

Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин,  
Ю. В. Мартьянов

ТОНКОЕ ВОЛОЧЕНИЕ И СВИВКА  
В МЕТАЛЛОКОРД СТАЛЬНОЙ  
ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

Гомель  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
2018

УДК 621.778

**Бобарикин, Ю. Л.** Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартьянов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с. : ил. – ISBN 978-985-535-364-6.

Изложены результаты собственных исследований авторов по особенностям тонкого волочения и свивки в металлокорд стальной латунированной проволоки. Разработана компьютерная численная модель процесса волочения тонкой проволоки и ее свивки в металлокорд, получены аналитические закономерности экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Определены критерии оценки оптимизируемых и разрабатываемых режимов волочения, математические зависимости для оценки напряженного и деформированного состояния проволоки. Определены факторы, влияющие на технологические свойства металлокорда и их изменение в процессе корректировки технологических режимов волочения.

Данная монография дополняет исследования по тонкому волочению и свивке в металлокорд стальной латунированной проволоки и является переработкой и продолжением монографии «Оптимизация тонкого волочения высокоуглеродистой стальной проволоки», опубликованной в 2011 г.

Для специалистов по металлургическому производству и материалуобработке: научных и инженерно-технических работников, преподавателей, а также для исследователей, аспирантов, магистрантов и студентов подходящего профиля.

Табл. 62, ил. 165, список лит. – 93 назв.

Рецензенты: проф. Гомел. фил. Ун-та гражд. защиты МЧС Респ. Беларусь  
д-р техн. наук, проф. *В. А. Ковтун*;  
зав. каф. «Обработка металлов давлением» Липец. гос. техн. ун-та  
д-р техн. наук, проф. *И. П. Мазур*

*Рекомендовано к изданию Советом ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 3 от 20.11.2017 г.)*

**ISBN 978-985-535-364-6**

© Бобарикин Ю. Л., Верещагин М. Н.,  
Мартьянов Ю. В., 2018  
© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2018

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния и температуры проволоки при увеличении скорости волочения</b> .....	10
1.1. Критерии оценки режимов волочения .....	10
1.2. Математические зависимости, используемые для оценки напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении .....	11
1.3. Формулировка исходных данных для расчета напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации.....	15
1.4. Результаты расчета режимов многократного волочения с использованием метода конечных элементов .....	17
1.5. Анализ результатов расчета температурного режима многократного волочения с использованием метода конечных элементов .....	29
1.6. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния и распределения температур в очаге деформации методом конечных элементов и их анализ.....	34
<b>Глава 2. Исследование влияния геометрии волок на процессы деформационного старения в проволоке</b> .....	42
2.1. Методология исследования влияния геометрии волокна на деформационное старение в обрабатываемой проволоке.....	42
2.2. Формулировка исходных данных для расчета напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при изменении геометрии волокна .....	44
2.3. Определение зависимости между значениями оптимальных углов деформирующей зоны и значениями длин калибрующей зоны волокна по температурному критерию .....	46
2.4. Анализ распределения температурных полей и напряженно-деформированного состояния в проволоке и волокне для маршрута волочения с имеющимся и уменьшенным контактным трением для проектной скорости волочения.....	58
2.5. Анализ распределения температурных полей и напряженно-деформированного состояния в проволоке и волокне при различной длине калибрующей зоны с оптимальными углами конической деформирующей зоны .....	59
2.6. Анализ распределения температурных полей и напряженно-деформированного состояния в проволоке и волокне с радиальной и сигмоидальной деформирующими зонами .....	61

<b>Глава 3. Экспериментально-теоретическое исследование тонкого волочения</b> .....	64
3.1. Использование критерия предельной пластичности для волочения .....	64
3.1.1. Разрушение металлов при пластической деформации .....	64
3.1.2. Модель разрушения металла при больших пластических деформациях .....	67
3.1.3. Расчет предельных деформаций .....	69
3.2 Экспериментальное оборудование для исследования процесса волочения проволоки .....	78
3.2.1. Схема и общий вид экспериментальной установки для волочения проволоки .....	78
3.2.2. Измерение температуры проволоки пирометром С-300 .....	83
3.2.3. Устройство и принцип работы .....	85
3.2.4. Измерение усилия волочения на базе усилителя тензометрического ТОПАЗ-3-02 .....	87
3.2.5. Устройство и принцип работы .....	88
3.2.6. Измерение скорости .....	89
3.2.7. Блок преобразования сигналов .....	93
3.3. Программное обеспечение .....	94
3.4. Ход работы с программой .....	98
3.5. Вычислительный эксперимент по оптимизации и геометрии канала волокна в маршруте волочения .....	99
3.6. Результаты эксперимента и их анализ .....	116
3.6.1. Сравнительный анализ численных и экспериментальных значений усилий волочения .....	116
3.6.2. Влияние скорости волочения на усилие волочения .....	117
3.6.3. Оценка коэффициента контактного трения .....	118
3.7. Применение напорных волокон и их влияние на условия волочения .....	119
3.8. Построение оптимизированных маршрутов волочения .....	122
<b>Глава 4. Закономерности волочения стальной проволоки при повышенных скоростях</b> .....	132
4.1. Факторы процесса волочения .....	141
4.2. Разработка закона упрочнения стали при волочении на повышенных скоростях .....	141
4.3. Оптимизация геометрии волочильного инструмента .....	146
4.4. Исследование контактного трения в волоке .....	155
<b>Глава 5. Разработка математической модели процесса высокоскоростного волочения стальной проволоки</b> .....	161
5.1. Разработка математической модели процесса волочения в сдвоенных волокнах .....	161

5.2. Разработка зависимостей для построения маршрута волочения тонкой проволоки по температурному критерию.....	169
5.3. Разработка методики построения маршрута волочения с учетом кинематики волочильного стана.....	177
5.3.1. Общие положения.....	177
5.3.2. Расчет деформационно-кинематических параметров волочения.....	180
5.3.3. Расчет энергосиловых режимов волочения .....	182
5.3.4. Введение сдвоенных волок в маршрут волочения.....	184
5.3.5. Применение методики расчета маршрута волочения проволоки диаметром 0,35 <i>UT</i> мм из стали 96 .....	184
5.4. Математическое описание механических свойств готовой тонкой проволоки в зависимости от режимов волочения .....	186
<b>Глава 6. Разработка технологических процессов волочения высокопрочной и ультра высокопрочной проволоки из сталей 85, 90, 95 диаметром 0,2–0,5 мм с максимальными скоростями волочения в диапазоне 8–18 м/с .....</b>	<b>194</b>
6.1. Разработка критериев оценки эффективности маршрутов волочения проволоки .....	194
6.1.1. Температурный критерий оптимизации маршрутов тонкого волочения .....	195
6.1.2. Деформационный критерий оптимизации маршрутов тонкого волочения .....	196
6.1.3. Оценка оптимизации маршрута волочения .....	201
6.2. Исследование способов снижения неравномерности деформации проволоки по поперечному сечению .....	204
6.3. Исследование влияния растяжения тонкой проволоки на ее прямолинейность .....	208
6.3.1. Определение механических свойств тонкой проволоки. ....	208
6.3.2. Проведение испытаний на осевое растяжение тонкой углеродистой проволоки .....	209
6.3.3. Расчет отклонения от прямолинейности .....	212
6.4. Разработка высокоэффективных способов волочения проволоки.....	213
6.4.1. Маршрут волочения с дополнительной предчистовой волокой.....	213
6.4.2. Маршрут волочения с уменьшенным числом волок .....	216
6.4.3. Маршрут тонкого волочения с тремя дополнительными волоками .....	219
<b>Глава 7. Анализ исходного уровня исследований в области свивки металлокorda .....</b>	<b>224</b>
7.1. Методы аналитического расчета процесса свивки металлокorda .....	224

7.2. Обзор способов численного моделирования процесса свивки металлокорда. Использование метода конечных элементов для моделирования свивки металлокорда. ....	227
<b>Глава 8. Законы упрочнения для свивки металлокорда</b> .....	231
8.1. Обоснование выбора закона упрочнения по отношению к кручению и изгибу .....	232
8.2. Определение закона упрочнения для свивки проволоки в металлокорд 0,35HT; 0,30HT; 0,30SHT .....	236
<b>Глава 9. Построение адекватной универсальной математической модели свивки проволоки с оценкой неравномерности деформации и ее остаточной величины</b> .....	240
9.1. Общая характеристика пакетов прикладных программ для моделирования процессов ОМД .....	240
9.2. Описание универсальной математической модели процесса свивки проволоки в металлокорд с использованием метода конечных элементов.....	241
9.2.1. Описание геометрической модели и основные упрощения .....	241
9.2.2. Начальные и граничные условия .....	243
9.2.3. Законы упрочнения материала .....	244
9.3. Оценка полученных данных и проверка адекватности модели .....	245
9.4. Исследования закономерностей деформации проволоки во время свивки .....	249
<b>Глава 10. Теоретический анализ влияния механических параметров тонкой проволоки на ее обрывность в процессе свивки в металлокорд и прямолинейность металлокорда после свивки</b> .....	256
10.1. Изменение свойств тонкой проволоки в процессе волочения и свивки .....	257
10.2. Основные факторы, влияющие на обрывность металлокорда .....	259
10.3. Определение параметров тонкой проволоки, влияющих на прямолинейность металлокорда после свивки.....	262
<b>Глава 11. Разработка технологических основ повышения прямолинейности и снижения обрывности металлокорда из высокоуглеродистой стальной латунированной проволоки</b> .....	267
11.1. Влияние механических свойств на обрывность металлокорда .....	267
11.2. Связь между обрывностью и прямолинейностью металлокорда.....	273
11.3. Критерий комплексной оценки обрывности и прямолинейности металлокорда .....	276
11.4. Проверка адекватности и корректировка комплексного критерия оценки обрывности и прямолинейности металлокорда .....	284
<b>Заключение</b> .....	290
<b>Литература</b> .....	297

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых перспективных направлений развития металлокордного производства в странах СНГ и дальнего зарубежья является разработка и использование мероприятий, повышающих прочность металлокорда путем увеличения временного сопротивления разрыву проволоки, используемой в его конструкции. Использование металлокорда повышенной прочности способствует уменьшению массы шины за счет снижения массовой доли металлокорда, улучшает эксплуатационные свойства шин, что повышает их потребительские свойства. В связи с этим уже начато производство сверхвысокопрочной проволоки (предел прочности 3500–3800 МПа), ведутся активные разработки в области получения ультравысокопрочной проволоки (предел прочности 3800–4200 МПа) и разрабатываются принципиальные основы получения мегавысокопрочной проволоки.

Увеличение прочности проволоки достигается повышением суммарной деформации сечения стальной проволоки на последнем переделе волочения и увеличением содержания углерода в стали проволоки. Возможности наращивания суммарного обжатия ограничены в связи с ограниченной пластичностью обрабатываемого металла. По этой причине прочность проволоки увеличивают повышением содержания углерода в стали, используя сталь 85, сталь 90 и сталь 95.

Современные условия требуют увеличения объемов производства сверхвысокопрочного и ультравысокопрочного металлокорда. Это в свою очередь требует повышения производительности волочения сверхвысокопрочной и ультравысокопрочной проволоки. Наиболее эффективно повышать производительность волочения увеличени-

ем скорости волочения, что и практикуется в металлокордном производстве. Но рост скорости волочения сверхвысокопрочной и ультравысокопрочной проволоки приводит к потере пластических свойств проволоки и росту обрывности при свивке из нее металлокорда. Это в целом снижает эффективность производства металлокорда. Для снижения обрывности и повышения качества сверхвысокопрочного металлокорда необходимы новые режимы высокоскоростного волочения сверхвысокопрочной и ультравысокопрочной проволоки.

Для решения этой проблемы предлагается исследовать процессы, происходящие в проволоке при ее волочении с разными и в том числе с повышенными скоростями, оценить распределение деформаций, напряжений, температуры по всему объему протягиваемой проволоки и их влияние на качество проволоки. В результате этого анализа будут установлены новые режимы многократного волочения на волочильных станах со скольжением.

Научная новизна разработки состоит в том, что исследованы на экспериментально-теоретическом уровне распределения напряжений, деформаций, температур в стальной латунированной проволоке по всему маршруту многократного волочения на волочильном стане со скольжением. Создана численная модель процесса волочения, адекватность которой оценена экспериментально. С помощью численных исследований модели процесса оптимизированы режимы для высоких скоростей волочения сверхвысокопрочной и ультравысокопрочной стальной проволоки.

Свивка металлокорда из высокоуглеродистой стальной латунированной тонкой проволоки является завершающим технологическим этапом металлургического производства.

Производительность и качество металлокорда определяется частотой обрывов проволок при свивке в металлокорд на канатных машинах двойного кручения. На обрывность металлокорда в процессе свивки оказывают влияние свойства тонкой проволоки и режимы ее свивки в металлокорд. Определение факторов, влияющих на обрывность, позволит снизить уровень обрывности металлокорда.

Новизна исследований в области свивки металлокорда состоит в том, что впервые на экспериментальном и теоретическом уровне будет определено и исследовано распределение напряжений и деформаций в стальной латунированной проволоке во время свивки в металлокорд. Распределение напряжений и деформаций в металлокорде в процессе свивки позволит определить зоны максимально допустимой деформации проволок металлокорда.



Для реализации численного моделирования процесса свивки необходимо разработать математическую модель процесса свивки металлокорда из стальной высокоуглеродистой латунированной проволоки.

Для описания изменения напряжений и деформаций в проволоке в процессе свивки в металлокорд необходимо разработать закон упрочнения высокоуглеродистой стальной латунированной проволоки.

На основании полученных законов упрочнения проволоки в процессе свивки и математической модели с использованием численного моделирования будут исследованы основные закономерности деформации проволоки во время свивки.

В процессе свивки металлокорда проволока подвергается крутящим и изгибающим напряжениям. Это в совокупности с напряженно-деформированным состоянием проволоки в процессах волочения и свивки, а также с уровнем внутренних остаточных напряжений, возникающих в проволоке после волочения, делает невозможным прогнозирование изменения свойств проволоки и корда известными расчетными способами. Для корректного расчета свивки металлокорда требуется точный прогноз обрывности проволоки и уровень внутренних остаточных напряжений, возникающих при волочении. На ранних этапах исследований использовались методы аналитического расчета, в том числе с помощью ЭВМ.

На данный момент существует несколько методик аналитического расчета технических и механических характеристик проволоки и металлокорда. Суть методик заключается в анализе смещения волокон проволоки при свивке металлокорда и получения численных значений предела текучести проволоки, степени упрочнения проволоки при свивке, крутящего и изгибающего момента. Геометрические характеристики металлокорда выводятся из условия касания эллипсов.

Несмотря на наличие расчетных методик и различных способов подхода, имеющиеся варианты расчетов не дают точного результата при относительно больших деформациях проволоки. Как известно, различные конструкции металлокорда, а также способы свивки требуют к себе индивидуального подхода, а, значит, аналитические методы не всегда будут подходить для расчетов, так как невозможно их унифицировать. Поэтому на данном этапе необходимо более глубокое изучение данной проблемы, так как уровень исследований в этом направлении относительно низкий.

# ГЛАВА 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОЛОКИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ СКОРОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ

### 1.1. Критерии оценки режимов волочения

При разработке или оптимизации режимов волочения в первую очередь необходимо выяснить, по каким критериям будет оцениваться практическая пригодность результатов расчета.

Холодная пластическая деформация металлов и металлических сплавов сопровождается деформационным нагревом от действия внутреннего и контактного трения. Температура нагрева деформируемой при волочении высокоуглеродистой стали вызывает эффект деформационного старения, снижающего пластические свойства стали после волочения, что уменьшает ее способность к дальнейшей обработке, например, свивкой в металлокорд. Деформационное старение этой стали начинает активно проявляться при температурах нагрева объема проволоки свыше 270–300 °С. При температурах нагрева поверхности проволоки от контактного трения свыше 700 °С (точка  $A_1$  на диаграмме сплава железо–углерод) в структуре поверхности проволоки возможно появление мартенсита, что особенно снижает пластические свойства поверхности проволоки. Поэтому первым критерием оценки режимов волочения является условие не превышения температуры сечения проволоки 300 °С и температуры поверхности проволоки – 700 °С. Интенсивность приведенных процессов пропорциональна интенсивности роста температур. Следовательно, критерием оптимизации режима деформации проволоки с точки зрения повышения качества проволоки может служить принцип достижения минимальных деформационных температур.

Вторым критерием оценки режимов волочения является критерий степени неравномерности упрочнения стали по сечению проволоки. В соответствии с этим критерием в объеме проволоки при и после деформации не должно быть участков с прочностью, превышающей допустимые пределы. Это исключит опасную степень неравномерности упрочнения разных слоев проволоки, которая приводит к трещи-

нообразованию в проволоке. Обычные методы оценивают среднее по сечению значение пределов текучести, прочности, но градиент этих величин в объеме проволоки может приводить к появлению недопустимо упрочненных слоев стали в объеме проволоки.

Третьим критерием оценки режимов волочения, с точки зрения всего процесса многократного волочения со скольжением, могут служить допустимые величины скольжения проволоки по поверхностям тяговых шкивов. Для изменения или разработки маршрутов волочения на станах со скольжением необходимо регулировать величину этого скольжения. Но существующие предельные значения этой характеристики должны быть учтены. При очень малых скольжениях высока вероятность обрыва проволоки, а при больших – повышенный износ поверхностей тяговых шкивов и рост тепловыделения от повышенного трения с витками проволоки.

Четвертым критерием оценки является соблюдение общеизвестного принципа определенных величин коэффициентов запаса волочения как гарантии отсутствия обрывности проволоки на стадии ее волочения от превышения напряжения волочения предела прочности проволоки на выходе из волоки. К этому критерию можно отнести и потребную мощность волочения, которая должна быть обеспечена приводом волочильного стана.

## **1.2. Математические зависимости, используемые для оценки напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении**

В основе современной теории обработки металлов давлением (ОМД) лежат методы механики деформируемого твердого тела и теории пластичности. Используя математические закономерности данных теорий, рассмотрим задачу волочения проволоки через волоку (рис. 1.1). Решение задачи осуществим в цилиндрической системе координат при следующих основных упрощениях:

- 1) напряженно-деформированное и температурное состояние материала проволоки считаем осесимметричным, для чего будем пренебрегать внешними массовыми силами;
- 2) материал волоки считаем абсолютно жестким, а материал проволоки – сплошным, несжимаемым и пластичным;

3) считаем, что в процессе пластического деформирования в объеме проволоки действует распределенный источник тепловой энергии, равный 90 % работы пластического деформирования.

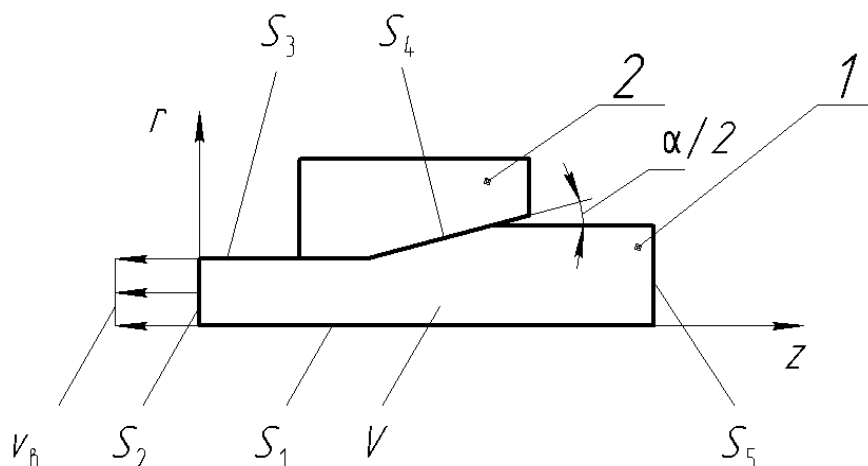


Рис. 1.1. Схема симметричной части деформации проволоки в волоке:  
1 – проволока; 2 – волока

С учетом принятых допущений установившееся напряженно-деформированное и температурное состояние всех точек сплошной среды, принадлежащих области  $V$  (рис. 1.1), ограниченной поверхностью  $S$ , будет описываться следующей системой уравнений (1.1)–(1.4):

– уравнение движения:

$$\frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} = \rho a_z; \quad (1.1)$$

– уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (1.2)$$

– уравнения связи деформаций и перемещений:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right); \quad (1.4)$$

– уравнения связи скоростей деформаций и скоростей перемещений:

$$\xi_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \xi_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r}; \quad \xi_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad (1.5)$$

$$\xi_{zr} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \quad (1.6)$$

– уравнения связи ускорений и скоростей:

$$a_r = v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}; \quad (1.7)$$

$$a_z = v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad (1.8)$$

– уравнение теплопроводности:

$$c\rho \left( v_r \frac{\partial t}{\partial r} + v_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + 0,9TH; \quad (1.9)$$

– уравнение теории пластичности Мизеса:

$$(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 6\sigma_{zr}^2 = 2\sigma_s^2, \quad (1.10)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\sigma_s$  – сопротивление пластическому деформированию;  $a_i$  – компоненты вектора ускорения;  $\rho$  – плотность;  $v_i$  – компоненты вектора скорости;  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций;  $u_i$  – компоненты вектора перемещений;  $t$  – температура;  $c$  – теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T$  – интенсивность касательных напряжений, определяемая по формуле

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 6\sigma_{zr}^2}; \quad (1.11)$$

$H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига, определяемая по формуле

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\xi_{rr} - \xi_{\theta\theta})^2 + (\xi_{\theta\theta} - \xi_{zz})^2 + (\xi_{zz} - \xi_{rr})^2 + 6\xi_{zr}^2}. \quad (1.12)$$

Данная система уравнений решается при следующих граничных условиях:

– на поверхности  $S_1$ , совпадающей с осью  $z$ , выполняется условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} \right|_{S_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_1} = 0; \quad (1.13)$$

– на поверхности  $S_2$  задана скорость волочения проволоки:

$$v\vec{n}|_{S_1} = v_B; \quad (1.14)$$

– на свободной поверхности проволоки  $S_3$  отсутствуют внешнее давление и теплообмен с окружающей средой:

$$\sigma\vec{n}|_{S_3} = 0; \quad \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_3} = 0; \quad (1.15)$$

– на поверхности контакта проволоки и волокна  $S_4$  выполняется условие обтекания волокна материалом проволоки, действуют силы трения Амонтона–Кулона и распределенный источник тепловой энергии, равный 50 % работы сил трения:

$$v\vec{n}|_{S_4} = 0; \quad (1.16)$$

$$\vec{\tau}|_{S_4} = f \left| \sigma\vec{n}|_{S_4} \right| \frac{\vec{v}|_{S_4}}{|\vec{v}|_{S_4}}; \quad (1.17)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_4} = 0,5 \left| \vec{\tau}|_{S_4} \right| |\vec{v}|_{S_4}; \quad (1.18)$$

– на поверхности  $S_5$  задано распределение температуры:

$$t|_{S_5} = t_0, \quad (1.19)$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $\vec{n}$  – направление нормали;  $v_B$  – скорость волочения проволоки;  $\vec{\tau}$  – касательное напряжение;  $f$  – коэффициент трения;  $t_0$  – температура окружающей проволоку среды.

### 1.3. Формулировка исходных данных для расчета напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации

Зависимость сопротивления пластическому деформированию (рис. 1.2) от деформации материала проволоки получили аппроксимацией методом наименьших квадратов экспериментальных данных, полученных при стандартных испытаниях проволоки из стали 90 на растяжение, с последующей корректировкой по скорости деформации на основе данных [5]:

$$\sigma_s = (1,374 + 0,114 \lg(\xi_i)) (999 + 544,31 \ln(\varepsilon_i)), \text{ МПа}, \quad (1.20)$$

где  $\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_{rr} - \xi_{\theta\theta})^2 + (\xi_{\theta\theta} - \xi_{zz})^2 + (\xi_{zz} - \xi_{rr})^2 + 6\xi_{zr}^2}$  – интенсивность скоростей деформаций;

$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + 6\varepsilon_{zr}^2}$  – интенсивность деформаций.

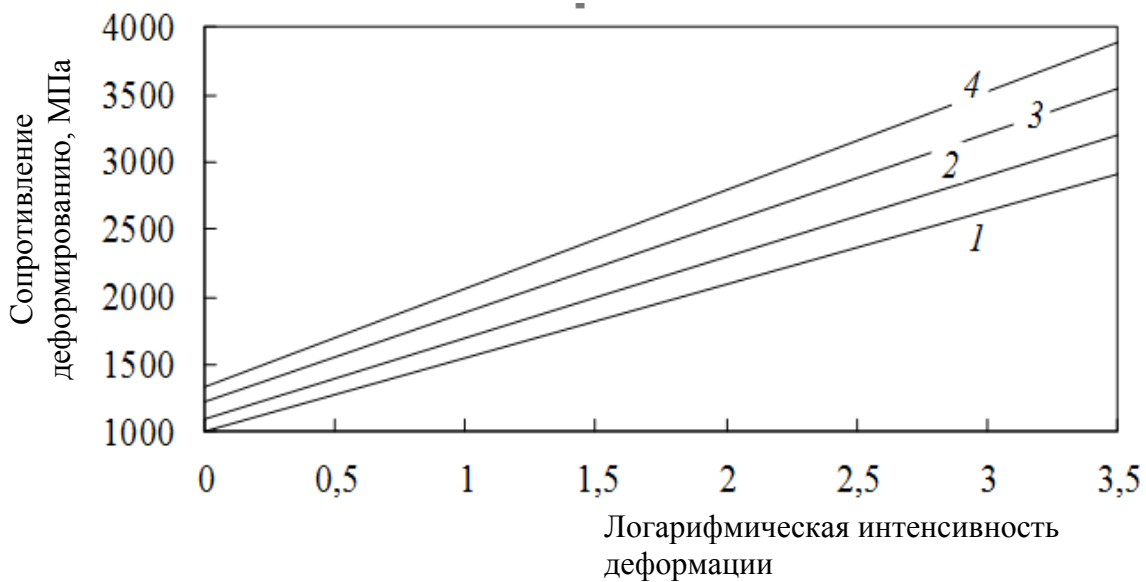


Рис. 1.2. Зависимость сопротивления деформированию  $\sigma_s$  от логарифмической интенсивности деформаций  $\ln(\varepsilon_i)$  для различных интенсивностей скоростей деформаций:

$$1 - \xi_i = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}; \quad 2 - \xi_i = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1};$$

$$3 - \xi_i = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}; \quad 4 - \xi_i = 0,8 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$$

Остальные физико-механические и теплофизические данные, использованные при расчете напряженно-деформированного и температурного состояния проволоки, приведены в табл. 1.1. Геометрические характеристики волокни по переходам волочения представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.1

**Физико-механические и теплофизические данные  
материала проволоки**

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение	Источник литературы
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	7745	[6]
Модуль Юнга	$E$	ГПа	207	
Коэффициент Пуассона	$\mu$	–	0,3	–
Теплоемкость	$c$	Дж/(кг · °С)	477	[6]
Теплопроводность	$\lambda$	Вт/(м · °С)	49	
Коэффициент трения	$f$	–	0,2–0,5	–
Скорость волочения	$v_B$	м/с	5–8	

Таблица 1.2

**Геометрические характеристики волокни**

Номер п/п	$d$ , мм	$\alpha$ , °	$l$ , мм	Номер п/п	$d$ , мм	$\alpha$ , °	$l$ , мм
1	2,23	5	0,5d	15	0,698	6	0,4d
2	2,01	5	0,5d	16	0,666	6	0,4d
3	1,821	5	0,5d	17	0,633	6	0,4d
4	1,65	5	0,5d	18	0,604	6	0,4d
5	1,5	5	0,5d	19	0,571	6	0,4d
6	1,36	6	0,4d	20	0,545	6	0,4d
7	1,235	6	0,4d	21	0,515	6	0,4d
8	1,122	6	0,4d	22	0,494	6	0,4d
9	1,02	6	0,4d	23	0,467	6	0,4d
10	0,93	6	0,4d	24	0,448	6	0,4d
11	0,85	6	0,4d	25	0,435	6	0,4d
12	0,814	6	0,4d	26	0,42	6	0,4d
13	0,771	6	0,4d	27	0,412	6	0,4d
14	0,738	6	0,4d				

*Примечание.*  $d$  – диаметр калибрующей зоны волокни;  $\alpha$  – угол конуса деформирующей зоны волокни;  $l$  – длина калибрующей зоны волокни.



#### 1.4. Результаты расчета режимов многократного волочения с использованием метода конечных элементов

С помощью метода конечных элементов (МКЭ) был проведен расчет напряженно-деформированных состояний (НДС) и температурных полей (ТП) для контактных и внеконтактных зон объемов очагов деформации проволоки в волоках для переходов волочения действующей технологии «тонкого» волочения проволоки сталь 90 с конечным диаметром 0,41 мм, проводимого со скоростью 5 м/с. Коэффициент трения принят равным 0,05, как соответствующий общепринятым нормам волочения высокоуглеродистой стали на стане со скольжением с использованием смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Результаты этого расчета позволили получить режимы волочения, приведенные в табл. 1.3, их интерпретация представлена на рис. 1.3а–1.3е.

