 \sqrt{1-0,27} = 4,7$ мм.

2.2.4. Необходимо изготовить проволоку диаметром 2,0 мм. Что бы получить достаточный предел прочности, обжатие должно быть равно 55%. Рассчитать исходный диаметр. Из формулы 3.1 следует $d_0 = \frac{d_1}{\sqrt{1-r}} = 2,98$ мм.

2.3. Удлинение

$$\text{Относительное удлинение } E = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3.3)$$

$$\text{Или в процентах: } E = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (3.4)$$

При волочении объём проволоки остаётся постоянным, что позволяет легко определить соотношение между обжатием r и удлинением E :

$$E = \frac{r}{1-r}, \quad (3.5)$$

$$r = \frac{E}{1+E} \quad (3.6)$$

2.4. Пример расчёта

Проволока протянута за несколько проходов с 8 до 4 мм. Требуется определить обжатие r и удлинение E .

$$r = 1 - \left(\frac{4}{8}\right)^2 = 0,75 = 75\%, \quad E = \frac{0,75}{1-0,75} = 3 = 300\%$$

2.5. Угол волокни

В случае круглой проволоки, волокни создаёт сходящееся течение металла с помощью конуса с углом α . Область сходящегося течения называется волочильным каналом. Отметим, что α – это угол между стенкой волокни и осевой линией, который иногда называют полууглом волокни. Полный угол равен 2α . Обычно углы измеряют в градусах. Однако, в некоторых случаях, углы измеряются в радианах. Один радиан равен $360/(2\pi)$, или 57,30 градуса.

При волочении некруглого профиля используются другие углы в зависимости от ориентации продольного сечения.

2.6. Форма зоны деформации и параметр Δ

На рисунке 3.1 показана трапецеидальная зона, ограниченная линиями перпендикулярными оси и пересекающими её в точках входа и выхода проволоки из волокна, а также линиями стенок волокна. Такая зона принята за основную в анализе процесса волочения, параметры зоны волочения зависят от значений обжатия r и полуугла α .

Форма зоны деформации характеризуется отношением Δ , где:

$\Delta = (\text{средняя высота зоны} / \text{длина зоны})$

Среднее численное значение для Δ может быть вычислено из уравнения:

$$\Delta = (\alpha/r)[1 + (1-r)^{1/2}]^2 \approx 4 \tan \alpha / \ln[1/(1-r)] \quad (3.7)$$

Таблица 3.1

Величина Δ как функция обжатия в процентах и полуугла волокна

Обжатие, %	5%	10%	15%	20%	25%
Полуугол, град					
4	5,5	2,7	1,7	1,3	1,0
6	8,2	4,0	2,6	1,9	1,5
8	10,9	5,3	3,5	2,5	2,0
10	13,7	6,7	4,3	3,1	2,4

В таблице 3.1 представлены значения Δ для углов и обжатий, типичных для волочения. В общем случае, низкие значения Δ связаны с малыми значениями угла волокна и большими обжатиями, и высокие значения Δ связаны с большими углами волокна и малым обжатием.

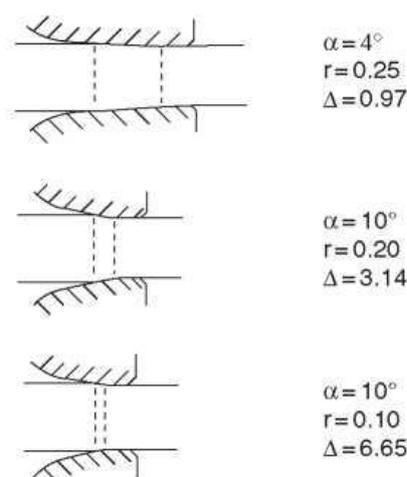


Рис. 3.3. Параметры Δ , α и r для трёх различных зон деформации

На рис. 3.3 показаны три различные зоны деформации и связанные с ними значения Δ , α и r .

Длина зоны деформации (L_d), параллельной оси волочения, равна $(d_0 - d_1)/(2\operatorname{tg}\alpha)$ и длина контакта проволоки со стенкой волоки (L_c), равна $(d_0 - d_1)/(2\sin\alpha)$.

Более сложный анализ процесса волочения показывает, что форма реальной зоны деформации в продольном сечении сложнее, чем простая трапеция. Однако, трапецевидная форма зоны деформации является основой для проектирования и практического анализа.

2.7. Напряжение волочения и противонатяжение

Напряжение волочения представляет собой силу, с которой тянут проволоку, делённую на площадь сечения проволоки на выходе из волоки. Часто при волочении к проволоке прикладывается сила в направлении, противоположном направлению движения проволоки, то есть, противонатяжение. Напряжение противонатяжения равно силе, направленной против движения проволоки, делённой на площадь сечения проволоки на входе в волоку.

2.8. Давление на волоку

На рис. 3.1 показано давление на волоку в зоне деформации, P . Это давление представляет собой суммарную нормальную силу, действующую между проволокой и волокой, делённую на площадь контакта между проволокой и волокой. В большинстве случаев при анализе рассматривают среднее давление на волоку, предполагая, что оно остаётся неизменным вдоль контактной поверхности волоки. Более точный анализ показывает, что давление меняется вдоль контактной поверхности, при этом оно выше на входе и выходе из волоки и ниже в середине контактной поверхности.

На рис. 3.1 показано среднее напряжение трения, μP , где μ – средний коэффициент трения. Напряжение трения направлено в сторону противоположную движению проволоки вдоль стенки волоки и равно силе трения, делённой на площадь контакта между проволокой и волокой. Понятно, что напряжение трения будет меняться вдоль канала волоки, но это редко принимается во внимание на практике.

2.9. Осевое напряжение

На рисунке 3.1 показано напряжение σ_m около центра зоны деформации. Это среднее значения нормального напряжения на осевой линии в точке, где растягивающие напряжения имеют максимальное значение, а сжимающие минимальное. Растягивающие напряжения доставляют наибольшее беспокойство при волочении, так как они приводят к разрывам в центре проволоки.

2.10. Задания

2.10.1. Вычислите процент обжатия, γ (%)

Волочение	Обжатие %
а) 5,50 мм → 1,80 мм	89,3
б) 2,00 мм → 0,70 мм	87,8
в) 12,0 мм → 9,00 мм	43,8

2.10.2. Вычислить конечный диаметр

Волочение	Конечный диаметр, мм
а) 5,50 мм протянуто с 19% обжатием	4,95
б) 8,00 мм протянуто с 75% обжатием	4,00
в) 0,85 мм протянуто с 92% обжатием	0,24

2.10.3. Вычислить начальный диаметр

Волочение	Начальный диаметр, мм
а) обжатие 29%, конечный диаметр 1,00 мм	1,19
б) обжатие 98%, конечный диаметр 0,20 мм	1,41
в) обжатие 68%, конечный диаметр 1,50 мм	2,65

2.10.4. Проволока протянута через волоку с силой 500Н, на скорости 1000м/мин. Какая при этом расходуется мощность в ваттах?

2.10.5. Рассмотрите деформацию с обжатием 20%. Рассчитайте величину истинной деформации и условной(инженерной) деформации.

2.10.6. Проволока протянута от диаметра 6мм до диаметра 5,5мм, полуугол волоки 6 градусов, скорость 200 м/мин. Какова величина скорости деформации?

2.10.7. Принято обжатие 20% с полууглом волоки 6 градусов. Необходимо использовать обжатие 15% без изменения значения Δ . Какое значение полуугла необходимо использовать?

3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ВОЛОЧЕНИЯ

3.1. Напряжение волочения и работа на единицу объёма

Работа, совершенная для протяжки проволоки, $W=F*L$. Представим это выражение в следующем виде:

$$W/(L*A_1)=F/A_1 \quad (4.2)$$

Слева работа, деленная на объем, или работа на единицу объема, w , справа напряжение волочения σ_d . Таким образом, напряжение волочения равно работе затраченной на единицу объема.

$$\sigma_d=w \quad (4.3)$$

При таком подходе работа рассматривается как работа внешних сил. В этом случае в нее входит работа однородной деформации, w_u , работа неоднородной или дополнительной деформации, w_r , и работа сил трения, w_f , всё в единичном объёме. Все эти величины вносят вклад в напряжение волочения. Таким образом, напряжение волочения можно представить в следующем виде:

$$\sigma_d = w_u + w_r + w_f \quad (4.4)$$

3.2. Однородная работа

Однородная работа – работа, затраченная на растяжение (уменьшение диаметра) проволоки или прутка без учета взаимодействия с волокой, то есть, при определении однородной работы принимается во внимание только изменение геометрических размеров, а влияние волоки, приводящее к изменению направления течения металла и к возникновению напряжений трения, не рассматривается.

Однородная работа на единицу объема эквивалентна работе на единицу объема, которая затрачивается при растяжении до степени деформации, соответствующей обжатию при волочении. Эта работа может быть получена путем интегрирования напряжения по времени или определения площади под кривой напряжение-деформация. Проще всего это можно выразить как произведение среднего сопротивления деформации при волочении проволоки, $\bar{\sigma}_a$, и истинной деформации по уменьшению диаметра проволоки, то есть:

$$W_u = \bar{\sigma}_a \ln(A_0/A_1) = \bar{\sigma}_a \ln[1/(1-r)] \quad (4.5)$$

Следует понимать, что среднее сопротивление деформации используется для упрощения, в то время как сопротивление деформации увеличивается от входа к выходу очага деформации.

3.3. Неоднородная или дополнительная работа

Когда проволока входит в волоку она отклоняется от горизонтального направления в соответствии с полууглом α . С другой стороны, проволока, выходящая из волочильного конуса, отклоняется в противоположном направлении к горизонтальному направлению. Схема течения металла через волоку показана на рис. 4.1.

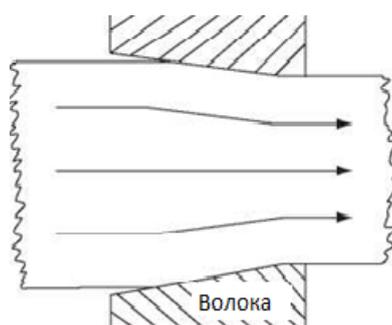


Рис. 4.1. Схема течения металла в очаге деформации при волочении

В простейшем анализе проволока подвергается сдвигу на входе и выходе из волоки в противоположных направлениях. Эти сдвиги в противоположных направлениях не вносят вклад в суммарное обжатие проволоки. Эти деформации часто называют избыточной или дополнительной деформацией, потому что она не влияет на конечную геометрию проволоки. При этом, связанная с ней

работа и работа, деленная на объём, называется избыточной или дополнительной работой.

Избыточную работу трудно моделировать исходя из первых принципов, поэтому в большинстве применений используется полуэмпирический подход.

В большинстве случаев вводится фактор дополнительной работы Φ , где

$$\Phi = (w_u + w_r) / w_u \quad (4.6)$$

Или $w_r = (\Phi - 1)w_u = (\Phi - 1)\sigma_a \ln[1/(1-r)]$ (4.7)

Очевидно, если дополнительной работы нет, то $\Phi = 1$. В общем случае избыточная работа всегда присутствует, особенно если величина Δ выше 1, что соответствует волочению с большими углами и/или с меньшими обжатыми. Наиболее полезен классический подход Уистрейха (Wistreich), который для типичного прохода волочения приводит к выражению:

$$\Phi = 0.8 + \Delta / (4.4) \quad (4.8)$$

Обращаем внимание, что избыточная работа существенно увеличивается при увеличении параметра Δ .

Природа избыточной работы и её связь с параметром Δ видна на рисунках профилей твердости (рис.4.2a и рис.4.2b). На рис. 4.2a применяемое значение Δ около 1.3, на рис.4.2b Δ около 5.3. При $\Delta = 1.3$ пруток деформирован однородно. При $\Delta = 5.3$, деформация неоднородна и избыточная работа концентрируется во внешних слоях проволоки. В центральных областях проволоки не видно существенного упрочнения. При $\Delta = 5.3$ фактор избыточной работы около 2 и работа избыточной деформации почти равна работе однородной деформации, таким образом, работа деформации при $\Delta = 5.3$ в два раза больше, чем при $\Delta = 1.3$.

Значительная величина дополнительной деформации и работы деформации сосредоточена около поверхности проволоки, что значительно увеличивает прочность проволоки. Это особенно заметно при испытаниях на изгиб и кручение, операциях нарезки резьбы и отжига.

Уменьшить дополнительную работу можно путем уменьшения угла волокна и увеличения обжаты. Уистрейч утверждал, что дополнительная деформация значительно влияет на работу волочения, за исключением значений Δ -параметра ниже 1,25. Практический опыт показывает, что низкие значения Δ -параметра особенно важны для первых проходов. При низких значениях Δ -параметра меньше дополнительная деформация, следовательно, меньше дополнительная работа деформации и меньше деформационное упрочнение (холодный наклеп) проволоки. Это позволяет увеличить суммарное обжатие между отжигами.

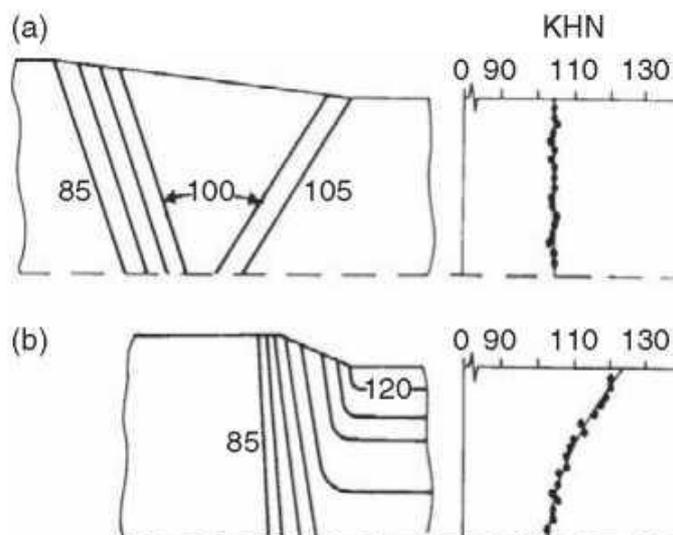


Рис. 4.2. Распределение твердости в продольном и поперечном сечении очага деформации при волочении для малого угла (малого Δ) и большого угла (большого Δ). Радиальный градиент твердости для случая большого угла (b) отражает наличие неоднородной деформации

Доля неоднородной деформации в зависимости от обжатия и величины угла волокна представлена на диаграмме Павельски рис. 4.3.

При анализе диаграммы Павельски следует учитывать, что в реальном процессе волочения дополнительная работа не может быть равна нулю. Для уменьшения доли неоднородной деформации нужно:

- уменьшить угол волокна;
- увеличить обжатие.

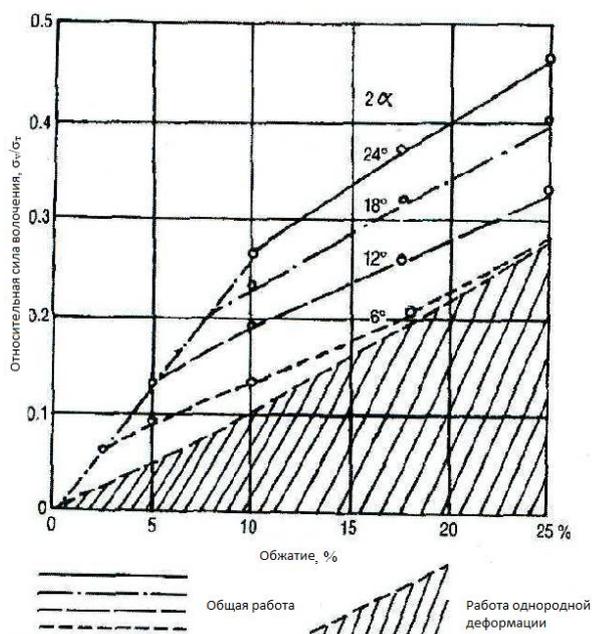


Рис. 4.3. Диаграмма Павельски. Влияние обжатия и угла волокна на относительную силу волочения

И то, и другое играет важную роль в обеспечении высокого качества протянутой проволоки. Общий эффект угла волоки и обжатия рассчитывается с использованием теории полей линий скольжения. Этот эффект хорошо виден на рисунке 4.3.

Относительное усилие волочения на диаграмме равно σ_v/σ_T , где σ_v – сила волочения, а σ_T – предел текучести на растяжение, $\sigma_T = 2k$, где k – предел текучести на сдвиг.