Таблица 1.3

**Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые  
параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм  
из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 5 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,05$**

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
1	2,230	0,17	0,19	0,19	1984,4	153,8	113,8
2	2,010	0,21	0,21	0,40	1906,0	174,8	127,6
3	1,821	0,26	0,20	0,59	1577,6	183,5	130,1
4	1,650	0,31	0,20	0,79	1493,6	196,4	136,0
5	1,500	0,38	0,19	0,98	1221,6	206,3	137,4
6	1,360	0,46	0,20	1,18	1058,8	221,5	147,9
7	1,235	0,56	0,19	1,37	902,8	234,1	152,2
8	1,122	0,67	0,19	1,56	801,2	247,1	157,5
9	1,020	0,82	0,19	1,75	701,2	260,8	162,9
10	0,930	0,98	0,18	1,94	607,6	270,6	164,6
11	0,850	1,17	0,18	2,12	518,4	282,5	167,5
12	0,814	1,28	0,09	2,20	280,0	220,4	99,4
13	0,771	1,43	0,11	2,31	308,0	243,0	120,1
14	0,738	1,56	0,09	2,40	248,8	242,1	100,5
15	0,698	1,74	0,11	2,51	264,4	259,7	126,0

Окончание табл. 1.3

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\sum e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
16	0,666	1,91	0,09	2,61	220,4	259,7	111,0
17	0,633	2,12	0,10	2,71	222,4	272,2	118,9
18	0,604	2,33	0,09	2,80	186,8	276,8	113,3
19	0,571	2,60	0,11	2,91	192,0	296,6	132,3
20	0,545	2,86	0,09	3,01	150,8	287,8	115,0
21	0,515	3,20	0,11	3,12	158,4	316,8	135,6
22	0,494	3,48	0,08	3,20	104,4	306,5	104,0
23	0,467	3,89	0,11	3,32	96,0	335,4	138,1
24	0,448	4,23	0,08	3,40	68,0	325,6	105,8
25	0,435	4,49	0,06	3,46	43,2	303,9	78,7
26	0,420	4,81	0,07	3,53	33,6	316,8	90,5
27	0,412	5,00	0,04	3,57	31,6	271,1	57,2

В табл. 1.3 приведены следующие параметры:

$D_i$  – диаметр волокна в калибрующей зоне, мм;

$e_i$  – логарифмическая (истинная) степень деформации:

$$e_i = \ln \left( \frac{D_{i-1}^2}{D_i^2} \right), \quad (1.21)$$

где  $i$  – номер перехода волочения;  $\sum e_i$  – суммарная логарифмическая (истинная) степень деформации, накопленная к  $i$ -му переходу волочения:

$$\sum e_i = \sum_{i=1}^n e_i; \quad (1.22)$$

$V_i$  – скорость волочения, м/с;  $P_i$  – усилие волочения, Н;  $T_i^{\max}$ ,  $T_i^{\min}$  – максимальная и минимальная температура в проволоке на выходе из волокна, °С.

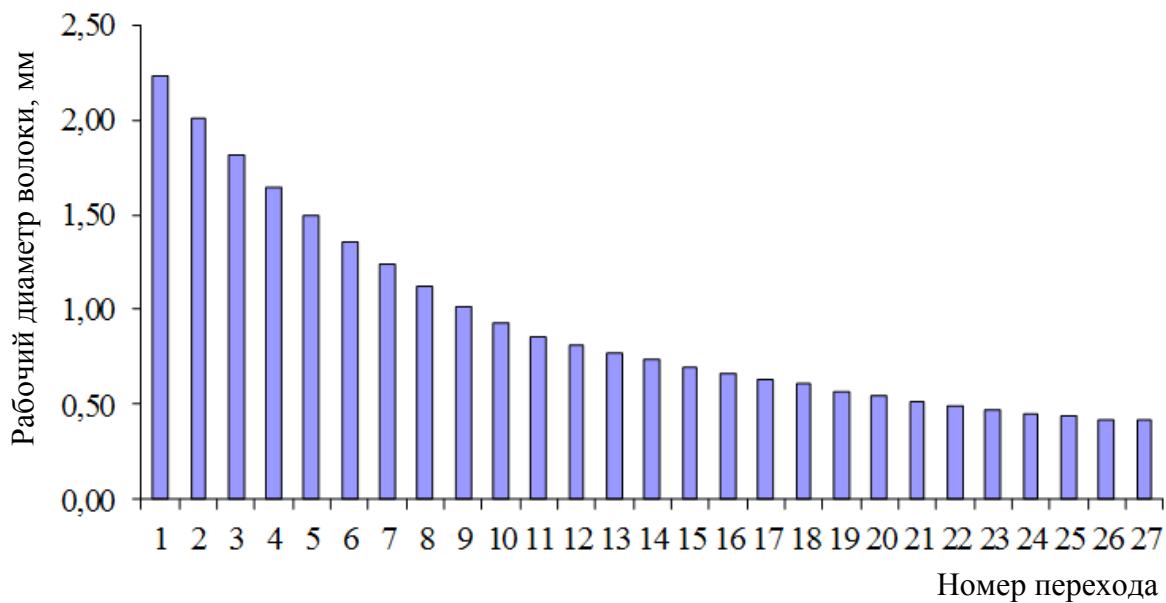


Рис. 1.3а. Режимы волочения с конечной скоростью 5 м/с (диаметры волок по переходам волочения)

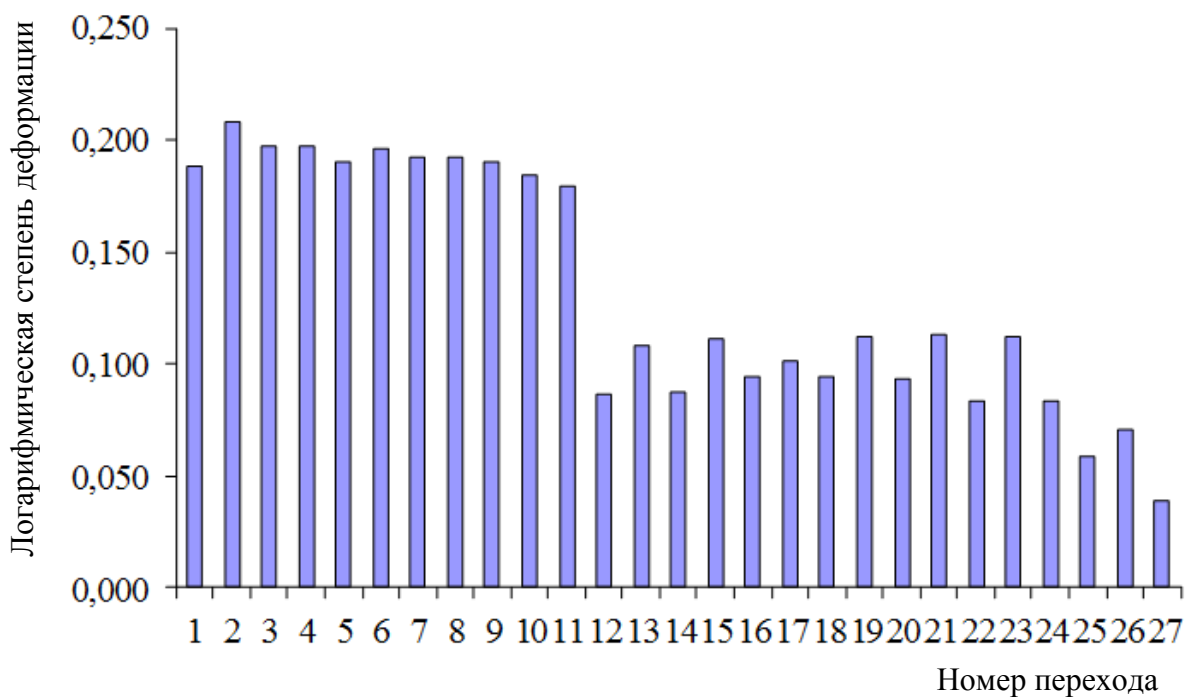


Рис. 1.3б. Режимы волочения с конечной скоростью 5 м/с (логарифмическая, или истинная степень деформации проволоки по переходам волочения)

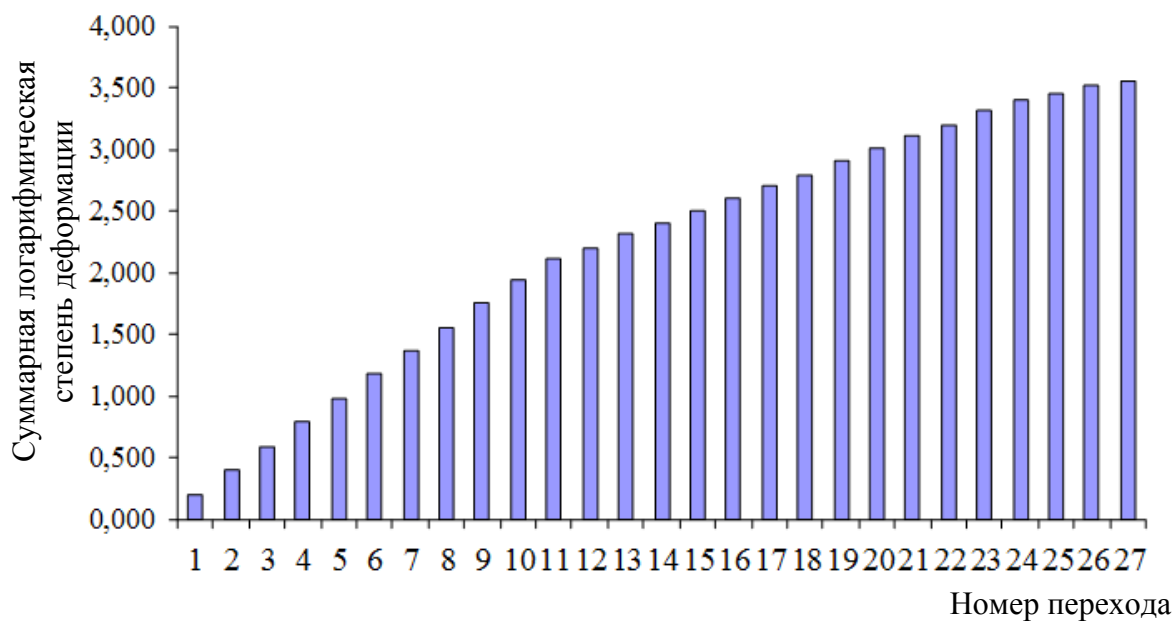


Рис. 1.3в. Режимы волочения с конечной скоростью 5 м/с (суммарная логарифмическая степень деформации проволоки по переходам волочения)

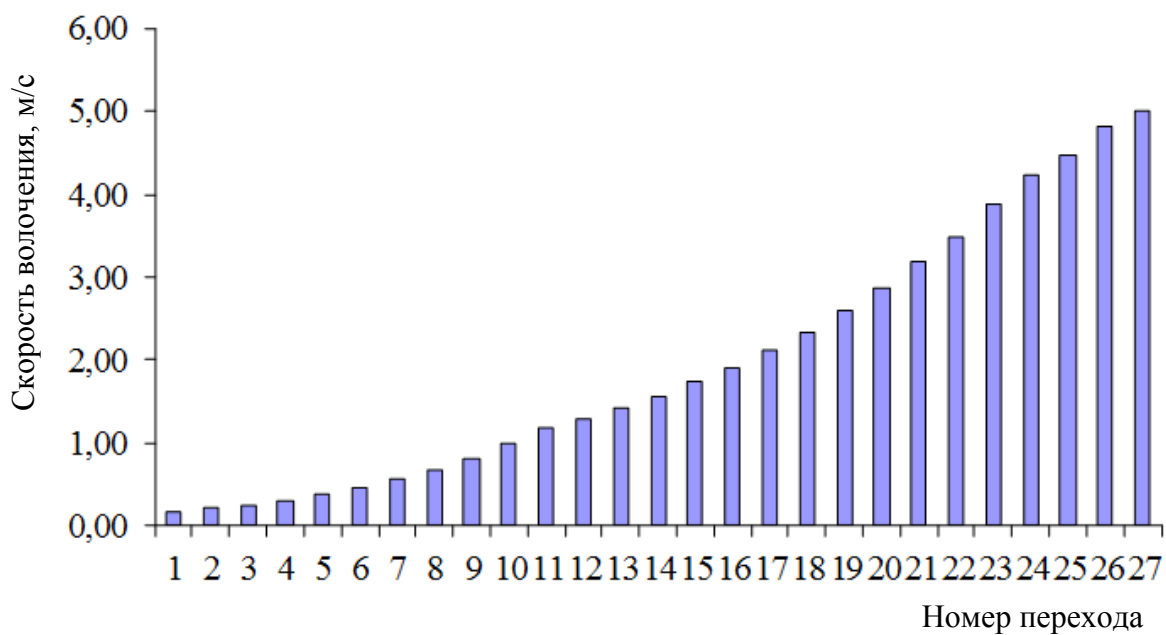


Рис. 1.3г. Режимы волочения с конечной скоростью 5 м/с (скорость волочения проволоки по переходам волочения)

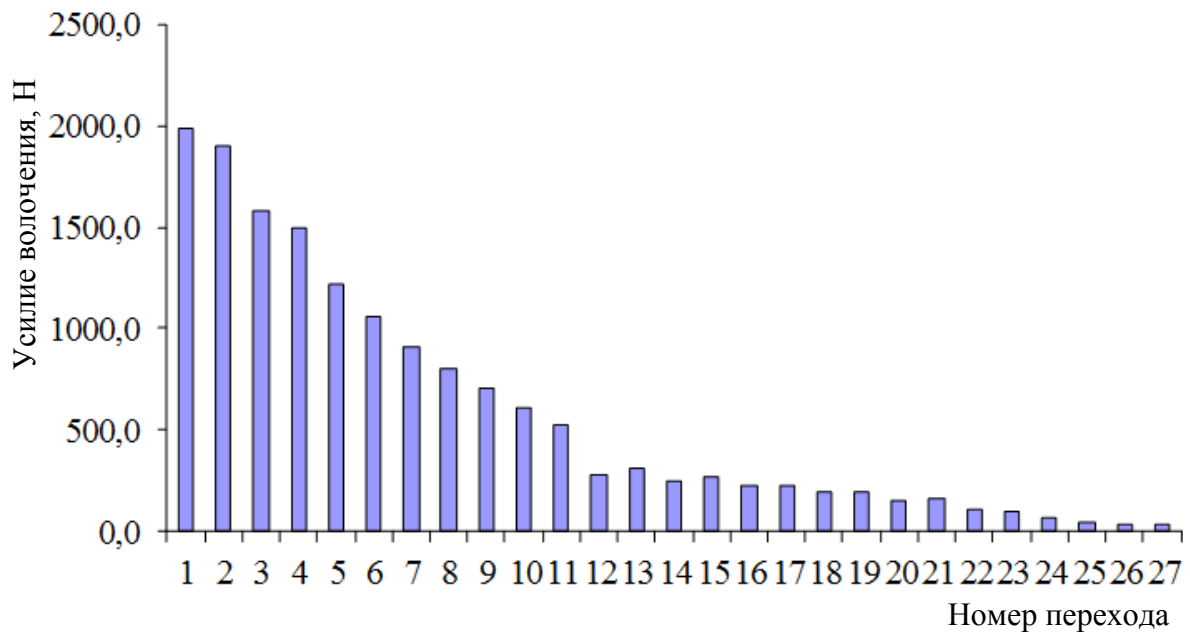


Рис. 1.3д. Режимы волочения с конечной скоростью 5 м/с (усилие волочения проволоки по переходам волочения)

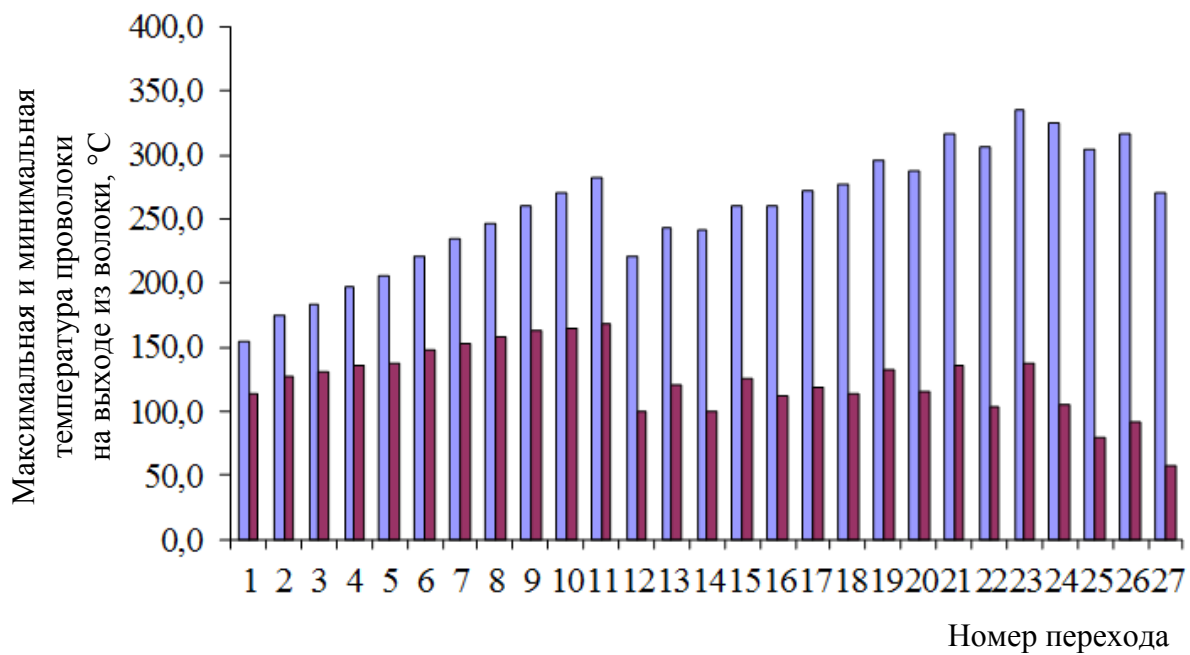


Рис. 1.3е. Режимы волочения с конечной скоростью 5 м/с (максимальная (серый цвет) и минимальная (черный цвет) температура проволоки на выходе из волоки)

С помощью МКЭ был проведен второй расчет НДС и ТП для контактных и внеконтактных зон объемов очагов деформации проволоки в волоках для каждого перехода волочения с промежуточными диаметрами волок, соответствующими действующей технологии «тонкого» волочения проволоки сталь 90 с конечным диаметром 0,41 мм, коэффициентом контактного трения 0,05. Но в этом расчете скорость волочения равна 8 м/с. Результаты расчета позволили получить режимы волочения, приведенные в табл. 1.4, их интерпретация представлена на рис. 1.4а–1.4е. Значения параметров волочения в табл. 1.4 аналогичны значениям этих параметров для табл. 1.3.

Таблица 1.4

**Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с при коэффициенте трения  $f=0,05$**

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
1	2,23	0,273	0,188	0,188	1960,8	171,0	108,2
2	2,01	0,336	0,208	0,396	1773,2	191,2	121,5
3	1,821	0,410	0,197	0,593	1528,8	202,6	125,3
4	1,65	0,499	0,197	0,791	1370,4	218,6	131,8
5	1,5	0,604	0,191	0,981	1199,6	232,2	135,3
6	1,36	0,734	0,196	1,177	1008,0	247,5	147,8
7	1,235	0,890	0,193	1,370	874,8	265,0	152,9
8	1,122	1,079	0,192	1,562	733,6	281,5	158,7
9	1,02	1,305	0,191	1,753	652,4	299,1	164,1
10	0,93	1,570	0,185	1,937	576,0	308,5	166,7
11	0,85	1,880	0,180	2,117	494,0	324,0	169,1
12	0,814	2,049	0,087	2,204	282,4	261,2	105,4
13	0,771	2,284	0,109	2,312	263,6	286,5	122,8
14	0,738	2,493	0,087	2,400	226,8	276,4	107,9
15	0,698	2,787	0,111	2,511	206,8	304,7	128,1
16	0,666	3,062	0,094	2,605	213,6	303,1	114,5
17	0,633	3,389	0,102	2,707	211,6	318,4	124,8
18	0,604	3,722	0,094	2,801	188,0	322,0	117,0

Окончание табл. 1.4

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
19	0,571	4,165	0,112	2,913	168,8	348,4	135,7
20	0,545	4,572	0,093	3,006	142,4	342,1	119,7
21	0,515	5,120	0,113	3,119	128,4	372,3	139,8
22	0,494	5,565	0,083	3,203	107,6	352,1	110,9
23	0,467	6,227	0,112	3,315	98,0	393,7	142,4
24	0,448	6,766	0,083	3,398	71,2	373,3	112,6
25	0,435	7,176	0,059	3,457	70,4	371,3	84,9
26	0,42	7,698	0,070	3,527	59,2	373,9	99,0
27	0,412	8,000	0,038	3,566	46,4	350,3	60,7

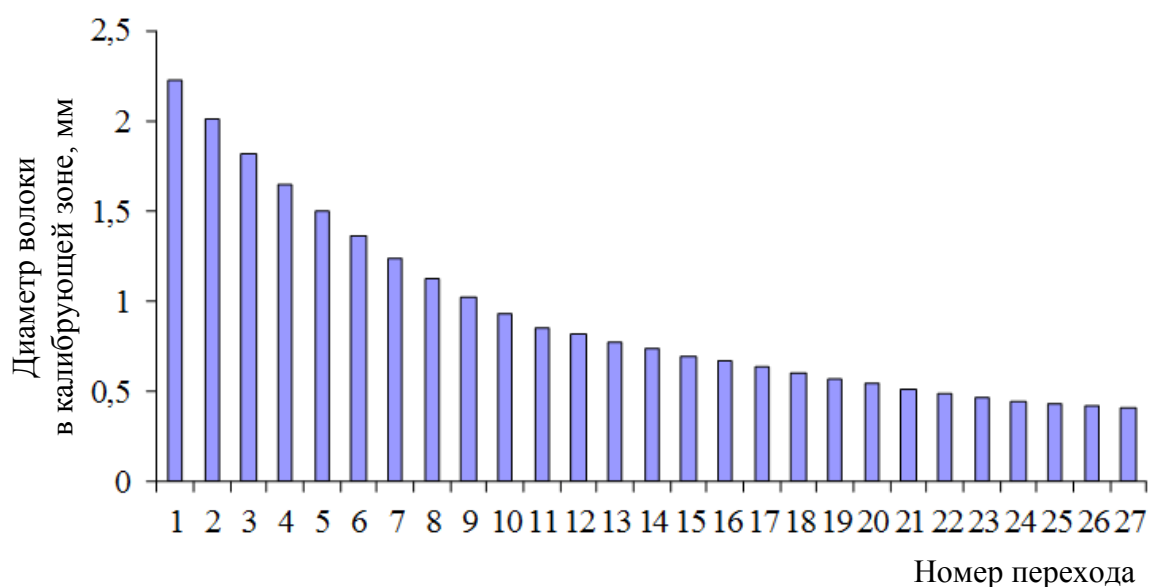


Рис. 1.4а. Режимы волочения с конечной скоростью 8 м/с (диаметры волок по переходам волочения)

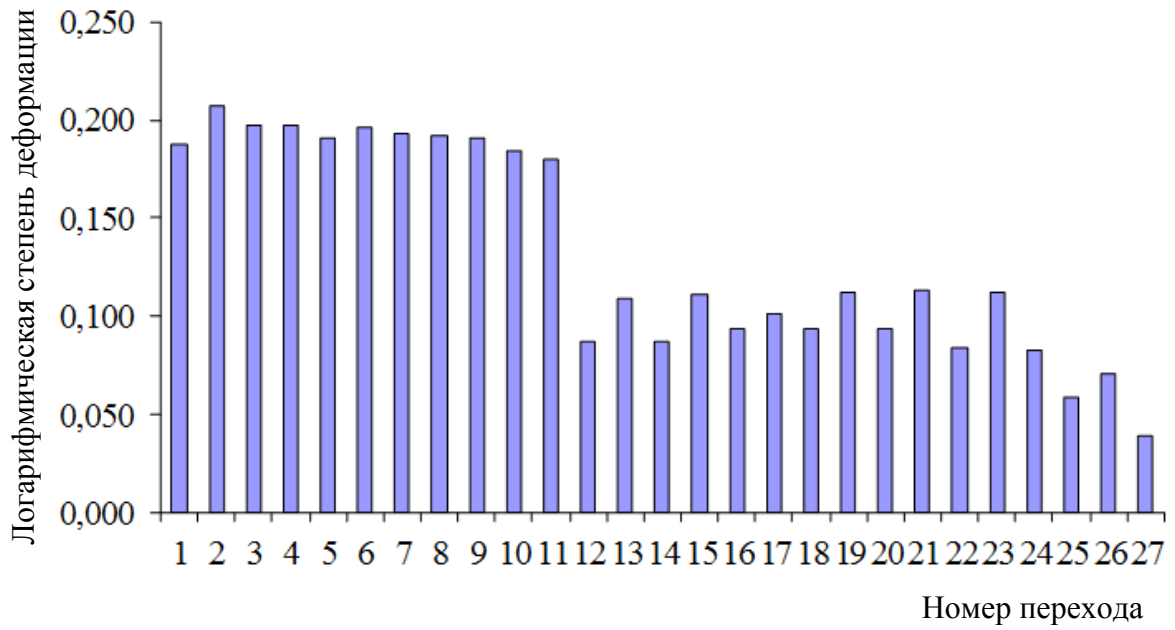


Рис. 1.4б. Режимы волочения с конечной скоростью 8 м/с  
(логарифмическая степень деформации проволоки по переходам волочения)

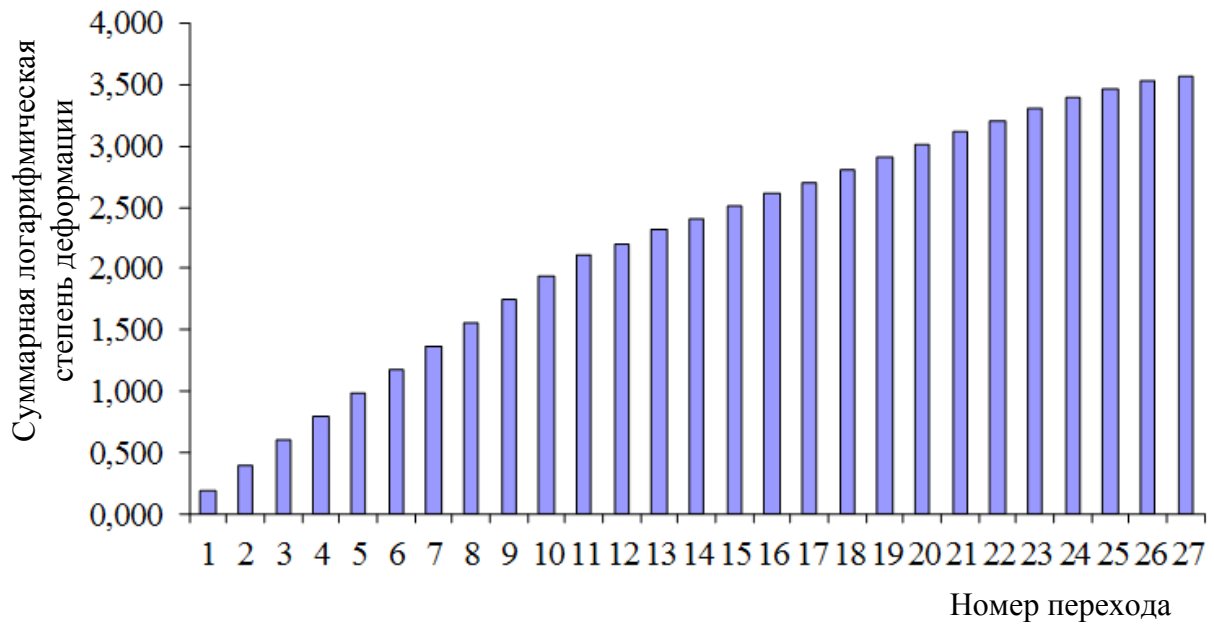


Рис. 1.4в. Режимы волочения с конечной скоростью 8 м/с  
(суммарная логарифмическая степень деформации проволоки по переходам волочения)



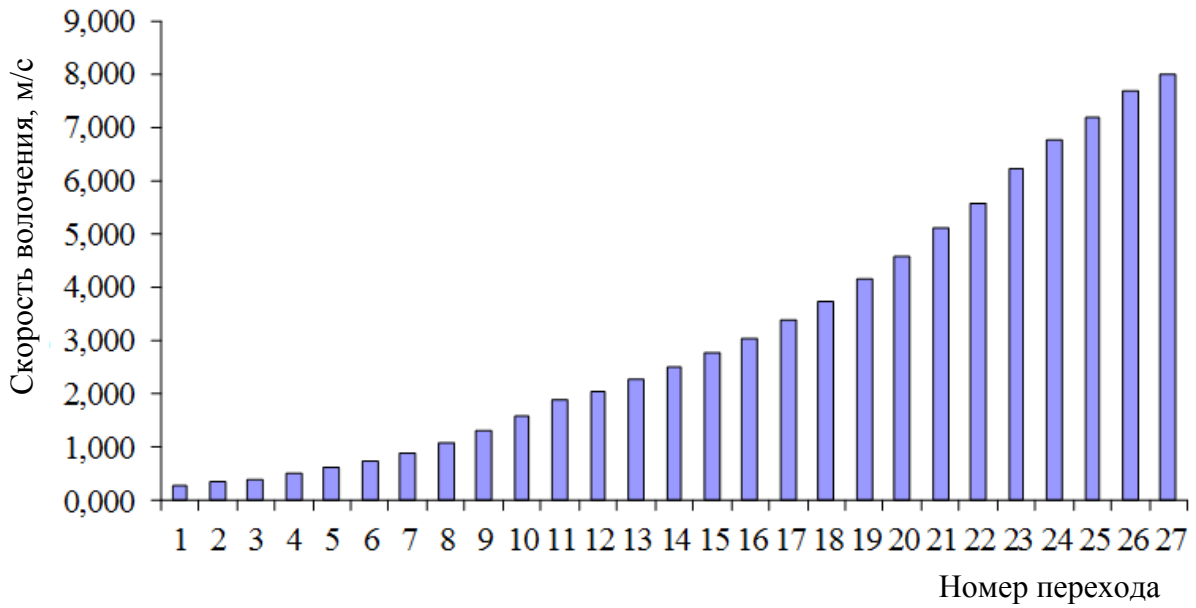


Рис. 1.4г. Режимы волочения с конечной скоростью 8 м/с (скорость волочения проволоки по переходам волочения)

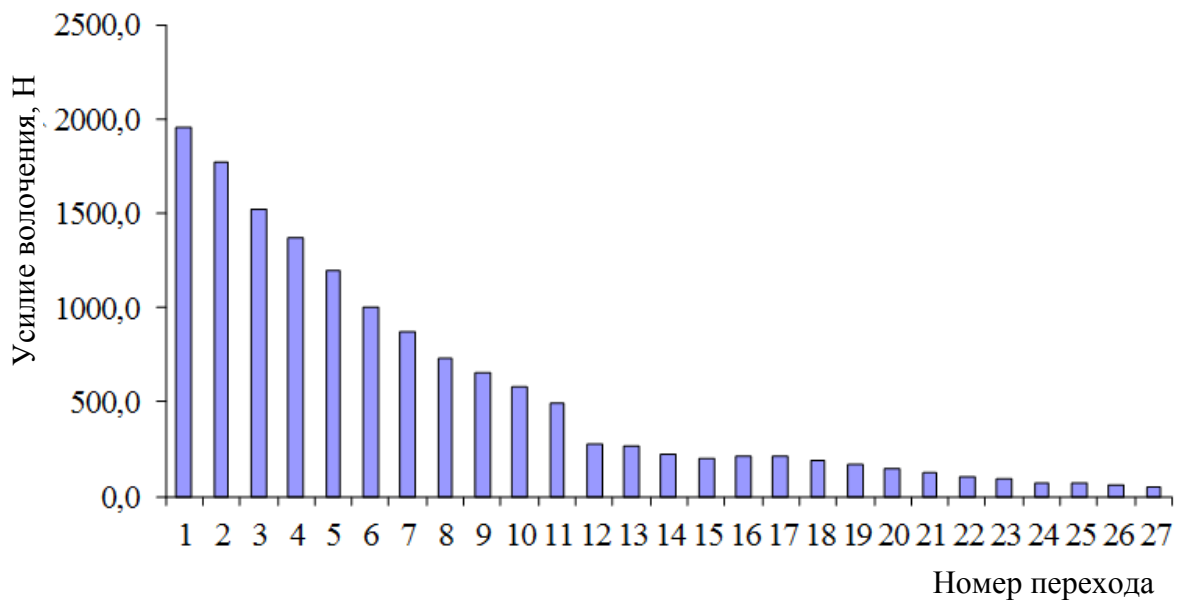


Рис. 1.4д. Режимы волочения с конечной скоростью 8 м/с (усилие волочения по переходам волочения)

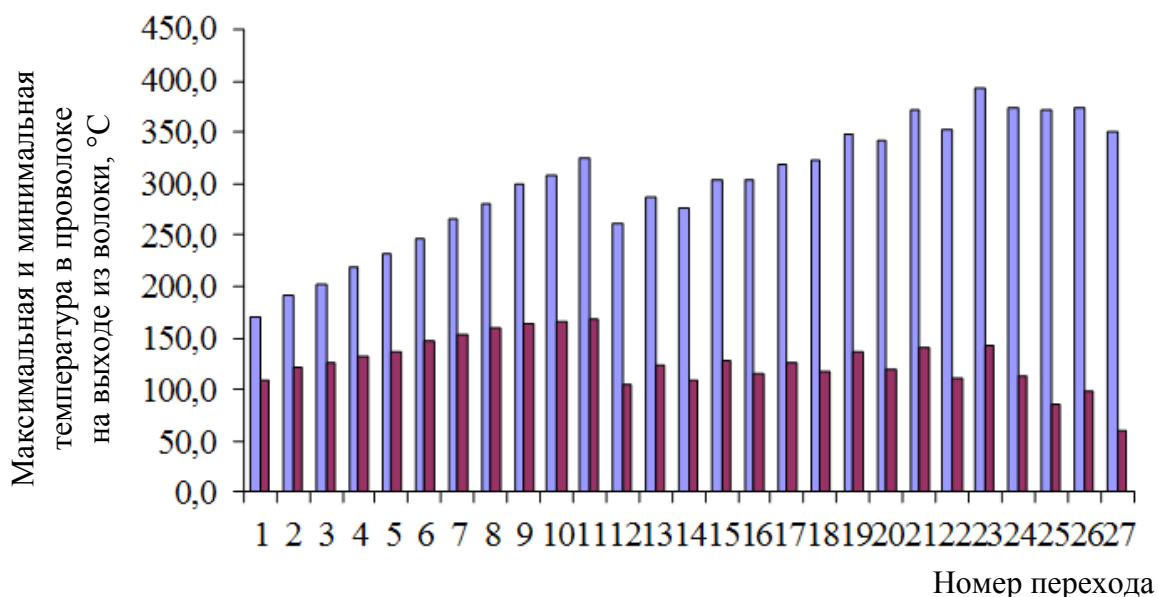


Рис. 1.4е. Режимы волочения с конечной скоростью 8 м/с (максимальная (серый цвет) и минимальная (черный цвет) температура проволоки на выходе из волоки)

Далее с помощью МКЭ был проведен третий расчет НДС и ТП для контактных и внеконтактных зон объемов очагов деформации проволоки в волоках для каждого перехода волочения с промежуточными диаметрами волок, соответствующими действующей технологии «тонкого» волочения проволоки сталь 90 с конечным диаметром 0,41 мм. Но в этом расчете скорость волочения равна 8 м/с, а коэффициент трения снижен до 0,02, как минимальная величина, которая может быть достигнута с использованием специальных мероприятий по снижению контактного трения. Результаты расчета позволили получить режимы волочения, приведенные в табл. 1.5, их интерпретация представлена на рис. 1.5а–1.5е. Значения параметров волочения в табл. 1.5 аналогичны значениям этих параметров для табл. 1.4.

Таблица 1.5

**Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,02$**

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °C	$T_i^{\min}$ , °C
1	2,23	0,273	0,188	0,188	1584,4	134,9	109,9
2	2,01	0,336	0,208	0,396	1448,0	153,5	123,1

Окончание табл. 1.5

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
3	1,821	0,410	0,197	0,593	1196,0	158,4	126,4
4	1,65	0,499	0,197	0,791	1076,4	168,4	133,1
5	1,5	0,604	0,191	0,981	1007,2	175,6	136,6
6	1,36	0,734	0,196	1,177	825,2	191,0	147,5
7	1,235	0,890	0,193	1,370	700,4	200,0	152,3
8	1,122	1,079	0,192	1,562	646,0	209,4	158,7
9	1,02	1,305	0,191	1,753	498,4	219,8	163,7
10	0,93	1,570	0,185	1,937	470,0	223,7	165,7
11	0,85	1,880	0,180	2,117	389,6	229,9	169,3
12	0,814	2,049	0,087	2,204	210,0	172,6	102,2
13	0,771	2,284	0,109	2,312	170,4	188,2	121,9
14	0,738	2,493	0,087	2,400	168,4	179,7	105,4
15	0,698	2,787	0,111	2,511	141,6	198,5	127,4
16	0,666	3,062	0,094	2,605	118,4	190,5	113,5
17	0,633	3,389	0,102	2,707	94,0	200,5	122,1
18	0,604	3,722	0,094	2,801	82,4	200,0	115,9
19	0,571	4,165	0,112	2,913	104,0	217,9	134,6
20	0,545	4,572	0,093	3,006	92,8	210,8	118,0
21	0,515	5,120	0,113	3,119	90,4	236,8	139,5
22	0,494	5,565	0,083	3,203	74,4	210,8	110,3
23	0,467	6,227	0,112	3,315	70,4	240,4	141,1
24	0,448	6,766	0,083	3,398	51,6	222,4	111,8
25	0,435	7,176	0,059	3,457	45,6	212,2	84,2
26	0,42	7,698	0,070	3,527	47,2	224,2	97,9
27	0,412	8,000	0,038	3,566	22,4	197,4	59,0

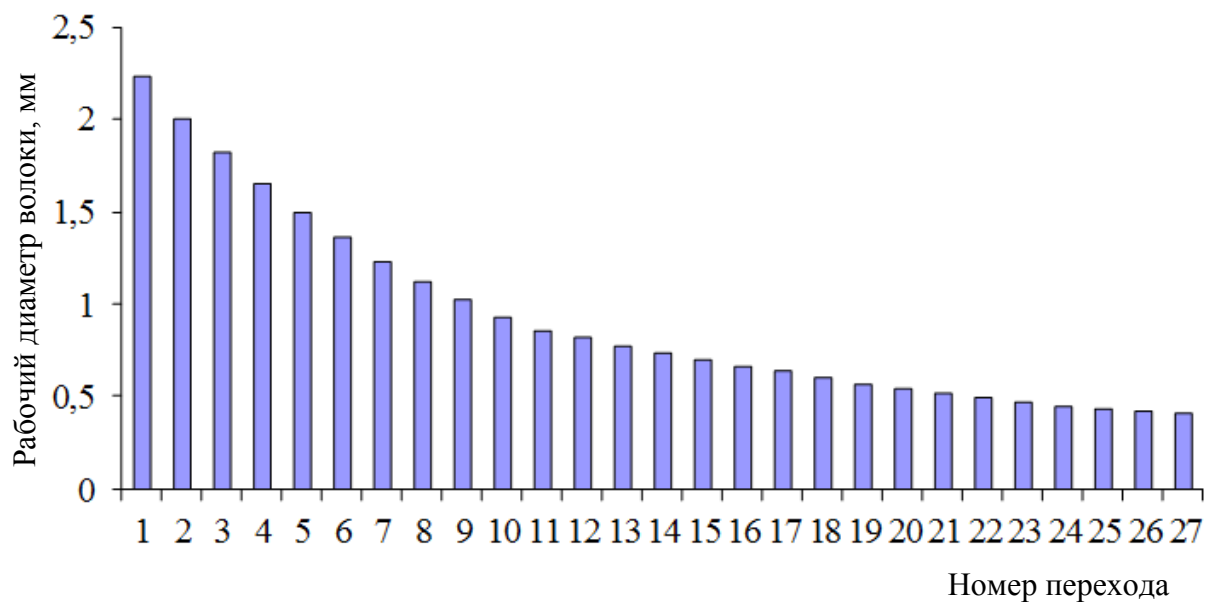


Рис. 1.5а. Режимы волочения с конечной скоростью волочения 8 м/с при  $f = 0,02$  (диаметры волок по переходам волочения)

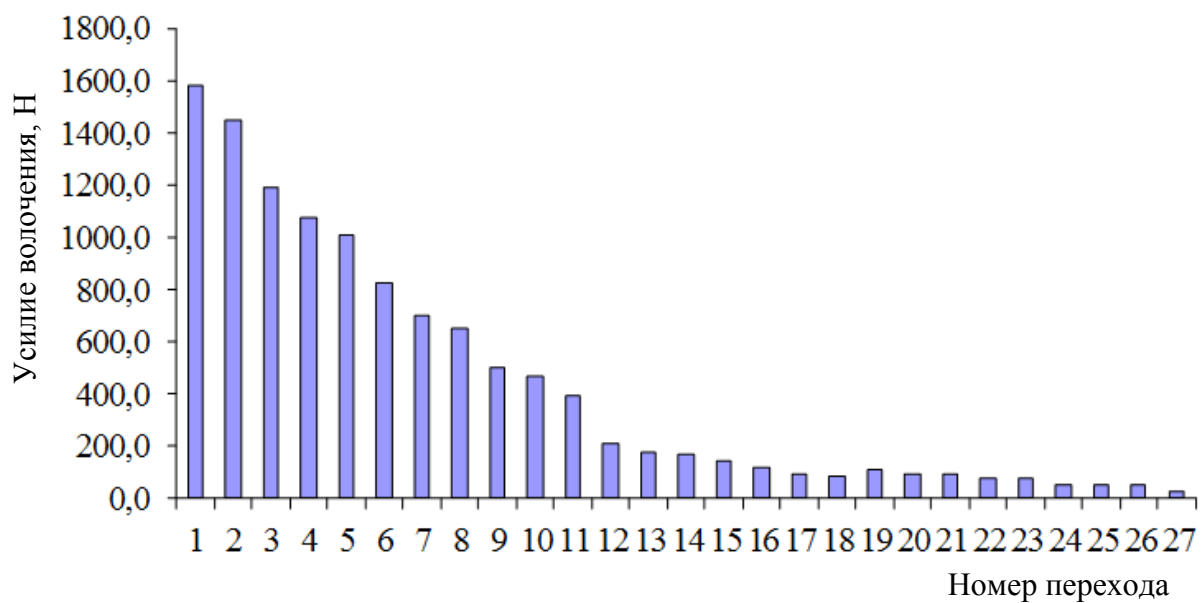
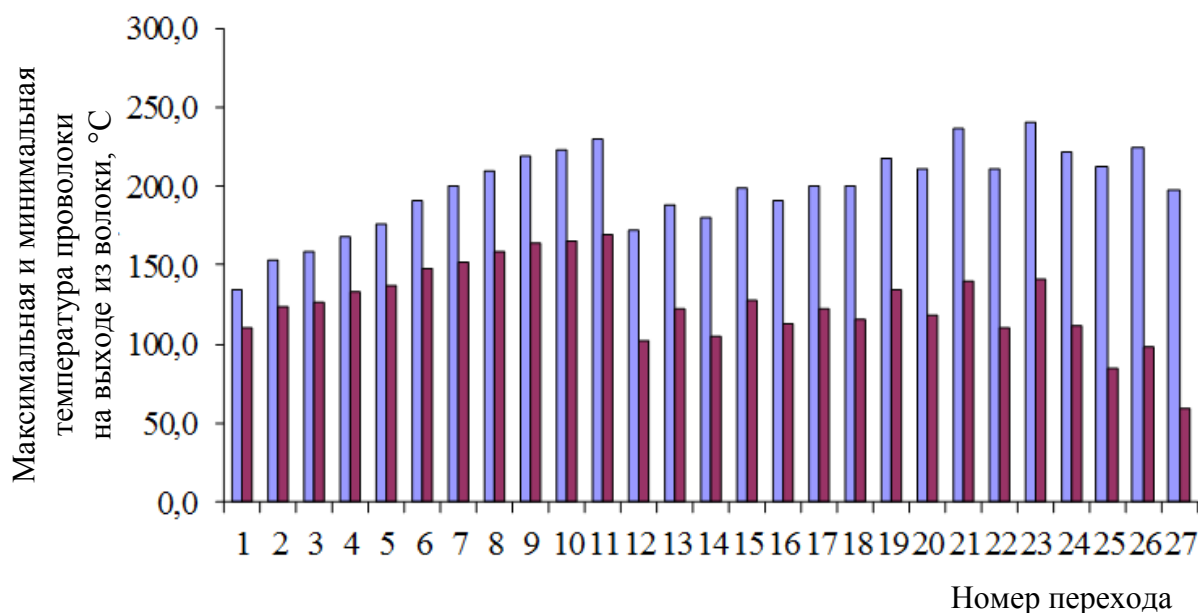


Рис. 1.5б. Режимы волочения с конечной скоростью волочения 8 м/с при  $f = 0,02$  (усилие волочения по переходам волочения)



*Рис. 1.5в.* Режимы волочения с конечной скоростью волочения 8 м/с при  $f = 0,02$  (максимальная (серый цвет) и минимальная (черный цвет) температура проволоки на выходе из волоки)

### **1.5. Анализ результатов расчета температурного режима многократного волочения с использованием метода конечных элементов**

Анализ рис. 1.3а показывает, что в действующей технологии диаметры волок выбраны рационально, так как имеет место закономерное снижение интенсивности уменьшения диаметров по мере движения проволоки к последней волоке. Но в соответствии с рис. 1.3б истинная деформация проволоки по переходам изменяется с явным наличием двух стадий волочения: 1-я стадия – переходы 1–11, 2-я стадия – переходы 12–27. Рациональнее не создавать такие явно разделенные стадии для повышения равномерности деформации. Суммарная накопленная деформация (рис. 1.3в) и скорость волочения (рис. 1.3г) изменяются рационально. В распределении усилий волочения имеется нерациональный спад значений между 11-м и 12-м переходами, как следствие – нерациональные распределения деформаций. Распределение максимальных величин температур (табл. 1.3, рис. 1.3е) показывает, что существующий режим волочения является по сути предельным по скоро-

стному ограничению. Имеется тенденция роста температур вдоль хода волочения. Большинство значений максимальных температур не превышает 300 °С. Максимальная температура соответствует 23-му проходу волочения и равна 335 °С. Этот анализ показывает на допустимость получения качественной продукции по действующей технологии, но резерв повышения скорости волочения отсутствует без внесения дополнительных изменений в режимы волочения. В связи с предельным режимом волочения любые непрогнозируемые изменения в режиме волочения способны привести к потере качества проволоки.

Последние заключения можно подтвердить, если проанализировать результаты вычислений, приведенных в табл. 1.4. Исходные результаты для этого расчета отличаются от расчета действующей технологии (табл. 1.3) только увеличенной скоростью волочения. Это видно из значений  $D_i$ ,  $e_i$ ,  $\sum e_n$ , которые совпадают с такими же величинами из табл. 1.3. Поэтому вид гистограмм на рис. 1.4а–1.4в не изменился по сравнению с рис. 1.3а–1.3в. Скорость волочения возрастает планомерно и рационально (рис. 1.4г). Сравнительный анализ значений усилий волочения, приведенных в табл. 1.3 и 1.4, а также на гистограммах рис. 1.3д и рис. 1.4д, показывает, что с ростом скорости волочения от 5 до 8 м/с усилие волочения значительно не изменяется. Это объясняется тем, что в модели не учтено изменение значения коэффициента контактного трения от роста скорости волочения, а также тем, что степень упрочнения стали незначительно зависит от скорости деформирования в исследуемом скоростном диапазоне волочения. Величины максимальных температур в проволоке увеличиваются до 393 °С, что свидетельствует о недопустимости практического использования данного режима волочения.

Если в описанном маршруте волочения снизить коэффициент контактного трения до 0,02, то в полученных результатах расчета можно определить значительное снижение максимальной температуры в проволоке: до 240 °С на 23-м переходе волочения. Это определяет практическую допустимость осуществления этого маршрута волочения и констатирует значительное влияние контактного трения на нагрев проволоки. Можно предположить, что необходимо предпринять все возможные мероприятия для минимизации контактного трения. К таким мероприятиям может быть отнесен поиск эффективной вязкости используемой СОЖ, изменение конструкции волочильного инструмента с целью более эффективного захвата СОЖ.

Гистограмма на рис. 1.5а показывает, что диаметры волок не изменены, а рис. 1.5б указывает на значительное снижение усилия волочения.

Гистограмма на рис. 1.5в показывает на значительную неравномерность в распределении максимальных температур в проволоке, что создает проблему в достижении равномерности распределения температур по проходам волочения. Если решить эту проблему, то появится возможность наращивать скорость волочения и при более высоких коэффициентах контактного трения, чем 0,02. Это упрощает практическое осуществление высокоскоростного волочения.

Для увеличения равномерности распределения максимальных температур в проволоке использовался разработанный метод оптимизации маршрута волочения со скольжением. Он основан на изменении диаметров и (или) количества волок с целью достижения требуемого закона изменения максимальной температуры в проволоке по проходам волочения. Этот метод предполагает получение зависимостей для максимальных температур в проволоке аппроксимацией методом наименьших квадратов расчетных данных для максимальных температур в проволоке определенного известного маршрута волочения, который требуется оптимизировать. Известный маршрут (например, действующий) должен быть заранее рассчитан с помощью МКЭ для получения данных, аналогичных табл. 1.3–1.5. Получаемые расчетные зависимости для максимальных температур могут выражаться через разные параметры волочения, например, логарифмическую деформацию, суммарную логарифмическую деформацию, накопленную к определенному проходу волочения.

Используя метод оптимизации маршрута волочения, были аппроксимированы расчетные данные для максимальных температур в проволоке из табл. 1.4. В результате получена зависимость

$$T_i^{\max} = 3,54694 + 726,907e + 90,907 \sum e_i, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.23)$$

На основе расчетных данных для максимальных температур в проволоке из табл. 1.5 получена расчетная зависимость

$$T_i^{\max} = 12,9165 + 723,89e + 52,3294 \sum e_i, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.24)$$

При использовании формулы (1.23) получен маршрут волочения с постоянной максимальной температурой в проволоке (табл. 1.6).

Таблица 1.6

**Маршрут волочения с постоянной максимальной температурой  
волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки  
диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,05$**

$i$	$T_i^{\max}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\mu$	$e$	$D_i, \text{ мм}$
1	339,386	1,5084	0,411	1,9949
2	339,386	1,4415	0,366	1,6616
3	339,386	1,3844	0,325	1,4121
4	339,386	1,3356	0,289	1,2219
5	339,386	1,2936	0,257	1,0743
6	339,386	1,2574	0,229	0,9581
7	339,386	1,2260	0,204	0,8653
8	339,386	1,1987	0,181	0,7903
9	339,386	1,1750	0,161	0,7291
10	339,386	1,1543	0,143	0,6786
11	339,386	1,1361	0,128	0,6367
12	339,386	1,1120	0,114	0,6015
13	339,386	1,1063	0,101	0,5719
14	339,386	1,0940	0,090	0,5468
15	339,386	1,0832	0,080	0,5253
16	339,386	1,0737	0,071	0,5070
17	339,386	1,0653	0,063	0,4912
18	339,386	1,0579	0,056	0,4776
19	339,386	1,0514	0,050	0,4658
20	339,386	1,0456	0,045	0,4555
21	339,386	1,0404	0,040	0,4466
22	339,386	1,0359	0,035	0,4388
23	339,386	1,0319	0,031	0,4319
24	339,386	1,0283	0,028	0,4259
25	339,386	1,0251	0,025	0,4207
26	339,386	1,0223	0,022	0,4161
27	339,386	1,0198	0,020	0,412

Примечание.  $\mu$  – вытяжка проволоки,  $\mu_i = \left( \frac{D_{i-1}^2}{D_i^2} \right)$ .



Анализируя значения  $\mu$  и  $e$  для переходов волочения, можно сделать заключение о недопустимо больших их значениях на начальных переходах волочения. Значения максимальных температур также не удалось снизить до требуемого уровня.

Поэтому, используя формулу (1.24), получаем маршрут волочения с постоянной максимальной температурой в проволоке (табл. 1.7).

Таблица 1.7

**Маршрут волочения с постоянной максимальной температурой  
волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки  
диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,02$**

$i$	$T_i^{\max}, ^\circ\text{C}$	$\mu$	$e$	$D_i, \text{мм}$
1	207	1,3277	0,283	2,1126
2	207	1,3026	0,264	1,863
3	207	1,2796	0,247	1,647
4	207	1,2585	0,230	1,468
5	207	1,2391	0,214	1,319
6	207	1,2213	0,200	1,193
7	207	1,2050	0,186	1,087
8	207	1,1900	0,174	0,100
9	207	1,1761	0,162	0,919
10	207	1,1633	0,151	0,852
11	207	1,1515	0,141	0,794
12	207	1,1406	0,132	0,744
13	207	1,1305	0,123	0,699
14	207	1,1212	0,114	0,660
15	207	1,1046	0,107	0,626
16	207	1,0972	0,099	0,596
17	207	1,0904	0,093	0,569
18	207	1,0904	0,087	0,545
19	207	1,0840	0,081	0,523
20	207	1,0782	0,075	0,504
21	207	1,0727	0,070	0,486
22	207	1,0676	0,065	0,471

Окончание табл. 1.7

$i$	$T_i^{\max}, ^\circ\text{C}$	$\mu$	$e$	$D_i, \text{мм}$
23	207	1,0629	0,061	0,457
24	207	1,0586	0,057	0,444
25	207	1,0545	0,053	0,432
26	207	1,0508	0,050	0,422
27	207	1,0473	0,046	0,412

В табл. 1.7 значения максимальных температур снижены до приемлемого уровня. Но значения  $\mu$  и  $e$  для начальных переходов волочения недопустимо велики. На практике, с одной стороны, это отразится слишком высокими значениями величин относительного скольжения проволоки по поверхностям тяговых шкивов, а с другой – при определенных условиях волочения возможна обрывность проволоки на волочильном стане вследствие недопустимо малых значений коэффициентов запаса.

В этой связи оптимальным маршрутом волочения можно предположить маршрут по табл. 1.5 с дополнительным введением изменений, которые позволят получить максимальные температуры в допустимом диапазоне.

### **1.6. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния и распределения температур в очаге деформации методом конечных элементов и их анализ**

Динамическое деформационное старение высокоуглеродистых сталей – физико-химический процесс, степень протекания которого зависит от времени деформирования. При этом смена температурного режима волочения по переходам является эффективным способом варьирования вклада деформационного старения в формирование свойств холоднодеформированной проволоки.

Отличающийся при волочении разогрев поверхностных и центральных слоев проволоки является причиной различной степени старения по сечению металла, что влияет на уровень напряженно-деформированного состояния проволоки и, как следствие, на качество готовой продукции.

Для разработки новых режимов высокоскоростного волочения сверхвысокопрочной проволоки необходим анализ напряженно-деформированного состояния проволоки и температурного режима очага деформации при увеличении скорости ее волочения и уменьшении коэффициента трения. Математические зависимости, используемые для оценки данных условий, представлены выше. Проведенное исследование на теоретическом уровне основано на использовании МКЭ. Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью волочения 5–8 м/с при коэффициенте трения 0,02–0,05 представлены в табл. 1.3–1.5.

Как показывает анализ табл. 1.3 и 1.4, наиболее «тяжелым», с точки зрения тепловыделения в зоне деформации, является 23-й переход действующего маршрута волочения со скоростью 5 м/с, где максимальная температура достигает 335,4 °С. При скорости 8 м/с данная температура увеличивается до 393,7 °С для того же коэффициента трения 0,05, что значительно превосходит температуру максимального развития деформационного динамического старения для патентованной стали 90.

Численный расчет поля температур при волочении проволоки диаметром 0,467 мм (23-й переход) для конечной скорости 5 м/с представлен на рис. 1.6, а для конечной скорости 8 м/с – на рис. 1.7. Расчетные зависимости показывают, что увеличение скорости волочения с 5 до 8 м/с при одинаковом коэффициенте трения  $f = 0,05$ , который соответствует граничному условию трения, ведет к значительному повышению температуры до 396,4 °С на контакте проволока–волока и, как следствие, к интенсивному развитию процесса деформационного динамического старения.

По данным [7], минимум температурной зависимости числа скручиваний для сталей 50, 60 и 70 приходится на температуры волочения 300–400 °С.

Очевидно, что переход на скорость волочения 8 м/с для стали 90 приведет к еще меньшему числу скручиваний, что, в свою очередь, будет способствовать резкому понижению качества готовой продукции и металлокорда.

Поле температур  $T$  при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 3,892 м/с при коэффициенте трения 0,05 представлено на рис. 1.6.

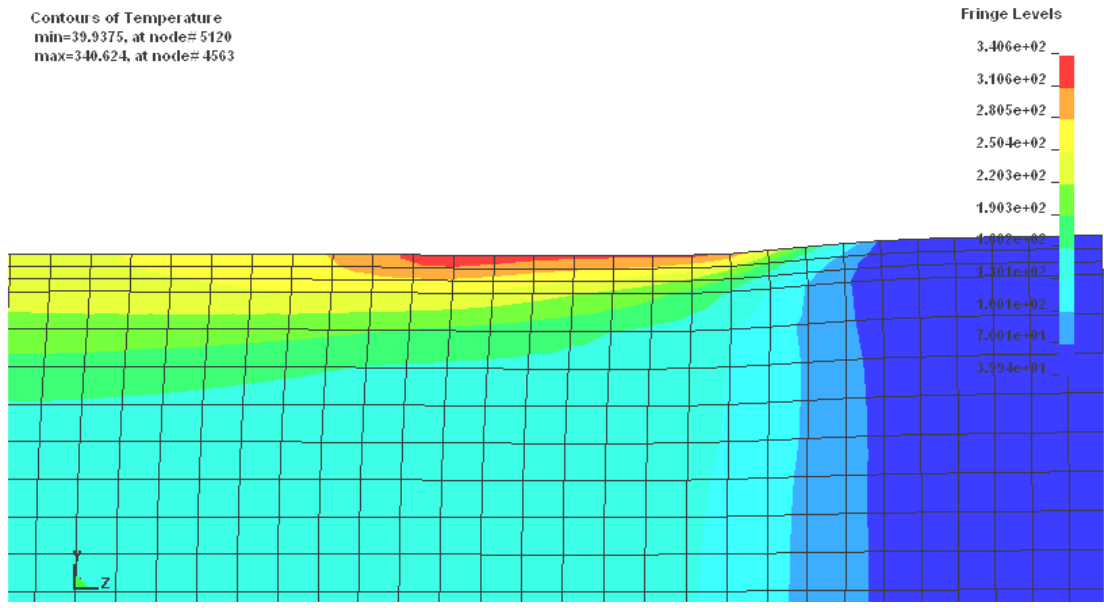


Рис. 1.6. Поле температур  $T$  при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 3,892 м/с при коэффициенте трения 0,05, °С

Анализ рис. 1.6 показывает, что распределение температуры в очаге деформации отличается большей неравномерностью по сравнению с рис. 1.7, хотя на выходе из калибрующей зоны эта неравномерность несколько выравнивается.

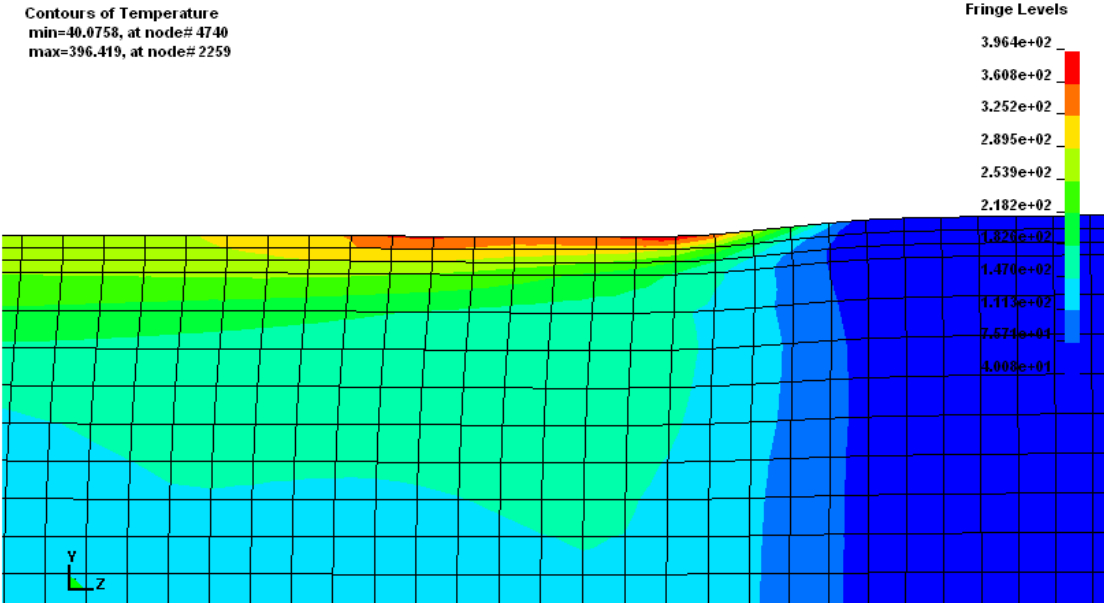


Рис. 1.7. Поле температур  $T$  при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,05, °С

Таким образом, из вышеизложенного можно сделать вывод, что одним из путей снижения температуры в очаге деформации является уменьшение коэффициента трения на контакте проволока–волокна. На рис. 1.8 представлен численный расчет поля температур при волочении проволоки диаметром 0,467 мм (23-й переход) при коэффициенте трения  $f = 0,02$ . Отличительной особенностью результата расчета является резкое снижение температуры в очаге деформации до 241,4 °С, что на 155 °С меньше, чем при коэффициенте трения  $f = 0,05$  и той же скорости волочения 8 м/с. Кроме того, распределение температуры проволоки по сечению после выхода из очага деформации отличается большей равномерностью, что является результатом уменьшения сил трения в очаге деформации и изменения напряженно-деформированного состояния проволоки в сторону снижения остаточных напряжений по сечению.