Пример расчёта доли неоднородной деформации для различных углов и обжатий приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Оценка доли неоднородной деформации по диаграмме Павельски (рис. 4.3)

Обжатие, %	Угол волоки 2α , град	Относительное усилие, σ_v/σ_T для различ- ных видов деформации			Доля неоднородной деформации, %
		однородной деформации	общей деформации	неоднородной деформации	
10	18	0,10	0,23	0,13	57
10	12	0,10	0,19	0,09	47
25	18	0,28	0,40	0,12	30
25	12	0,28	0,33	0,05	15

3.4. Работа сил трения

Вклад трения в напряжение волочения (работа сил трения, делённая на объём проволоки или прутка), может быть получен умножением контактной площади между проволокой и волочильным конусом на сдвиговое напряжение трения, действующее на контактной поверхности и делением на площадь сечения проволоки на выходе из волоки A_1 . Среднее напряжение трения обычно выражается как μP , где μ это средний коэффициент трения и P среднее давление на волоку. Среднее давление на волоку может быть приближенно выражено как $\Phi\sigma_a$, в этом случае давление на волоку включает как однородную, так и неоднородную работу в очаге деформации. Общее выражение для работы сил трения на единицу объёма:

$$w_f = \mu \cdot ctg\alpha \cdot \Phi\sigma_a \ln[1/(1-r)] \quad (4.9)$$

Так как Δ можно аппроксимировать выражением $4tg\alpha / \ln[1/(1-r)]$, уравнение может быть переписано следующим образом:

$$w_f = 4\mu\Phi\sigma_a / \Delta \quad (4.10)$$

Работа сил трения в калибрующем пояске обычно в практических расчетах не учитывается.

3.5. Формула напряжения волочения

Полное напряжение волочения можно представить формулой:

$$\sigma_d = w_u + w_r + w_f = \sigma_a \ln[1/(1-r)] + (\Phi - 1)\sigma_a \ln[1/(1-r)] + 4\mu\Phi\sigma_a / \Delta \quad (4.11)$$

Разделим на σ_a и учитывая, что $\operatorname{tg}\alpha \approx \alpha$, получим:

$$\sigma_d / \sigma_a = (4\Phi / \Delta)(\alpha + \mu) \quad (4.12)$$

Окончательно, используя предыдущие уравнения, получим:

$$\sigma_d / \sigma_a = \Sigma = [(3,2 / \Delta) + 0,9](\alpha + \mu) \quad (4.13)$$

3.6. Предельное обжатие

Напряжение волочения должно оставаться ниже сопротивления деформации σ_{01} на выходе из волоки, чтобы избежать неконтролируемого растяжения, образования шейки или разрушения. Среднее сопротивление деформации может быть аппроксимировано выражением:

$$\sigma_a = (\sigma_{00} - \sigma_{01}) / 2 \quad (4.14)$$

Таким образом, в случае отсутствия упрочнения $\sigma_a = \sigma_{00} = \sigma_{01}$, σ_d должно оставаться ниже σ_a и Σ должно оставаться ниже 1. Конечно, в случае значительного упрочнения, σ_d теоретически может превышать σ_a , так как увеличение сопротивления деформации на выходе из волоки позволяет применить более высокое напряжение волочения без неконтролируемого растяжения, образования шейки или разрушения. Однако, для общего и оценочного анализа предполагаем, что σ_d не может превышать σ_a , а предельное значение $\Sigma = 1$.

Теоретически, если нет избыточной работы и работы трения, согласно уравнениям 4.4 и 4.5 предел волочения достигается, когда $\ln[1/(1-r)] = 1$, то есть, если $r = 0,632$ или 63,2%. Конечно, на практике волочение включает избыточную работу и работу трения, поэтому предел волочения достигается при обжатии много меньше 63,2%. В промышленной практике редко используются обжатия выше 30 или 35%, обычными являются намного меньшие обжатия.

3.7. Пример расчета

Рассмотрим проход волочения, включающий однократное обжатие 20,7% при волочении через волоку с полууглом 8° или 0,14 рад (величина α в уравнении 4.13 должна быть в радианах). Из уравнения 3.7 величина $\Delta = 2,42$.

Будем считать, что средний коэффициент трения равен 0,1, как типичный пример волочения с жидкой смазкой.

В результате подстановки этих величин в уравнение 4.13 получим значение $\Sigma = 0,53$, что намного ниже предела волочения 1,0. Так как такой проход является вполне обычным в практике волочения, ясно, что во многих случаях волочение проводится при уровнях напряжения намного ниже того, который обычно связывают с неконтролируемым растяжением, образованием шейки или разрушением. Таким образом, такие разрушения возникают при значительном отклонении условий волочения от принятых на практике.

3.8. Оптимальный угол волокни и параметр Δ

Согласно уравнению 4.8 избыточная работа и её вклад в напряжение волочения увеличивается с увеличением Δ. Уравнение 4.10 указывает, что работа трения и её вклад в напряжение волочения уменьшается с увеличением Δ. Эти зависимости приводят к минимизации напряжения волочения при промежуточных или оптимальных значениях Δ. Если правую сторону уравнения 4.13 преобразовать в выражение, включающее только Δ, μ, и r, можно получить зависимость:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_a} = \Sigma = [(3.2/\Delta) + 0,9] \{ \Delta r [1 + (1-r)^{1/2}]^{-2} + \mu \} \quad (4.15)$$

Дифференцируем правую часть уравнения 4.15 по Δ и приравниваем производную к 0. Из полученного уравнения можно получить величину Δ соответствующую минимуму величин $\frac{\sigma_d}{\sigma_a}$ или Σ. Эти оптимальные величины определяются выражениями:

$$\Delta_{opt} = (1,89)(\mu/r)^{1/2} [1 + (1-r)^{1/2}] \quad (4.16)$$

$$\alpha_{opt} = (1,89)(\mu r)^{1/2} / [1 + (1-r)^{1/2}] \quad (4.17)$$

На рис. 4.4 показаны экспериментальные кривые минимума $\frac{\sigma_d}{\sigma_a}$ или Σ как функцию угла волокни для широкого диапазона обжатий.

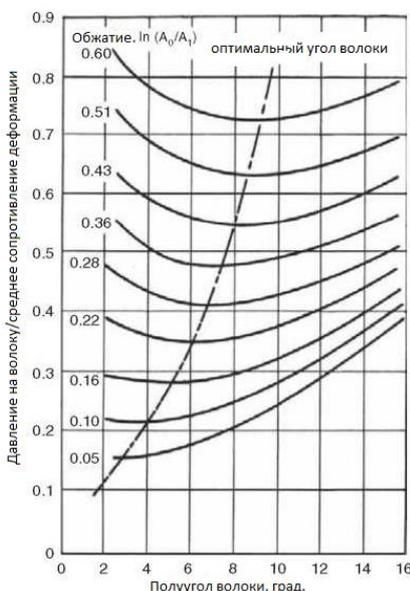


Рис. 4.4. Экспериментальное определение зависимости $\frac{\sigma_d}{\sigma_a}$ как функции угла волокни для широкого диапазона обжатий

Следует отметить, что существует много других факторов, которые следует учитывать при выборе угла волокни или Δ. Кроме того, величина напряжения волочения слабо меняется в широком диапазоне величин угла или параметра Δ. К тому же низкие значения Δ часто улучшают условия смазки и снижают вели-

чину коэффициента трения μ , таким образом подталкивая величину Δ_{opt} или α_{opt} к более низким значениям.

Таким образом, хотя концепция оптимального угла или величины Δ является важной для понимания влияния работы трения и избыточной работы, критерий оптимального угла редко является единственным фактором для выбора величины угла волоки или Δ .

3.9. Давление на волоку

Среднее давление на волоку, P , определяется работой деформации, как однородной, так и неоднородной. Часто полезно рассматривать отношение P/σ_a , среднего давления к среднему сопротивлению деформации и выразить отношение как функцию Φ или Δ . На рис. 4.5 показана зависимость между Δ и P/σ_a по данным Вистрейха. Когда Δ около 1 среднее давление на волоку находится в пределах $\pm 20\%$ от σ_a . Для больших величин Δ , среднее давление увеличивается линейно с Δ , и может быть аппроксимировано как

$$P/\sigma_a = \Delta/4 + 0.6 \quad (4.18)$$

В диапазоне малых значений Δ , уменьшение обжатия приводит к увеличению давления на волоку, в дополнение к росту Δ при уменьшении обжатия.

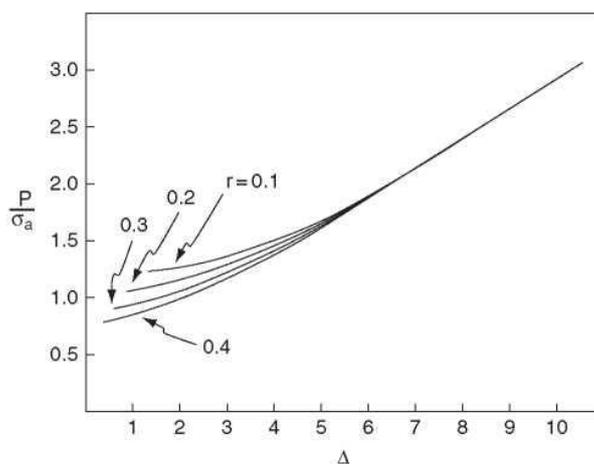


Рис. 4.5. Отношение среднего давления на волоку к среднему сопротивлению деформации как функция Δ

Давление на волоку не испытывает больших изменений при изменении трения в практическом диапазоне. Высокие уровни трения, однако, существенно уменьшают давление на волоку.

Увеличенный износ часто связан с увеличенным давлением и параметром Δ . Это имеет место в точке, где проволока первый раз касается волоки. В этом месте вибрация, осевая асимметрия, изменения в диаметре, условиях смазки вызывают периодические изменения давления на волоку. Это приводит к развитию кольца износа в месте первоначального контакта проволоки с волокой. На рис 4.6 показан профиль такого кольца износа.

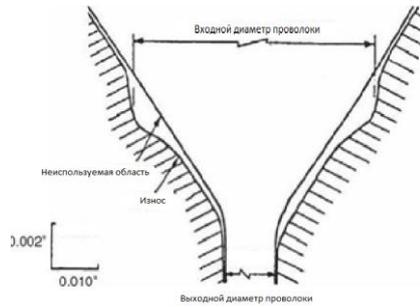


Рис. 4.6. Профиль кольца износа

3.10. Растяжение в центре проволоки

Деформационная зона подвергается воздействию напряжения растяжения (напряжение волочения) на выходе из волоки, сдвигового напряжения трения и сжимающего напряжения (давления на волоку) через стенки волоки. На входе либо нет напряжения, либо присутствует напряжение противонатяжения.

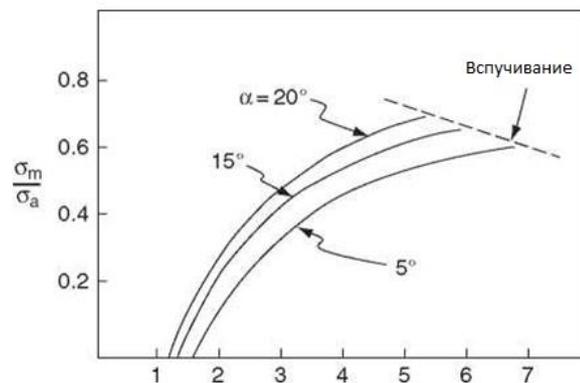


Рис. 4.7. Отношение гидростатического давления в центре проволоки (σ_m) к среднему сопротивлению деформации (σ_a) как функция Δ

Напряжённое состояние в зоне деформации далеко от однородного. Среднее напряжение в центре проволоки менее сжимающее, чем у стенки волоки и даже может быть растягивающим. Это особенно проявляется при высоких значениях Δ . Рис. 4.7 показывает значения, вычисленные Кофином и Роджерсом (Coffin and Rogers) из работы Хилла и Таппера (Hill and Tupper), отношения среднего или гидростатического давления в центре проволоки, σ_m , к среднему сопротивлению деформации, σ_a , как функцию Δ . Ниже значения $\Delta=1,3$, гидростатическое давление в центре проволоки сжимающее. При Δ выше 1,3, σ_m становится всё больше растягивающим с увеличением Δ , достигая значений много выше половины среднего сопротивления деформации. В общем случае увеличение угла волоки приводит к увеличению осевого растягивающего напряжения, кроме того, параметр Δ также увеличивается с ростом угла.

Осевое растяжение при волочении является нежелательным явлением, потому что способствует росту пор и пластическому разрушению проволоки на оси. Кроме того, оно препятствует стабилизации и уплотнению пор на оси, унаследованных от операций литья. Разрывы, развивающиеся на осевой линии проволоки во время волочения называются «центральными разрывами». На рис. 4.8 показано продольное сечение центральных разрывов (цитирование Калпакьяна (Kalpakian) из работы Брейера (Breyer)).

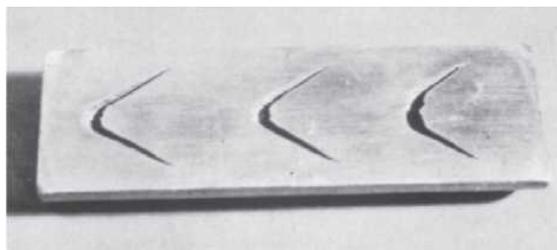


Рис. 4.8. Продольное сечение проволоки с разрывами в центре

3.11. Пластическое течение за пределами волочильного конуса

При анализе процесса волочения обычно полагают, что деформация ограничена трапециевидной зоной в продольном сечении на рис. 3.1. Параметр Δ также определяется исходя из принятой трапециевидной формы очага деформации. Однако, для более высоких значений Δ деформация имеет место до и после этой принятой зоны волочения.

Деформацию перед трапециевидной зоной обычно называют вспучиванием, и она может рассматриваться как смещение приповерхностных слоёв при больших значениях угла. Если угол волоки достаточно большой, металл будет отрываться от поверхности проволоки или прутка. Такое поведение называется скальпированием. На практике скальпирование обычно происходит при углах более чем $\pi/2(90^\circ)$. В отсутствие скальпирования вход приповерхностных слоев металла в волоку сопровождается большой величиной неоднородной деформации и отгоном смазки от входа в волоку.

Для устойчивости процесса волочения необходимо, чтобы напряжение волочения всегда было ниже предела текучести или сопротивления деформации. Следовательно, деформацию на выходе из волоки нельзя рассматривать как просто растяжение под действием напряжения волочения. Деформацию на выходе из волоки можно рассматривать как расширение области пластической деформации за пределы номинальной зоны деформации, показанной на рис. 3.1. При использовании предельно больших углов волоки и высоких Δ , зона пластической деформации может распространяться на расстояние двух диаметров от выхода из волоки. За счет этого возникает дополнительное обжатие до степени 1,2%. Конечно, если взять более типичное значение Δ , эта величина будет намного меньше и, возможно, будет в пределах неточности размеров проволоки, эффектов износа и отклонений в осевой ориентации проволоки. Подразумевается, что в идеальном случае, когда проволока расположена точно по осе-

вой линии, давления на калибрующий поясok не оказывается. В реальном процессе такое точное расположение не всегда возможно и проволока будет испытывать трение с одной из сторон калибровочного пояска.

3.12. Эффект противонатяжения

В отсутствие трения противонатяжение добавляется к общему напряжению волочения:

$$\sigma_d = \sigma_{d0} + \sigma_b \quad (4.19)$$

где σ_{d0} – напряжение волочения, которое было бы в отсутствие противонатяжения.

Противонатяжение снижает давление на волоку, P , и, таким образом, снижает среднее напряжение трения, μP . Таким образом, с учетом уменьшения силы трения, σ_b при наличии противонатяжения будет ниже, чем в приведенном выше уравнении. Выражение для напряжения волочения:

$$\sigma_d = \sigma_a[(3.2/\Delta) + 0.9](\alpha + \mu) + \sigma_b[1 - (\mu r/\alpha)(1 - r)^{-1}] \quad (4.20)$$

Влияние среднего давления на волоку, P , может быть выражено следующим образом:

$$P/P_0 = 1 - [2b/(2 - \Sigma)] \quad (4.21)$$

где P_0 это среднее давление в отсутствие противонатяжения и b это σ_b/σ_a . σ_a – среднее сопротивление деформации и Σ – отношение σ_d/σ_a .

В дополнение к увеличению общего напряжения волочения и снижению давления на волоку и связанного с ним трения, противонатяжение добавляется к величине осевого растягивающего напряжения, увеличивая риск разрыва в центре проволоки. Тем не менее, в некоторых случаях может быть полезно применять противонатяжение, чтобы уменьшить давление на волоку и связанное с ним трение. В этом случае практический анализ показывает, что увеличения риска осевого разрушения можно в значительной степени избежать уменьшением величины Δ на величину около 0,75.

3.13. Задания

4.13.1. Какова величина Δ для волочильного прохода с обжатием 20% и углами 20°, 16°, 12° и 8°.

4.13.2. Какова величина напряжения волочения, σ_d , для 4 случаев в задаче 4.13.1, предполагая коэффициент трения 0,1 и среднее напряжение 350 МПа. Каковы величины силы волочения для 0,5 мм проволоки?

4.13.3. Каково среднее давление на волоку для 4 случаев в задаче 4.13.1, предполагая, что среднее напряжение равно 350 МПа.

4.13.4. Чему равен фактор избыточной работы для 4 случаев задачи 4.13.1?

4.13.5. Чему равна величина осевого напряжения для 4 случаев задачи 4.13.1, предполагая среднее напряжение равным 350 МПа?

4.13.6. Чему равна величина напряжения волочения, σ_d , для прохода волочения с обжатием 20% с вписанным углом 12° и коэффициентом трения 0,04;

0,1; 0,15; 0,25? Предполагаем, что среднее напряжение 350 МПа. Сравните напряжение волочения со средним напряжением в зоне деформации. Возможны ли описанные выше условия волочения?

4.13.7. Какое максимальное обжатие может быть принято за один проход с вписанным углом 12° и коэффициентом трения 0,1?