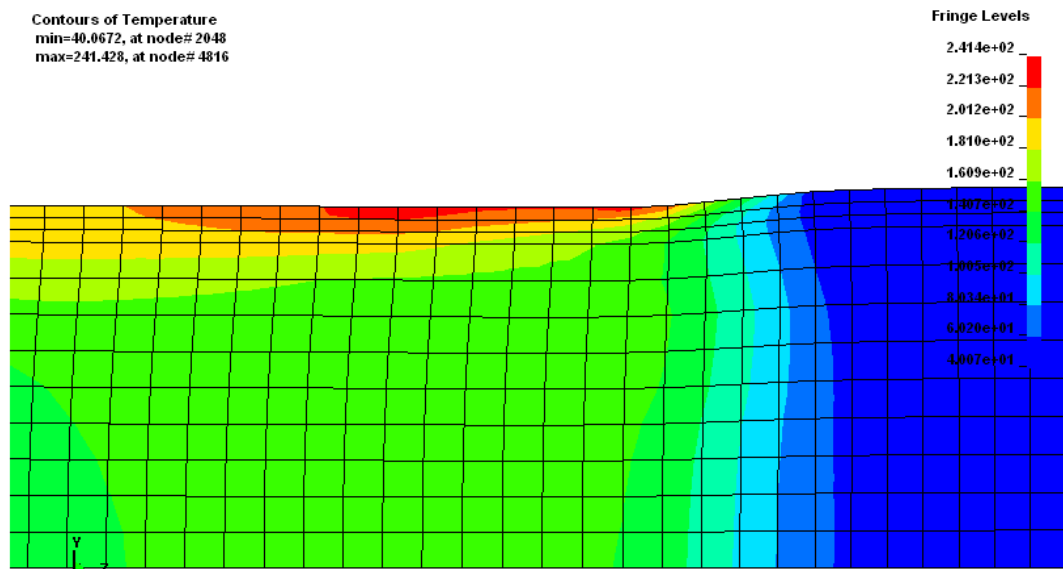


Рис. 1.8. Поле температур  $T$  при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,02, °С

Полное деформированное состояние металла при пластической деформации описывается компонентами тензоров деформации и их скоростей, а также инвариантными характеристиками:  $H$  – интенсивностью скоростей деформаций сдвига и  $G$  – интенсивностью деформаций сдвига, которая характеризует нарастающую, накопленную деформацию. По распределению  $H$  можно точнее указать зоны затрудненной и повышенной интенсивности деформирования, оценить неравномерность проработки металла пластической деформацией.

Компоненты скоростей деформации могут быть получены дифференцированием скоростей перемещений вдоль линии тока, тогда как компоненты тензора деформации и интенсивность деформации сдвига получены интегрированием их приращений вдоль линий тока. При определении  $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$  и  $\varepsilon_{rz}$  учитывается знак соответствующих скоростей деформации.

Распределение компонентов деформированного состояния в начале очага при установившемся течении металла свидетельствует об интенсивном течении периферийных слоев заготовки и затрудненной деформации центральных. Зона повышенной интенсивности деформации поверхностных слоев с увеличением скорости волочения от 5 до 8 м/с при одинаковом коэффициенте трения  $f = 0,05$  распространяется достаточно глубоко в очаге деформации. Уменьшение коэффициента трения до  $f = 0,02$  ведет к выравниванию деформаций  $\varepsilon_{zz}$  по очагу деформации.

Характер изменения компонентов деформированного состояния в остальной части пластической зоны аналогичен известному при волочении через конический канал волокна с калибрующей частью. Однако следует отметить, что размеры этих зон по абсолютной величине компонентов деформации неодинаковы, причем рост скорости волочения и уменьшение трения ведут к выравниванию этих величин и большей проработке металла пластической деформацией. Равномерность распределения по сечению компонентов деформации, наряду с изложенным, может быть увеличена за счет уменьшения угла волокна, уменьшением исходного диаметра заготовки (дробление маршрута волочения) и увеличением степени деформации.

На протяжении пластической зоны компоненты деформации  $\varepsilon_{zz}$  не меняют знак. Наиболее чувствительная к условиям на контакте величина деформации сдвига  $\varepsilon_{rz}$  отражает изменение характера трения. Снижение коэффициента трения с 0,05 до 0,02 при той же скорости понижает абсолютную величину деформации  $\varepsilon_{rz}$ . Варьирование параметрами процесса – степенью деформации, углом волокна, масштабным фактором (диаметром проволоки) – влияет лишь на величину неравномерности деформации, но не изменяет общей картины течения.

Численный расчет поля компонентов тензора деформации  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$  и  $\varepsilon_{rz}$  выявил зоны знакопеременных деформаций.

Распределение компонентов деформаций по сечению отражает общую закономерность картины течения внутри очага деформации. Центральные слои остаются наиболее вытянутыми, поверхностные получают меньшую деформацию удлинения. Особенно эта неравномерность характерна для скорости 5 м/с и коэффициента трения  $f = 0,05$ . Рост скорости волочения до 8 м/с и уменьшение коэффициента трения до  $f = 0,02$  ведет к тому, что проволока из очага деформации выходит практически с одним уровнем деформации  $\varepsilon_{zz}$  по сечению.

Различия в распределении радиальных ( $\varepsilon_{rr}$ ) и тангенциальных ( $\varepsilon_{\theta\theta}$ ) компонентов тензора деформации независимо от технологических параметров настолько незначительны, что позволяют считать  $\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\theta\theta}$ .

В процессе течения металла через волоку величина интенсивности пластической деформации  $\varepsilon_i^p$  нарастает. Однако это увеличение неравномерно для различных слоев заготовки. В пластической зоне имеет место перераспределение деформаций между слоями. В начале пластической зоны деформация поверхностных слоев несколько больше, чем нижележащих. Затем имеются сечения с равной степенью деформации, после которых внутренние слои деформируются в значительно большей степени, чем поверхностные. На выходе из волоки величина деформации центральных слоев вновь остается минимальной. Положение первой зоны деформации отражает изменение силовых условий на контактной поверхности и зависит от параметров процесса. Вторичное перераспределение деформаций и увеличение степени деформации поверхностных слоев связано с влиянием деформации сдвига  $\varepsilon_{rz}$ , так как все нормальные компоненты тензора деформации  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  имеют наибольшее значение в центре очага деформации.

Степень деформации при волочении следует оценивать величиной

$$\Gamma = \int_0^t H d\tau, \quad (1.25)$$

а величину неравномерности формоизменения по сечению можно оценить соотношением значений максимальной и минимальной степени деформации:

$$n = \frac{\Gamma}{\Gamma_{\text{и}}}, \quad (1.26)$$

где  $n$  – коэффициент неравномерности;  $\Gamma_{и}$  – итоговая величина интенсивности деформаций сдвига, подсчитанная по соотношению диаметров заготовки  $D_{n-1}$  и  $D_n$  :

$$\begin{aligned} \Gamma_{и} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + 6\varepsilon_{rz}^2} = \\ &= 2\sqrt{3} \ln\left(\frac{D_{n-1}}{D_n}\right). \end{aligned} \quad (1.27)$$

Во всех случаях деформации  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$  максимальны в центре. Следовательно, неравномерность деформации определяется главным образом величиной сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{rz}$ . Очевидно, что те параметры, которые влияют на величину деформаций сдвига, будут определять и степень неравномерности деформаций. Действительно, уменьшение угла волоки и увеличение степени деформации значительно снижают неравномерность формоизменения по сечению. Неравномерность деформации в непосредственной близости от оси невелика. По мере удаления от оси неравномерность увеличивается, достигая максимума на поверхности проволоки.

Напряженное состояние металла в процессе истечения его через коническую волоку зависит от многих факторов – геометрии и формы волоки, условий трения на контакте металла и инструмента, свойств обрабатываемого металла, скорости деформирования.

В данном случае численный расчет компонентов напряженного состояния, как и деформированного, выполнен для стационарной стадии процесса с использованием МКЭ. В расчетах учитывали упрочнение металла при деформировании и влияние скорости деформации на величину сопротивления деформированию.

В результате численных расчетов определяли поля значений  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$  и  $\sigma_{rz}$  в пластической области. Напряженное состояние определяется главным образом кинематикой процесса истечения и силовыми граничными условиями. Поэтому очевидно, что от изменения параметров процесса (скорости волочения, коэффициента трения) будет непосредственно зависеть характер распределения напряжений в металле.

Продольные напряжения  $\sigma_{zz}$  независимо от условий волочения знакопеременны. Однако неравномерность распределения  $\sigma_{zz}$  при волочении со скоростью 5 м/с и коэффициенте трения  $f = 0,05$  достаточно высокая по сравнению со скоростью 8 м/с и  $f = 0,02$ .



Распределение напряжений  $\sigma_{zz}$  по поперечному сечению в значительной мере зависит от параметров процесса волочения.

Распределение радиальных ( $\sigma_{rr}$ ) и окружных ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) напряжений в очаге деформации показывает их приближенное равенство во всем объеме пластической зоны.

Характер изменения  $\sigma_{rz}$  вдоль пластической зоны, как и скорости деформации сдвига, зависит от геометрических условий волочения. Варьирование параметров процесса, которое приводит к изменению силовых условий на контакте с волокой, изменяет распределение касательных напряжений в пластической зоне.

Следует отметить, что силы трения на контакте оказывают большое влияние на схему напряженного состояния. Общий характер распределения продольных, радиальных и тангенциальных напряжений при волочении с граничным трением ( $f = 0,05-0,1$ ) такой же, как и при жидкостном трении. Увеличенное влияние сил трения вызывает большой перепад в величине осевых напряжений ( $\sigma_{zz}$ ).

Из анализа расчетов напряженного состояния можно отметить, что зона действия напряжений распространяется далеко за пределы геометрического очага деформации, практически на всю область заготовки. Силы контактного трения настолько велики, что продольные напряжения становятся растягивающими, а распределение касательных напряжений в очаге деформации сопровождается сменой знака.

Имеется значительная неравномерность распределения интенсивности напряжений в поперечном сечении проволоки на выходе из волоки. Так как этот параметр эквивалентен значению сопротивления пластической деформации стали, то можно сделать заключение о неравномерности упрочнения стали по поперечному сечению проволоки. Для снижения этой неравномерности можно уменьшать коэффициент контактного трения, оптимизировать геометрию волочильного канала волоки.

## ГЛАВА 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВОЛОК НА ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ В ПРОВОЛОКЕ

### 2.1. Методология исследования влияния геометрии волокна на деформационное старение в обрабатываемой проволоке

Зависимость между деформационным старением в проволоке и геометрией волокна связана с влиянием формы и размеров деформирующей и калибрующей зон волокна на распределение и величину температур в проволоке. Это вызвано тем, что распределение температуры в проволоке зависит от особенностей пластического течения металла в очаге деформации волокна как основного источника нагрева проволоки, влияющего на деформационное старение стали проволоки. Пластическое течение отличается высокой неравномерностью распределений его параметров и поэтому распределение температуры также неравномерно.

Очаг деформации в волокне представляет собой объем пластически деформируемой среды (проволоки), в котором концентрируется тепловая энергия в результате диссипации (перехода в тепло) энергии внутреннего и внешнего трения в этой среде при ее пластической деформации. Внутреннее трение осуществляется вследствие межкристаллитных и внутрикристаллитных пластических смещений в микроструктуре металла. Внешнее трение реализуется за счет скольжения контактных поверхностей обрабатываемой среды и инструмента (волокна). Тепловая энергия вызывает нагрев деформируемой среды и волокна. Основная задача оптимизации геометрии волоочильного канала волокна заключается в определении такой формы и размеров деформирующей и калибрующей зон волокна, при которых достигаются приемлемые максимальные температуры и в очаге деформации. Для этой цели необходимо иметь зависимость между распределением температур в очаге деформации и геометрией канала волокна. Если иметь эту зависимость, то можно рекомендовать оптимальные форму и размеры канала волокна, вызывающие допустимый нагрев проволоки в очаге деформации с точки зрения исключения критических температур, вызывающих интенсивное деформационное старение.

При установившемся режиме волочения температура проволоки в очаге деформации и на выходе из него зависит от величины тепловой энергии, выделяемой в очаге деформации и на контакте волокни с проволокой, накопленной тепловой энергии, разогретой волокни и от интенсивности теплоотвода от проволоки к волоке. Это определяет высокую сложность адекватного определения распределения температур в очаге деформации. Поэтому для решения этой задачи наиболее приемлемыми являются численные методы, позволяющие учитывать все основные причинно-следственные связи пластической деформации. Наиболее рационально использование численных методов, основанных на МКЭ, который наиболее адаптирован к компьютерной обработке и позволяет учесть все основные законы реологии пластического деформирования твердой среды.

Основываясь на приведенном подходе к принципу исследований, предлагается следующая последовательность основных этапов исследований:

1. Определение зависимости значений максимальной температуры в очаге деформации от значений углов конической деформирующей зоны и длин цилиндрической калибрующей зоны волокни. Эта зависимость даст возможность определять оптимальные значения углов волокни при определенной длине калибрующей зоны. Оптимальным углом волокни принимается такое его значение, при котором достигается минимальное значение температуры в очаге деформации при определенной длине калибрующей зоны.

2. Получение и анализ распределений температуры, интенсивности напряжений, интенсивности деформации в проволоке и волоке для наиболее нагруженной волокни действующей технологии и для варианта волочения, отличающегося от действующего уменьшенным значением коэффициента контактного трения скольжения. Анализ позволит дать оценку исходного уровня этих характеристик, а также дать заключение о влиянии контактного трения скольжения на нагруженность волокни и тепловыделение в проволоке. Значения интенсивностей напряжений и деформации в волоке позволяют оценить нагруженность волокни в зависимости от изменений угла деформирующей и длины калибрующей зон волокни. При этом принимается положение: чем меньше максимальные значения интенсивностей напряжений и деформации в волоке, тем стойкость волокни выше.

3. Получение и анализ распределений температуры, интенсивности напряжений, интенсивности деформации в проволоке и волоке для

разных вариантов геометрий волокни. Исследования проводятся с использованием оптимальных углов волок на различных формах деформирующих зон и на различных длинах калибрующих зон волокни. Этот анализ позволит дать рекомендации о наиболее оптимальных вариантах геометрий волок. Оптимальной геометрией волокни принимается такая ее форма и размеры, при которых имеется минимальная температура в проволоке и минимальные значения интенсивностей напряжений и деформаций в волокни как опосредованные параметры ее износа.

Приведенные этапы выполняются при помощи численного расчета указанных выше параметров наиболее нагруженной волокни в действующей технологии волочения проволоки диаметром 0,412 мм из проволочной заготовки диаметром 2,45 мм из стали 90. Конечная скорость волочения увеличена до 8 м/с. Наиболее нагруженной волокни является 23-я волокни по ходу волочения. Для этой волокни: входной диаметр проволоки 0,494 мм, выходной диаметр волокни 0,467 мм; скорость проволоки на выходе из волокни 6,227 м/с. Результаты исследований могут использоваться для других волок для разных маршрутов волочения по аналогии.

Оптимизируется канал волокни по температурному критерию или по критерию минимальной температуры в проволоке. Но для обоснованного использования оптимизированной геометрии волокни по температурному критерию необходимо дополнительно провести оптимизацию канала волокни по критерию минимального износа канала волокни и по критерию захвата смазки. В связи с большими сложностями в теоретической оптимизации по критерию захвата смазки эта оптимизация будет выполнена экспериментально впоследствии.

## **2.2. Формулировка исходных данных для расчета напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при изменении геометрии волокни**

В основе математической формулировки рассматриваемого процесса волочения проволоки лежит система зависимостей механики деформируемого твердого тела: уравнения движения, неразрывности, связи деформаций и перемещений, связи скоростей деформаций и скоростей перемещений, связи ускорений и скоростей, уравнение теплопроводности [1]–[4]. Замыкают систему данных уравнений начальные условия, описывающие конфигурацию проволоки и волокни, их темпе-

ратурное и деформированное поле в начальный момент времени; граничные условия, описывающие приложенные к ограничивающим поверхностям проволоки и волокна кинематические и энергосиловые параметры, а также физические уравнения связи из теории пластичности и из теории упругости.

Решение рассматриваемой задачи осуществляется в цилиндрической системе координат при следующих основных упрощениях:

1) напряженно-деформированное и температурное состояние материала проволоки считаем осесимметричным, для чего будем пренебрегать внешними массовыми силами;

2) считается, что в процессе пластического деформирования в объеме проволоки действует распределенный источник тепловой энергии, равный 90 % работы пластического деформирования;

3) на поверхности контакта проволоки и волокна действуют силы трения Амонтона–Кулона и распределенный источник тепловой энергии, равный 50 % от работы сил трения. Через поверхность контакта между волоком и проволокой осуществляется теплопередача по закону Ньютона с коэффициентом теплопередачи  $\alpha = 15 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;

4) материал проволоки считаем деформационно и кинематически упрочняемой упруго-пластической средой с плотностью  $\rho = 7745 \text{ кг}/\text{м}^3$ , модулем Юнга  $E = 207 \text{ ГПа}$ , коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,3$  и зависимостью сопротивления пластическому деформированию:

$$\sigma_s = (1,374 + 0,114 \lg(\xi_i))(999 + 544,31 \ln(\varepsilon_i)), \text{ МПа}, \quad (2.1)$$

где  $\xi_i$  – интенсивность скоростей деформаций;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций.

Зависимость сопротивления пластическому деформированию от деформации материала проволоки получили аппроксимацией методом наименьших квадратов экспериментальных данных, полученных при стандартных испытаниях проволоки из стали 90 на растяжение, с последующей корректировкой по скорости деформации на основе данных [5]. Теплофизические характеристики материала проволоки: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 49 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ; теплоемкость  $c = 477 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$ ;

5) материал волокна считаем упругой средой с плотностью  $\rho = 15150 \text{ кг}/\text{м}^3$ , модулем Юнга  $E = 647 \text{ ГПа}$ , коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,2$ . Теплофизические характеристики материала волокна: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 50,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ; теплоемкость  $c = 382 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$ .

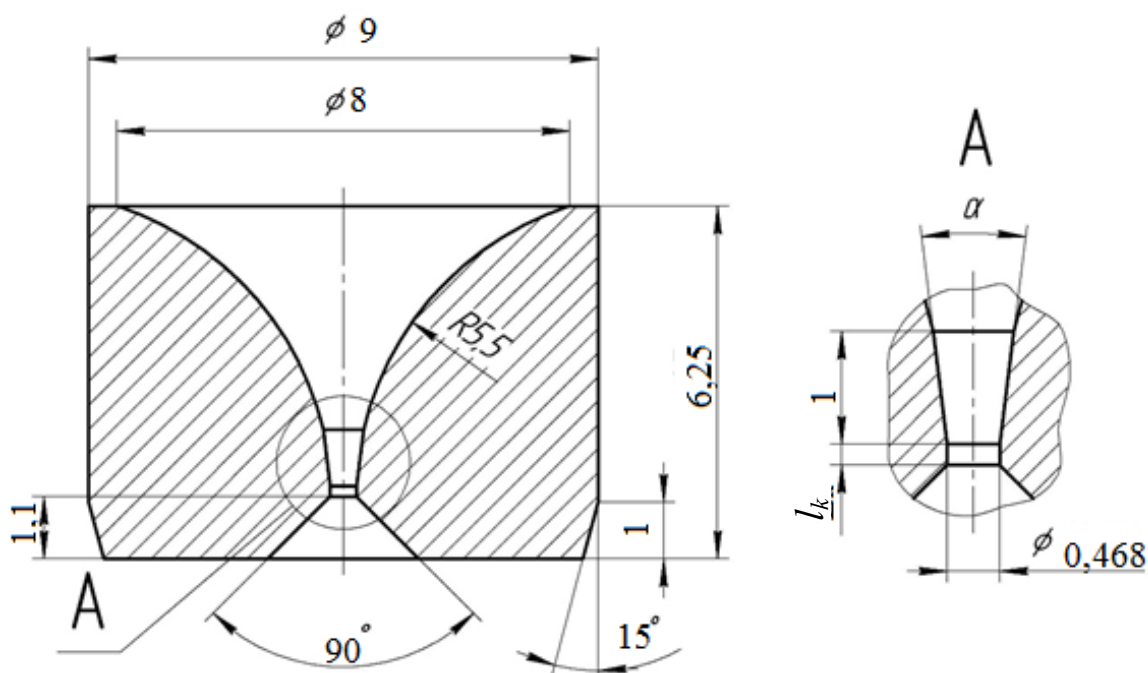


Рис. 2.1. Эскиз волокна с конической деформирующей зоной:  
 $l_k$  – длина калибрующей зоны;  $\alpha$  – угол конической деформирующей зоны

Численные исследования волокон с конической деформирующей зоной выполнялись для волокон, габаритные размеры которых соответствуют техническим требованиям РУП БМЗ (рис. 2.1).

### 2.3. Определение зависимости между значениями оптимальных углов деформирующей зоны и значениями длин калибрующей зоны волокна по температурному критерию

Оптимальной геометрией волокна по температурному критерию принимается такой вариант геометрии канала волокна, при котором проволока при протяжке через эту волоку нагревается до минимальной температуры сравнительно с другими геометриями волокон. Под каналом волокна будем понимать форму и размеры деформирующей и калибрующей зон волокна, не принимая во внимание на этом этапе другие зоны канала. Для волокна с определенной длиной калибрующей зоны  $l_k$  оптимальной геометрии волокна будет соответствовать оптимальный угол конической деформирующей зоны волокна  $\alpha_{\text{опт}}$ . Для поиска  $\alpha_{\text{опт}}$  необходимо получить распределения температур в проволоке при волочении при разных углах волокна и при неизменном

значении  $l_k$ . После этого можно выбрать вариант волокни с минимальным значением пиковых или максимальных температур в температурном поле проволоки. Таким образом, необходимо исследовать весь диапазон углов деформирующих и длин калибрующих зон волокни и найти соответствие между углом деформирующей волокни и длиной калибрующей зоны, которое определяет минимальный нагрев проволоки. Чтобы каждое значение  $l_k$  привести в соответствие определенному значению  $\alpha_{\text{опт}}$ , необходимо также учесть уровень усилий волочения  $P$  и коэффициентов запаса волочения  $\gamma$ . Это увеличивает степень объективности данных исследований.

Из полученных температурных полей в проволоке при ее волочении из численных моделей определено, что имеет место два температурных пика в проволоке: на выходе из калибрующей зоны волокни  $T1_{\text{max}}$ ; в месте входа в калибрующую часть волокни  $T2_{\text{max}}$ .

Для упрощения длину  $l_k$  можно представить в виде относительной длины калибрующей зоны:

$$k = l_k / d_k, \quad (2.2)$$

где  $d_k$  – диаметр волокни в калибрующей зоне.

Результаты численного расчета величин  $T1_{\text{max}}$ ,  $T2_{\text{max}}$ ,  $P$ ,  $\gamma$  в зависимости от значений углов конической деформирующей зоны волокни  $\alpha$  и значений  $k$  представлены в табл. 2.1. Таблица 2.1 представляет собой план численного эксперимента на 18 опытов с факторами  $\alpha$  и  $k$ , совмещенный со значениями откликов эксперимента  $T1_{\text{max}}$ ,  $T2_{\text{max}}$ ,  $P$ ,  $\gamma$ .

Таблица 2.1

**Значения параметров волочения при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$**

Номер опыта	$\alpha, ^\circ$	$k$	$T1_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$T2_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{H}$	$\gamma$
1	6	0,3	513	474,3	172	2,8
2	10	0,3	450,8	464,1	157,3	3,1
3	12	0,3	414,5	454,2	158,2	3,0
4	14	0,3	403,2	460,5	160,5	3,0
5	16	0,3	390,6	480,5	163,5	2,9
6	20	0,3	383,6	497,3	173,4	2,8

Окончание табл. 2.1

Номер опыта	$\alpha, ^\circ$	$k$	$T1_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T2_{\max}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{H}$	$\gamma$
7	6	0,4	534,3	473,7	180,3	2,7
8	10	0,4	452,4	462,7	163,6	2,9
9	12	0,4	427,8	451,7	161,7	3,0
10	14	0,4	404,8	457,3	163,6	2,9
11	16	0,4	390,4	479,5	166,4	2,9
12	20	0,4	381,9	506,4	175,4	2,7
13	6	0,5	543	473,3	188,6	2,5
14	10	0,5	454,8	461,9	170,7	2,8
15	12	0,5	430,1	449,1	168,6	2,8
16	14	0,5	404,8	454	166,7	2,9
17	16	0,5	400,9	476,1	169,4	2,8
18	20	0,5	393,6	499,6	177,1	2,7

Анализ значений параметров табл. 2.1 показывает на удовлетворительные условия волочения, исходя из величин  $P$  и  $\gamma$ . Но значения  $T1_{\max}$ ,  $T2_{\max}$  не позволяют получить требуемое качество стали из-за повышенных величин. Диапазон полученных температур достаточно широк и показывает на влияние геометрии волоки на температуру проволоки.

Для вычислительного опыта № 9 (табл. 2.1) получен график термического цикла произвольной точки поверхности проволоки (рис. 2.2). На графике горизонтальный отрезок линии справа внизу соответствует величине температуры поверхности проволоки на входе в волоку. Затем наблюдается интенсивный рост температуры при движении проволоки через деформирующую зону. Первый температурный пик  $T2_{\max}$  приходится на зону стыковки деформирующей и калибрующей зон. Вторым температурный пик  $T1_{\max}$  относится к зоне окончания калибрующего пояса. Величина температуры поверхности после выхода проволоки из волоки уменьшается. Интересен факт спада температуры между двумя пиками.  $T1_{\max}$  меньше, чем  $T2_{\max}$ . Объяснения поведения температурной кривой связаны с тем, что до первого пика источником тепловыделения служит энергия внутреннего трения (или пластической деформации), а также энергия контактного трения. После второго пика основным вклад в нагрев поверхности проволоки вносит контактное трение.



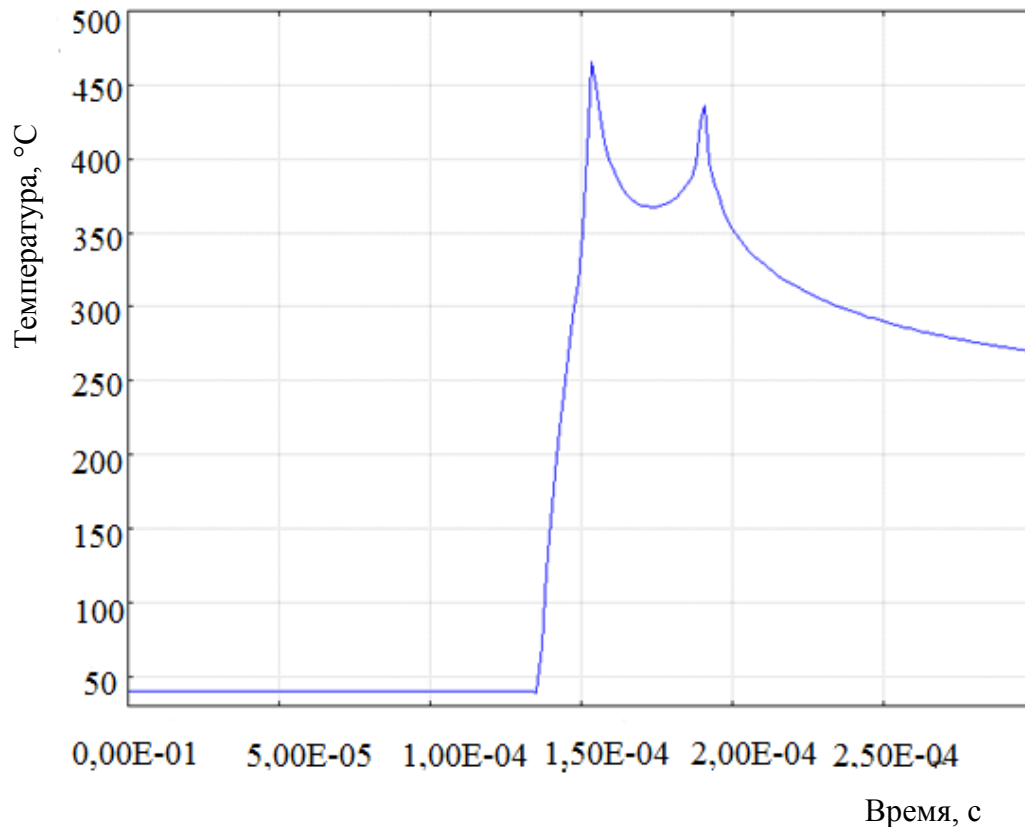


Рис. 2.2. Температурный цикл поверхности проволоки для  $\alpha = 12^\circ$ ;  $k = 0,4$ ;  $f = 0,05$

Данные, представленные в табл. 2.1, описываются следующими математическими зависимостями, полученными обработкой данных этой таблицы по плану регрессионного анализа:

максимальная температура проволоки на выходе из волоки, °C:

$$T1_{\max} = 439,9 - 13,8\alpha + 0,8\alpha^2 + 992,3k - 826k^2 - 59,8\alpha k - 0,8\alpha^2 k + 24,6\alpha k^2 + 2,7\alpha^2 k^2; \quad (2.3)$$

максимальная температура проволоки на входе в калибрующую зону волоки, °C:

$$T2_{\max} = 396,5 + 17,7\alpha - 0,9\alpha^2 + 639,2k - 712,3k^2 - 146,1\alpha k - 7,2\alpha^2 k + 163,5\alpha k^2 - 8,3\alpha^2 k^2; \quad (2.4)$$

3) усилие волочения проволоки, Н:

$$P = 140,2 + \alpha + 258,5k - 155,9k^2 - 38,5\alpha k + 1,4\alpha^2 k + 37\alpha k^2 - 1,5\alpha^2 k^2. \quad (2.5)$$

Используя приведенные уравнения, можно вычислять величины данных параметров для других значений  $\alpha$  и  $k$ , не вошедших в табл. 2.1.