4.13.8. В проходе от 1,00 до 0,9мм с вписанным углом 12° сила волочения 200 Н со средним напряжением 700 МПа. Оцените коэффициент трения.

4. ТЕМПЕРАТУРА ПРОВОЛОКИ

4.1. Вклад различных факторов в температуру проволоки

4.1.1. Температура входящей проволоки

Температура проволоки непосредственно перед входом в волоку, T_0 , имеет значительное влияние на температурный режим волочения, так как в условиях многократного волочения она определяется количеством тепла, оставшегося в проволоке от предыдущих проходов. Маловероятно, что проволока сможет охладиться до температуры окружающей среды при движении между волоками. Кроме того, в некоторых случаях применяется предварительный нагрев или охлаждение проволоки перед волочением. Проволока принимает температуру того помещения, в котором она хранится (плюс незначительный тепловой эффект размотки, выпрямления или обработки поверхности). В любом случае, при расчетах температурных эффектов необходимо учитывать значительную роль температуры на входе в волоку.

4.1.2. Суммарный рост температуры за волочильный проход

Работа деформации при волочильном проходе почти полностью переходит в тепло. Можно отметить, что малая часть работы деформации переходит в энергию дефектов кристаллической решетки (дислокации, вакансии и другие формы внутренней энергии) и т.д. Однако, на практике, в большинстве случаев, переход энергии деформации в энергию кристаллической решетки не учитывается и считается, что вся энергия деформации полностью переходит в тепло и вызывает рост температуры проволоки и волоки. Предполагается, что работа на единицу объема, w , эквивалентна напряжению волочения, B_d .

В начале волочения или при волочении коротких прутков и проволоки, холодная волока может поглощать значительную долю тепла. Однако, в установившемся режиме, температура контактной поверхности становится достаточно высокой и поток тепла от проволоки к волоке становится минимальным. Таким образом, простой подход, основанный на предположении, что вся работа деформации переходит в тепло и вызывает нагрев проволоки, является хорошей аппроксимацией.

На выходе из волоки наблюдается температурный градиент, вызванный тепловыделением за счет трения на контактной поверхности, то есть температура проволоки на поверхности будет выше, чем в центре. Этот градиент существует короткое время и затем в проволоке устанавливается равновесие при от-

носителем однородной температуре, за исключением случая с эффективным конвективным охлаждением, когда температура на поверхности ниже температуры в центре проволоки. Эта равновесная температура может быть выражена следующим образом:

$$T_{eq} \approx T_0 + \sigma_d / (C\rho) \quad (5.1)$$

где C – удельная теплоёмкость и ρ – плотность проволоки.

Расстояние в направлении движения проволоки от выхода из волокна, на котором устанавливается равновесие L_{eq} , можно оценить исходя из теории теплопроводности следующим образом:

$$L_{eq} \approx (\nu C \rho d^2) / (24K) \quad (5.2)$$

где K – теплопроводность проволоки.

Для углеродистой стали теплоёмкость $C = 0,461$ дж/(г·°C), плотность $\rho = 7,8$ г/см³, теплопроводность $K = 0,461$ дж/(см·с·°C).

4.1.3. Пример расчёта

Рассмотрим пример для волочения со следующими параметрами:

Среднее сопротивление деформации – 550 МПа, диаметр на выходе из волокна – 4,57мм, обжатие – 0,324, полуугол волокна - 6°, коэффициент трения – 0,05, скорость волочения - $5 \cdot 10^2$ см/с. Для приведённой выше стали параметр Δ и σ_d равны соответственно, 1,08 и 330 МПа. Таким образом, используя уравнение 5.1 и принимая начальную температуру равной 20°, получим равновесную температуру проволоки 112°, то есть, температура стальной проволоки увеличивается на 92° за один проход от температуры на входе в волоку и становится выше температуры кипения воды. При низкой теплопроводности смазки (сухое мыло и др.) в условиях многократного волочения температура стальной проволоки может достичь экстремально высоких величин, что будет затруднять смазку и может привести к нежелательным изменениям.

Для приведённого выше примера, расстояние, на котором устанавливается тепловое равновесие, составляет 34см, что в 74 раза больше диаметра проволоки, но это меньше, чем расстояние между волокнами.

4.1.4. Тепло однородной деформации

В напряжение волочения и удельную работу вносят вклад однородная деформация, неоднородная (дополнительная) деформация и трение. Полезно исследовать вклад каждого источника тепла, учитывая, что все они вносят вклад в последний член уравнения 5.1. В первую очередь мы рассмотрим вклад однородной деформации в увеличение температуры при волочении.

Уравнение 4.5 даёт величину однородной работы, которая совершается во время прохода волочения. Это значение можно просто разделить на $(C\rho)$, чтобы получить адиабатический прирост температуры, связанный с однородной работой $(T_{uw} - T_0)$:

$$(T_{uw} - T_0) = \sigma_a \ln[1/(1-r)] / (C\rho) \quad (5.3)$$

4.1.5. Тепло неоднородной деформации

Уравнение 4.7 даёт величину дополнительной работы, которая совершается во время прохода волочения. Эту величину также можно разделить на $(C\rho)$, чтобы получить адиабатический прирост температуры, связанный с неоднородной работой:

$$(T_{rw} - T_0) = (\Phi - 1)\sigma_a \ln[1/(1-r)]/(C\rho) \quad (5.4)$$

Из рисунка 4.2б очевидно, что дополнительная работа увеличивается при движении от центра к поверхности проволоки. Таким образом, рост температуры за счет неоднородной деформации будет выше во внешних слоях проволоки. Температурный градиент неоднородной деформации обычно мал по сравнению с градиентом, вызванным теплом трения и, как правило, при практических расчетах не учитывается.

4.1.6. Суммарное тепло деформации

Если сложить полученные выше выражения для тепловыделения однородной и неоднородной деформации получим:

$$(T_w - T_0) = \Phi\sigma_a \ln[1/(1-r)]/(C\rho) \quad (5.5)$$

4.1.7. Вклад трения в тепловыделение

Тепло трения выделяется на контактной поверхности между волокой и проволокой, поэтому в проволоке возникает радиальный градиент температур. Этот градиент, как отмечалось ранее, существует очень малое время. К моменту, когда проволока выходит из волоки на расстояние L_{eq} , тепло трения распределяется равномерно по объёму проволоки. Таким образом, величину выделенного тепла трения можно разделить на $(C\rho)$ и получить средний по объёму адиабатический прирост температуры, связанный с работой трения:

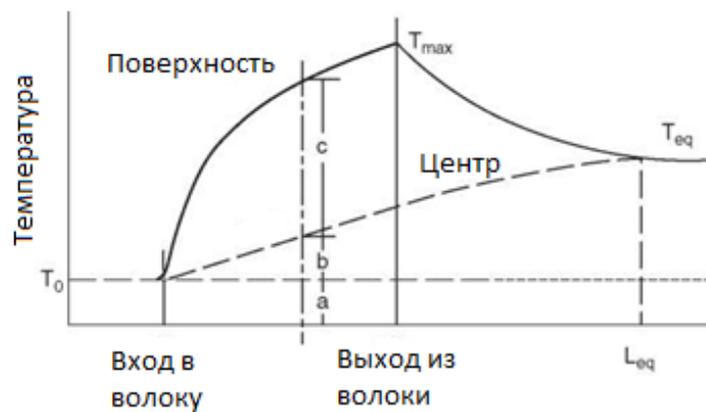
$$(T_f - T_0) = \mu \cot\alpha \Phi\sigma_a \ln[1/(1-r)]/(C\rho) \quad (5.6)$$

Важно понимать, что градиент радиальной температуры и, соответственно, высокая температура на поверхности проволоки существует только в короткий переходный период установления теплового равновесия. Однако, высокая температура на поверхности проволоки в этот период может повлиять на условия смазки, химический состав и дефекты на поверхности проволоки. Строгая оценка фрикционного нагрева в переходный период установления теплового равновесия достаточно сложна и требует рассмотрения условий теплопередачи и взаимодействия поверхностей проволока-волока. Количественная оценка максимальной температуры на поверхности проволоки для высоких скоростей волочения может быть получена с использованием подхода Зибеля и Кобитца:

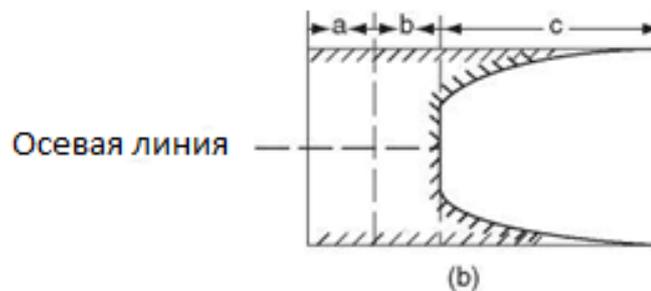
$$T_{max} = (1,25)\mu\Phi\sigma_a[(vL_d)/(C\rho K)]^{1/2} + \Phi\sigma_a \ln[1/(1-r)]/(C\rho) + T_0 \quad (5.7)$$

Полуколичественное описание представлено на рис. 5.1, где T_0 , T_w и температура на поверхности проволоки представлена в зависимости от положения

вдоль проволоки от точки входа в волоку до точки установления равновесия L_{eq} . Линия $T_w(\text{центр})$ представляет собой сумму начальной температуры и прироста температуры за счёт деформации. Эта величина линейно растёт по мере продвижения проволоки через волоку. Линия, представляющая температуру на поверхности проволоки, растёт до величины T_{max} на выходе из волоки и затем уменьшается до T_{eq} в положении, соответствующем расстоянию установления теплового равновесия L_{eq} .



(a)



(b)

Рис. 5.1. (a) продольное распределение температуры в центре и на поверхности проволоки, (b) график распределения температуры по сечению проволоки в канале волоки

4.1.8. Пример расчета

Рассмотрим проход волочения стальной проволоки со значениями из предыдущего примера. Из уравнения 4.8 получаем, что величина Φ равна 1,05. Согласно уравнения 5.5 прирост температуры от работы деформации составляет 63°C , из уравнения 5.7 максимальная температура равна $491^\circ\text{C} + T_0$, или 511°C , если начальная температура равна 20°C . Согласно приведённому выше расчёту, T_{eq} равно 112°C на расстоянии L_{eq} 34см от волоки по движению прово-

локи. Это означает, что $(T_f - T_0) = (112 - 63 - 20) = 29^\circ\text{C}$ в соответствии с уравнением 5.6.

4.2. Измерение температуры

Наилучший практический способ измерения температуры при волочении – это использование термопар. При низких скоростях и больших диаметрах проволоки, особенно в лабораторных условиях, контакт термопары может быть установлен на выходе проволоки из волоки. На более высоких скоростях, малых диаметрах и в случае применения смазки с низкой теплопроводностью можно оценить равновесную температуру проволоки установив термопару на кабестане.

Использование пирометра затруднено из-за быстрого изменения излучательной способности поверхности проволоки на выходе из волоки. Это вызвано быстрым окислением и другими процессами, происходящими на поверхности проволоки сразу после выхода из волоки. Такое быстрое изменение излучательной способности может привести к ошибочным и противоречивым показаниям пирометра, например, пирометр может показать рост, а не уменьшение температуры проволоки после выхода из волоки.

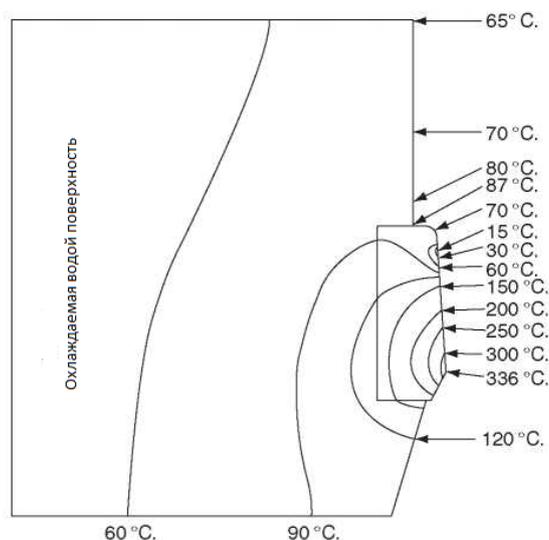


Рис. 5.2. Температура волоки при волочении стальной проволоки со скоростью 700 см/с

Температура волоки была измерена и смоделирована в условия исследовательской лаборатории при помощи термопар, помещённых в волоку на различных расстояниях от поверхности контакта волока-проволока. Классический пример таких данных представлен на рис. 5.2 из работы Рэнжера (Ranger). Исследовалось распределение температуры в волоке при волочении стальной проволоки со скоростью 700 см/с.

4.3. Охлаждение между проходами

Деформационный и фрикционный нагрев может быть существенно уменьшены за счёт охлаждения между волоками, особенно в случае волочения тонкой проволоки со смазкой на основе воды.

В случае сухого волочения суммарный нагрев может оказаться существенным. В этом случае для поддержания уровня температуры, необходимого для обеспечения хорошего качества проволоки и стабильности условий смазки, требуется применение сложного оборудования и технологии волочения. Это особенно важно для стальной проволоки. Особое внимание уделяется хорошей теплопередаче на шкивах и охлаждению волок (где возможно). Кроме того, может быть разработан маршрут волочения, обеспечивающий одинаковый нагрев в каждом проходе.

Небольшой температурный градиент у поверхности волокна (рис. 5.2) указывает на недостаточную эффективность охлаждения волокна водой (поток тепла пропорционален градиенту). Лабораторные эксперименты по волочению показывают, что водяное охлаждение волокна позволяет уменьшить пиковую температуру всего на несколько процентов. Хотя в некоторых случаях уменьшение температуры на несколько процентов может оказаться критическим, на шкивах возможности водяного охлаждения намного выше, так как внутренние поверхности могут быть спроектированы так, чтобы усилить охлаждающий эффект от циркулирующей в шкивах и барабанах воды.

4.4. Практические примеры влияния температуры на процесс волочения

4.4.1. Смазка

Коэффициент трения при волочении со смазкой на основе масла прямо зависит от вязкости смазки, то есть, напряжение трения увеличивается с увеличением вязкости в диапазоне рабочих температур смазки (для ньютоновской жидкости напряжение сдвига прямо пропорционально вязкости). В таблице 5.3 показано влияние температуры на вязкость нефтяного масла при давлении 300 МПа.

Напряжение трения при применении в качестве смазки твёрдого мыла прямо зависит от напряжения сдвига смазки. Таблица 5.4 показывает влияние температуры на начальное напряжение деформации для стеарата соды. Из практики известно, что существуют оптимальные диапазоны для параметров смазки. Таким образом, рост температуры при волочении может привести как к улучшению, так и к ухудшению условий смазки в зависимости от остальных условий. Явно выраженное влияние температуры на условия смазки является неоспоримым. При прочих равных условиях повышение температуры смазки приводит к уменьшению вязкости смазки и уменьшению толщины смазочного слоя.

Таблица 5.3

Связь между температурой и вязкостью нефтяного масла при давлении 300 Мпа

Температура, °С	Вязкость, Па·с
38	240
99	0,92
218	0,18

Таблица 5.4

Связь между температурой и начальным пределом прочности при сдвиге для стеарата соды

Температура, °С	Начальный предел прочности при сдвиге, МПа
80	0,3
99	0,2
119	0,16
142	0,05

4.4.2. Остаточные напряжения

Как показано выше, в проволоке, выходящей из волоки, имеется градиент температуры, то есть на поверхности проволоки температура выше, чем в центре. Однако, этот градиент исчезает по мере того, как в проволоке устанавливается тепловое равновесие на расстоянии L_{eq} по движению проволоки.

В процессе установления теплового равновесия внешние слои проволоки охлаждаются и стремятся уменьшиться в длине благодаря тепловому сжатию (противоположному тепловому расширению). Середина проволоки увеличивается в длине, так как она несколько нагревается во время установления теплового равновесия. После окончания протяжки в приповерхностных слоях проволоки возникают напряжения растяжения (приповерхностные слои проволоки растягиваются, так как их длина должна быть равна длине слоёв в центре проволоки), а в центре проволоки – напряжения сжатия (центральные слои сжимаются). Эти напряжения в протянутой проволоке называются остаточными напряжениями, и большая доля промышленно изготовленной проволоки содержит эти напряжения.

Остаточные напряжения создают следующие проблемы в проволоке, полученной волочением:

а. Кажущееся снижение сопротивление деформации ниже предела текучести. Так как напряжения ниже номинального предела текучести складываются с остаточными напряжениями, это вызывает пластическое течение при внешних напряжениях ниже предела текучести.

б. Кажущееся снижение модулей упругости в результате того, что пластическое течение начинается при напряжениях при которых ожидается чисто упругая деформация (реальные модули упругости не изменяются, но наклон кривой напряжение-деформация будет ниже в результате снижения сопротивления деформации ниже предела текучести).

с. Релаксация остаточных напряжений, которая со временем приводит к изменениям формы проволоки и др.

Пункт (а) особенно проявляется при кручении и сгибе, так как приложенные остаточные напряжения имеют наибольшую величину на поверхности проволоки и, в сочетании с растяжением поверхностных слоёв, эти напряжения могут вызвать деформацию проволоки, а также неправильное формообразование и упругое изменение формы после окончания процесса волочения.

На практике остаточные напряжения могут быть сняты отжигом и растяжением проволоки.

Следует отметить, что следующим по значимости фактором после фрикционного нагрева, влияющим на остаточные напряжения, является величина обжатия. Например, малое обжатие может вызвать остаточные сжимающие напряжения на поверхности, таким образом улучшая стойкость к разрушению и усталости.

4.5. Задания

4.5.1. Используя ответы на задачу 4.13.2, вычислите нагрев стальной проволоки, предполагая, что температура распределяется равномерно и тепло не рассеивается в окружающую среду. Повторите вычисления для стали с прочностью на разрыв 1700МПа.

4.5.2. Проверьте значения L_{eq} в примерах раздела 5.1.3.

4.5.3. Подтвердите из уравнения 5.6 значения $(T_f - T_0)$ приведенные в примере раздела 5.1.8.

5. СКОРОСТЬ ВОЛОЧЕНИЯ

5.1. Определения и основные формулы

Скорость волочения, равна расстоянию, которое точка на проволоке проходит в единицу времени, например, в метрах за минуту. Обычно скорость волочения полагают постоянной в промежутках между волоками. Скорость проволоки изменяется во время прохождения через волоку, так как длина проволоки увеличивается при уменьшении поперечного сечения. На практике скорость волочения изменяется в пределах от 10 до 5000 м/мин.

На практике обычно полагают, что объём, и, следовательно, произведение поперечного сечения проволоки на её длину не меняется. Из этого следует, что произведение скорости на поперечное сечение проволоки величина постоянная. Следовательно,

$$V_0 \times A_0 = V_1 \times A_1, \quad (6.1)$$

или

$$\frac{A_0}{A} = \frac{V_1}{V_0}, \quad (6.2)$$

где V_0 – скорость проволоки на входе в волоку, и V_1 – скорость проволоки на выходе из волоки.

В случае однократного волочения скорость волочения равна скорости проволоки на выходе из волочильной машины. В случае многократного волочения скорость на выходе из волоки:

$$V_1 = \pi Dv, \quad (6.3)$$

где D – диаметр тянущего барабана и v – скорость вращения барабана в оборотах в минуту.

5.2. Влияние скорости на условия волочения

5.2.1. Мощность

Потребляемая мощность для отдельного перехода волочения равна произведению силы волочения на скорость выхода проволоки из волоки, или $F \cdot V_1$. Если V_1 измеряется в метрах в секунду и сила F в ньютонах, произведение будет равно $\frac{нм}{с}$, что эквивалентно $\frac{Дж}{с}$ или ваттам.

5.2.2. Скорость деформации

Скорость деформации один из важных параметров, определяющих условия процесса волочения. Средняя скорость деформации в волочильном проходе даётся выражением:

$$\frac{d\varepsilon_t}{dt} = \varepsilon_t (V_0 + V_1) / (2L_d), \quad (6.4)$$

где L_d – длина зоны деформации.

Очевидно, что средняя скорость деформации линейно растёт с ростом скорости волочения. Следует отметить, так как степень деформации безразмерна, единицей скорости деформации является $с^{-1}$.

Большие изменения в скорости деформации могут значительно повлиять на сопротивление деформации и прочность протянутой проволоки.

5.2.3. Температура волочения

Влияние скорости деформации на температуру наиболее очевидно проявляется в области максимума температуры на выходе из волоки на поверхности проволоки. Как видно из уравнения 5.7:

$$T_{\max} = (1,25)\mu\Phi\sigma_a [(vL_d)/(C\rho K)]^{1/2} + \Phi\sigma_a \ln[1/(1-r)]/(C\rho) + T_0 \quad (5.7)$$

Скорость волочения появляется в правой части этого уравнения:

$(1,25)\mu\Phi\sigma_a [(vL_d)/(C\rho K)]^{1/2}$. Эта часть уравнения отражает влияние фрикционного нагрева. Для проникновения фрикционного тепла с поверхности в более

холодный центр проволоки требуется время. Уравнение 5.7 описывает ситуацию, когда времени для отвода фрикционного тепла от поверхности в центр проволоки недостаточно. По этой причине, с увеличением скорости волочения, время нахождения проволоки в очаге деформации становится меньше и температура поверхности проволоки на выходе из волоки становится выше. Как следует из уравнения 5.7 зависимость температуры пропорциональна $v^{\frac{1}{2}}$.

На выходе из волоки в проволоке существует градиент температур от горячей поверхности к более холодному центру, но на относительно небольшом расстоянии от выхода из волоки устанавливается равновесие. Из уравнения 5.2 следует, что это расстояние $L_{eq} \approx (vC\rho d^2)/(24K)$ пропорционально скорости волочения. Действительно, для установления равновесия необходимо время:

$$t_{eq} = \frac{L_{eq}}{v} = (C\rho d^2)/(24K).$$

После установления теплового равновесия можно получить равновесную температуру проволоки складывая уравнения 5.5 и 5.6 с T_0 :

$$T_{eq} = (1 + \mu \cot \alpha) \Phi \sigma_a \ln[1/(1-r)]/(C\rho) + T_0, \quad (6.5)$$

что, в свою очередь, согласно уравнения 5.1, равно $T_0 + \sigma_d/(C\rho)$.

Температура по уравнению 6.5 не зависит от скорости волочения, однако, скорость волочения влияет на начальную температуру T_0 . При оценке температуры проволоки на выходе из волоки необходима учитывать, что T_0 включает (в дополнение к внешней температуре), эффект нагрева на предыдущих проходах и эффект охлаждения между проходами. Таким образом, можно ожидать, что T_{eq} будет возрастать в каждом проходе при многократном волочении, так как охлаждение между волоками обычно не удаляет всё тепло, выделенное в предыдущих проходах и, следовательно, T_0 будет возрастать.

Как правило, охлаждение между волоками включает потери тепла на теплопроводность, конвекцию в окружающий воздух, смазку и потери тепла на барабанах. При увеличении скорости волочения время на охлаждение уменьшается и T_0 увеличивается. При высокоскоростном волочении со смазкой, имеющей низкую теплопроводность, суммарное увеличение T_0 может вызвать значительное ухудшение свойств смазки и проволоки.

Таким образом, деформационный нагрев в каждом отдельном проходе не зависит от скорости волочения, если не учитывать значительное влияние скорости деформации на сопротивление деформации. Аналогично, температура проволоки после установления равновесия на отдельном переходе, не зависит от скорости волочения. Однако, время охлаждения в промежутках между волоками уменьшается при увеличении скорости волочения, что приводит к суммарному увеличению температуры проволоки от прохода к проходу. И, возможно, наиболее важным является то, что температура поверхности проволоки на выходе из волоки существенно зависит от скорости волочения.

5.3. Влияние скорости волочения на условия смазки

Как отмечалось ранее, увеличение скорости волочения может вызвать рост температуры, что влияет на условия смазки.

Кроме этого, скорость волочения прямо влияет на толщину слоя смазки и связанный с ней коэффициент трения. Это показано на кривых Штрибека рис. 6.1.



Рис. 6.1. Расчетные зависимости толщины смазочной пленки и коэффициента трения от скорости волочения

В нижней части рисунка толщина слоя смазки увеличивается с увеличением параметра $\left(\frac{\eta v}{P}\right)$, где η – вязкость смазки, а v и P – это скорость проволоки относительно поверхности волокна и давление волокна, соответственно. В определённом диапазоне величин $\left(\frac{\eta v}{P}\right)$ толщина смазочной плёнки растёт быстро и, таким образом, можно ожидать значительного уменьшения коэффициента трения.

Это увеличение толщины смазочной плёнки со скоростью приводит к установлению гидродинамического режима смазки (для жидких и влажных смазок) или просто толстоплёночного режима смазки (для сухих смазок). В

верхней части рис. 6.1 можно видеть, что коэффициент трения может упасть на порядок величины с установлением толстой плёнки смазки.

Следует отметить, что увеличение температуры, связанное с увеличением скорости волочения может уменьшить вязкость смазки и это уменьшение вязкости может компенсировать часть эффекта увеличения скорости волочения, так что, в результате, увеличение будет меньше.

5.4. Некоторые практические вопросы высокоскоростного волочения

5.4.1. Производительность волочильных машин

Основная причина увеличения скорости это, без сомнения, увеличение производительности волочения. С эффективным контролем температуры скорость волочения на практике может достичь очень высоких значений (5000 м/мин). Этого можно достичь только в случае применения смазки, обеспечивающей достаточную толщину смазочного слоя. Большинство смазок для волочения проектируются для использования на высоких скоростях.

Недостатком высокоскоростного волочения является необходимость стабильной и надёжной подачи заготовки и укладки готовой проволоки. Преимущества высокоскоростного волочения проявляются только в сочетании с применением стабильных и эффективных систем снятия проволоки.

5.4.2. Запуск волочильной машины

В начале волочения скорость проволоки увеличивается от нуля и обычно проходит скоростной диапазон намного ниже скорости, соответствующей установившемуся состоянию. В этом диапазоне смазка может быть недостаточной, как видно из уравнения 7.1. Проволока может прилипнуть к волоке и волока может даже разрушиться. Такие условия возникают при медленном волочении и большой нагрузке на волоку.

Поэтому на практике в зону деформации при запуске вносится дополнительная смазка, разработанная для улучшения условий смазки на малых скоростях.

5.4.3. Установившееся медленное волочение

Однократное волочение и волочение с большим обжатием обычно осуществляется на малых скоростях, и это нужно принимать во внимание при выборе смазки. Кроме того, некоторые высокоскоростные операции дополнительно могут сопровождаться волочением на малых скоростях и поэтому должна быть предусмотрена возможность работы на низких скоростях. В этом случае важно выбрать смазку, которая могла бы нормально работать при низких скоростях.

5.5. Задания

5.5.1. В проходе проволока уменьшается в диаметре от 1,0 мм до 0,9 мм. Скорость волочения 200 м/мин и диаметр блока (ниже волоки) 15см. Какова скорость блока в об/мин?

5.5.2. Используя рис. 6.1 укажите аппроксимацию для коэффициента трения соответствующую трению прилипания, граничному трению и гидродинамическому режиму смазки. Как изменяются условия трения по уравнению 6.5?

5.5.3. Если приравнять коэффициент трения нулю, можно ли полностью исключить нагрев при волочении?

5.5.4. Обычная практика использовать различные смазки при натяжении и при установившемся режиме. Используя кривую Штрибека, объясните, на чем основана такая практика.

6. РЕЖИМЫ СМАЗКИ И УСЛОВИЯ ТРЕНИЯ

Толщина смазочной пленки зависит от давления, относительной скорости контактных поверхностей и вязкости смазки. Оценка толщины смазочной пленки – удобный способ описания режимов трения.

6.1. Отсутствие или малое количество смазки, режим прилипания

Это экстремальный режим смазки при котором отсутствует смазочная пленка между проволокой и волокой. В результате действия высокого давления и появления на поверхности свежих, необработанных слоев металла, образуется относительно сильная связь между волокой и проволокой, из-за действия сдвиговых напряжений на поверхности проволоки возникают пластические сдвиги и фрагменты металла проволоки прилипают к рабочей поверхности волоки. Фактически, появляющаяся поверхность проволоки является поверхностью пластического разлома.

В худшем случае напряжение на поверхности проволоки равно сопротивлению деформации на сдвиг для металла проволоки. Так как минимальная величина давления волоки равно сопротивлению деформации на растяжение σ_0 , или $2\tau_0$ (τ_0 – сопротивление деформации на сдвиг), максимальная величина коэффициента трения μ_{\max} , равна $\tau_0/2\tau_0=0,5$. Согласно критерию Мизеса для осесимметричной деформации теоретическая максимальная величина μ_{\max} равна 0,577. Режим прилипания необязательно распространяется на всю поверхность контакта проволока-волока, поэтому часто для моделирования режима прилипания используется, например, коэффициент трения 0,25.

На рисунке представлена поверхность алюминиевого прутка, протянутого в условиях трения прилипания. Такие условия, как правило, приводят к катастрофическому разрыву проволоки, поэтому испытания проводятся в особых условиях.

6.2. Локальное прилипание

Большая величина трения прилипания не типична для установившегося режима волочения. Однако часто недостаточная смазка приводит к локальному прилипанию, что приводит к появлению длинных, похожих на шеврон полос сдвигового отрыва металла, обычно называемых вороньими лапами. Для описания условий локального прилипания часто используется коэффициент трения 0,15.

На рис.7.1 представлена область «вороньих лап» при волочении алюминиевой проволоки. Развитие «вороньих лап» также приводит к разрушению поверхности проволоки.

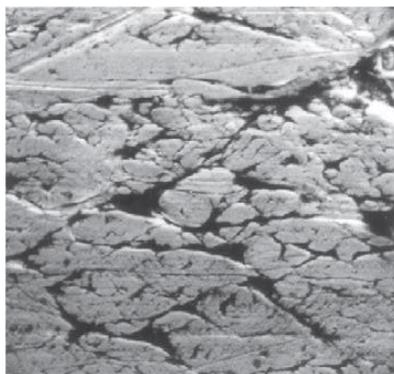


Рис.7.1. Область «вороньих лап» на поверхности алюминиевой проволоки

6.3. Граничное трение

В условиях граничного трения поверхности отделены друг от друга тонкой пленкой смазки (например, мономолекулярный слой). В этом случае не должно быть разрывов смазочной пленки, локального прилипания и «вороньих лап». Тонкая смазочная пленка позволяет волоке с гладкой поверхностью «гладить» или выравнивать поверхность проволоки.

При «глажении» проволоки на поверхности происходит значительная пластическая деформация, при этом коэффициент трения достаточно высокий, около 0,10. На рис.7.2 показана поверхность алюминиевого прутка, протянутого в условиях граничного трения. Следует отметить, что макроскопически блестящая поверхность может быть изготовлена и в условиях локального прилипания. Таким образом, блестящая поверхность проволоки не обязательно получается в условиях чистого граничного трения и попытки получить блестящую поверхность проволоки часто приводят к развитию «вороньих лап».

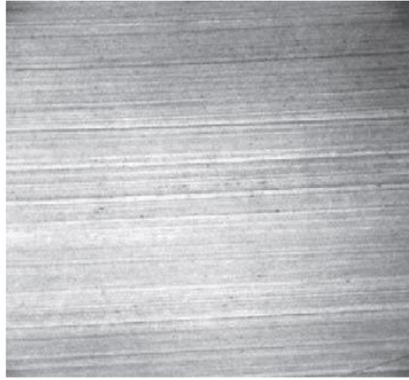


Рис.7.2. Алюминиевый пруток, изготовленный в условиях граничного трения

6.4. Гидродинамический или толсто пленочный режим трения

При некоторых условиях толщина смазочной пленки становится больше неровностей поверхности проволоки и волокна, такой режим трения называется гидродинамическим или толсто пленочным. В трибологии различают пленки, которые на половину порядка толще неровностей и пленки, которые толще неровностей на порядок и более. Однако, для наших целей мы будем рассматривать толстые пленки, которые благодаря своим свойствам (напряжение сдвига смазки, вязкость и т.д.) создают напряжение сдвига между проволокой и волоком. На рис. 6.1 видно, что в определенном диапазоне значений $\left(\frac{\eta \cdot v}{P}\right)$ происходит быстрый рост толщины смазочной пленки. Для жидкостей такой режим называется гидродинамическим. Для каждой смазки существует диапазон скоростей при которых достигается гидродинамический режим. Для каждой скорости волочения существует диапазон вязкостей и температур, зависящих от химического состава, при которых достигается гидродинамический режим смазки.

Для некоторых твердых смазок (например, твердый мыльный порошок) также можно достичь толсто пленочного режима, особенно если давление на входе в волоку создается принудительно с помощью нагнетательного устройства. Такие пленки часто называются квази-гидродинамическими.

Напряжение сдвига толстой пленки смазки становится очень низким, и коэффициент трения $\mu = \frac{\tau_{lub}}{P}$ может быть ниже 0,05 и даже ниже 0,01 в некоторых случаях. Наличие тонкой, достаточно мягкой смазочной пленки не позволяет выглаживать поверхность проволоки и, действительно, на поверхности проволоки видны полосы сдвига и границы зерен, как показано на рис. 7.3. Макроскопически такая пленка выглядит тусклой или матовой. Такая поверхность, тем не менее, создается при отличных условиях смазки.



Рис.7.3. Алюминиевый пруток, протянутый в условиях толсто пленочного режима трения

В условиях, промежуточных между граничным и гидродинамическим трением, когда существуют области с толстой пленкой, на обработанной поверхности могут развиваться впадины как на рис. 7.4



Рис.7.4. Поверхность алюминиевой проволоки, протянутой в условиях смазки, промежуточных между граничным и толсто пленочным режимами

6.5. Сравнение режимов трения

Связь между коэффициентом трения, режимом смазки и видом поверхности представлены в таблице 7.1.