Уравнения (2.3) и (2.4) графически представляют собой криволинейные поверхности (рис. 2.3 и 2.4).

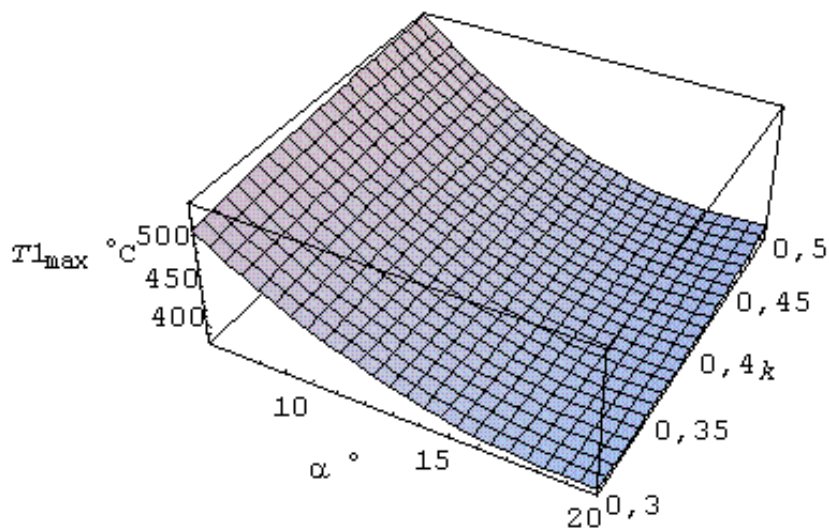


Рис. 2.3. Графическая зависимость максимальной температуры  $T1_{max}$  проволоки на выходе из волоки от угла деформирующей зоны  $\alpha$  и относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$

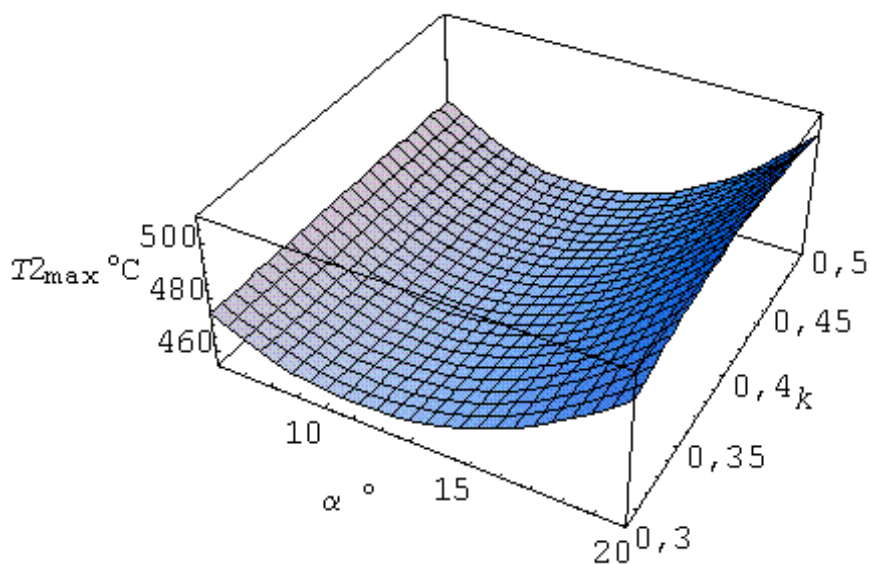


Рис. 2.4. Графическая зависимость максимальной температуры  $T2_{max}$  проволоки на входе в калибрующую зону волоки от угла деформирующей зоны  $\alpha$  и относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$

Совмещение поверхностей рис. 2.3 и 2.4 позволяет получить поверхность, изображенную на рис. 2.5. Анализ поверхности на рис. 2.5 показывает на наличие линии на этой поверхности, для которой характерна минимальная температура, выбранная из максимальных значений для определенного значения  $\alpha$  при постоянном значении величины  $k$ . Эту линию можно представить в виде графика (рис. 2.6). Этот график приводит в соответствие длину калибрующей зоны, выраженную через  $k$ , с оптимальным углом деформирующей зоны волокна  $\alpha_{\text{опт}}$ . Значения  $\alpha_{\text{опт}}$  не постоянны и для определенной длины калибрующей зоны принимают свое значение. На линии отмечены численные значения максимальных температур в проволоке, соответствующих точкам графика, где размещены эти цифры. Анализ этих цифр показывает на практическое постоянство минимальных значений температур при различных значениях длин калибрующей зоны волокна. Из этого можно сделать предварительное заключение: для достижения минимальной температуры в проволоке при коэффициенте трения 0,05 необходимо использовать такое сочетание длины калибрующей зоны и угла  $\alpha_{\text{опт}}$  волокна, которые согласованы с показателями стойкости волокна.

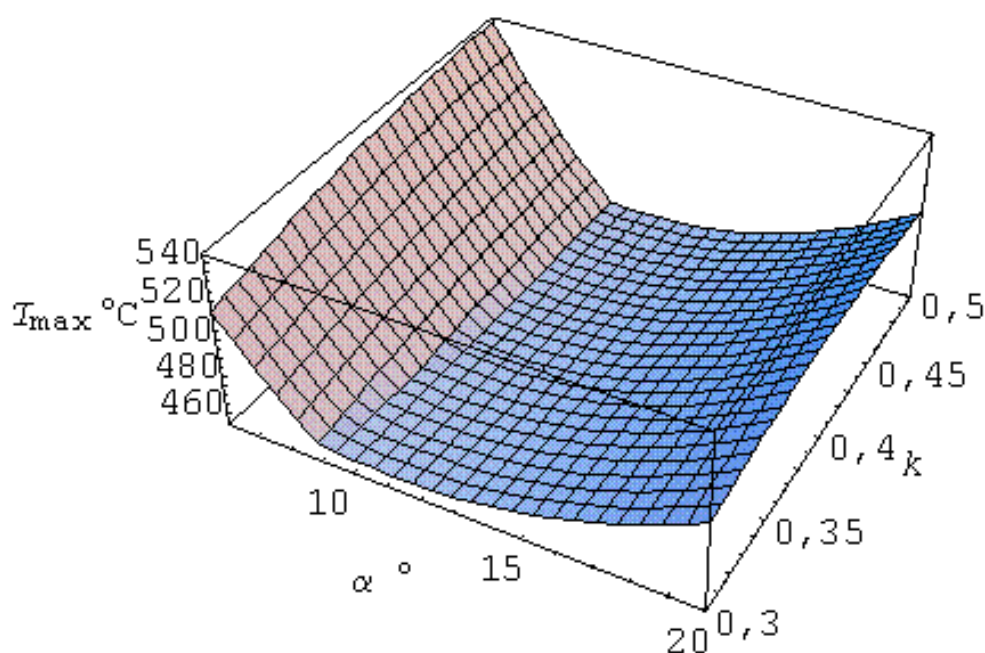


Рис. 2.5. Графическая зависимость максимальной температуры  $T_{\max}$  проволоки от угла деформирующей зоны  $\alpha$  и относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$

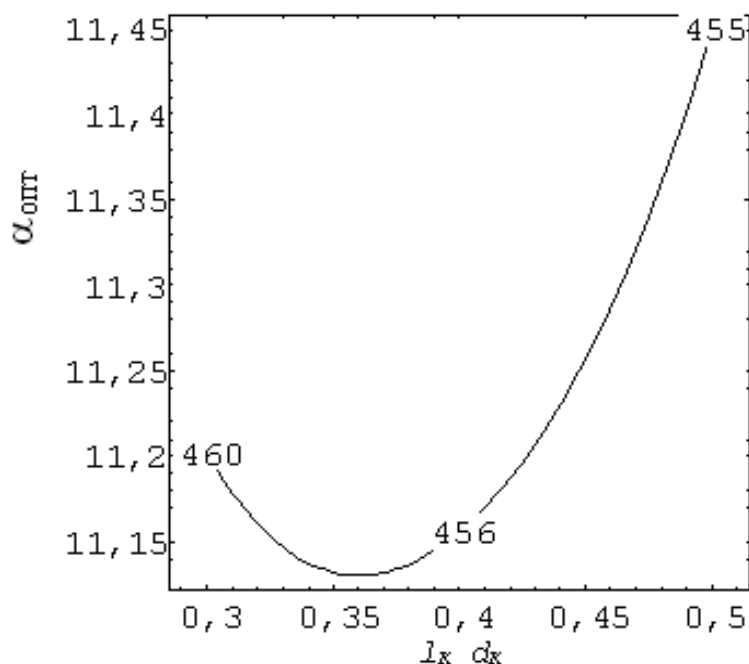


Рис. 2.6. Зависимость величины оптимального угла  $\alpha_{opt}$  конической зоны деформирующей зоны волокна от относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$

Для сравнения волочения с обычным контактным трением и уменьшенным его значением были проведены аналогичные вышеприведенным исследования, отличающиеся коэффициентом контактного трения, равным  $f = 0,02$ . Результаты вычислений приведены в табл. 2.2. Анализ полученных данных показывает на значительную разгрузку волок, определяемую по относительно большим значениям величин  $\gamma$  и по уменьшенным значениям  $P$ . Температурный режим волочения для опытов, где величины максимальных температур не выше  $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ , уже может быть приемлем. Это относится для вычислительных опытов № 3, 4. Широкий разброс значений максимальных температур подтверждает факт наличия влияния геометрии волокна на температуру проволоки при изменении контактного трения и, следовательно, на ее деформационное старение.

Для вычислительного опыта № 9 (табл. 2.2) получен график распределения максимальной температуры на поверхности проволоки (рис. 2.7), аналогичный графику на рис. 2.2. Полученный график имеет также два экстремальных значения температуры. Но, в отличие от графика на рис. 2.6, на графике рис. 2.7 величина  $T1_{max}$  больше, чем  $T2_{max}$ . Это свидетельствует об уменьшении степени влияния контактного трения в зоне деформации и увеличении этого влияния в калибрующей зоне при снижении контактного трения.

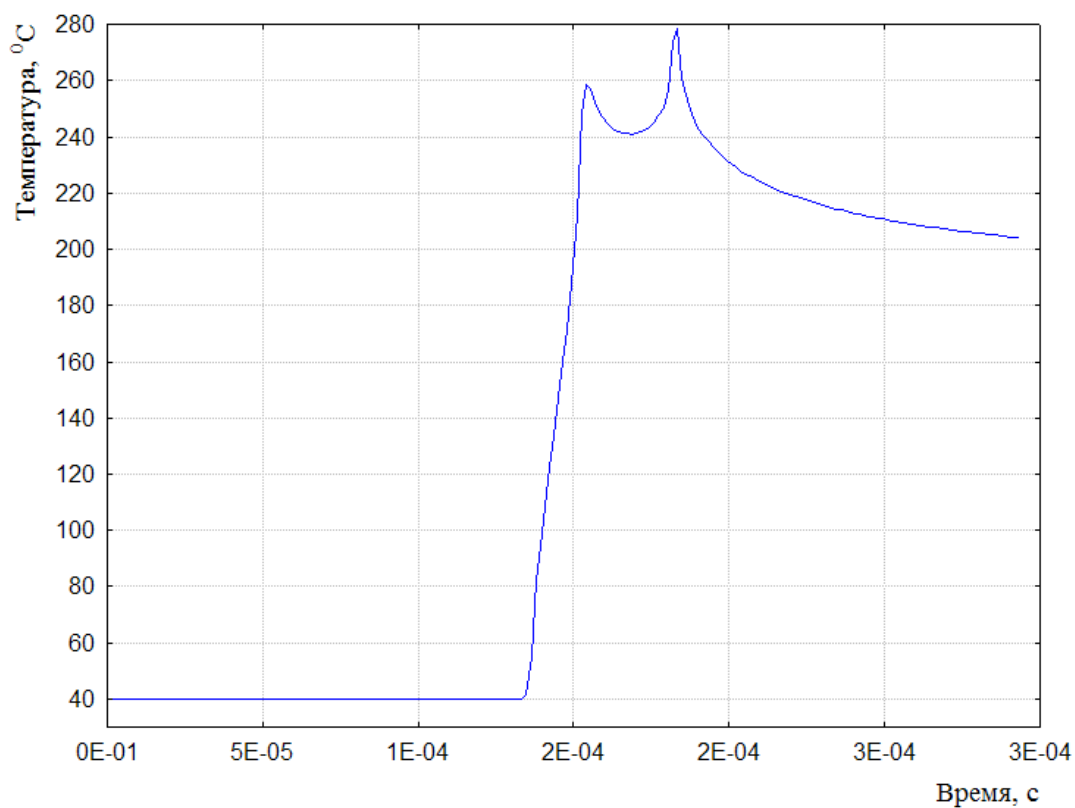


Рис. 2.7. Температурный цикл поверхности проволоки для  $\alpha = 12^\circ$ ;  $k = 0,4$ ;  $f = 0,02$

Таблица 2.2

**Значения параметров волочения при коэффициенте контактного трения  $f = 0,02$**

Номер опыта	$\alpha, ^\circ$	$k$	$T1_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T2_{\max}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{H}$	$\gamma$
1	6	0,3	301,9	264,6	116,5	4,1
2	10	0,3	279,6	257,2	117,3	4,1
3	12	0,3	266,6	257,7	121,9	3,9
4	14	0,3	263,2	261,5	128,8	3,7
5	16	0,3	272,7	273,9	133,5	3,6
6	20	0,3	292,1	305	148,5	3,2
7	6	0,4	307	265,6	120,4	4,0
8	10	0,4	283,2	256,4	120,3	4,0
9	12	0,4	278,3	257,9	124	3,9
10	14	0,4	274,6	262,2	129,5	3,7
11	16	0,4	276,2	272,3	135,1	3,6

Номер опыта	$\alpha, ^\circ$	$k$	$T1_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T2_{\max}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{H}$	$\gamma$
12	20	0,4	293,4	299,7	148,7	3,2
13	6	0,5	319,9	269,4	124,4	3,9
14	10	0,5	285,5	256,2	123,9	3,9
15	12	0,5	280,3	257,9	126,2	3,8
16	14	0,5	276,5	263,3	131,6	3,6
17	16	0,5	277,6	271	136,7	3,5
18	20	0,5	299,4	297,3	150,2	3,2

Данные, представленные в табл. 2.2, описываются следующими математическими зависимостями, полученными обработкой данных этой таблицы по плану регрессионного анализа:

1) максимальная температура проволоки на выходе из волоки,  $^\circ\text{C}$ :

$$T1_{\max} = 671,9 - 71,6\alpha + 2,7\alpha^2 - 1623,2k + 2192,5k^2 + \\ + 297,3\alpha k - 11,2\alpha^2 k - 385,4\alpha k^2 + 14,4\alpha^2 k^2; \quad (2.6)$$

2) максимальная температура проволоки в месте входа в калибрующую часть волоки,  $^\circ\text{C}$ :

$$T2_{\max} = 375,4 - 21,8\alpha + \alpha^2 - 367,4k + 488,8k^2 + \\ + 60,4\alpha k - 2,5\alpha^2 k - 75,4\alpha k^2 + 2,9\alpha^2 k^2; \quad (2.7)$$

3) усилие волочения проволоки, Н:

$$P = 101,3 - 0,1\alpha + 0,1\alpha^2 + 63,3k + 2,4k^2 - 6\alpha k + \\ + 2,4k^2 + 0,1\alpha^2 k + 1,7\alpha k^2. \quad (2.8)$$

Используя приведенные уравнения (2.6)–(2.8), можно вычислять величины данных параметров для других значений  $\alpha$  и  $k$ , не вошедших в табл. 2.2.

Уравнения 2.6 (рис. 2.8) и 2.7 (рис. 2.9) графически представляют собой криволинейные поверхности. Совмещение указанных поверхностей позволяет получить поверхность, изображенную на рис. 2.10. На рис. 2.11 приведен график, полученный из рис. 2.10, аналогичный графику на рис. 2.6. Анализ этого графика показывает, что при умень-

шенном контактном трении температура проволоки снижается при уменьшении длины калибрующего пояска или зоны волокни. Но вид графика изменен. Это свидетельствует о влиянии величины контактного трения на вид оптимальной геометрии канала волокни.

Анализ абсолютных величин оптимальных углов волок (рис. 2.6 и 2.11) показывает на относительно узкий диапазон их значений, что определяет возможность рационального практического использования полученных данных.

На основании проведенного анализа можно сделать заключение: если принять, что деформационное старение стали проволоки связано преимущественно с температурой нагрева проволоки, то оптимизация геометрии канала волокни с точки зрения уменьшения деформационного старения проводится поиском такой геометрии деформирующей и калибрующей зон волокни, называемой оптимальной геометрией волокни, которой соответствует минимум температуры в проволоке.

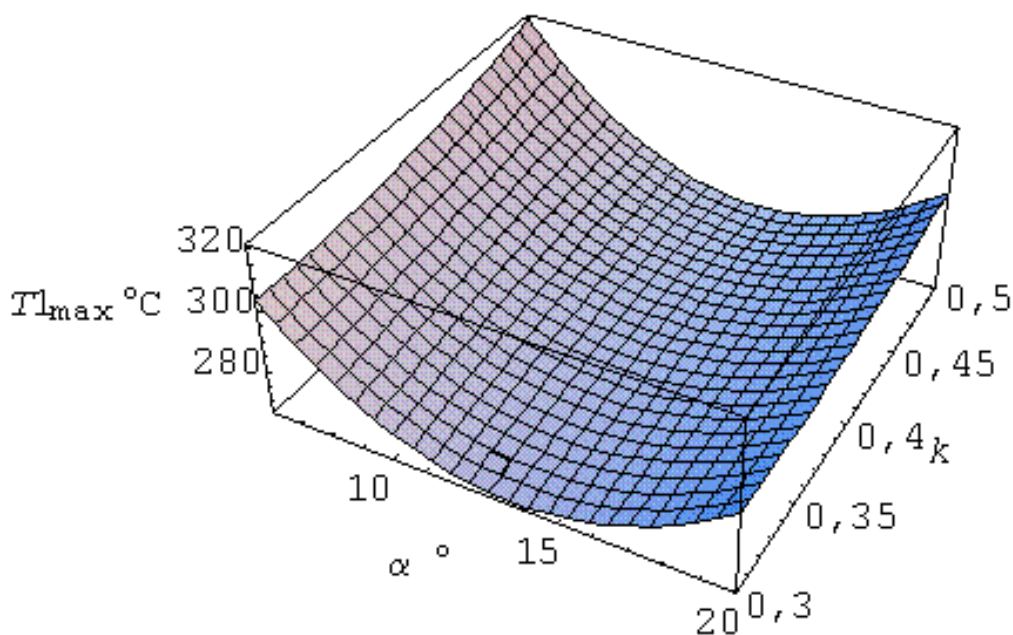


Рис. 2.8. Графическая зависимость максимальной температуры  $T_{\max}$  проволоки на выходе из волокни от угла деформирующей зоны  $\alpha$  и относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f = 0,02$

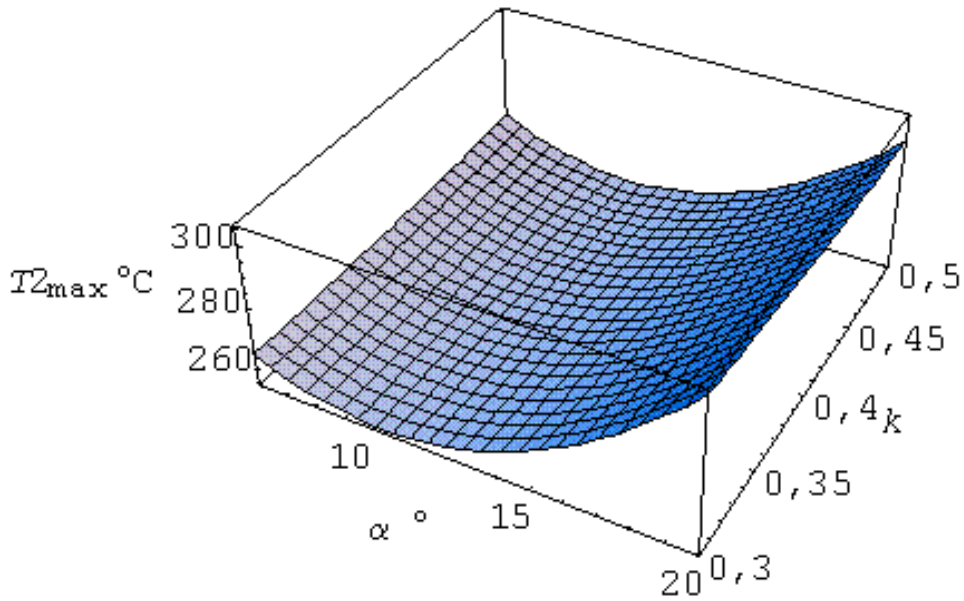


Рис. 2.9. Графическая зависимость максимальной температуры  $T_{2\max}$  проволоки в зоне входа в калибрующую зону волюки от угла деформирующей зоны  $\alpha$  и относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f=0,02$

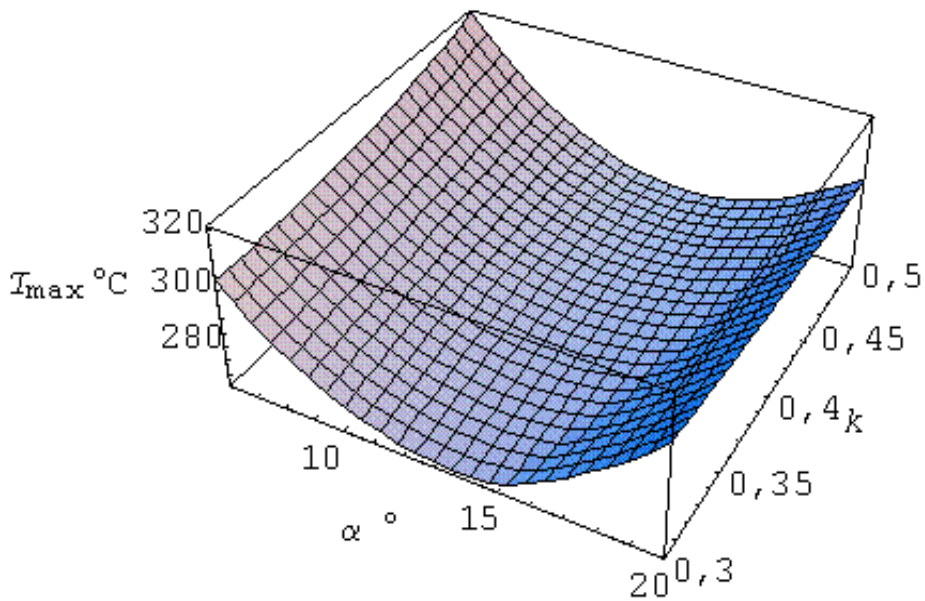


Рис. 2.10. Графическая зависимость максимальной температуры  $T_{\max}$  проволоки от угла рабочей зоны  $\alpha$  и относительной длины калибрующей зоны  $k$  при коэффициенте контактного трения  $f=0,02$



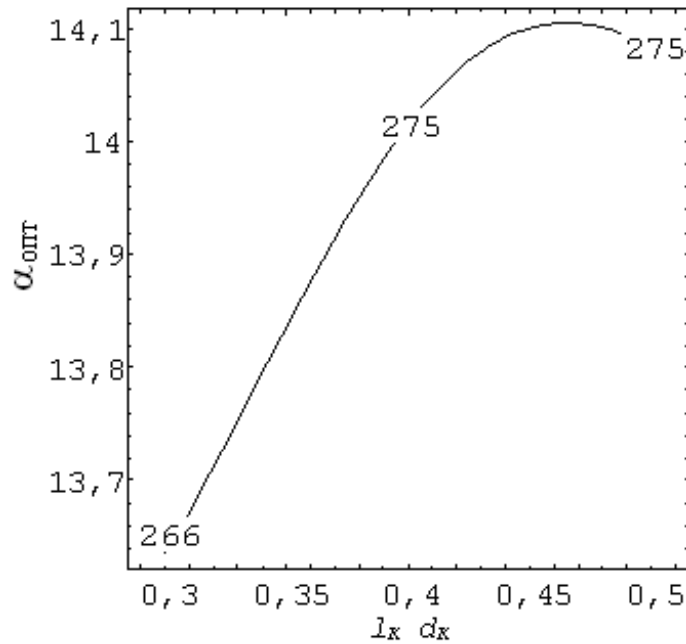


Рис. 2.11. Зависимость величины оптимального угла  $\alpha_{opt}$  конической зоны деформирующей части волокна от относительной длины калибрующей зоны при коэффициенте контактного трения  $f = 0,02$

Определено, что оптимальную геометрию волокна можно определить для любой длины калибрующей зоны выбором оптимального угла конической деформирующей зоны волокна. Для каждой длины калибрующей зоны имеется собственное значение оптимального угла деформирующей зоны, учитывающее прочие условия волочения: диаметр проволоки на входе в волоку; диаметр калибрующей зоны волокна; скорость волочения; коэффициент контактного трения; механические свойства проволоки и физические свойства волокна, а также смазочно-охлаждающей жидкости.

Выявлено, что наиболее оптимальной геометрией волокна для коэффициента контактного трения  $f = 0,02$  является геометрия с минимально возможной длиной калибрующей зоны; при  $f = 0,05$  длина калибрующей зоны при оптимальном угле конической зоны волокна мало влияет на температуру в проволоке.

Для действующих технологий волочения можно рекомендовать провести коррекцию углов деформирующих и длин калибрующих зон волокон по всему маршруту волочения путем использования приведенной методики.

Определено, что для исследуемой волоки для проектной скорости волочения 8 м/с при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$  оптимальным углом является угол  $11^\circ$ , а для  $f = 0,02$  – угол  $13\text{--}14^\circ$ .

#### **2.4. Анализ распределения температурных полей и напряженно-деформированного состояния в проволоке и волоке для маршрута волочения с имеющимся и уменьшенным контактным трением для проектной скорости волочения**

Для оценки возможности и условий волочения проволоки диаметром 0,412 мм из стали 90 с увеличенной скоростью 8 м/с с использованием имеющихся волок ( $k = 0,4$ ;  $\alpha = 12^\circ$ ) в действующем маршруте волочения, имеющем скорость волочения 5 м/с, получены распределения ТП и НДС в сечении проволоки и волоки (волоки № 23 в действующем маршруте). Распределения получены в момент движения проволоки при ее выходе из волоки на расстояние 1,7 мм с постоянной скоростью после стабилизации скорости волочения. В этот момент ТП в проволоке и НДС в системе «проволока–волока» стабилизированы. Не стабильно остается только ТП в волоке. Температурное поле в волоке оказывает воздействие на нагрев проволоки, но, в силу кратковременного контакта новых участков проволоки с волокой, это воздействие принимается не существенным.

Сравнительный анализ ТП показывает, что уменьшение коэффициента контактного трения с величины 0,05, соответствующей имеющемуся уровню трения, до величины 0,02, которую можно получить специальными мероприятиями, снижает максимальный диапазон температур в проволоке 344–394 °С до диапазона 249–270 °С. Это подтверждает факт значительного влияния контактного трения на температуру проволоки и, соответственно, волоки в процессе волочения. Концентрация повышенных температур соответствует приконтактным зонам волоки и проволоки в области перехода от деформирующей к калибрующей зоне волоки и в области окончания калибрующей зоны волоки.

Анализ распределения интенсивностей упругих деформаций  $\varepsilon_i$  при  $f = 0,05$  показывает на наличие в волоке нагруженной зоны с диапазоном значений  $\varepsilon_i$  от  $8,357 \cdot 10^{-3}$  до  $1,045 \cdot 10^{-2}$  в области контакта рабочей и калибрующей зон волоки. Этой зоне соответствует зона ин-

тенсивного износа и разрушения канала волокна. При деформации в аналогичной волоке, но с уменьшенным трением при  $f = 0,02$ , этой зоне соответствует диапазон значений  $\varepsilon_i$  от  $9,091 \cdot 10^{-3}$  до  $1,136 \cdot 10^{-2}$ .

Если анализировать максимальные значения интенсивностей напряжений  $\sigma_i$ , возникающих в волоке, то можно определить, что при коэффициенте трения  $f = 0,05$  эта величина равна  $7,697 \cdot 10^9$  Па, а при  $f = 0,02$  значение этого параметра составляет  $8,292 \cdot 10^9$  Па. Место расположения максимальных значений  $\sigma_i$  соответствует месту расположения максимальных значений  $\varepsilon_i$ .

Из сопоставления значений  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$  для разных коэффициентов контактного трения можно сделать вывод об отсутствии существенного влияния контактного трения на нагрузку в волоке, имеющей геометрию, соответствующую техническим требованиям ОАО «БМЗ УКХ «БМК». Существенно его влияние на тепловыделение в проволоке и, соответственно, влияние на деформационное старение стали проволоки. Получаемый после снижения трения температурный диапазон в проволоке может быть приемлем для практического использования этого варианта волочения, но он остается на рубеже максимально допустимых температур нагрева проволоки (до  $250^\circ\text{C}$ ) по сечению проволоки с точки зрения максимальных температур, исключая интенсивное деформационное старение стали.

На основании этого анализа можно предположить, что при условии наличия мероприятий по снижению коэффициента контактного трения до величины  $f = 0,02$  для увеличения конечной скорости волочения исследуемой проволоки до  $8$  м/с может быть использована волока из имеющегося комплекта волок на ОАО «БМЗ».

## **2.5. Анализ распределения температурных полей и напряженно-деформированного состояния в проволоке и волоке при различной длине калибрующей зоны с оптимальными углами конической деформирующей зоны**

Основной задачей данного анализа является выбор из ряда оптимальных геометрий волок с конической деформирующей зоной, отобранных по минимальной температуре в проволоке как критерию оптимизации, таких вариантов геометрий волок, которые соответствовали бы минимальному износу канала волокна при ее эксплуатации.

С этой целью анализируются распределения интенсивностей упругих деформаций  $\varepsilon_i$  и распределения интенсивностей напряжений  $\sigma_i$  в волюке. Повышенные значения этих величин свидетельствуют о повышенном износе области волюки, в которой они действуют.