Связь между режимом трения, коэффициентом трения и видом поверхности

Режим трения	Коэффициент трения	Вид поверхности
трение прилипания	0,25	глубокие борозды, трещины
локальное прилипание	0.15	“вороньи лапы”
граничное	0,10	гладкая, яркая
толсто пленочный (гидродинамический)	0.03	тусклая, матовая, неровная

6.6. Использование постоянной величины для характеристики сдвигового напряжения трения

Использование коэффициента трения μ означает, что сдвиговое напряжение трения между проволокой и волокой, τ равно μP . Эта концепция удовлетворительно работает в условиях граничного трения, когда при увеличении давления на контактной поверхности между проволокой и волокой увеличивается площадь контакта между неровностями проволоки и неровностями волоки и, следовательно, увеличивается сдвиговое напряжение. Однако, при толсто пленочном режиме, сдвиговое напряжение между проволокой и волокой приближается к сдвиговому напряжению между слоями смазки, а в режиме трения прилипания сдвиговое напряжение приближается к напряжению сопротивления проволоки на сдвиг.

Таким образом, в толсто пленочном режиме и в режиме прилипания использование постоянной величины для напряжения трения сдвига является более соответствующим реальным условиям трения, чем использование величины, пропорциональной давлению на волоку.

Часто при моделировании предпочитают использовать постоянную величину напряжения сдвига трения между проволокой и волокой. В частности, используется фактор трения m , такой что $\tau = m \cdot \tau_0$, где τ_0 – сопротивление деформации на сдвиг для проволоки. Для определения, что использовать, коэффициент трения или фактор трения, можно начертить график τ от P . Если наблюдается линейная зависимость, тогда необходимо использовать коэффициент трения. Если величина τ не увеличивается с увеличением P , то необходимо использовать фактор трения. Построение таких графиков достаточно сложное дело, поэтому часто принимают решение о выборе коэффициента трения или фактора трения основываясь на имеющихся в наличии данных или математическую простоту.

В большинстве случаев при анализе процесса волочения проволоки используют коэффициент трения не зависимо от физических условий. В этом

случае можно легко объяснить поведение смазки во многих случаях, используя сопротивление деформации и вязкость смазочной пленки.

6.7. Состав смазок

Частицы подсмазочного слоя и смазки совместно формируют систему смазки. В качестве смазок может быть использовано пластифицированное мыло. В роли подсмазочного слоя могут выступать:

- твердая известь (гидроксид кальция)
- гидроксид железа + известь
- фосфаты + известь
- фосфаты + бура (смесь бура/соль)
- бура и смесь бура/соль
- медь + известь
- смесь солей без буры (включая сульфаты, например, полимер, силикаты и растворимые фосфаты). Такие смеси представляют интерес как для углеродистых, так и для нержавеющей сталей.

Сухие кристаллические частицы подсмазочного слоя повышают надежность смазки и уменьшают риск её выдавливания из волоки. Смазки обычно наносятся с помощью погружения в смазочную ванну после травления.

Развитие смазочных систем на современном этапе определяется двумя факторами – переход от травления к механическим методам удаления окалины привел к разработке новых сочетаний подсмазочных покрытий и смазок, которые больше соответствуют новой технологии, а требования экологии привели к развитию работ по использованию подсмазочных покрытий и смазок без бора.

6.8. Смазочная пленка

Деформируемый материал отделен от волоки тонкой пленкой смазочного вещества и подсмазочного слоя (см. рис. 7.5). Поверхность раздела проволока/волока характеризуется не только трением и смазкой при быстро растущей температуре, но и формированием новой поверхности. Так, один проход с обжатием 25% приводит к увеличению площади поверхности на 15%. На этой новой поверхности должны быть быстро сформированы абсорбционные и диффузионные слои.



Рисунок 7.5.а Система смазки в волоке. Тонкая пленка между катанкой и волокой состоит из смазки и частиц смазконосителя

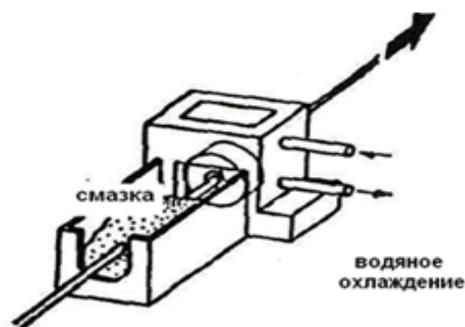


Рисунок 7.5.б Обычная емкость со смазкой (мыльница) перед волокой и водоохлаждаемой волокой

6.9. Захват смазки – особая роль первой волоки

Перед входом в волоку катанка, покрытая подсмазочным покрытием, проходит через емкость со смазкой (см. рисунок 7.5.б). Для повышения эффективности нанесения смазки используют напорные и вращающиеся волоки, а на первом проходе дают высокое обжатие и используют волоки с большим углом, чем на остальных проходах. Проволока испытывает колебания на входе в первую волоку и увеличение угла способствует захвату смазки. Например, если по маршруту углы 12° , то первую волоку можно взять с углом 14° .

Увеличение неоднородности деформации при большом угле компенсируется повышением обжатия на первом проходе. К тому же, катанка имеет овальную форму (диаметр катанки 5,5 мм может представлять собой среднее значение между минимальным 5,35 и максимальным 5,65 мм). А сочетание диаметра на верхнем пределе допуска (5,65 мм) со слишком малым углом волоки может ухудшить захват смазки, что визуально определяется по наличию светлых, блестящих участков поверхности, не покрытых смазкой.

Захват смазки может также быть улучшен благодаря использованию смазочного аппликатора в емкости со смазкой (рисунок 7.6). Применение аппликаторов особенно эффективно на первом проходе. Аппликатор может также компенсировать нехватку подсмазочного покрытия на поверхности катанки, очищенной от окалина механическим способом, особенно если поверхность очень гладкая. Эффективен аппликатор и при волочении оцинкованной проволоки средних диаметров.

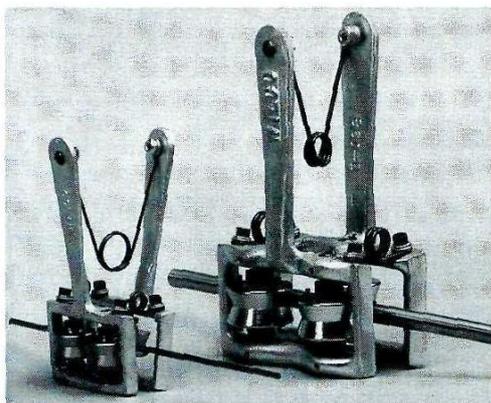


Рис. 7.6. Аппликатор смазки

6.10. Износ

6.10.1. Адгезионный износ

При большом увеличении видно, что даже гладкая поверхность представляет собой «горный ландшафт» (см. рис. 7.7.а). Когда две металлические детали прижимают друг к другу, выступы шероховатостей поверхностей становятся точками контакта. Локальное давление в этих точках очень высоко, что вызывает пластическую деформацию (см. рис. 7.7.б).

В точках контакта, благодаря металлическим связям происходит схватывание. При перемещении деталей относительно друг друга межзатомные связи разрываются, и поверхности повреждаются. Возникает адгезионный износ. Смазки играют важную роль в его устранении, разделяя трущиеся поверхности. На практике, однако, это разделение не всегда полное. В случае недостаточного количества смазки при волочении происходит схватывание металла проволоки.

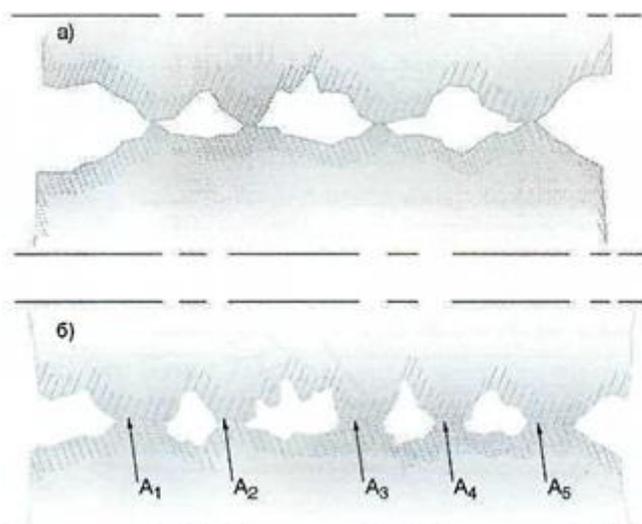


Рис. 7.7. Две поверхности контактируют в точках выступов шероховатостей поверхностей (а). При сдавливании материал в точках контакта пластически деформируется (б)

При волочении проволоки важно, чтобы «горный ландшафт» поверхности сглаживался без повреждения поверхности проволоки (рис. 7.8).



Рис. 7.8. Сглаживание грубой поверхности катанки

6.10.2. Абразивный износ

Абразивный износ вызывается твердыми частицами, попадающими между двумя движущимися поверхностями. При волочении такими частицами могут являться песчинки на поверхности проволоки, частицы материала проволоки и катанки.

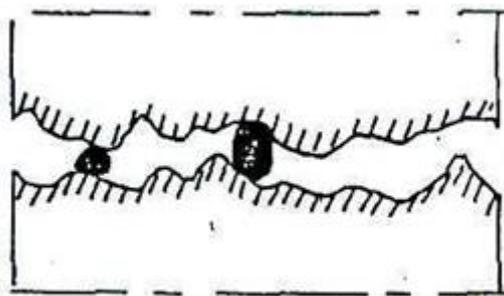


Рис. 7.9. Абразивный износ «Песок в оборудовании»

6.11. Подсмазочные покрытия

6.11.1. Бура (в чистом виде или как добавка в соляной смеси)

Химический состав буры

Термин «бура» используется для обозначения ряда сходных минералов или химических соединений, отличающихся друг от друга содержанием кристаллизационной воды. Например:

- бура безводная $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
- бура двуводная $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, кристаллизуется при температуре 88 - 170°C
- бура пятиводная $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, кристаллизуется при температуре 61 - 88°C
- бура десятиводная $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, кристаллизуется при температуре ниже 61°C

Декаборат $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ является белым порошком. При нагреве он последовательно теряет воду. На последней стадии образуется дегидрированная или безводная бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, которая плавится при температуре 741°C.

Бура – токсичное вещество.

Бура как подсмазочное покрытие

Покрытие катанки бурой осуществляется погружением бунта или покрытием в линии стана. Ванну готовят из десятиводной (100-200 г/л), или пятиводной (80-160 г/л) буры. При бурировании в линии стана концентрация буры может быть выше (300 г/л десятиводной или 250 г/л пятиводной буры). Температура ванны с бурой должна быть, как минимум, 85°C. После извлечения из ванны бунт сохнет, и бура кристаллизуется на поверхности катанки. Если кристаллизация проходит при температуре ниже 60°C, формируется декагидрат. Он представляет собой белый порошок на поверхности катанки и не обладает оптимальными свойствами подсмазочного покрытия, так как вместе с ним в волоку попадает вода. Таким образом, обработка катанки в ванне с бурой должна проводиться при температуре достаточно высокой для того, чтобы катанка успела высохнуть в интервале температур от 61 до 88°C. В этом случае образуется прозрачный стеклообразный пентагидрат, являющийся гораздо более лучшим подсмазочным покрытием. См. рисунок 7.10

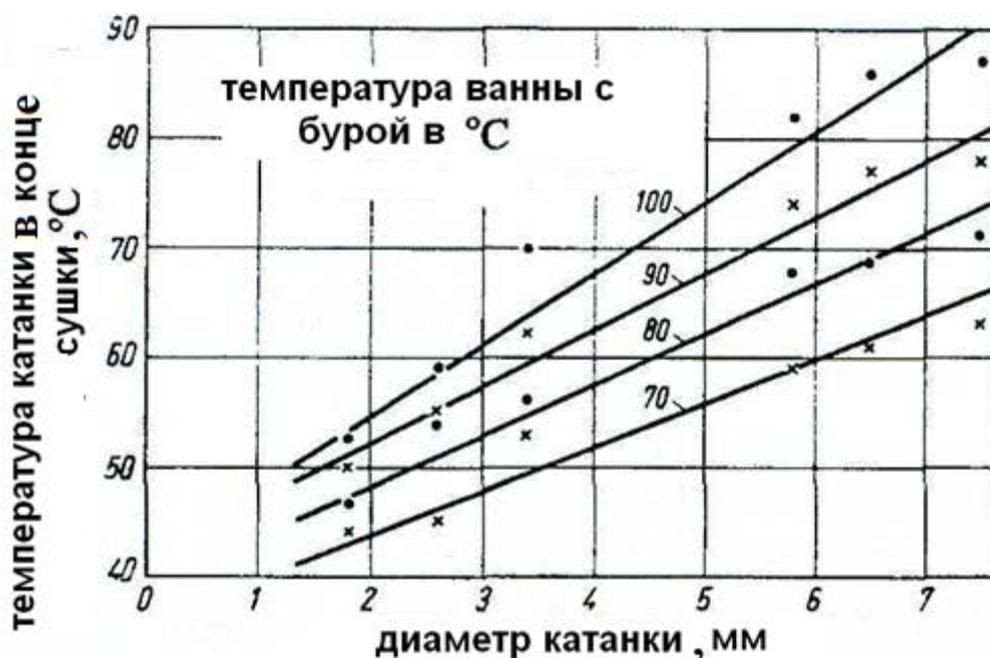


Рис. 7.10. Температура кристаллизации буры на поверхности катанки в зависимости от диаметра катанки и температуры ванны с бурой

Диаграмма показывает, что при диаметре катанки 5,5 мм и температуре ванны с бурой 70°C температура окончания сушки составляет 58°C. Следовательно, на её поверхности образуется декагидрат, являющийся плохим подсмазочным покрытием. Чтобы этого избежать, температура ванны должна быть от 80 до 90°C. Тонкая катанка, обработанная бурой, должна после погружения в

ванну просушиваться в потоке горячего воздуха или другим способом температурного воздействия.

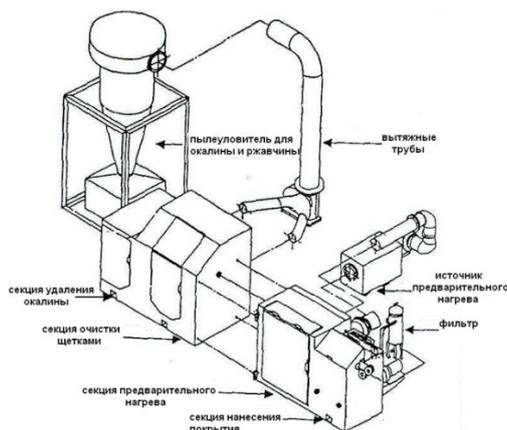


Рис. 7.11. Оборудование для механического удаления окалины и бурирования катанки

Ларс Хагстед отметил, что бура на поверхности катанки должна быть хорошо просушена, чтобы содержание кристаллизационной воды в покрытии было ниже, чем в пентагидрате. После механического удаления окалины методом изгиба, электролитического травления, промывки и покрытия бурой (см. рис. 7.12) катанка проходит через печь, расположенную в верхней части волоочильного стана. Вместо электролитического травления можно использовать дробеструйную обработку или обработку наждачной бумагой.

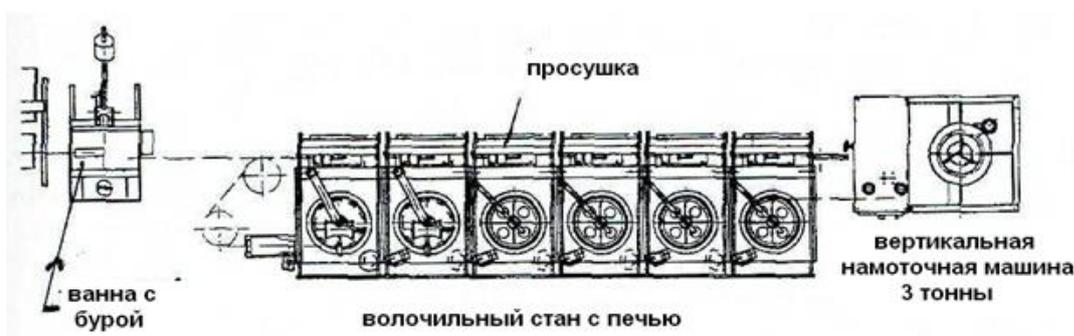


Рис. 7.12. Волоочильный стан с сушильной печью для катанки, покрытой бурой

6.11.2. Подсмазочные покрытия для нержавеющей катанки

Для нержавеющей катанки в качестве подсмазочного покрытия используется смесь солей. Подсмазочное покрытие состоит из буры или солей калия с сульфатом натрия, с добавлением силиката натрия или глюконата натрия. Соли растворяются в горячей воде, и носитель наносится на поверхность катанки путем погружения бунта в раствор или в технологической линии, после закалки. При выборе температуры ванны следует руководствоваться теми же соображениями, что и для ванны бурирования. Очень важно, чтобы кристаллы соли были

мягкими, так как это позволяет избежать образования мелких дефектов на поверхности нержавеющей катанки. Для ферритных нержавеющей сталей важна и способность солей защищать от коррозии.

6.11.3. Фосфатное покрытие катанки из углеродистой стали

Фосфат цинка используется в качестве носителя смазки для наиболее сложных видов волочения, например, для грубого волочения высокоуглеродистой проволоки. При фосфатировании катанка обрабатывается раствором фосфорной кислоты (H_3PO_4) и фосфата цинка с различными добавками. Фосфатное покрытие наносится в ходе следующих реакций.



Рис. 7.13. Реакции, протекающие во время фосфатирования катанки

- в ванне в ходе реакции травления фосфорная кислота взаимодействует со сталью;
- в тонком слое раствора на поверхности стали значение pH увеличивается настолько, что фосфат цинка становится нерастворимым;
- фосфат цинка осаждается в виде кристаллов на поверхность стали, образуется фосфатное покрытие;

Вследствие первой реакции травления концентрация ионов Fe^{2+} в ванне увеличивается, что недопустимо, так как приводит к прекращению реакции травления и, следовательно, процесса фосфатирования. Во избежание этого в ванну часто добавляют катализатор. Катализаторы (обычно нитриты или хлораты). являются окислителями, Ведущие мировые поставщики фосфатов для металлообрабатывающей индустрии рекомендуют нитратно-нитритно катализируемые ванны. Они более эффективны при температуре 80-85°C, в то время как для хлоратно катализируемых ванн оптимальна температура 70-75°C. Но повышение температуры до 80-85°C повышает эффективность и хлоратно-катализируемых ванн. В проволочной индустрии Северной Америки основны-

ми являются нитратно-нитритно катализируемые ванны, а в Европе – хлоратно-катализируемые.

При добавлении в ванну катализатор окисляет Fe^{2+} до Fe^{3+} , который осаждается вместе с фосфорной кислотой с образованием осадка фосфата железа. Таким образом, железо удаляется из раствора и реакция фосфатирования может продолжаться.

Фосфатная ванна приготавливается в соответствии с рекомендациями поставщика. Во время работы состояние ванны контролируют путем использования различных методов титрования. Для поддержания требуемых концентраций фосфата и катализатора в ванну на основе аналитических расчетов добавляют различные растворы. Ванна работает при температуре 70-85°C, поэтому, аналогично ваннам травления, имеет место испарение воды из нее, и для компенсации потерь тепла на испарение необходим дополнительный нагрев (рис. 7.14).

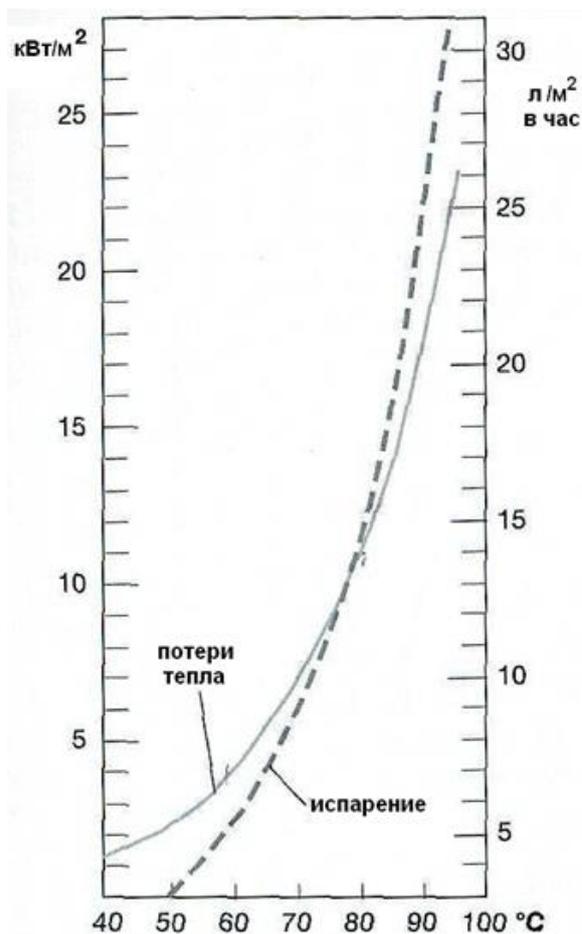


Рис. 7.14. Потери тепла ($кВт/м^2$) и испарение ($л/м^2$ в час) из вентилируемой фосфатной ванны

6.11.4. Известкование

Основная причина использования извести состоит в необходимости нейтрализации остатков кислоты на поверхности катанки после травления, чтобы защитить сталь от коррозии при хранении. Известь — очень дешёвый нейтрализатор. Кроме того, она обеспечивает хороший захват сухой мыльной

смазки и втягивание её в волоку, а также способствует повышению температуры размягчения и текучести в зоне взаимодействия катанки и волокна.

Иногда известь ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) используется как самостоятельное подсмазочное покрытие. Но обычно известкование применяется в качестве дополнительной обработки катанки после фосфатирования. Во время известкования бунт погружается или непрерывно проходит через известковую ванну при температуре 80-90°C. Наиболее важный для волочения показатель качества извести – размер её зерен, который выражается как:

- средний размер зерен в мкм, или
- удельная поверхность извести в м²/кг (чем мельче известь, тем больше удельная поверхность)

Хорошая известь для волочения имеет удельную поверхность 1200-1800 м²/кг. При этом 99% зерен имеют размеры менее 50 мкм и 50% – менее 5 мкм.

Также важно обеспечить низкое содержание в извести окислов металлов. Хорошая известь содержит, например, 1-2% SiO_2 , 0,2-0,4% Al_2O_3 , 0,2-0,3% Fe_2O_3 и 0,5-1% MgO .

Относительно концентрации извести в ванне имеются разные рекомендации. Обычно это 5%, но иногда используются две ванны: одна содержит тяжелую 5% известь, а вторая – легкую 2,5% известь.

Нельзя перемешивать известковую ванну воздухом – всегда присутствующий в воздухе углекислый газ сделает раствор непригодным, превращая известь в карбонат кальция. По этой причине перемешивание нужно производить при помощи шнеков или циркуляции.

Перемешивание не должно быть ни слишком сильным, ни слишком слабым.

При слишком интенсивном перемешивании частицы извести плохо сцепляются с поверхностью катанки. При слишком слабом перемешивании, известь осаждается на дно, а длительный контакт частиц извести с нагревательными элементами приводит к образованию крупных кристаллов извести, что ухудшает ее качество как подсмазочного покрытия.

Концентрацию извести в ванне контролируют тестом на осаждение: в мерный цилиндр наливают 500 или 100 мл хорошо перемешанного раствора и определяют количество выпавшей извести.

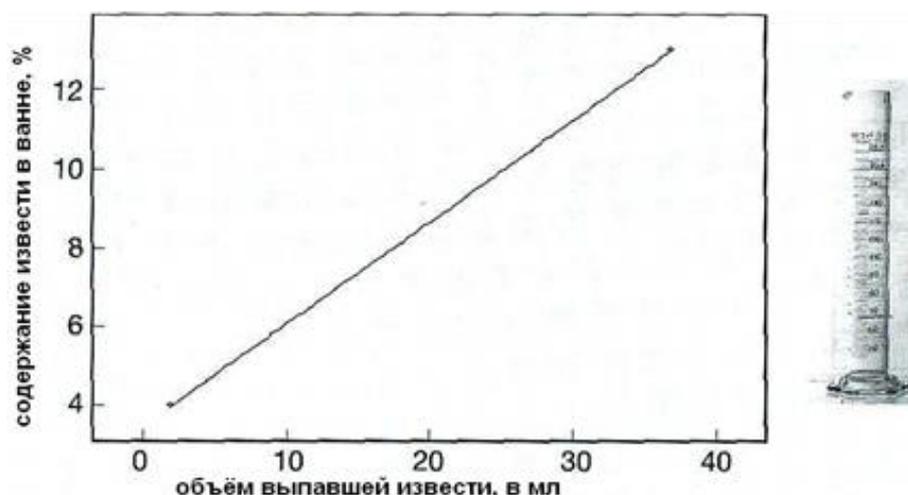


Рис. 7.15. Зависимость объема осажденной извести (после 10 часов) от концентрации извести (в весовых %) в ванне. Диаграмма для мерного цилиндра на 100 мл. Рекомендуется корректировать диаграмму на основе аналитических расчетов с учетом свойств используемой извести. В правой части – мерный цилиндр со слоем выпавшей в осадок извести

6.12. Смазка при гидродинамическом сухом волочении

Гидродинамическое режим при сухом волочении может иметь место, если смазка наносится под давлением.

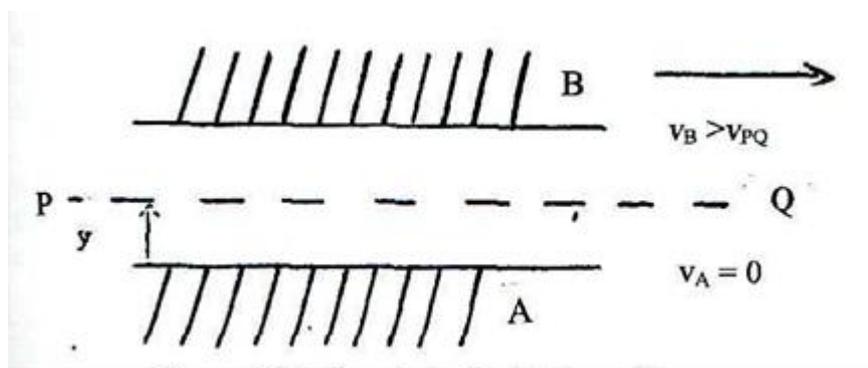


Рис. 7.16. Распределение скоростей в смазочном слое

Сдвиг слоев смазки в режиме гидродинамического трения зависит от вязкости смазочного слоя. Поверхности двух деталей А и В (см. рисунок 7.16) разделены жидким смазочным слоем. Деталь В движется, деталь А неподвижна. Жидкость в слое PQ на расстоянии y от А имеет скорость v_{PQ} . Слой жидкости выше PQ увеличивает свою скорость, а слой жидкости ниже PQ замедляется. Таким образом в плоскости PQ возникает напряжение сдвига, также и во всех слоях смазки между поверхностями А и В. В ньютоновской жидкости каса-

тельное напряжение пропорционально градиенту скорости dv/dy . Коэффициент пропорциональности равен вязкости η жидкости.

$$\text{Следовательно: } \tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

Присвоим производной $\frac{dv}{dy}$ символ D , который соответствует градиенту скорости.

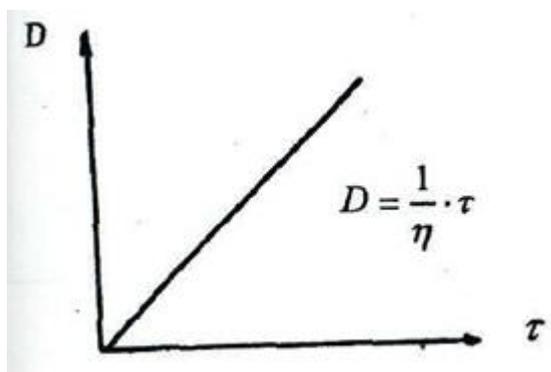


Рис. 7.17. Градиент скорости в ньютоновской жидкости. τ – касательное напряжения в смазочном слое

Когда масло или расплавленное мыло смешивается с твердыми частицами (известь, кристаллы буры или фосфата и т.п.), характер движения меняется. Касательное напряжение перестаёт быть пропорциональным градиенту скорости $\frac{dv}{dy}$.

Такая система уже не является ньютоновской жидкостью, так как движение не начинается, пока не достигнут предел текучести f . Предел текучести растет с увеличением содержания твердых частиц. Практическое значение этого явления состоит в том, что комбинированные смазки вытесняются не так легко, как чистое мыло. Поэтому катанка, покрытая подсмазочным слоем, гораздо лучше удерживает смазку в процессе волочения.

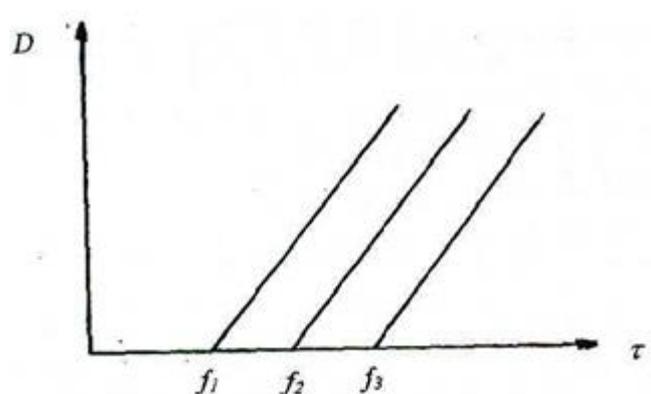


Рис. 7.18. Градиент скорости в неньютоновской жидкости (например, в расплавленном мыле с частицами носителя). С увеличением содержания твердых частиц уменьшается риск отгона смазки: $f_3 > f_2 > f_1$

6.13. Смазки для граничного и промежуточного режима смазки

Промежуточный режим представляет собой сочетание граничного и гидродинамического. Влияние доли поверхности с граничным характером смазки на износ волоки было исследовано Накамурой и др. (рисунок 7.19).

В особых случаях при сухом волочении с очень хорошим поступлением смазки (подача смазки под давлением) ситуация, как уже упоминалось, сходна с гидродинамическим режимом трения. При обычном сухом волочении, а также при мокром волочении, ситуация больше напоминает смешанное и граничное трение. Коэффициент трения μ равен 0,03-0,05 при сухом и примерно 0,1 при мокром волочении.

Даже в случае, когда при граничном или смешанном трении волока и катанка очень плотно контактируют, смазка между поверхностями все равно должна быть активна. Поэтому важно, чтобы выбранная смазка содержала RCOOH (R – длинный молекулярный хвост, а COOH – полярная группа на конце молекул смазки). Эти группы сцепляются с поверхностью стали. На этом рисунке показано, что реакция $2RCOOH + FeO \rightarrow Fe(RCOO)_2 + H_2O$ происходит в тонкой окисной пленке на поверхности железа. Возможно, это справедливо в случае к мыльного раствора или пасте, но для смазочного порошка при сухом волочении – вряд ли. Однако при очень высокой температуре в зоне контакта катанки и волоки такая реакция возможна.

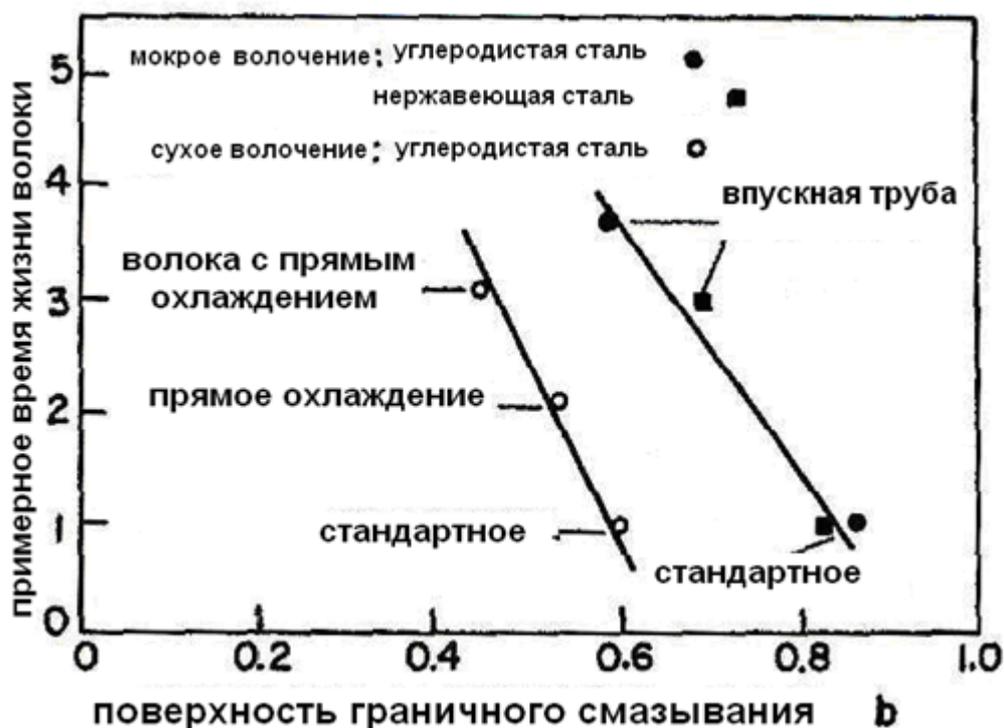


Рис. 7.19. Связь между стойкостью волоки и относительной площадью поверхности с граничным режимом смазки. Сухое волочение: 7,5 м/с, 0,6% С, фосфатированная, патентированная свинцом сталь. Мокрое волочение: 1,25 м/с, аустенитная нержавеющая сталь

Однако достоверно известно, что полярные молекулы смазки способны выполнять свою функцию в узких зазорах между плотно контактирующими катанкой и волокой. Углеводородные хвосты формируют смазку даже при расстоянии между поверхностями всего 25-30Å.

6.14. Смазки для мокрого волочения

Эмульсии

Мокрое волочение проволоки из углеродистой стали проводят в эмульсиях. Это смесь двух взаимно нерастворимых жидкостей, образованная путем добавления поверхностно-активного вещества в смесь воды и масла. Молекула ПАВ имеет длинный углеводородный «хвост», который растворяется в масле, и полярную часть, которая растворяется в воде. Эмульсия должна обладать стабильностью, достаточной для длительной эксплуатации при температуре до 60°C. Но, с другой стороны, стабильность не должна быть чрезмерной, чтобы не слишком затруднять разложение эмульсии. Используются и различные добавки, например, ингибиторы коррозии. В процессе волочения при высоком давлении в волоке капли масла объединяются, образуя смазочную пленку.