Для анализа принимаются волюки с длиной калибрующих зон, соответствующей крайним значениям этой длины и середине между этими значениями, т. е. принимается три варианта геометрии волюк с относительными длинами калибрующих зон  $k = 0,2; 0,4; 0,6$ . Для волюк с определенной протяженностью калибрующих зон определяется оптимальный угол конической зоны  $\alpha_{\text{опт}}$ , обеспечивающий минимальную температуру в проволоке сравнительно с другими значениями этих углов. Для  $k = 0,4$  при  $f = 0,02$  значение  $\alpha_{\text{опт}} = 14^\circ$  определено из графика на рис. 2.10. Значения  $\alpha_{\text{опт}} = 11,2$  и  $\alpha_{\text{опт}} = 13$  для  $k = 0,2$  и  $k = 0,6$ , соответственно, получены методом аппроксимации линии графика на рис. 2.10. Для указанных исходных данных проведено математическое моделирование очага деформации волюки с использованием метода конечных элементов.

Для волюки 1-го варианта с параметрами  $k = 0,4; \alpha_{\text{опт}} = 14^\circ; f = 0,02$  максимальная температура в проволоке  $T_{\text{max}} = 271^\circ\text{C}$ , максимальное значение упругих деформаций в волюке  $\varepsilon_i = 1,121 \cdot 10^{-2}$ , максимальное значение интенсивности напряжений в волюке  $\sigma_i = 8,119 \cdot 10^9$  Па.

Для волюки 2-го варианта с параметрами  $k = 0,2; \alpha_{\text{опт}} = 11,2^\circ; f = 0,02$  максимальная температура в проволоке  $T_{\text{max}} = 269^\circ\text{C}$ , максимальное значение упругих деформаций в волюке  $\varepsilon_i = 1,050 \cdot 10^{-2}$ , максимальное значение интенсивности напряжений в волюке  $\sigma_i = 7,680 \cdot 10^3$  МПа.

Для волюки 3-го варианта с параметрами  $k = 0,6; \alpha_{\text{опт}} = 13,9^\circ; f = 0,02$  максимальная температура в проволоке  $T_{\text{max}} = 306,5^\circ\text{C}$ , максимальное значение упругих деформаций в волюке  $\varepsilon_i = 8,361 \cdot 10^{-3}$ , максимальное значение интенсивности напряжений в волюке  $\sigma_i = 7,074 \cdot 10^3$  МПа.

Исходя из приведенных значений величин  $T_{\text{max}}$  для разных вариантов геометрий волюк, наиболее приемлемым является 2-й вариант геометрии волюки, обеспечивающий меньшую температуру в проволоке. Исходя из наиболее благоприятной нагрузки на волюку, можно расставить варианты геометрий волюк по ранжиру, начиная с более благоприятного варианта или с варианта с меньшими значениями  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$ : третий, второй, первый. Таким образом, 2-й вариант является

средним по износостойкости. Но поскольку основной целью оптимизации геометрии волокна является снижение температуры проволоки, то второй вариант геометрии волокна на этом этапе следует признать наиболее оптимальным.

Для волочения исследуемой проволоки с конечной скоростью 8 м/с для 23-го перехода волочения определено: среди геометрий волокон с конической деформирующей зоной наиболее оптимальна геометрия, с точки зрения максимального снижения деформационного старения проволоки, имеющая угол деформирующей зоны волокна  $\alpha_{\text{опт}} = 11^\circ$ , относительную длину калибрующей зоны  $k = 0,2$  или длину калибрующей зоны  $l_k = 0,2 \cdot 0,467 = 0,09$  мм. Коэффициент контактного трения должен быть уменьшен до  $f = 0,02$ .

## 2.6. Анализ распределения температурных полей и напряженно-деформированного состояния в проволоке и проволоке с радиальной и сигмоидальной деформирующими зонами

Для получения сравнительной характеристики распределения ТП и НДС в проволоке и проволоке с неконическими деформационными зонами было проведено моделирование волочения через волокна с различной формой деформирующей зоны. Использовалась проволока с радиальной деформирующей зоной (рис. 2.12).

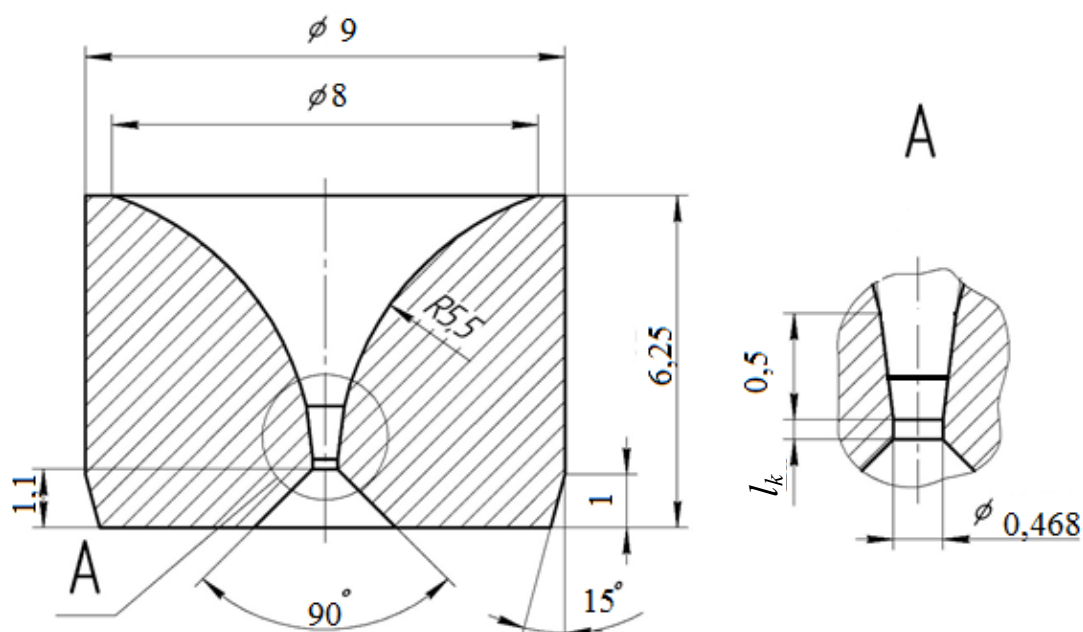


Рис. 2.12. Эскиз проволоки с радиальной деформирующей зоной

После численного моделирования на разных формах деформирующих зон волок получены распределения ТП и НДС в волоке и в проволоке. При определении максимальных значений интенсивности упругих деформаций в волоке  $\varepsilon_i$ , максимальных значений интенсивности напряжений в волоке  $\sigma_i$ , максимальных температур в проволоке  $T_{\max}$  получены результаты для волок следующих видов:

- Вид 1: волока с радиальной деформирующей зоной при  $R = 5,5$  мм,  $k = 0,4$ :  $T_{\max} = 308$  °С;  $\varepsilon_i = 8,856 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma_i = 6762$  МПа.

- Вид 2: волока с радиальной деформирующей зоной при  $R = 0,6$  мм,  $k = 0,2$ :  $T_{\max} = 280$  °С;  $\varepsilon_i = 9,969 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma_i = 7209$  МПа.

- Вид 3: волока с радиальной деформирующей зоной при  $R = 2,5$  мм,  $k = 0,2$ :  $T_{\max} = 303,8$  °С;  $\varepsilon_i = 7,781 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma_i = 6037$  МПа.

- Вид 4: волока с радиальной деформирующей зоной при  $R = 2,5$  мм,  $k = 0,4$ :  $T_{\max} = 321$  °С;  $\varepsilon_i = 7,87 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma_i = 6104$  МПа.

- Вид 5: волока с сигмоидальной деформирующей зоной (рис. 2.13):  $T_{\max} = 294$  °С;  $\varepsilon_i = 9,737 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma_i = 7243$  МПа.

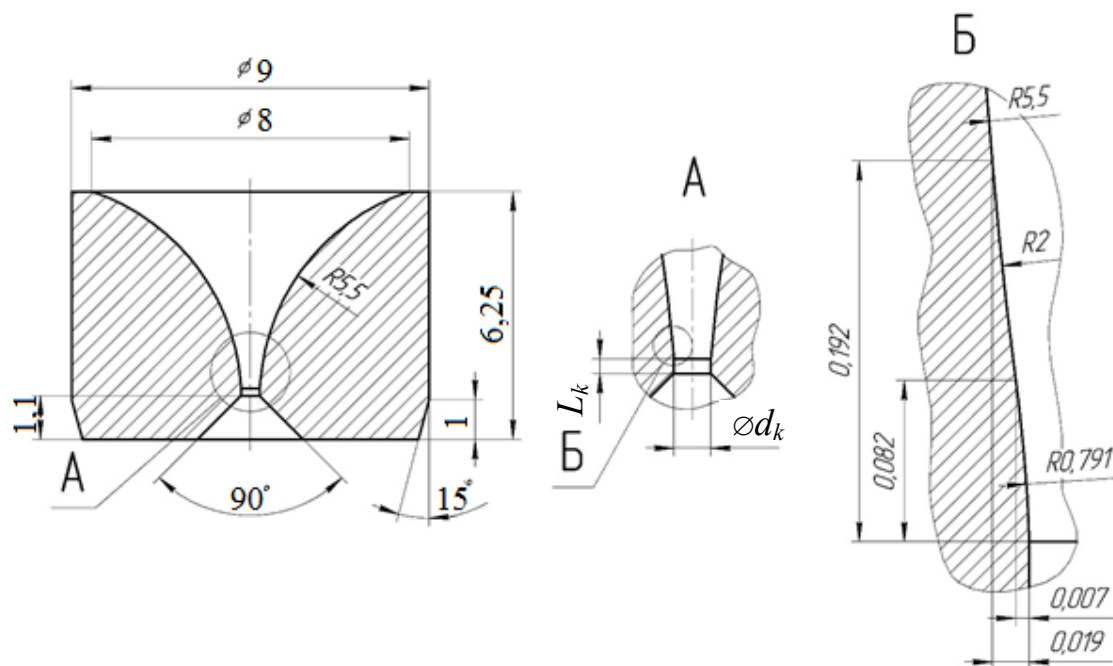


Рис. 2.13. Эскиз волоки с сигмоидальной деформирующей зоной

- Вид 6: волока с радиально-конической (комбинация радиального и конического участка с углом конуса  $\alpha$ , радиальный участок сопряжен с калибрующей зоной) деформирующей зоной при  $R = 1$  мм,  $\alpha = 11^\circ$ ,  $k = 0,2$ :  $T_{\max} = 275,1$  °С;  $\varepsilon_i = 9,053 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma_i = 6888$  МПа.

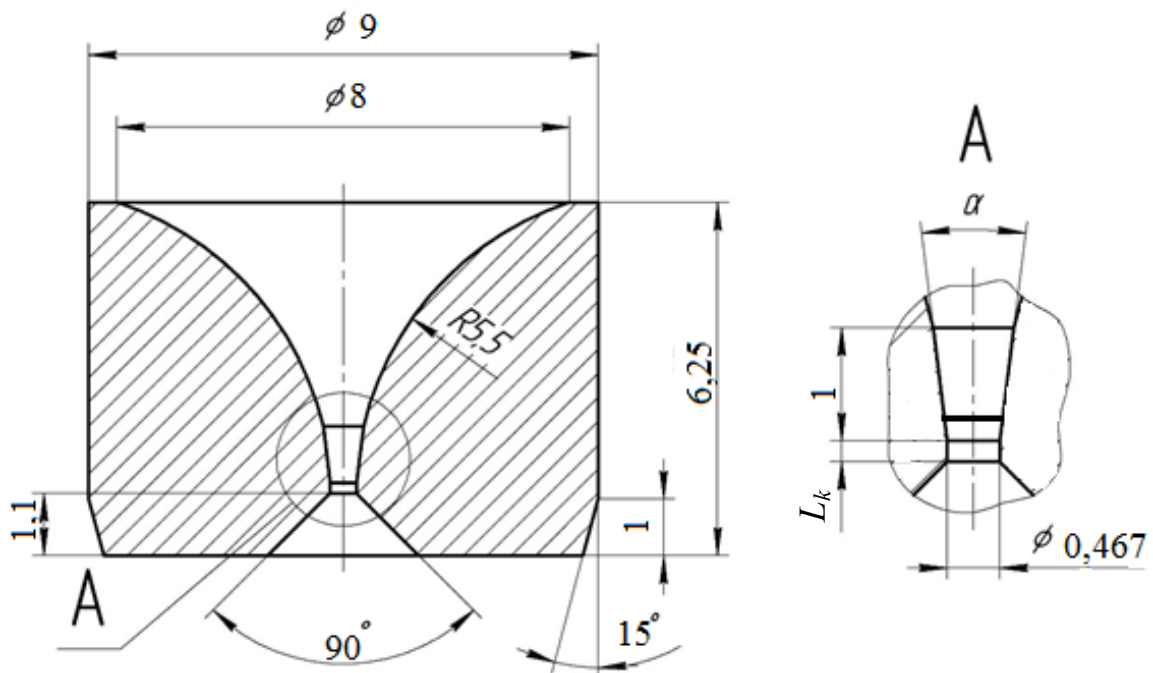


Рис. 2.14. Эскиз волокна с радиально-конической деформирующей зоной

Анализ полученных данных показывает, что исследованные деформирующие зоны не снижают температуру в проволоке. Однако они позволяют значительно снизить максимальные нагрузки в волокне. Например, при волочении через радиальную проволоку вида 3 максимальная величина  $\sigma_i$  составляет 6037 МПа. При волочении через коническую проволоку с оптимальной геометрией эта величина составила 7680 МПа. Аналогичное снижение напряжений в волокне наблюдается в большинстве неконических видов деформирующих зон волокон.

На основании проведенных численных исследований можно прийти к заключению о том, что волочение проволоки в волокнах с радиальными элементами деформирующих зон не снижает температуру в проволоке, но значительно разгружает волокна, повышая их стойкость.

## ГЛАВА 3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОГО ВОЛОЧЕНИЯ

#### 3.1. Использование критерия предельной пластичности для волочения

##### *3.1.1. Разрушение металлов при пластической деформации*

Увеличение скорости волочения проволоки вызывает дополнительное образование трещин в металле этой проволоки при ее последующей свивке. Поэтому возникает необходимость анализа причин возникновения этого явления и определения численного критерия возникновения трещин.

В процессе пластической деформации металлов имеет место непрерывное образование и развитие очагов разрушения (субмикротрещин). Процесс образования субмикротрещин связан с движением дислокаций, возникающих при пластической деформации, и взаимодействием полей напряжений, которые окружают дислокации.

Образование зародышей трещин связано с тем, что в некоторых микро- или субмикрообъемах скоплений дислокаций их упругая энергия деформации достигает предельной величины, равной скрытой теплоте плавления, которая и приводит к разрушению металла [8]. В соответствии с данными [8] зародыш трещины устойчив, однако на его острие присутствует или образуется новая дислокация, которая, взаимодействуя с другими, ведет к росту зародыша.

В [8] образование трещины в твердых телах связывают с локализованным пластическим течением – дискообразным сдвигом. Высокая концентрация касательных напряжений в данных областях, а также пересечение линий скольжения приводит к образованию микротрещин на границах дисков. Пораженность элементарного объема, окружающего некоторую частицу металла, микротрещинами характеризуется скалярной величиной – трещинноватостью [8].

Примем, что приращение  $d\psi$ , полученное за некоторый промежуток времени, пропорционально пластичности  $\Lambda_p$  металла для данного напряженного состояния, характеризуемого коэффициентом напряженного состояния  $k$ , т. е.:



$$k = \sigma/T;$$

$$d\bar{\Psi}_1 = A_1 \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} = A_1 \frac{H}{\Lambda_p [k(\tau)]} d\tau, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  – интенсивность нормальных напряжений;  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $A_1$  – коэффициент, зависящий от схемы напряженного состояния;  $\Lambda$  – степень деформации сдвига;  $\Lambda_p$  – предельная степень деформации сдвига, соответствующая разрушению;  $H$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига;  $d\tau$  – элементарный промежуток времени.

В [10]–[12] принято, что период накопления микротрещин составляет основную часть времени деформации металла. Различают две стадии разрушения – постепенное развитие трещин и значительное ускоренное разрушение, причем преобладает первая стадия.

При больших пластических деформациях по мере развития деформации растут зародыши трещин и концентрация напряжений в микро- и субмикрообъемах металла. На данной стадии зародыш трещины устойчив и для его дальнейшего роста требуется дополнительная пластическая деформация. При достижении трещиной критического размера она теряет устойчивость, происходит ее рост, объединение с другими трещинами с образованием поверхности разрушения.

Параллельно с данным процессом возникновения и увеличения количества микротрещин идет противоположный процесс залечивания зачатков нарушения сплошности и торможения их развития. Наличие шарового тензора сжатия в очаге деформации и касательных напряжений сдвига при пластической деформации ведет к схватыванию, сварке поверхностей разрушения.

Уменьшение пораженности элементарного объема микротрещинами за промежуток времени  $d\tau$  равно:

$$d\bar{\Psi}_2 = -A_2 H d\tau, \quad (3.2)$$

где  $A_2$  – коэффициент, зависящий от напряженного состояния.

При  $\sigma/T > 0$   $A_2 = 0$ . Залечивание микротрещин происходит при  $\sigma/T < 0$ .

Результирующее приращение  $d\Psi_1$  и  $d\Psi_2$  :

$$d\bar{\Psi} = (A_1 - A_2 \Lambda_p) \frac{H d\tau}{\Lambda_p}. \quad (3.3)$$

В результате малого акта пластической деформации сдвига  $Hd\tau$  соотношение неизвестных величин  $A_1$  и  $A_2$  определяет интенсивность охрупчивания ( $d\Psi > 0$ ) или улучшение пластических свойств ( $d\Psi < 0$ ). Моменту разрушения соответствует некоторая предельная величина трещиноватости  $\Psi_p$ .

Разделив левую и правую части (3.3) на  $\Psi_p$ , имеем:

$$d\Psi = B(\tau) \frac{Hd\tau}{\Lambda_p}, \quad (3.4)$$

где  $\Psi = \frac{\bar{\Psi}}{\Psi_p}$  – степень использования ресурса пластичности;

$$B(\tau) = (A_1 - A_2 \Lambda_p) / \Psi_p.$$

В предположении, что правая часть (3.4) не зависит от  $\bar{\Psi}$ , после интегрирования данного уравнения получаем:

$$\Psi = \int_0^t B(\tau) \frac{Hd\tau}{\Lambda_p}. \quad (3.5)$$

Данная величина показывает степень использования записи пластичности.

Если считать, что в исходном недеформированном состоянии  $\Psi = 0$ , а в момент разрушения  $\Psi = 1$ , за период времени  $[0, t]$  условие деформирования металла без разрушения имеет вид:

$$\Psi = \int_0^t B(\tau) \frac{H(\tau)}{\Lambda_p [k(\tau)]} d\tau < 1. \quad (3.6)$$

Полученная зависимость может быть использована при оценке предельных деформаций металлов в условиях холодного или теплого деформирования, так как оно не учитывает залечивания микродефектов вследствие рекристаллизации и диффузионных процессов при высоких температурах.

При монотонной деформации с постоянным коэффициентом  $k$  степень деформации в условиях формоизменения не должна превышать некоторой предельной величины, свойственной данному напряженному состоянию, т. е.  $B(\tau) = 1$ .

Зависимость  $\Lambda_p$  от показателя напряженного состояния – диаграмма пластичности – определяется экспериментальным путем [13]–[18].

### 3.1.2. Модель разрушения металла при больших пластических деформациях

Если при тех или иных значениях термомеханических параметров, к которым относятся температура, тензор напряжений, тензор скорости деформирования и др., нагруженное внешними силами тело претерпевает формоизменение без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности, можно говорить о понятии «пластичность», мерой которой является степень деформации сдвига, накопленная материалом к моменту разрушения.

В общем случае на элементарный единичный объем деформируемого тела действуют по его граням напряжения  $\sigma_{ij}$ , при этом он испытывает деформацию, скорости которой определяются компонентами тензора скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_{ij}$ . Мощность пластической деформации данного объема есть величина  $\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$ . В соответствии с [2] данное произведение равно произведению интенсивности касательных напряжений (напряжений деформаций сдвига)  $T$  на интенсивность скоростей деформаций сдвига  $H$ , т. е.:

$$\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = TH; \quad (3.7)$$

$$T = \sqrt{|I_2(D_\sigma)|}; \quad H = 2\sqrt{|I_2(D_{\dot{\varepsilon}})|}, \quad (3.8)$$

где  $I_2(D_\sigma)$ ,  $I_2(D_{\dot{\varepsilon}})$  – второй инвариант девиатора напряжений и второй инвариант девиатора скорости деформаций.

Вместо  $H$  можно принять пропорциональную ей величину  $\varepsilon_i = H / \sqrt{3}$  – интенсивность скоростей деформаций, а вместо  $T$  – интенсивность напряжений  $\sigma_i = \sqrt{3}T$ .

Пластическая деформация в течение отрезка времени  $0 \leq \tau \leq t$ , которая подсчитывается вдоль траектории движения частицы, составляет

$$\varepsilon_4 = \int_0^t \varepsilon_{4i} d\tau.$$

Степень деформации сдвига соответственно равна:

$$\Lambda = \int_0^t H d\tau. \quad (3.9)$$

При этом пластичность металла по А. А. Ильюшину [19] имеет обозначение  $\Lambda_p$  и характеризует степень деформации сдвига к мо-

менту разрушения. Пластичность металла зависит от напряженного состояния, т. е.

$$\Lambda_p = \Lambda_p [I_1(T_\sigma); I_2(T_\sigma); I_3(T_\sigma)], \quad (3.10)$$

где  $I_1(T_\sigma)$ ,  $I_2(T_\sigma)$ ,  $I_3(T_\sigma)$  – инварианты тензора напряжений.

Из общей теории пластичности следует, что в функции (3.9) за аргументы вместо инвариантов напряжений можно принять аргументы  $\sigma$ ;  $I_2(D_\sigma)$ ;  $I_3(D_\sigma)$ , т. е. среднее нормальное напряжение и два инварианта девиатора напряжений:

$$\Lambda_p = \Lambda_p [\sigma; I_2(D_\sigma); I_3(D_\sigma)]. \quad (3.11)$$

Согласно  $\pi$ -теореме выражение (3.10) представляется в виде зависимости от двух безразмерных параметров:  $\mu_\sigma$  – показателя формы девиатора напряжений (коэффициент Лодэ) и  $k$  – показателя напряженного состояния.

При деформации материального объема в условиях постоянства термомеханических параметров, от которых зависит величина  $\Lambda_p$ , условие деформирования без разрушения, с учетом вышеизложенного, записывается в виде:  $\Lambda < \Lambda_p$ , т. е. пока накопленная частицей степень деформации сдвига  $\Lambda$  не достигнет предельной величины  $\Lambda_p$  разрушения. Это можно записать следующим образом:

$$\Psi = \Lambda / \Lambda_p < 1. \quad (3.12)$$

Величина  $\Psi$  называется степенью использования запаса пластичности. В момент разрушения  $\Psi = 1$ . Деформацию будем рассматривать этапной, или дискретной. На  $i$ -м этапе степень использования запаса пластичности определим в соответствии с полученным выше выражением

$$\Psi_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (H / \Lambda_{pi}) d\tau, \quad (3.13)$$

где  $\Lambda_{pi}$  – пластичность подвергаемого обработке металла при тех же значениях термомеханических параметров, которые имеют место в момент времени  $\tau$ . Ее можно записать в виде сложной функции:

$$\Lambda_{pi} = \Lambda_{pi} [k(\tau); \mu_\sigma(\tau)]. \quad (3.14)$$

Общая степень использования запаса пластичности с учетом замедления разрушения принимается в виде:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Psi_i^{a_i} < 1, \quad (3.15)$$

где  $a_i \geq 1$ .

Разрушению соответствует величина  $\Psi = 1$ . Если в пределах этапа деформирования параметры изменяются достаточно мало, то условие разрушения (3.14) и (3.15) можно представить в виде:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta \Lambda_i}{\Lambda_i} \right)^{a_i} = 1, \quad (3.16)$$

где  $n$  – число этапов деформирования к моменту разрушения;  $a_i$  – эмпирический коэффициент, зависящий от схемы напряженного состояния.

### 3.1.3. Расчет предельных деформаций

В соответствии с теорией разрушения предельная степень деформации, которую можно сообщить металлу при пластическом его формоизменении, определится из условия (3.16). Схема расчета ресурса пластичности по данному соотношению следующая.

В процессе определения компонентов НДС в пластической области определяют интенсивность скоростей деформации сдвига  $H(\tau)$  и показатель напряженного состояния  $\sigma/T$ . Показатель  $\sigma/T$  дает возможность определить по диаграммам пластичности величину степени деформации до разрушения  $\Lambda_p = \Lambda_p$ . Как показывают исследования [8]–[18], характер зависимости пластичности от показателя напряженного состояния отличается не только для вида металла, но и для одного металла в различном состоянии обработки или состоянии поставки, зависящих от плавки, предшествующей обработке. Для удобства расчетов нужны аналитические формулы для расчета предельной деформации при различных значениях показателя  $k$ . Экспериментальные данные, представленные в [8]–[18] и связывающие  $\Lambda_p$  и  $k$ , аппроксимировали по методу наименьших квадратов. Установлено, что лучшим вариантом аппроксимирования диаграмм пластичности является степенная функция

$$\Lambda_p = A + B(k) + C(k)^2 + D(k)^3. \quad (3.17)$$

Диаграммы пластичности (3.16) вместе с рассчитанными значениями напряжений и деформаций служат основой для выбора предельных (по условию разрушения). Степень использования ресурса пластичности определяется по переходам по зависимости (3.17).

Для стали высокоуглеродистой, типа 85...90, получены следующие формулы расчета пластичности  $\Lambda_p$  до разрушения от показателя напряженного состояния  $k$ :

1. Отожженное состояние:

$$\Lambda_p = 1,572 - 2,252k + 0,984k^2 + 0,17k^3. \quad (3.18)$$

2. Упрочненная, 48 HRC:

$$\Lambda_p = 2,539 - 2,42k + 0,6769k^2 - 0,008k^3. \quad (3.19)$$

3. Упрочненная, 56 HRC:

$$\Lambda_p = 1,39 - 2,11k + 0,378k^2 - 0,88k^3. \quad (3.20)$$

Определение величины  $\Delta\Lambda_i$  в выражении (3.16) связано с расчетом деформационно-кинематических и энергосиловых параметров процесса волочения проволоки по базовой и проектируемой технологии получения проволоки диаметром 0,35 и 0,410 мм. Коэффициент контактного трения в волоке принимался  $f_1 = 0,05$  и  $f_2 = 0,02$ . Коэффициент трения между поверхностью вытяжного шкива и огибающими ее витками проволоки для расчета заднего противонатяжения принимался из справочных данных. Число витков проволоки на волочильной шайбе определяется технологической инструкцией волочения латунированной проволоки на станах тонкого волочения.

Увеличение прочности проволоки приводит к увеличению суммарной деформации на последнем переделе, ограничению единичных обжатий, а также ужесточает требования к охлаждению проволоки в процессе волочения и качеству ее поверхности.

Улучшения качества поверхности и повышения пластичности проволоки можно достичь при максимальном использовании допустимого числа переходов и уменьшения скольжения проволоки по волочильным шайбам. Необходимо также использовать метод минимального абсолютного скольжения, когда относительное скольжение равномерно уменьшается до нуля к концу маршрута волочения.

Для установления условий разрушения металла при высокоскоростном волочении проволоки в соответствии с условием (3.16) необходимо произвести расчеты деформационно-кинематических и энергосиловых параметров процесса волочения проволоки по соответствующим маршрутам для получения проволоки диаметром 0,35 и 0,41 мм. Расчет проводится по следующей разработанной нижеприведенной методике.

Вначале рассчитывается базовый процесс волочения заданного диаметра и свойства проволоки, который обеспечивает относительно стабильное удовлетворительное качество проволоки.

Исходные данные к расчету:

– ряд последовательных диаметров волок для рассчитываемого маршрута волочения  $d_i$ , мм;

– полууглы конусов рабочих зон для каждой волоки  $\alpha_i$ , рад;

– коэффициенты длины калибрующей зоны волоки  $m_i$ , определяющие длину этой зоны  $d_i m_i$ ;

– скорость проволоки для последней волоки  $V_n$ , м/с;

– величина противонапряжения проволоки для первой волоки  $\sigma_{v_0}$ , МПа;

– количество витков проволоки на тяговой шайбе для переходов волочения  $z_i$ ;

– коэффициент контактного трения в волоке  $f$ ;

– коэффициент контактного трения между витками проволоки и поверхностями тяговых шайб  $f_{ш}$ ;

– значения максимальных температур в очаге деформации для каждой волоки, полученные с помощью численного моделирования или аналитического расчета процесса волочения  $T_i$ , °С;

– зависимость для определения сопротивления пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ , МПа, где  $\varepsilon \Sigma_i$  – итоговая логарифмическая деформация проволоки для  $i$ -го перехода волочения; зависимость может быть получена аппроксимацией экспериментальной кривой растяжения проволочной заготовки;

– сопротивление пластической деформации проволочной заготовки  $\sigma S_0$ , МПа;

– скорость деформирования  $\xi_0$ , использованная при получении зависимости  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ , 1/с;

– функция для коэффициента влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации проволоки  $Z_i = f(\xi_i)$ , где  $\xi_i$  – скорость деформации проволоки для каждого  $i$ -го перехода волочения; функция может приниматься из справочных данных или из экспериментальных зависимостей;

– зависимости для диаграмм пластичности  $\Lambda_{pi} = f(k_i)$ , соответствующие разной степени упрочнения обрабатываемой проволоки, где  $\Lambda_{pi}$  – интенсивность сдвиговой деформации разрушения;  $k_i$  – коэффициент напряженного состояния очага деформации для каждого перехода волочения; зависимости могут быть получены аппроксимацией экспериментальных кривых диаграмм пластичности;

– базовое значение коэффициента запаса пластичности  $\Psi_{баз} = 0,8$ , принимаемое для известного действующего процесса волочения, который обеспечивает относительно стабильное удовлетворительное качество проволоки и называется базовым процессом. Если после изменения режимов этого процесса, например, увеличения скорости волочения, изменения коэффициента контактного трения, маршрута волочения и т. д.,  $\Psi$  уменьшается или остается равным относительно  $\Psi_{баз}$ , то такие изменения не приведут к потере качества проволоки, а если  $\Psi$  увеличится относительно  $\Psi_{баз}$ , то качество ухудшится вследствие исчерпания при волочении запаса пластичности и трещинообразования;

– паспортные кинематические вытяжки для тяговых шкивов  $\mu_i$ .