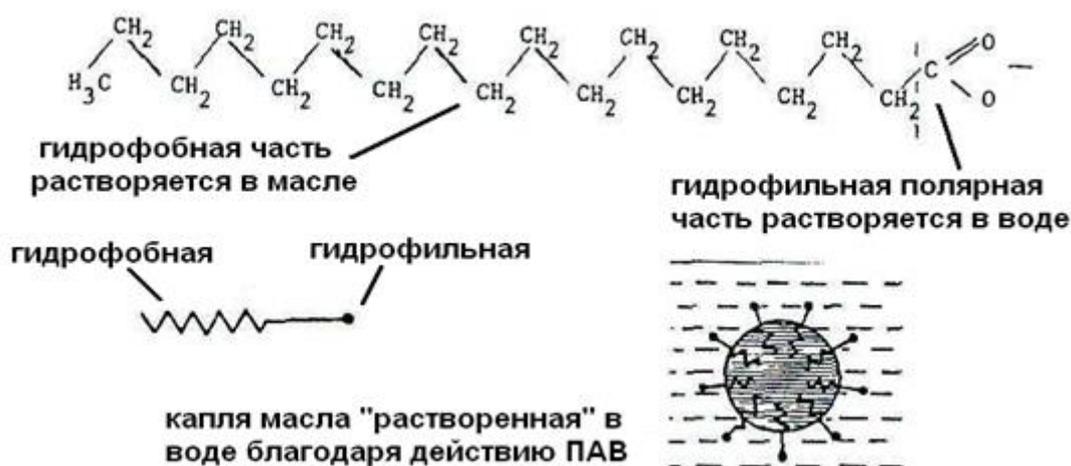


Рис. 7.20. Водно-масляные эмульсии

Жиры и масла

Для волочения с получением светлой поверхности на стане сухого волочения следует использовать жиры вместо мыльного порошка. Волочение нержавеющей проволоки с получением светлой поверхности на обычных станах мокрого волочения проводится с использованием масла. В качестве подсмазочного слоя под нанесение жиров можно использовать известь или очень чистую соль. Смазки на основе растительных жиров в основном используются на станах од-

нократного волочения, потому что при повышении температуры уменьшается вязкость, а, следовательно, ухудшаются условия смазки.

6.15. Смазки при сухом волочении

Для сухого волочения стальной проволоки используются различные мыла, например, стеарат натрия $C_{17}H_{35}\cdot COONa$ (натриевое мыло), или стеарат кальция $(C_{17}H_{35}\cdot COO)_2Ca$ (кальциевое мыло). В этих мылах органической кислотой является стеариновая кислота. Обычно при производстве мыла используют смеси различных жирных кислот.

6.15.1. Смазки с насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами

Жирные кислоты могут быть насыщенными и ненасыщенными. В насыщенных кислотах все связи одинарные, а в ненасыщенных присутствует по крайней мере одна двойная связь.

Тип жирной кислоты или смеси жирных кислот, используемой для получения мыла для волочения часто описывают как собственно мыло. Мыла, образованные ненасыщенными жирными кислотами, менее пригодны для тяжелых условий волочения, чем смазки, содержащие только насыщенные жирные кислоты.

6.15.2. Обедненные и насыщенные смазки

Два основных типа мыла, применяемых при волочении (натриевое и кальциевое) отличаются тем что натриевое мыло растворимо в воде, а кальциевое - нет (растворимость кальциевой и магниевой солей сульфоновой кислоты чуть выше, чем соответствующих им мыл жирных кислот). Третий тип мыла содержит как натрий, так и кальций. В некоторых случаях применяются также алюминиевые и цинковые мыла.

Свойства смазки сильно зависят от добавок. Смазка с высоким содержанием жира (к примеру, 70%) и низким содержанием добавок (30%) называется насыщенной, при обратном соотношении жиров и добавок (30/70%) – обедненной.

Основным компонентом смазки являются мыла жирных кислот. Добавки или наполнители (сода, зола, известь, рутил (TiO_2), тальк и т.д.) увеличивают вязкость и температуру размягчения. Дисульфид молибдена MoS_2 является добавкой для волочения при сверхвысоком давлении и используется для очень жестких условий волочения (например, для волочения фасонной проволоки). Смазки такого типа очень эффективны, но после волочения сложно очистить проволоку от смазки.

Для смазки проволоки, после механической очистки от окалины используют обедненные кальциевые смазки с довольно высоким содержанием извести.

Если мыло является слишком насыщенным для конкретных условий, смазка будет вытекать из волокна. Если же смазка слишком обеднена, сложно создать необходимый непрерывный смазочный слой на поверхности катанки. Проволока в зависимости от условий может быть блестящей или поцарапанной.

6.15.3. Проблема образования пыли при использовании смазки

Многие смазки для сухого волочения склонны к образованию пыли из-за очень мелких, неправильной формы частиц. Если в процессе изготовления смазки ее частицы укрупняются и приобретают сферическую или эллипсоидную форму, текучесть улучшается, риск туннельного эффекта снижается, а образование пыли при волочении минимизируется. Иногда такие смазки называют «каплевидными».

6.15.4. Комплексы подсмазочных покрытий и мыл

Новая технология позволила готовить ванны, содержащие одновременно и подсмазочное покрытие (типа буры) и смазку. Катанку либо погружают в ванну бунтами, либо непрерывно протягивают через неё. После сушки катанку можно подвергать волочению без дополнительного нанесения подсмазочного покрытия. Такие ванны подходят для катанки, на поверхности которой после механической очистки от окалина с использованием щеток окалина практически отсутствует. Этот метод используется также для калибровки с незначительным обжатием.

6.15.5. Плавление – размягчение – в смазочной емкости

Иногда в смазочной емкости происходит локальное плавление смазки, что препятствует попаданию потока смазки из емкости в волоку. Причины этого явления могут быть различны:

- слишком высокая температура катанки из-за плохого охлаждения на предыдущей стадии;
- слишком низкая температура размягчения смазки из-за слишком большого содержания жиров (смазка чрезмерно насыщена);
- слишком низкая температура размягчения смазки ввиду слишком низкого титра жирных кислот в мыле (жирные кислоты содержат слишком много ненасыщенных углеводородов);
- точка контакта катанки и волокна расположена слишком близко к входу в волоку; давление смазки низкое, она нагревается и выбрасывается обратно в емкость.
- неоптимальная геометрия (особенно угол и длина цилиндрической части) волокна.

6.15.6. Выбор смазки для сухого волочения

Выбор смазки для сухого волочения основывается в основном на личном опыте. Рекомендуется всегда обсуждать выбор с поставщиками. Для волочения низкоуглеродистой катанки рекомендуется использовать кальциевое мыло с низким или средним содержанием жиров. Если на протянутую проволоку будет наноситься гальваническое или медное покрытие, следует проводить тщательную очистку. Во время завершающих проходов следует использовать растворимую в воде натриевую смазку.

Для волочения высокоуглеродистой катанки используют кальциевые мыла со средним или высоким содержанием жиров, но конкретный тип смазочного вещества должен зависеть от носителя, фосфатного или соляного покрытия. На выбор смазочного вещества также влияет, используются ли напорные волокна. Возможно сочетание натриевых и кальциевых мыл, особенно при высокоскоростном волочении.

Для сухого волочения нержавеющей стали на современном этапе характерно использование различных натриевых мыл (с низкой степенью поглощения влаги). Это связано с их стойкостью при повышенном давлении и температурах.

При мокром волочении нержавеющей стали эмульсии на основе растительных масел хорошо очищают поверхность и придают ей блеск.

Некоторые общие правила приведены в таблице 7.2:

Таблица 7.2

Выбор смазок для сухого волочения

Вид продукции	Тип смазки
Проволока с низким содержанием углерода, которая должна быть тщательно очищена после волочения для нанесения гальванопокрытия или химического покрытия медью.	Водорастворимое мыло – смазка на основе натрия, по крайней мере, на завершающих проходах. Это также хороший вариант, если завершающим является мокрое волочение в эмульсии или воде.
Высокопрочная проволока, используемая для изготовления различных пружин. Волочильная смазка должна использоваться также как смазка при навивке пружин.	Кальциевые или кальциево-натриевые мыла, совместно с цинк-фосфатным покрытием. В некоторых случаях используется добавка дисульфида молибдена (MoS_2)
Проволока, очищенная от окалины механическим способом, без подсмазочного покрытия.	Обедненное кальциевое мыло с относительно высоким содержанием извести.
Проволока для сердечников сварочных электродов. Механическая очистка от окалины. Большие обжатия, высокая скорость.	Обедненное кальциевое мыло. Для увеличения срока службы волок добавляют воск*. В последних волокнах может использоваться кальциевое/натриевое мыло с примерно 50% жира

* – воск также благоприятен для последующего отжига при высоких температурах, так как после него на поверхности практически не остаётся следов.

7. ЯВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ

Скорость деформации существенно влияет на условия проведения процессов обработки металлов давлением. К высокоскоростным процессам обработки металлов давлением можно отнести прокатку на проволочных станах, где скорость готовой катанки достигает 100 м/с и более, также высокоскоростным процессом является волочение тонкой проволоки, при котором скорость готовой проволоки на современных волочильных станах достигает 80 метров в секунду и имеет тенденцию к дальнейшему повышению. При волочении тонкой проволоки очаг деформации имеет небольшие размеры, вследствие этого скорость деформации при волочении тонкой проволоки превышает 10^5 с^{-1} . Такие скорости деформации характерны для ударной деформации. Условия ударной деформации значительно отличаются от условий деформации при низких скоростях деформирования. В условиях высокоскоростной деформации возникает ряд явлений, которые не проявляют себя при обработке с низкими скоростями. К таким явлениям можно отнести рост сопротивления деформации с ростом скорости деформации, локализацию деформации в небольшой области очага деформации, снижение пластичности заготовки с увеличением скорости деформации, изменение условий смазки, температурные эффекты, рост неоднородности деформации по сечению проволоки. При высокоскоростной обработке металлов давлением проявляется волновой характер пластической деформации. С увеличением скорости нагружения уменьшается скорость пластических волн. Вследствие отставания пластической волны релаксации от упругой волны упругие напряжения при быстром нагружении могут значительно превышать сопротивление деформации при низких скоростях нагружения. Все перечисленные выше явления можно наблюдать при работе на обычных современных прокатных и волочильных станах. В связи с этим возникает необходимость учета явлений высокоскоростной деформации при разработке технологии и оборудования высокоскоростных процессов обработки металлов давлением.

Сопротивление деформации, как правило, растет с увеличением скорости деформации. С ростом сопротивления деформации также растет температура изделия. Поэтому при высокоскоростной деформации действуют два процесса в разных направлениях – скоростное упрочнение и температурное разупрочнение. Если преобладает скоростное упрочнение – сопротивление деформации увеличивается, если преобладает температурное разупрочнение – сопротивление деформации уменьшается. При горячей деформации также идут процессы динамической полигонизации и рекристаллизации, определяющие релаксационные процессы.

Увеличение скорости волочения проволоки, как правило, вызывает ухудшение основных показателей по механическим свойствам готовой проволоки. Например, при увеличении скорости волочения с 8 м/с до 25 м/с, число гибов уменьшается на 8-10 %, уменьшается число скручиваний, увеличивается температура проволоки. При этом предел прочности повышается на 5-6 % и повышается качество поверхности проволоки.

Сопротивление деформации при горячей обработке металлов давлением зависит от температуры деформируемого материала и заданной скорости деформации. Температура и скорость деформации в этом случае являются факторами, определяющими выбор рациональных температурно-скоростных условий процесса обработки давлением с целью формирования мелкозернистой структуры стали.

Экспериментальные исследования влияние скорости, степени деформации и температуры на величину сопротивления деформации углеродистой низколегированной стали показали, что общим для всех полученных кривых упрочнения является высокая скорость упрочнения в начальный период деформации, когда действие релаксационных процессов не проявляется. Исследования проводились при температурах 800°C - 1200°C , скорости деформации $0,1-10\text{c}^{-1}$, степени деформации от 0 до 6,5. Кривые упрочнения имеют максимум, вызванный равенством скоростей деформационного упрочнения и разупрочнения. В диапазоне температур 800°C - 1200°C максимум кривой упрочнения достигается при степени деформации 2,75 – 3,5 при скорости деформации 10c^{-1} . В точке максимума суммарная интенсивность упрочнения равна нулю и сопротивление деформации достигает максимального значения. При дальнейшем увеличении степени деформации наблюдается разупрочнение стали. С ростом скорости деформации и уменьшением температуры величина сопротивления деформации в точке максимума увеличивается. При увеличении скорости деформации растет значение сопротивления деформации при котором достигается максимум. Диапазон исследованных температур соответствует температурам заготовки при прокатке катанки, поэтому следует ожидать, что поведение углеродистых низколегированных сталей при прокатке будет аналогичным. Все высокоскоростные процессы с высокой степенью деформации сопровождаются двумя конкурентными процессами – деформационным упрочнением и температурным разупрочнением, поэтому, следует ожидать, что поведение сталей других марок в целом должно подчиняться тем же закономерностям. Согласно приведенным данным, при снижении температуры стали точка максимума кривой упрочнения смещается в область более высоких значений степени деформации, но вид кривой не меняется. Поэтому следует ожидать такого же вида кривой деформации с максимумом сопротивления деформации и для условий холодной обработки металлов давлением, например, при волочении проволоки. При волочении проволоки максимум будет наблюдаться при более высоких степенях и скоростях деформации.

Большинство процессов обработки металлов давлением проводятся при более низких степенях деформации, чем приведенные выше и условия деформации соответствуют участку роста сопротивления деформации. При процессах с выделением большого количества тепла деформации, в частности, при горячей прокатке катанки и холодном волочении с высокими скоростями возможно достижение максимума сопротивления деформации с последующим его снижением.

В процессах обработки металлов давлением практически вся работа деформации переходит в тепло. На современных волочильных станах использу-

ются эффективные методы охлаждения проволоки, такие как применение охлаждаемых тянущих барабанов, волок, волочение в охлаждающей жидкости и другие. Тем не менее при высоких скоростях волочения проволока не успевает охладиться в промежутках между волоками. При высокоскоростном волочении и прокатке заготовка очень быстро проходит через очаг деформации, время нахождения проволоки или проката в очаге деформации может быть 10^{-5} с и меньше. За такое короткое время теплообмен с окружающей средой не успевает произойти, и температура проволоки и проката на выходе из очага деформации практически не зависит от эффективности используемой системы охлаждения. От температуры проволоки зависят их механические свойства, условия смазки и, следовательно, условия обработки и качество конечной продукции. Поэтому при высокоскоростном волочении проволоки задача снижения нагрева проволоки в волоках остаётся актуальной не зависимо от эффективности применяемой системы охлаждения.

В условиях мокрого волочения проволока, волокна и шкивы находятся в водной эмульсии, которая является одновременно смазкой и охлаждающей средой. Проволока нагревается за счет выделения тепла деформации и трения на шкивах. На последних проходах, где скорость волочения самая высокая, за время нахождения в охлаждающей среде проволока не успевает охладиться, и температура растёт. С ростом скорости волочения увеличивается температура проволоки, а увеличение температуры приводит к росту коэффициента трения, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. Эти явления являются факторами, существенно ограничивающими скорость волочения.

На машине сухого волочения эффективным средством охлаждения является охлаждение проволоки на тянущих барабанах с принудительным охлаждением. Время нахождения проволоки на барабане большого диаметра значительно больше, чем в промежутках между волоками и за счет этого температура проволоки снижается до температуры поверхности барабана. Однако с ростом скорости протяжки проволоки эффективность охлаждения снижается, так как уменьшается время нахождения проволоки на барабане. Эффективность охлаждения можно повысить, увеличивая диаметр барабана и количество витков проволоки, тем самым увеличивая время нахождения проволоки на барабане. Тем не менее при высокоскоростном волочении возможна ситуация, когда проволока не успевает охладиться за время пребывания на барабане, что является фактором, ограничивающим скорость волочения проволоки.

Трение на контактных поверхностях волочильного инструмента и прокатных валков зависит от давления и температуры смазки. При волочении трение является нежелательным явлением, так как с ростом коэффициента трения увеличивается сила волочения, нагрев проволоки и износ волочильного инструмента. Увеличение скорости волочения приводит к увеличению давления смазки на входе в очаг деформации и увеличению толщины смазочного слоя. Повышение температуры смазки приводит к снижению вязкости смазки и уменьшению толщины смазочного слоя. При повышении скорости волочения действуют два противоположно направленных процесса – увеличение давления на входе в волоку и повышение температуры контактной поверхности. В зависи-

мости от того, какой процесс преобладает, толщина смазочного слоя будет расти или уменьшаться. При увеличении толщины смазочного слоя коэффициент трения уменьшается, а при уменьшении увеличивается. При повышении скорости волочения коэффициент трения, как правило, сначала уменьшается, так как растёт давление смазки на входе в волоку, а затем уменьшается из-за повышения температуры контактной поверхности. Мокрое волочение имеет свои особенности, связанные с использованием в качестве смазки водной эмульсии. При волочении проволоки в водной эмульсии с увеличением скорости ухудшается захват смазки на свободной поверхности проволоки, что способствует уменьшению толщины слоя смазки в дополнение к эффекту повышения температуры.