Расчет базового процесса с целью поиска значения степенного коэффициента  $a_0$  и определения относительных скольжений для тяговых шкивов ведется путем определения следующих параметров:

1. Вытяжка:

$$\mu_i = \frac{(d_{i-1})^2}{(d_i)^2}. \quad (3.21)$$

2. Скорость волочения:

$$V_{i-1} = \frac{V_i}{\mu_i}. \quad (3.22)$$

3. Длина очагов деформации:

$$l_i = \frac{(d_{i-1} - d_i)}{2 \tan(\alpha_i)}. \quad (3.23)$$



4. Время прохода элементарной точки поверхности проволоки через зоны деформации волок:

$$t_i = \frac{l_i}{V_i}. \quad (3.24)$$

5. Относительное обжатие проволоки:

$$\delta_i = \frac{(d_{i-1})^2 - (d_i)^2}{(d_{i-1})^2}. \quad (3.25)$$

6. Скорость деформации:

$$\xi_i = \frac{\delta_i}{t_i}, \text{ 1/с.} \quad (3.26)$$

7. Итоговая логарифмическая деформация для каждой волоки:

$$\varepsilon \Sigma_i = \ln \left[ \frac{(d_0)^2}{(d_i)^2} \right]. \quad (3.27)$$

8. Сопротивление пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения в зависимости от деформационного упрочнения  $\sigma S_i$ .

Определяется по зависимости  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ , МПа.

9. Коэффициент влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации  $Z_i$ . В зависимости от значений максимальных температур в очаге деформации выбирается соответствующая формула из справочных данных, по которой ведется расчет параметра  $Z_i$ .

10. Сопротивление пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения в зависимости от деформационного и скоростного упрочнения  $\sigma S_i$ :

$$\sigma s_i = Z_i \sigma S_i, \text{ МПа.} \quad (3.28)$$

11. Модуль упрочнения проволоки:

$$w_i = \frac{\sigma s_i - \sigma s_{i-1}}{\mu_i - 1}, \text{ МПа.} \quad (3.29)$$

12. Коэффициент, определяющий степень противонатяжения проволочки:

$$K_i = e^{2\pi z_{i-1} f_{\text{ш}}}. \quad (3.30)$$

13. Напряжение волочения:

$$\sigma v_i = \sigma s_i (1 + 2f) - \frac{(w_i - \sigma s_{i-1}) \left[ (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}} - 1 \right]}{\frac{f}{\tan(\alpha_i)} (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} - \frac{\sigma s_{i-1} - \left( \frac{\sigma v_{i-1}}{K_i} \right)}{(\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} + 4m_i f \sigma s_i, \text{ МПа.} \quad (3.31)$$

14. Коэффициент запаса волочения:

$$\gamma_i = \frac{\sigma v_i}{\sigma s_i}. \quad (3.32)$$

15. Радиальное нормальное напряжение в очаге деформации:

$$\sigma_i = -(\sigma s_i - \sigma v_i), \text{ МПа.} \quad (3.33)$$

16. Среднее напряжение очага деформации:

$$\sigma \sigma_i = \frac{2\sigma_i + \sigma v_i}{3}, \text{ МПа.} \quad (3.34)$$

17. Коэффициент напряженного состояния очага деформации:

$$k_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma \sigma_i}{\sigma s_i}. \quad (3.35)$$

18. Интенсивность сдвиговой деформации разрушения  $\Lambda_{pi}$ .

Определяется из зависимостей  $\Lambda_{pi} = f(k_i)$ .

19. Интенсивность деформации сдвига в очаге деформации:

$$\Lambda_i = 2\sqrt{3} \cdot \ln \left[ \frac{(d_{i-1})^2}{(d_i)^2} \right]. \quad (3.36)$$

20. Степенной коэффициент  $a_0$  для коэффициента запаса пластичности  $\Psi$  определяется с помощью компьютера из следующего уравнения:

$$\Psi_{\text{баз}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Lambda_i}{\Lambda_{pi}} \right)^{(a_0)^{(1+0,238k_i)}}, \quad (3.37)$$

где  $n$  – количество волок в маршруте волочения.

21. Скорость тяговых шайб:

$$B_{i-1} = \frac{B_i}{\mu n_i}, \text{ мм/с.} \quad (3.38)$$

22. Относительное скольжение проволоки по поверхности тяговых шайб:

$$C_i = \frac{B_i - V_i}{B_i}. \quad (3.39)$$

На этом этапе расчет базового процесса заканчивается.

Далее вводятся предлагаемые изменения в режим волочения базового процесса с целью его оптимизации. По аналогии с базовым процессом формируются исходные данные для измененного процесса с изменением предлагаемых для оптимизации режимов волочения с сохранением величины конечного диаметра проволоки и ее свойств в конце волочения.

Расчет измененного процесса выполняется в соответствии с измененными исходными данными по п. 1–22 расчета базового процесса с добавлением следующих пунктов:

23. Степень коэффициента запаса пластичности:

$$a_i = (a_0)^{(1+0,238k_i)}. \quad (3.40)$$

24. Частный коэффициент запаса пластичности для каждого прохода волочения:

$$\Psi_i = \left( \frac{\Lambda_i}{\Lambda_{pi}} \right)^{a_i}. \quad (3.41)$$

25. Коэффициент запаса пластичности для всего маршрута волочения:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Psi_i. \quad (3.42)$$

Если полученное значение  $\Psi$  меньше или равно  $\Psi_{\text{баз}}$ , то измененный процесс можно принять как оптимизированный, если полученное значение  $\Psi$  больше  $\Psi_{\text{баз}}$ , то изменения в процессе волочения приведут к переупрочнению проволоки и к ухудшению ее свойств. Также следует проанализировать изменения в величинах относительного скольжения, которые должны оставаться в допустимых пределах.

Для примера проведен расчет маршрута волочения проволоки диаметром 0,412 мм сталь 90 со следующими исходными данными базового процесса волочения:

– ряд последовательных диаметров волок из 27-ми штук для рассчитываемого маршрута волочения  $d_i$ , мм: 2,230, 2,010, 1,821, 1,650, 1,500, 1,360, 1,235, 1,122, 1,020, 0,930, 0,850, 0,814, 0,771, 0,738, 0,698, 0,666, 0,633, 0,604, 0,571, 0,545, 0,515, 0,494, 0,467, 0,448, 0,435, 0,420, 0,412;

– полууглы конусов рабочих зон для каждой волоки  $\alpha_i$ : для волок № 1–5 полуугол 0,087 рад ( $5^\circ$ ); для волок № 6–27 полуугол 0,105 рад ( $6^\circ$ );

– коэффициенты длины калибрующей зоны волоки  $m_i$ : для волок № 1–5  $m_i = 0,5$ ; для волок № 6–27  $m_i = 0,4$ ;

– скорость проволоки для последней волоки  $V_n$ , мм/с: 5000;

– величина противонатяжения проволоки для первой волоки  $\sigma_{v_0}$ , МПа: 0;

– количество витков проволоки на тяговой шайбе для переходов волочения  $z_i$ : для волок № 1–6  $z_i = 3,5$ ; для волок № 7–26  $z_i = 2,5$ ; для волоки № 27  $z_i = 1,5$ ;

– коэффициент контактного трения в волоке  $f = 0,05$ ;

– коэффициент контактного трения между витками проволоки и поверхностями тяговых шайб  $f_{\text{ш}} = 0,08$ ;

– значения максимальных температур в очаге деформации для каждой волоки получены численным методом. Максимальное значение температуры в очаге деформации  $T_{\text{max}} = 455^\circ\text{C}$  для волоки диаметром 0,494 мм;

– зависимость для определения сопротивления пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$  получена аппроксимацией экспериментальной кривой растяжения проволоочной заготовки:

$$\sigma S_i = \sigma S_0 + 544,311 \varepsilon \Sigma_i, \text{ МПа}; \quad (3.43)$$

– сопротивление пластической деформации проволоочной заготовки, МПа:

$$\sigma S_0 = 999 \text{ МПа};$$

– скорость деформирования, использованная при получении зависимости  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ :

$$\xi_0 = 0,005 \text{ 1/с};$$

– функция для коэффициента влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации проволоки  $Z_i = f(\xi_i)$  принимается из [20]. Согласно [20], для  $T_{\max} = 455 \text{ }^\circ\text{C}$  определяется отношение  $455/1500 = 0,3$ . Исходя из равенства данного отношения 0,3, функция имеет вид:

$$Z_i = 0,999034 \left( \frac{\xi_i}{\xi_0} \right)^{0,0324075}; \quad (3.44)$$

– зависимости для диаграмм пластичности  $\Lambda_{pi} = f(k_i)$ , соответствующие разной степени упрочнения обрабатываемой проволоки, получены аппроксимацией экспериментальных кривых диаграмм пластичности: для волок № 1–8 – зависимость (53); для волок № 9–18 – зависимость (54); для волок № 19–27 – зависимость (55);

– паспортные кинематические вытяжки для тяговых шкивов  $\mu_i$  (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Номер шкива	$\mu_i$	Номер шкива	$\mu_i$	Номер шкива	$\mu_i$
1	1,1698	10	1,1698	19	1,0909
2	1,1698	11	1,1698	20	1,0721
3	1,1698	12	1,1753	21	1,0909

Номер шкива	$\mu$	Номер шкива	$\mu$	Номер шкива	$\mu$
4	1,1698	13	1,0909	22	1,0720
5	1,1698	14	1,1753	23	1,0909
6	1,1698	15	1,0909	24	1,0719
7	1,1698	16	1,0721	25	1,0480
8	1,1698	17	1,0909	26, 27 (сдвоенная волока)	1,0984
9	1,1698	18	1,0717		

В результате расчета базового процесса по приведенной выше методике получено значение степенного коэффициента  $a_0 = 1,565$ .

Для выяснения влияния коэффициент контактного трения в волоке  $f$  на величину  $\Psi$  проведен расчет измененного процесса, в котором величина  $f$  уменьшена до 0,02. В результате расчета получено  $\Psi = 0,553$ . Снижение контактного трения привело к уменьшению  $\Psi$  с 0,8 до 0,553. Это означает, что резерв пластичности проволоки увеличился при сохранении ее прочностных характеристик. Таким образом получено дополнительное подтверждение вывода о необходимости снижения контактного трения для уменьшения трещинообразования в проволоке.

Предлагаемая методика, основанная на вычислении предельных деформаций, может использоваться для оценки влияния изменения других параметров волочения на пластические свойства получаемой проволоки. Таким образом, она позволяет оценивать критические режимы волочения, снижающие качество проволоки.

## **3.2. Экспериментальное оборудование для исследования процесса волочения проволоки**

### **3.2.1. Схема и общий вид экспериментальной установки для волочения проволоки**

Для экспериментальных исследований использовалась экспериментальная установка для волочения проволоки (рис. 3.1 и 3.2).

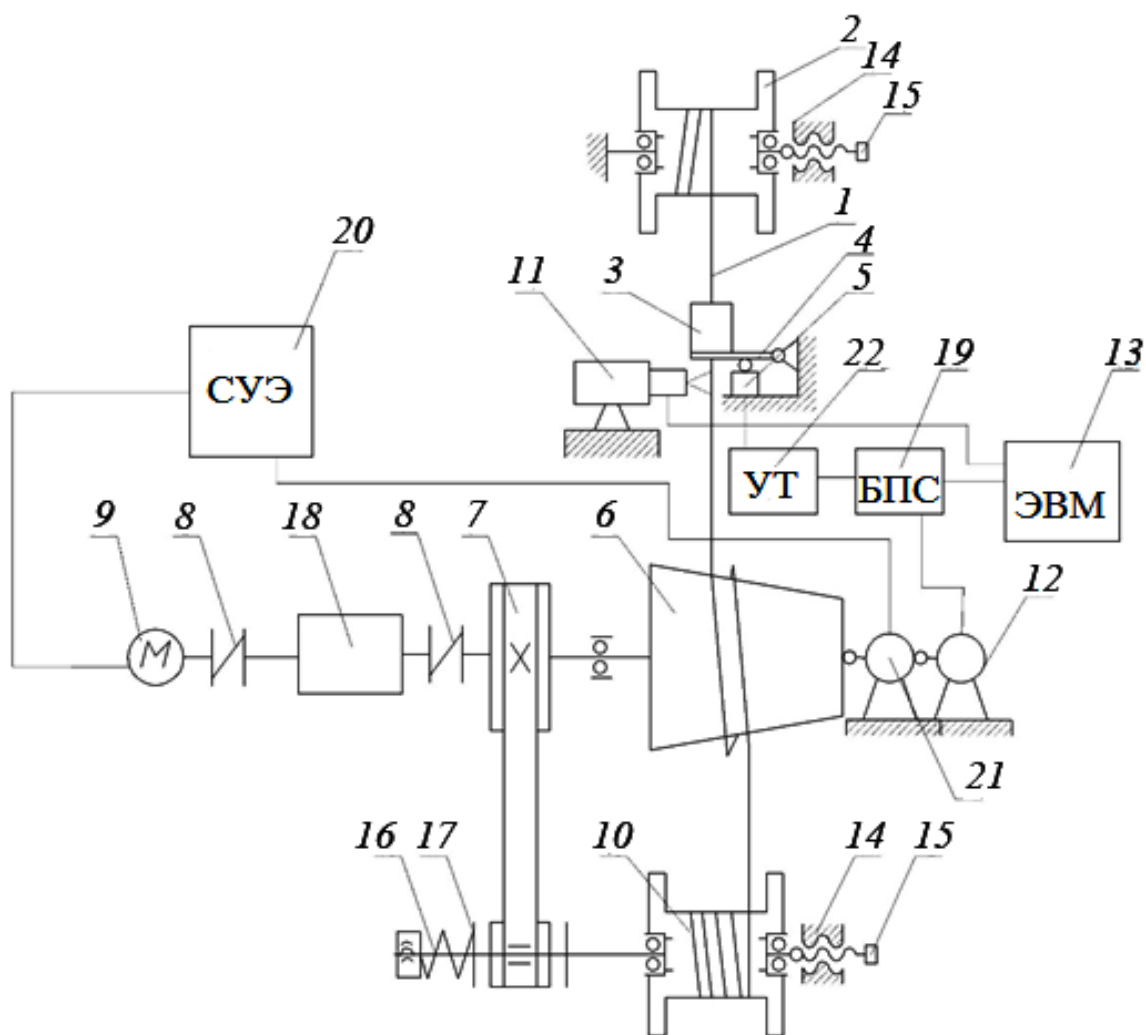


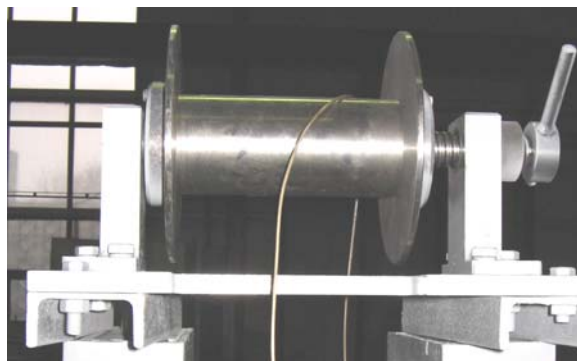
Рис. 3.1. Схема установки для волочения проволоки:  
 1 – проволока; 2 – катушка размоточная; 3 – волокодержатель;  
 4 – плита качающаяся; 5 – датчик усилия; 6 – тяговый барабан;  
 7 – клиноременная передача привода намоточной катушки;  
 8 – муфты соединительные; 9 – электродвигатель  
 постоянного тока; 10 – катушка намоточная; 11 – пирометр;  
 12 – датчик скорости вращения; 13 – контрольный блок (ЭВМ);  
 14 – винтовая пара; 15 – гайка зажимная; 16 – прижим;  
 17 – нажимной диск; 18 – коробка передач; 19 – блок  
 преобразования сигналов (контроллер); 20 – система  
 управления электроприводом; 21 – контроллер оборотов;  
 22 – усилитель тензометрический

Общий вид установки для волочения проволоки представлен на рис. 3.2.



*Рис. 3.2.* Общий вид экспериментальной установки для волочения проволоки

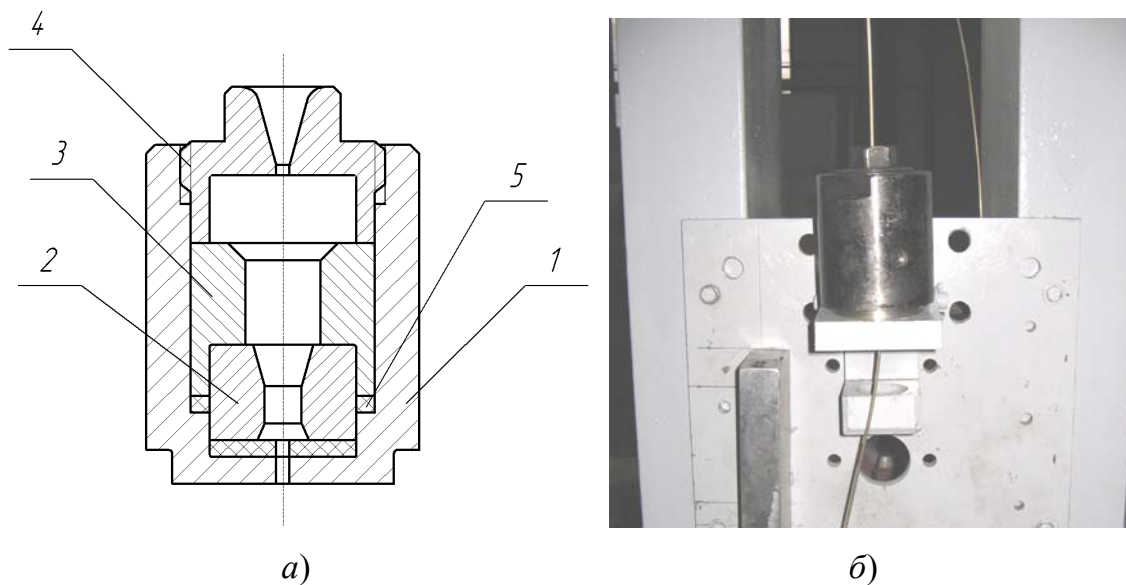
Катушка с исходной проволокой устанавливается в размоточное устройство. Чтобы избежать инерционного разгона катушки, с одной стороны ось вращения выполнена в виде винтовой пары с зажимной гайкой (рис. 3.3).



*Рис. 3.3.* Размоточное устройство

Исходная проволока проходит через волоку 2, которая установлена в волокодержатель, куда подается смазка (рис. 3.4).





*Рис. 3.4. Волокодержатель:*  
*а* – эскиз: 1 – корпус; 2 – волокна; 3 – обойма; 4 – гайка зажимная;  
 5 – прокладка уплотнительная; *б* – общий вид

Волокодержатель установлен на качающейся плите 4 (см. рис. 3.1), которая передает усилие волочения датчику 5 (рис. 3.5), сигнал от которого поступает на тензоусилитель 21, который через блок преобразования сигнала 19 подключен к контрольному блоку (ЭВМ) 13.



*Рис. 3.5. Датчик усилия*

На выходе из волокна с помощью оптического пирометра 11 фиксируется температура проволоки. Данные с пирометра поступают в контрольный блок 13.

Пирометр закреплен на штативе и установлен на передвижном столе (рис. 3.6), перемещая который можно точно навести прибор на объект измерения температуры.



Рис. 3.6. Оптический пирометр

Усилие, необходимое для волочения, обеспечивает тяговое устройство, которое состоит из электродвигателя 9 (рис. 3.7), коробки передач 18, муфты 8, клиноременной передачи 7, тягового барабана 6, датчика скорости вращения 12 и системы управления электроприводом (СУЭ) 20. Вращение от электродвигателя с переменной частотой вращения через коробку передач и соединительные муфты передается на тяговый барабан. Частота вращения фиксируется датчиком, сигнал от которого также поступает на контрольный блок 13 (рис. 3.1).

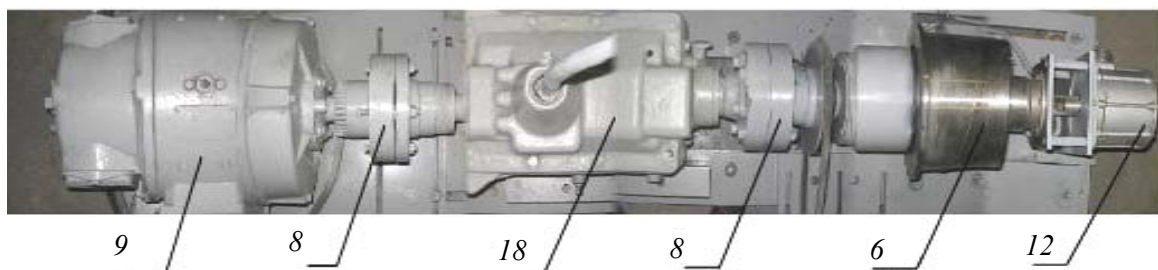


Рис. 3.7. Привод волочильного стана

Схема переключения скоростей коробки передач и передаточные числа каждой скорости приведены на рис. 3.8.

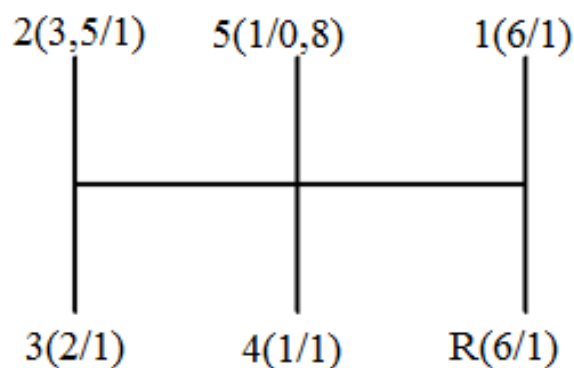


Рис. 3.8. Характеристика коробки передач

Сделав несколько витков на тяговом барабане, проволока с барабана передается на приемную катушку 10 намоточного устройства (рис. 3.9).

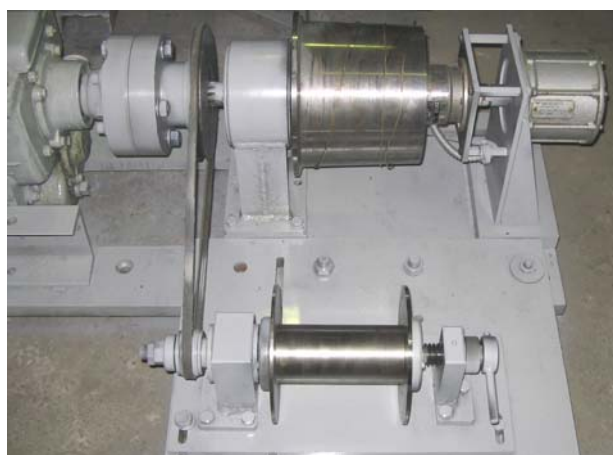


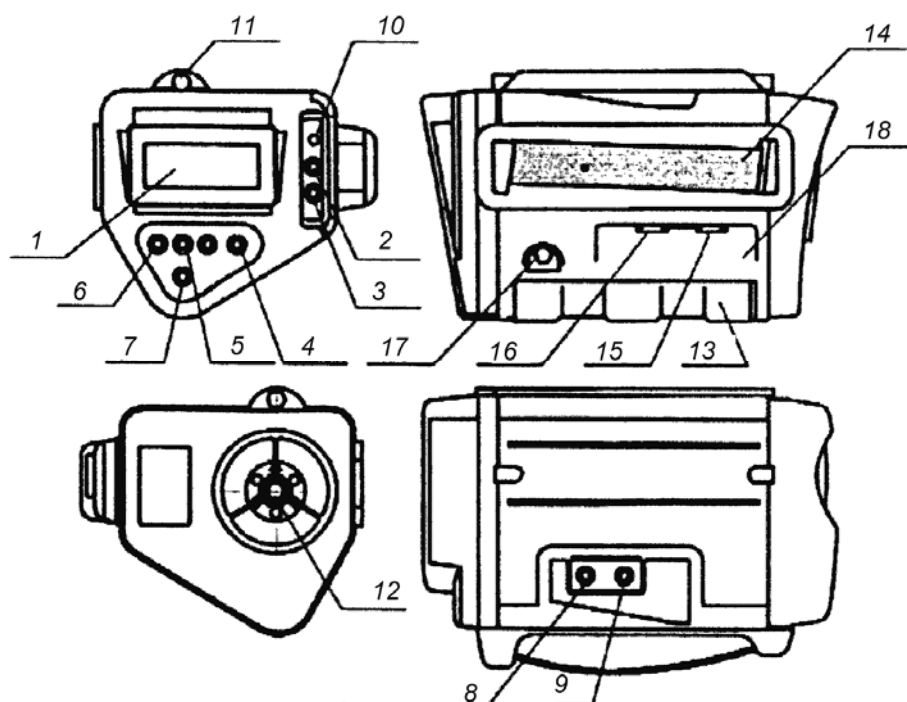
Рис. 3.9. Намоточное устройство

Привод намоточного устройства осуществляется от вала тягового барабана через клиноременную передачу 7. Шкив намоточного устройства имеет возможность скользить на валу. Вращение передается на вал через нажимные диски 17, которые прижимаются к вращающемуся шкиву намоточного устройства посредством упругого элемента 16.

### **3.2.2. Измерение температуры проволоки пирометром С-300**

Пирометр инфракрасный С-300.3 (рис. 3.10) предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхностей твердых (сыпучих) тел и воды по их собственному тепловому излучению. При этом размеры исследуемой поверхности объекта определяются угловым полем зрения пирометра.

Пирометры применяются для контроля состояния объектов и технологических процессов в различных отраслях промышленности, а также при проведении научных исследований.



*Рис. 3.10.* Схема расположения и назначение органов управления пирометра инфракрасного С-300.3:  
 1 – 4-строчный ЖКИ; 2 – кнопка включения-выключения прибора (ПИТАНИЕ); 3 – кнопка включения подсветки (СВЕТ);  
 4 – кнопка переключения в режим установки поправочного коэффициента Е; 5 – кнопка ввода; 6 – клавиши управления меню (<<>>); 7 – кнопка включения ЛЦУ; 8 – кнопка включения режима измерения (ИЗМЕРЕНИЕ); 9 – кнопка записи в память (ПАМЯТЬ); 10 – индикатор разряда батарей (РАЗРЯД); 11 – визир; 12 – лазерный целеуказатель; 13 – крышка батарейного отсека прибора; 14 – рукоятка с поддерживающим ремнем с застежкой «репейник»; 15 – разъем для подключения к компьютеру; 16 – разъем для подключения выносного индикатора; 17 – разъем для подключения блока питания БПС; 18 – место расположения заводского номера

### Технические характеристики

Диапазон измерения температуры .....	от –20 до +600 °С
Предел допускаемой погрешности	
в указанных диапазонах .....	±1,5 %
– абсолютной .....	±2 °С от –20 до +0 °С
– относительной.....	±1,5 °С от 0 до 100 °С

Время установления показаний .....	2 с
Показатель визирования .....	1 : 100
Потребляемая мощность .....	0,2 Вт
Диапазон установки излучательной способности объекта .....	0,01–2,5
Разрешение прибора .....	0,1 °С
Спектральный диапазон .....	8–14 мкм
Габаритные размеры пирометра .....	200 × 150 × 12 мм
Масса пирометра, не более .....	1,2 кг
Объем памяти, ячеек:	
– малой .....	320
– большой .....	16000
Интервал между измерениями .....	0,5–3600 с
Погрешность хода часов .....	10 с
Наработка на отказ .....	5000 ч
Срок службы .....	7 лет

### 3.2.3. Устройство и принцип работы

Пирометр является сложным оптико-электронным устройством, предназначенным для измерения температуры объектов бесконтактным способом.

В основе работы пирометра лежит принцип преобразования потока инфракрасного излучения объекта, принимаемого чувствительным элементом, в электрический сигнал, пропорциональный спектральной мощности потока излучения.

Структурная схема пирометра приведена на рис. 3.11.

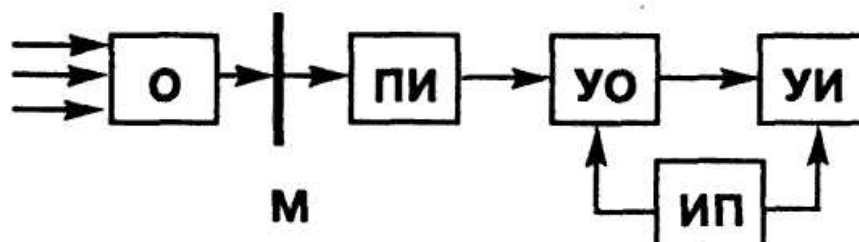


Рис. 3.11. Структурная схема пирометра:

О – объектив; М – модулятор; ПИ – приемник излучения;  
 УО – узел обработки сигнала; УИ – узел индикации;  
 ИП – источник питания

Поток инфракрасного излучения, испускаемый объектом, попадает в объектив О, где диафрагментируется и фокусируется на приемник излучения ПИ, находящийся в фокусе объектива. Модулятор М

преобразует поток излучения, попадающий на ПИ, из постоянного в переменный. Приемник излучения преобразует мощность падающего на него потока инфракрасного излучения в электрическое напряжение, пропорциональное температуре объекта.

Узел обработки преобразует сигнал с ПИ, в соответствии с номинальной статической характеристикой преобразования, в вид, удобный для индикации.

Узел индикации отображает поступающий на него сигнал с УО на знаковосинтезирующем индикаторе в виде цифрового значения температуры.

Источник питания обеспечивает все узлы прибора напряжениями, необходимыми для их работы.

Конструктивно пирометр выполнен в оригинальном пластмассовом корпусе, в котором располагаются все узлы пирометра.

После включения питания на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) появляется информация о готовности к работе.

Для измерения температуры необходимо: включить пирометр; ввести значение поправочного коэффициента излучательной способности измеряемого объекта  $E$  (0,01–2,50); направить прибор на объект и нажать кнопку «Измерение»; считать с ЖКИ значение, соответствующее температуре измеряемого объекта.

Поправочный коэффициент излучательной способности объекта  $E$  задается в пределах от 0,01 до 2,5 и зависит от размера и материала объекта, характера поверхности, наличия внешней засветки.

Коэффициент  $E$  определяется для каждого объекта отдельно по следующей методике:

1) определить с помощью контактного датчика температуру поверхности объекта, при этом температура поверхности должна превышать температуру окружающей среды минимум на 50 °С;

2) выбрать, зафиксировать и соблюдать при проведении дальнейших измерений положение пирометра (расстояние до объекта измерений, угол установки пирометра, характер поверхности объекта, например, наличие шлака на поверхности расплавов), экранировать внешнюю засветку;

3) изменением коэффициента  $E$  добиться совпадения показаний пирометра и температуры, измеренной с помощью контактного датчика;

4) при проведении дальнейших измерений соблюдать выбранные условия проведения измерений и полученное значение поправочного коэффициента  $E$ .

### 3.2.4. Измерение усилия волочения на базе усилителя тензометрического ТОПАЗ-3-02

Тензоусилитель ТОПАЗ-3-02 предназначен для усиления выходного сигнала тензометрических датчиков (рис. 3.12), собранных как по мостовой, так и по полумостовой схеме.

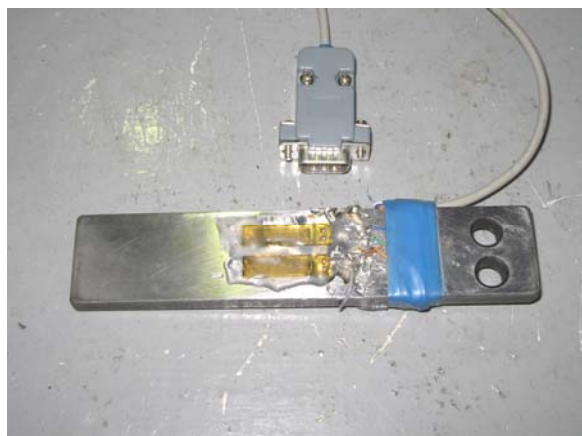


Рис. 3.12. Планка с тензодатчиками

Прибор применяется для усиления сигналов:

- 1) при измерении сил, моментов вращения, ускорений, гидродавлений и других параметров посредством тензометрических преобразователей (датчиков);
- 2) при измерении температур посредством термопар;
- 3) при измерении относительной деформации материалов.

#### Технические характеристики

Габаритные размеры .....	435 × 135 × 210 мм
Масса, не более .....	9,2 кг
Число измерительных каналов .....	10
Изменяемые деформации при одном активном тензорезисторе и питании в 9 В.....	$(0-0,1)10^{-3}-(0-10)10^{-3}$ отн. ед.
Диапазон входных напряжений.....	0-40 мВ
Делитель входного сигнала.....	2, 5, 10
Относительная погрешность делителя входного сигнала .....	6,0 %
Сопротивление тензорезисторов .....	100-400 Ом
Крутизна усиления при нагрузке 20 Ом .....	2,5 мА/мВ
Диапазон выходных токов .....	±15 мА

Приведенная основная погрешность преобразования напряжения в ток:	
– на участке $\pm 10$ мА .....	$\pm 1,5$ %
– на участке $\pm 15$ мА .....	$\pm 2,0$ %
Напряжения питания датчиков .....	$9 \pm 0,2$ В; $5 \pm 0,1$ В
Приведенная относительна погрешность преобразования напряжения в ток.....	4,5

### 3.2.5. Устройство и принцип работы

Конструктивно прибор выполнен по агрегатно-модульному принципу построения с использованием функционально-узлового метода разделения.

Прибор представляет собой корпус, в который спереди вставляются субблоки усилителей универсальных, преобразователей стабилизированных и блок питания. Связь прибора с датчиками осуществляется с помощью кабелей, присоединяемых к разъемам на задней стенке прибора, где также установлен предохранитель. На лицевой панели установлены: стрелочный измерительный прибор, переключатель ВЫХОД-КОНТРОЛЬ, контрольные гнезда, кнопочный переключатель управления, сигнальный светодиод.

Принцип действия прибора основан на усилении сигналов тензорезисторов или других датчиков, соединенных по мостовой схеме и питающихся постоянным стабилизированным напряжением.

Напряжение питания с аккумулятора поступает на устройство защиты по току и напряжению, а с него – на стабилизатор напряжения и преобразователи. Стабилизатор напряжения формирует напряжения 9 В и 5 В, предназначенные для питания датчиков. Преобразователи формируют гальванически развязанные напряжения питания усилителей универсальных. Каждый из преобразователей подключен к пяти усилителям универсальным. Сигналы с датчиков подаются на входы усилителей. Усиленные сигналы подаются на выходной разъем и через устройство коммутации подаются на стрелочный прибор.

На передней панели прибора расположены:

1. Потенциометр для установки нуля.
2. Потенциометр Б для балансировки усилительного тракта (датчик и усилитель).
3. Потенциометр для регулирования коэффициента усиления усилителя.
4. Кнопка М для включения масштабного сигнала.



5. Кнопка «5-9» для установки требуемого напряжения питания датчиков.

6. Кнопка «2-5-10» для установки требуемого масштабного коэффициента.

7. Кнопка «+ – » для переключения полярности выходного сигнала.

На передней панели блока питания расположены:

1. Кнопка ВКЛ включения прибора.

2. Кнопка ПД питания датчиков.

3. Кнопка ТОЧНО для повышения чувствительности стрелочного прибора.

4. Кнопка СТ для измерения стрелочным прибором выходного напряжения стабилизатора.

5. Кнопки П1 и П2 для измерения стрелочным прибором напряжений первого и второго преобразователей.

6. Переключатель ВЫХОД-КОНТРОЛЬ для подключения стрелочного прибора к выходу одного из каналов или измерения напряжений блока питания.

7. Гнезда для контроля выхода одного из каналов.

### **Подготовка тензоусилителя к измерениям**

1. Установить все кнопки прибора в отжатое положение, а переключатель ВЫХОД-КОНТРОЛЬ в положение КОНТРОЛЬ.

2. Подключить к прибору кабели на задней стенке. Их выводы соединить с датчиками.

3. Включить прибор кнопкой ВКЛ, при этом должен загореться светодиод. Прогреть прибор в течение 10 мин.

4. Проверить напряжение питания. Для этого нажать кнопки СТ, П1, П2 поочередно. Напряжение должно быть 8,55–9,45 В.

5. Проверить балансировку усилителей, для чего потенциометром установить стрелочку на ноль. Окончательную регулировку производить при нажатой кнопке ТОЧНО. Далее, нажав кнопку ПД, подать питание на датчики и потенциометром Б установить стрелку прибора на ноль.

### **3.2.6. Измерение скорости**

Для измерения скорости используется дискретный фотоэлектрический датчик перемещения типа ПДФ-3М, предназначенный для преобразования перемещений (угла поворота) рабочих органов

промышленных механизмов в число импульсов, а угловой скорости – в частоту следования импульсов.

*Структура условного обозначения:* ПДФ – перемещения, дискретный, фотоэлектрический; 3 – номер разработки; М – модернизированный:

### ПДФ-3М

#### *Условия эксплуатации*

Высота над уровнем моря не более 2000 м.

Температура окружающего воздуха от –10 до +60 °С.

Окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металл и изоляцию; содержание нетокопроводящей пыли в воздухе 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Коррозийная активность атмосферы соответствует группе С3 – для датчиков климатического исполнения У и группе Ж1 – для датчиков климатического исполнения Т по ГОСТ 15150–69.

Степень защиты IP54 по ГОСТ 14254–96. Группа механического исполнения М1 по ГОСТ 17516.1–90. Требования техники безопасности по ГОСТ 12.2.007.0–75 и ГОСТ 12.2.007.6–75. Датчики для внутригосударственных и экспортных поставок отвечают требованиям ТУ 16–90 ИТКА.648165.006. ТУ 16–90 ИТКА.648165.006.

### Технические характеристики

Выходные сигналы .....	две серии импульсов и нулевой импульс
Число импульсов в каждой серии на один оборот вала .....	600
Сдвиг импульсов разных серий	
относительно друг друга .....	от –90 до +20 эл. град.
Ширина нулевого импульса .....	от –90 до +20 эл. град.
Напряжение выходных сигналов .....	«0» – не более 1,5 В;
.....	«1» – не менее 23 В
Минимальное сопротивление нагрузки	
каждого канала .....	820 Ом
Максимальная частота вращения входного вала .....	3000 мин <sup>-1</sup>
Длительность фронта импульсов .....	не более 1 мкс
Номинальное напряжение питания .....	24 В
Потребляемый ток .....	не более 300 мА
Статический момент трения на входном	
валу датчика .....	не более 500 г · см

Режим работы.....	реверсивный
Ускорение входного вала .....	не более $200 \text{ 1/c}^2$
Скважность импульсов выходных сигналов обеих серий.....	от 2 до +20 %
Масса датчика ПДФ-3М.....	4 кг
Наработка на отказ.....	не менее 12000 ч

Все сигналы представлены в прямом и инверсном виде.

Работа датчика основана на модуляции светового потока, направленного от источника излучения 1 через диск 2 с прорезями на фотоприемник 3. При воздействии светового потока на фотоприемник в момент прохождения через прозрачный участок диска с выхода датчика снимается сигнал «1». Если световой поток подается на непрозрачный участок и фотоприемник 3 затемнен, то на выходе датчика – сигнал «0». Затем сигнал с фотоприемника усиливается и формируется. После усиления по мощности сигнал поступает на разъем, подключаемый к внешней схеме. Структурная схема датчика приведена на рис. 3.13, схема подключения датчика отражена в табл. 3.2.

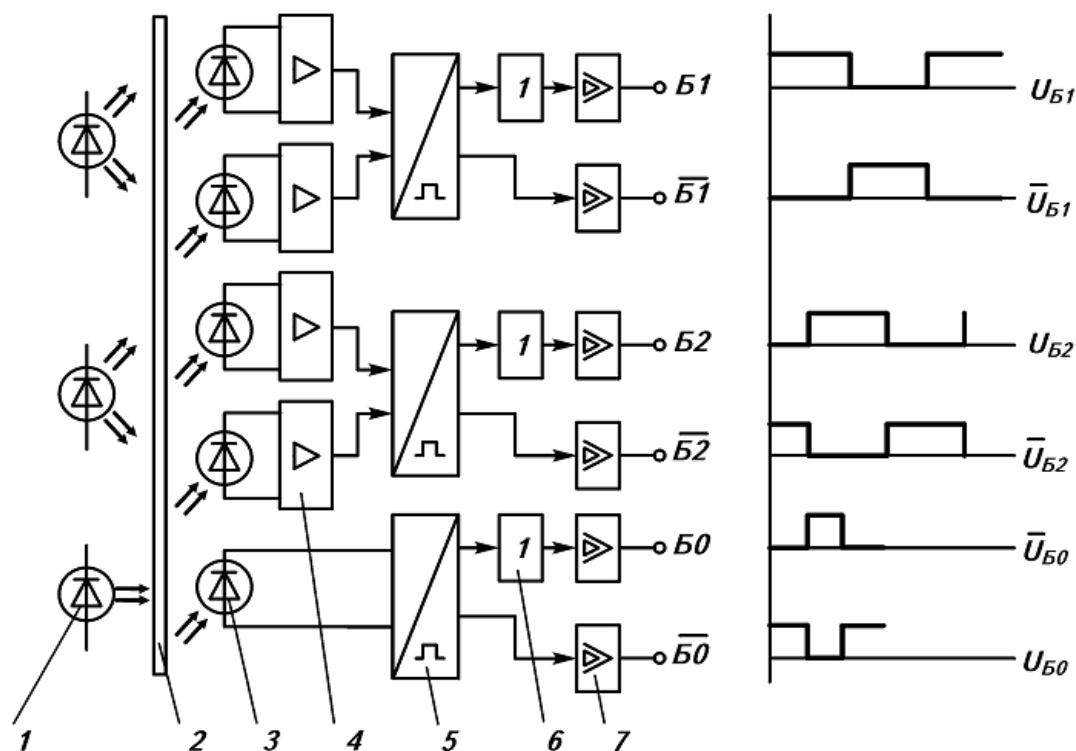


Рис. 3.13. Структурная схема датчика:

- 1 – светодиод; 2 – модуляционный диск; 3 – фотодиод;
- 4 – усилитель; 5 – формирователь сигнала; 6 – инвертор;
- 7 – усилитель мощности

Схема подключения датчика

Контакт разъема	Цепь
1	$\overline{B1}$
2	$\overline{B1}$
3	$\overline{B2}$
4	$\overline{B2}$
5	$\overline{B0}$
6	$\overline{B0}$
7	+24 В
8	0
9	Корпус
10	–
11	–
12	–

Конструктивно датчик смонтирован в цилиндрическом литом корпусе из алюминиевого сплава. Модуляционный диск имеет 600 прорезей, равномерно расположенных по периферии. Элементы электронной схемы датчика расположены на трех печатных платах. Корпус датчика с двух сторон закрыт литыми крышками из алюминиевого сплава. В задней крышке датчика ПДФ-3М предусмотрено отверстие для соединения вала датчика с валом модуля. Габаритные и установочные размеры приведены на рис. 3.14.

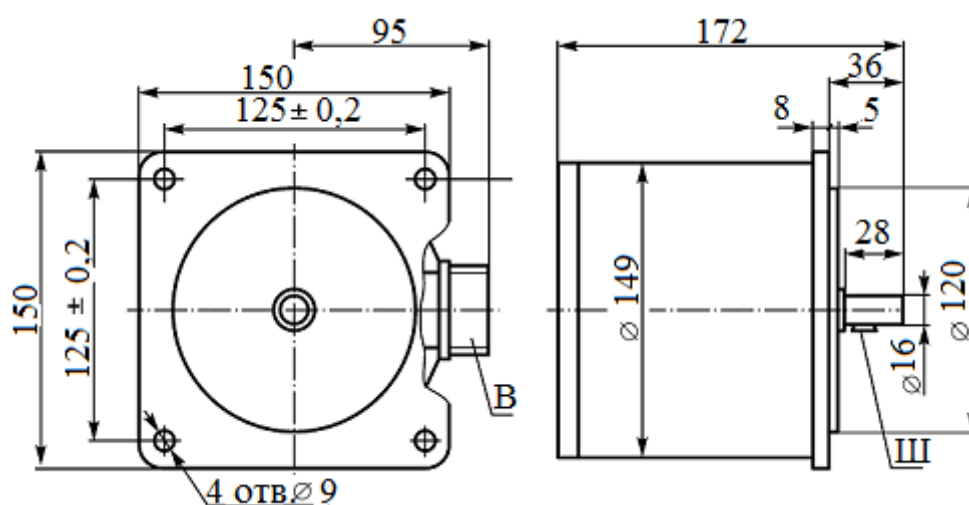


Рис. 3.14. Схема датчика измерения скорости ПДФ-3М:  
Ш – сегментная шпонка 4 × 6,5 по ГОСТ 24071–80; В – вилка

### 3.2.7. Блок преобразования сигналов

Измерение температуры производится бесконтактным методом при помощи пирометра С-300. Пирометр может подключаться напрямую к компьютеру по интерфейсу RS-232. Интерфейс обмена данными с пирометром построен по следующей схеме.

*Параметры настройки последовательного порта:*

- скорость передачи данных – 57600 бит/с;
- паритет – нет паритета;
- размер байта – 8 бит;
- стоп-бит – 1 стоп-бит.

Для того чтобы пирометр выдал в линию данные, необходимо послать байт 01H. После этого пирометр выдаст в линию 16 байт. Формат данных – *Single*.

Первые четыре байта – температура объекта, вторые – температура прибора, третьи – максимальная температура, четвертые – минимальная температура.

Измерение силы проводится тензометрическим способом, при помощи тензоусилителя ТОПАЗ-3М. Усилитель состоит из 10 каналов для подключения тензодатчиков. Подключение датчика производится по мостовой схеме. Выходы усилителя организованы по дифференциальной схеме. При максимальной нагрузке датчика выходное напряжение составляет 0,2 В.

Таким образом, необходимо разработать устройство, способное принимать данные с датчика оборотов и тензоусилителя, обрабатывать их и передавать в персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки.

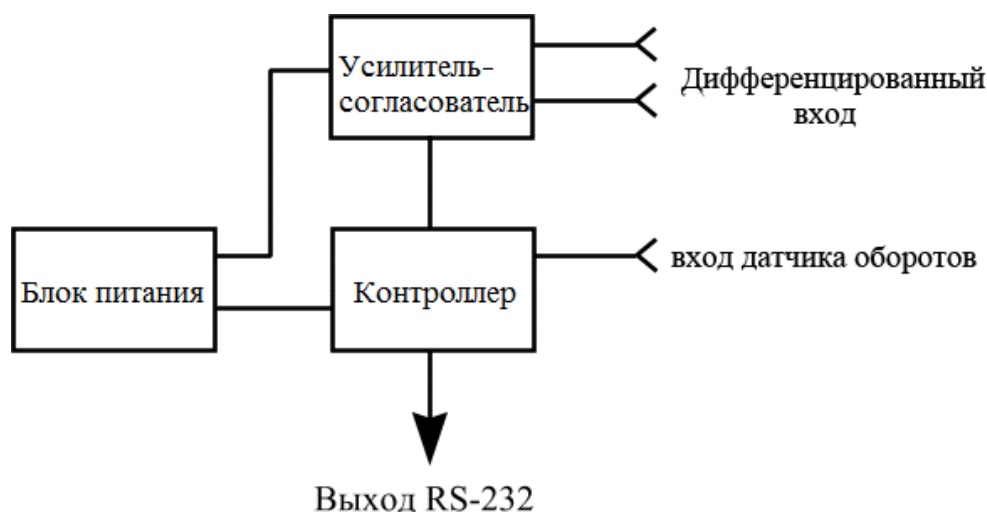


Рис. 3.15. Блок-схема устройства обработки сигналов

На рис. 3.15 представлена блок-схема разрабатываемого устройства. Усилитель-согласователь представляет собой дифференциальный усилитель, необходимый для того, чтобы согласовать малое выходное напряжение тензоусилителя ТОПАЗ-3М и необходимое входное напряжение АЦП. Контроллер производит оцифровку полученного сигнала с тензоусилителя, принимает данные с датчика оборотов, производит их первичную обработку и посылает данные в ПК по интерфейсу *RS-232*.

### 3.3. Программное обеспечение

Для обработки входящих данных используется специально разработанная программа. Она принимает данные от пирометра и контроллера, производит их вторичную обработку, выводит данные на экран ПК в реальном времени и позволяет записывать принимаемые данные, сохранять их в текстовый файл для последующего анализа. Для нормальной работы программы необходимо обеспечить следующую минимальную конфигурацию ПК: 1. Процессор – *Intel 600MHz*. 2. Винчестер – *4Gb*. 3. Дисковод *3.5"*. 4. 2 *COM* порта. 5. Операционная система *Windows NT 4.0* и выше.

На рис. 3.16 показано главное окно программы. Данные по каждому каналу измерений отображаются тремя способами: график, стрелочный указатель, численные данные. Числовые данные и данные на стрелочных указателях отображаются постоянно после подключения портов. Данные на графике начинают отображаться только после нажатия кнопки «Старт».

Меню «Файл» содержит следующие пункты:

1. «Новый» – начинает прием данных с портов ПК.
2. «Открыть» – в версии 1.1 не реализована.
3. «Заккрыть» – завершает прием и освобождает порты.
4. «Сохранить как» – выводит запрос об указании имени файла, в котором будет сохранена записываемая информация. Если этот пункт меню не доступен, это значит, что либо еще нечего сохранять, либо запись данных еще не остановлена. После ввода имени сохраняемого файла выводится запрос на ввод комментария к проводимому эксперименту. После ввода комментария происходит сохранение файла в текстовом формате в указанное место.

5. «Настройки» – ввод настроек программы.
6. «Выход» – закрывает программу без сохранения записанных данных.

Меню «Управление» содержит следующие пункты:

1. «Старт» – начинает запись данных.
2. «Пауза» – в версии 1.1 не реализована.
3. «Стоп» – завершает запись данных.

Меню «Справка» содержит пункт «О программе», в котором указаны общие сведения о программе и ее версия.

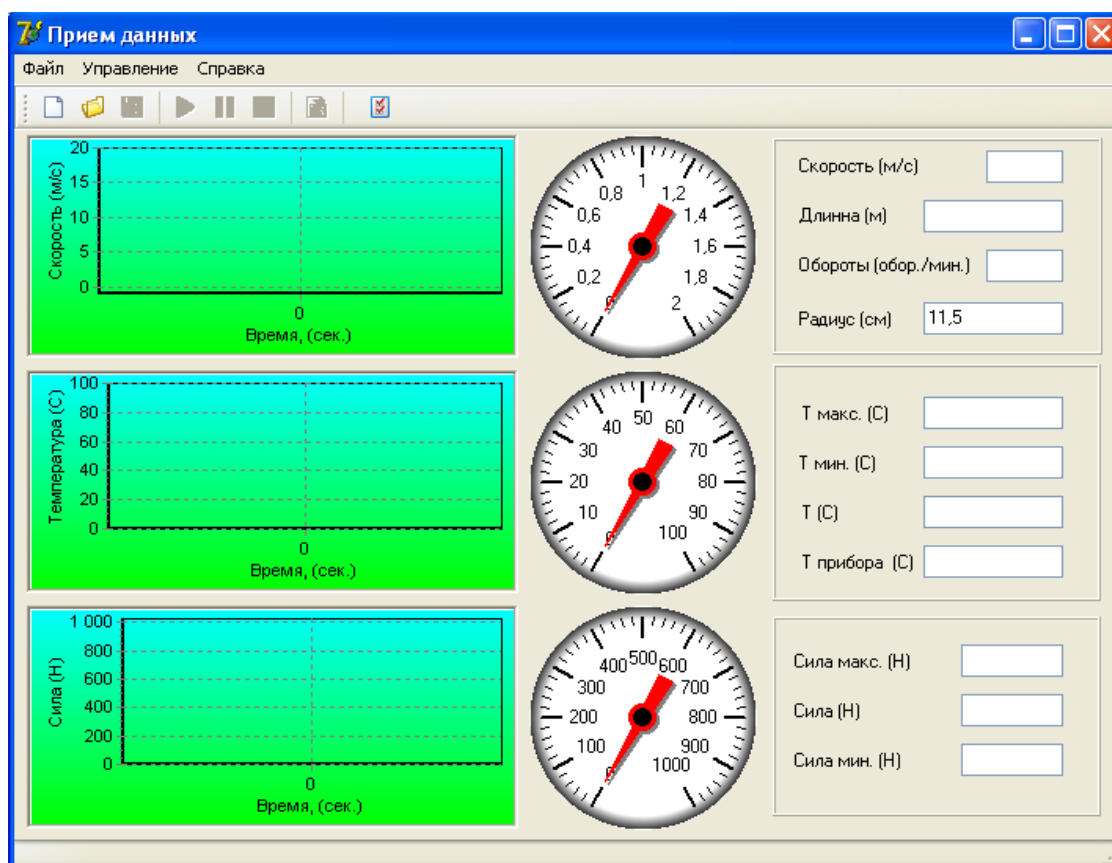


Рис. 3.16. Главное окно программы

При нажатии правой кнопкой на один из стрелочных приборов появляется подменю (рис. 3.17), которое дает возможность выбрать максимум, показываемый на приборе, а также выбрать количество делений прибора. Подменю прибора, отображающего скорость, имеет также пункт «На весь экран». При выборе этого пункта открывается окно, в котором отображается числовое значение скорости с максимально возможным размером цифр для данного размера окна.



Рис. 3.17. Окно стрелочного прибора

На рис. 3.18 показано окно настроек аппаратного обеспечения. Оно включает в себя три блока:

1. Блок настройки датчика оборотов.
2. Блок настройки пирометра.
3. Блок настройки датчика силы.

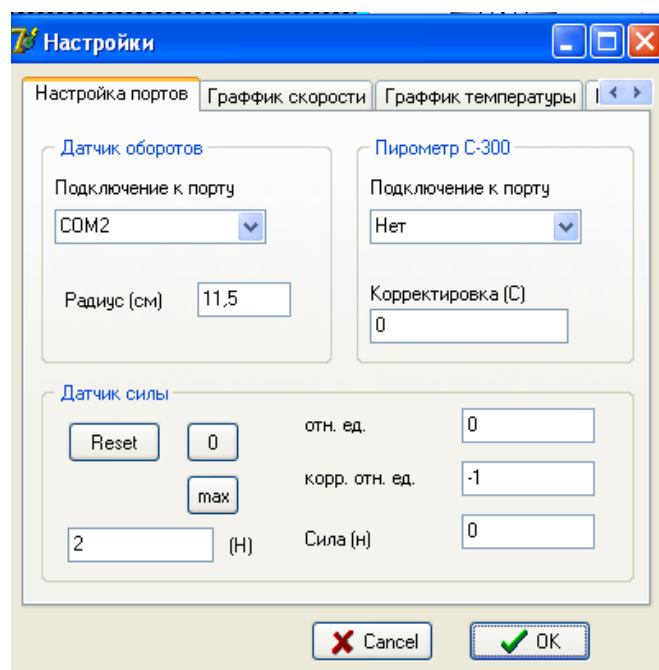


Рис. 3.18. Окно настроек

Блок настройки датчика оборотов включает в себя выбор COM порта, к которому подключен контроллер и возможность ввода диаметра волочильного барабана. Так как разработанный контроллер обрабатывает одновременно два сигнала (сигнал от датчика оборотов и датчика силы), то автоматически при правильном выборе порта датчика оборотов начинают приниматься и данные от датчика силы. Ввод диаметра волочильного барабана необходим для перевода угловой скорости вращения барабана в линейную скорость хода проволоки.



Блок настройки пирометра включает в себя выбор COM порта, к которому подключен пирометр и корректировка смещения показаний пирометра в градусах Цельсия.

Блок настройки датчика силы включает в себя только элементы, необходимые для его тарировки. К ним относятся:

1. Кнопка «Reset» – необходима для сброса всех тарировок датчика.
2. Кнопка «0» – необходима для установления 0 показаний.
3. Кнопка «max» – используется для ввода в соответствие показаний датчика и реально действующей силой.
4. Окно ввода реально действующей силы на датчик.
5. Окно «отн. ед.» – показывает оцифрованное значение, поступающее от контроллера.
6. Окно «кор. отн. ед.» – показывает оцифрованное значение, поступающее от контроллера с учетом смещения, которое получается как разность измеряемых показаний и измеренного показания в момент нажатия кнопки «0».
7. Окно «сила (Н)» показывает измеренную силу в (Н) после проведения тарировки.

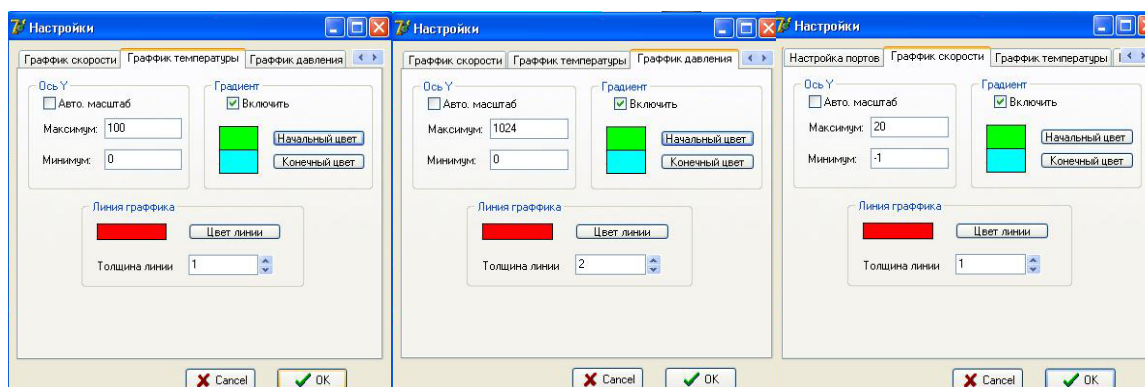


Рис. 3.19. Окна настройки отображения данных

На рис. 3.19 показана вкладка настройки вида графического отображения данных. Окно включает в себя также три блока:

1. Ось  $Y$  – выбираются минимальные и максимальные данные, которые могут отображаться на графиках. Также может быть выбран авто. Масштаб – при этом программа сама будет подбирать масштаб графика согласно принятым данным.
2. Градиент – здесь указывается начальный и конечный цвет заливки графика.
3. Линия графика – позволяет задать цвет и толщину отображаемой линии, данных на графике.

Каждый график настраивается отдельно, но окна настроек всех графиков полностью идентичны.

После ввода всех настроек и нажатия на кнопку «ОК» происходит сохранение всех настроек в файл Nastr.ini, таким образом обеспечивается восстановление всех настроек после повторного открытия программы.

### 3.4. Ход работы с программой

При первом включении программы необходимо удостовериться, что все приборы подключены и работают. После запуска программы зайти в пункт меню «Настройки» и зайти на вкладку «Настройки портов». Затем выбрать порты, к которым подключены устройства, ввести правильный диаметр волоочильного барабана и нажать кнопку «ОК». После этого выбрать пункт меню «Новый» или нажать на панели управления кнопку «Открыть порты». При правильном подключении и указании СОМ портов должны начать отображаться данные, принимаемые с датчиков и пирометра. Затем опять зайти в меню настройки и произвести тарировку датчика силы.

Тарировка проводится следующим образом:

1. Убедиться, что в окне «отн. ед.» показания больше 5. Если это не так, то подкорректировать тензоусилитель и добиться выполнения этого условия.
2. Убедиться, что датчик не нагружен и нажать кнопку «0». Показания окна «кор. отн. ед.» должны стать около 0.
3. Нагрузить датчик силы.
4. Заполнить поле ввода силы.
5. Нажать кнопку «max». Теперь окно «сила (Н)» показывает реальную силу нагруженного датчика.

Тарировка окончена. Теперь можно нажать кнопку «ОК». Данные о тарировке сохраняются, таким образом нет необходимости тарировать датчик каждый раз при загрузке программы.

Теперь нажатием кнопки «Старт» начинаем записывать показания приборов и проводим эксперимент. После окончания эксперимента нажимаем кнопку «Стоп». Запись данных прекращается. При повторном нажатии на кнопку «Старт» предыдущие данные удаляются и запись начинается сначала. Затем при необходимости сохранения данных выбираем в меню файл пункт «Сохранить как», вводим в появившемся окне имя