Практически все процессы обработки металлов давлением отличаются неоднородностью деформации по объёму очага деформации, в том числе прокатка и волочение. Расчёты напряжённого и деформированного состояния при прокатке и волочении, как правило, проводятся из предположения об однородности деформации. Неучёт неоднородности деформации приводит к значительным отклонениям полученных значений деформаций и напряжений от реальных.

Распределение скоростей деформации и деформаций при обработке металлов давлением существенно зависит от конфигурации очага деформации. Исследование свойств очага деформации экспериментальными методами представляет сложную задачу в силу того, что напряжённо-деформированное состояние в процессе обработки металлов давлением существенно отличается от напряжённо-деформированного состояния после остановки процесса, когда проводится экспериментальное исследование. В настоящее время всё большее применение получают методы конечно-элементного и математического моделирования в сочетании с экспериментальными исследованиями. Конечно-элементное исследование напряжённо-деформированного состояния показывает, скорости материальных точек в очаге деформации, напряжения и деформации в различных областях деформированного тела значительно отличаются и определяются формой очага деформации.

При прокатке и волочении распределение напряжений, деформаций и скоростей деформации по очагу деформации в большой степени зависят от геометрии очага деформации и условий прокатки или волочения, что влияет на структуру и механические свойства готового проката и проволоки. Распределение скоростей деформации и накопленной деформации зависит от скорости деформации при обработке металлов давлением. Экспериментально определить распределение пластической деформации при горячей прокатке сложно, так как обработка металла сопровождается процессами отпуска и рекристаллизации. При холодной прокатке по степени упрочнения можно определить накопленную деформацию в любой точке. По распределению микротвердости можно определить распределение накопленной деформации по объёму очага деформации. Методика определения деформаций по микротвердости успешно применялась во многих исследованиях. Проведённые исследования показали, что при холодной прокатке геометрические параметры очага деформации в значительной степени определяют распределение скоростей деформации. При горячей

прокатке интенсивности скоростей деформации распределены значительно неравномернее, чем интенсивности напряжений и деформаций. Абсолютные значения скоростей деформации возрастают пропорционально скорости прокатки. Температура в очаге деформации при прокатке также распределена неравномерно. Неравномерное распределение температуры и релаксация напряжений могут увеличить неоднородность скоростей деформации. От скорости деформации зависит сопротивление деформации при обработке, поэтому распределение скоростей деформации определяет распределение механических свойств при обработке и свойства готовой продукции.

С ростом скорости волочения и прокатки и, соответственно, с увеличением скорости деформации, увеличивается сопротивление деформации, за исключением случаев, когда деформация сопровождается тепловым разупрочнением. Неоднородность скоростей деформации с увеличением скорости протяжки растет, что приводит к неоднородности механических свойств, температуры, деформации по сечению очага деформации. При увеличении скорости деформации возникают дополнительные градиенты напряжений, которые могут существенно повлиять на характер течения металла в очаге деформации.

Неоднородность напряжений и температуры по сечению проволоки и катанки в очаге деформации приводит к возникновению остаточных напряжений. Остаточные напряжения могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на качество готового изделия. Сжимающие остаточные напряжения способствуют залечиванию дефектов, а растягивающие способствуют раскрытию дефектов. Повышение величины сжимающих напряжений снижает вероятность усталостного разрушения. Рост отрицательных остаточных напряжений снижает долговечность изделия в результате развития усталостных дефектов.

В очаге деформации в центральной области проволоки растягивающие продольные напряжения выше, чем в приповерхностных слоях проволоки. После выхода проволоки из очага деформации и снятия нагрузки все действующие напряжения должны быть уравновешены, поэтому в результате снятия внешней нагрузки в областях с растягивающими напряжениями возникают сжимающие остаточные напряжения, а в областях с действующими сжимающими напряжениями – остаточные растягивающие напряжения.

При повышении скорости волочения растет неоднородность деформации по сечению проволоки. Вследствие этого растут величины остаточных напряжений. Наличие растягивающих остаточных напряжений на поверхности проволоки способствует развитию дефектов на поверхности проволоки.

Процессы обработки металлов давлением с высокими скоростями деформации используются для получения изделий из ультрамелкозернистых материалов. К таким процессам относятся равноканально-угловое прессование, кручение под давлением, радиально-сдвиговая прокатка, асимметричная прокатка и другие. При обработке металлов давлением, в частности, при горячей прокатке катанки и холодном волочении проволоки микроструктура стали испытывает значительные изменения. Рост скорости деформации и сопровождающие его температурные и деформационные эффекты оказывают существенное влияние

на микроструктуру готового изделия. Экспериментальные исследования, проводимые с целью определения условий получения мелкозернистой структуры стали, показывают существенное влияние скорости волочения на микроструктуру готовой проволоки. При увеличении скорости деформации увеличивается количество внутренних дефектов протянутой проволоки и изменение ориентации пластин цементита. Отмечается, что при высоких степенях деформации (выше 80%) практически невозможно исследовать микроструктуру стали обычными металлографическими методами из-за значительного вытягивания зерен вдоль оси проволоки.

Для описания процессов обработки металлов давлением в большинстве случаев используются модели пластической или, реже, упругопластической среды, свойство вязкости металлов используется довольно редко. Результаты расчетов оказываются не зависимыми от времени, что может привести к значительным отклонениям расчетных параметров от экспериментальных и производственных, например, при описании быстрых процессов с высокой скоростью деформации.

Для описания зависящих от времени процессов, например, ползучести, используются уравнения, учитывающие вязкие свойства материалов. Ползучесть заключается в деформации тел в течении длительного времени под действием постоянной нагрузки. Аналогичные процессы происходят и при высокоскоростной обработке металлов давлением, например, при волочении тонкой проволоки или прокатке катанки. В такого рода процессах при приложении нагрузки деформация начинается с запаздыванием и скорость деформации достигает соответствующего напряжению максимального значения в течении некоторого времени релаксации.

Использование вязкопластического определяющего уравнения позволяет описать влияние скорости волочения тонкой проволоки на параметры процесса волочения. Подобный подход позволяет рассчитать напряжение волочения с учетом скорости волочения, условий трения и геометрии волочильного инструмента. Аналогичные методы с использованием вязких свойств металлов позволяют рассчитывать параметры других высокоскоростных процессов обработки металлов давлением.

Для моделирования высокоскоростных процессов обработки металлов давлением, проявляющих свойство вязкости, то есть зависимость деформации от скорости и времени нагружения, применяется подход, основанный на разложении полной деформации на упругую и вязкопластическую компоненты. Такой подход предложен в работах. При этом в используемые уравнения входят материальные функции, содержащие модуль упругости и вязкости исследуемого металла. Материальные функции могут быть определены по скоростям нагружения и измеряемым деформациям.

Проектирование высокоскоростных процессов обработки металлов давлением, таких как волочение тонкой проволоки и прокатка катанки, требует учета ряда приведенных выше особенностей для адекватного описания этих процессов.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Условная (инженерная) деформация	$\varepsilon_e = (l_1 - l_0) / l_0$
Истинная деформация	$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$
Обжатие	$r = 1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)$
Обжатие в процентах	$\left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)\right] \times 100$
Параметр дельта (параметр формы зоны деформации)	$\Delta = \left(\frac{\alpha}{r}\right) \left[1 + (1-r) \frac{1}{2}\right]^2$
Напряжение волочения	$\sigma_d = w_u + w_r + w_f = \sigma_a \left[\left(\frac{3,2}{\Delta}\right) + 0,9 \right] (\alpha + \mu)$
Фактор дополнительной работы	$\Phi \approx 0,8 + \frac{\Delta}{(4,4)}$
Отношение напряжения волочения к сопротивлению деформации	$\frac{\sigma_d}{\sigma_a} = \Sigma = \left[\frac{3,2}{\Delta} + 0,9 \right] (\alpha + \mu)$
Дельта для минимума напряжения волочения	$\Delta_{onm} = 1,89 \left(\frac{\mu}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + (1-r) \frac{1}{2}\right]$
Полуугол для минимума напряжения волочения	$\alpha_{onm} = 1,89 (\mu r)^{\frac{1}{2}} \left[1 + (1-r) \frac{1}{2}\right]$
Отношение давления на волоку к сопротивлению деформации	$\frac{P}{\sigma_a} = \frac{\Delta}{4} + 0,6$
Напряжение волочения с учётом противонапряжения	$\sigma_d = \sigma_a \left[\left(\frac{3,2}{\Delta}\right) + 0,9 \right] (\alpha + \mu) + \sigma_b \left[1 - \left(\frac{\mu r}{\alpha}\right) (1-r)^{-1} \right]$
Равновесная температура после прохода	$T_{eq} \approx T_0 + \frac{\sigma_d}{(C\rho)}$
Расстояние установления температурного равновесия после волоки	$L_{eq} \approx \frac{(vC\rho d^2)}{24K}$

Вклад деформации в температуру
волочения

$$(T_w - T_0) = \Phi \sigma_a \frac{\ln \left[\frac{1}{1-r} \right]}{C\rho}$$

Вклад трения в температуру
волочения

$$(T_f - T_0) = \mu \operatorname{ctg} \alpha \Phi \sigma_a \frac{\ln \left[\frac{1}{1-r} \right]}{C\rho}$$

Максимальная температура
поверхности проволоки
(на выходе из волоки)

$$T_{\max} = 1,25 \mu \Phi \sigma_a \left[\frac{\nu L_d}{C\rho K} \right]^{\frac{1}{2}} + \Phi \sigma_a \frac{\ln \left[\frac{1}{1-r} \right]}{C\rho} + T_0$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Enghag, Per. Steel wire technology. - Sweden. Örebro University. 2009.- 351p.
2. George E. Dieter, Howard A. Kuhn, S. Lee Semiatin. Handbook of workability and process design. Materials Park, OH: ASM International. 2003—414p.
3. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. — М.: Metallurgy, 1971. — 448с.
4. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Проектирование режимов высокоскоростного волочения проволоки на основе моделирования: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. - 117 с.
5. Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Стальная проволока: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011.-689с.
6. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Оценка скоростной неоднородности деформации при волочении в монолитной волоке // Производство проката. 2010. № 3. С. 14–17.
7. B. Golis, J.W. Pilarczyk, Z. Muskalski et al. Strain rate in wire drawing process // Wire Industry. 2004. № 840. 200, 202-206.
8. Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals: Concepts and applications / Сост. М. А. Meyers [и др.]. New York, London: Plenum, 1981.
9. Ващенко А.П. Механические свойства сталей разного уровня прочности при высокоскоростном растяжении. Киев, 1989. 48 с.
10. Ващенко А.П., Сунцов Г.Н., Белалова Г.В., Зиновьев Е.Г., Брагов А.М., Ломунов А.К., Медведев А.А. Механические свойства малоуглеродистых сталей в широком диапазоне температур и скоростей деформации применительно к процессам тонколистовой прокатки // Проблемы прочности. 1990. № 8. С. 76–84.
11. Лабер К.Б., Дыя Х.С., Ковалек А.М., Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Влияние температурно-скоростных условий на сопротивление деформации углеродистой низколегированной стали // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. 59. № 9. С. 610–614.
12. Первухин А.Е. Проявления неоднородности пластической деформации в процессах волочения проволоки из благородных металлов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2018.
13. Крымчанский И.И. Высокоскоростное волочение стальной проволоки и волочильный инструмент // Сталь. 2013. № 12. С. 41–47.
14. Новацкий В.К. Волновые задачи теории пластичности. М: Мир, 1978. 320 с.
15. Suliga M. The influence of the High Drawing Speed on Mechanical-Technological Properties of High Carbon Steel Wires // Archives of Metallurgy and Materials. 2011. 56. № 3.
16. Prakash Gawali, Amitesh Paul, G.R. Selokar. Effect of High Speed Drawing on Properties of High Carbon Steel Wires // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2012. 2. № 2. С. 209–214.

17. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Сост. Мейерс М.А. [и др.]. М: Metallurgiya, 1984. 512 с.
18. Meyers M. A. Discussion of paper by Klopp, Clifton, Shawki // *Mechanics of Materials*. 1985. 4. 387-393.
19. Wright R. N. *Wire technology : process engineering and metallurgy*. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2011.
20. *Handbook of workability and process design* / Сост. G. E. Dieter [и др.]. Materials Park OH: ASM International, 2003. vi, 414.
21. Enghag, Per. *Steel wire technology*. - Sweden. Örebro University. 2009.- 351p.
22. Enghag Per, Larsson Rune, Pettersson Kjell. An investigation into the forces and friction in wire drawing // *Wire Industry*. 2001. 69. № 809. 272-273, 275-277.
23. Lee S.-K., Lee S.-B., Kim B.-M. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72wt% C steel wire // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. 210. № 5. С. 776–783.
24. Vega G., Haddi A., Imad A. Temperature effects on wire-drawing process: Experimental investigation // *International Journal of Material Forming*. 2009. 2. S1. С. 229–232.
25. Haddi A., Imad A., Vega G. Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process // *Mater. and Des.* 2011. 32. 8-9. С. 4310–4315.
26. Wellinger K. S. S. Der einflub von temperatur, dehnungsgeschwindigkeit und haltezeit auf das zeitfestigkeitsverhaltex von stahlem // *Archiv fur das kisenhuttenwesen*. 1973. 44. № 1. С. 47–55.
27. Харитонов В.А., Головизнин С.М., Иванцов А.Б., Усанов М.Ю. Оценка температурно-деформационных режимов на тянущих шкивах высокоскоростных машин мокрого волочения // *Металлург*. 2009. № 4. С. 50–61.
28. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1982. 312 с.
29. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Влияние скорости на свойства и режимы волочения тонкой высокопрочной проволоки // *Сталь*. 2007. № 7. С. 85–86.
30. Логинов Ю.Н. А. Л.В. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах // *Цветные металлы*. 2010. № 5. С. 119–122.
31. Логинов Ю.Н. К. В.В. Моделирование процесса прессования трубной заготовки из титанового сплава в программе QFORM 2D/3D // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2010. № 12. С. 36–40.
32. Ampere A. Tseng, Shi R. Wang, A.C.W. Lau. Local variations of strain and strain rate in roll bite region during rolling of steels // *ASME. J. Eng. Mater. and Technol.* 1998. 120. № 1. С. 86–96.
33. Sharma P., Praveen Kumar, Dr. Geeta Agnihotri. Cold drawing process –a review // *International Journal of Engineering Research and Application*. 2013. 3. № 3. С. 988–994.

34. Головизнин С.М. Оценка условий локализации деформации при волочении проволоки // *Сталь*. 2014. № 4. С. 66–68.
35. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Расчёт скоростных напряжений при протяжке проволоки в клиновидном очаге деформации // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2005. 3(11). С. 48–50.
36. Cheng W., Finnie I. Residual stress measurement and the slitting method. 2007.
37. Kobelev V. Theory of optimal residual stresses and defects distribution // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2010. 41. № 3. С. 351–370.
38. Phelippeau A., Pommier S., Nsakalagos T., Clavel M., Prioul C. Cold drawn steel wires - Processing, residual stresses and ductility - Part I: Metallography and finite element analyses // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2006. 29. № 3. С. 201–207.
39. Phelippeau A., Pommier S., Zakharchenko I., Levy-Tubiana R., Tsakalagos T., Clavel M., Croft M., Zhong Z., Prioul C. Cold drawn steel wires-processing, residual stresses and ductility Part II: Synchrotron and neutron diffraction // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2006. 29. № 3. С. 255–265.
40. Головизнин С.М., Зюзин В.И. Моделирование остаточных напряжений при волочении проволоки // *Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. междунар. заоч. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.С. Мхитаряна. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. 2016. С. 295–299.
41. Головизнин С.М., Покачалов В.В. Исследование остаточных напряжений проволоки для армирования предварительно напряженных бетонных конструкций // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: сб. науч. тр./под ред. В.М. Салганика — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. 2013. С. 46–50.
42. Zelin M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing // *Acta Materialia* (). 2002. № 50. С. 4431–4447.
43. M. Suliga, R. Kruzal, N. Garstka, J. Gazdovicz. The influence of drawing speed on structure changes in high carbon steel wires. 2015.
44. Cristescu N. Dynamic plasticity. Singapore, Hackensack NJ: World Scientific, 2007. 468 с.
45. Cristescu N. Plastic Flow through conical converging Dies, using a viscoplastic constitutive Equation // *Int. J. Mech. Sci.* 1975. 17. С. 425–433.
46. Хохлов А.В. Кривые ползучести и длительной прочности нелинейной модели вязкоупругопластичности типа максвелла.
47. Хохлов А.В. Определяющее соотношение для реологических процессов с известной историей нагружения, кривые ползучести и длительной прочности // *Механика твердого тела*. 2008. № 2. С. 140–160.
48. Хохлов А.В. Идентификация нелинейной модели упруговязкопластичности типа Максвелла по диаграммам нагружения с постоянными скоростями // *Деформация и разрушение материалов*. 2018. 4. С. 2–10.99.

Учебное текстовое электронное издание

Головизнин Сергей Михайлович

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ**

Учебное пособие

1,70 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2019 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 металлургии и стандартизации
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru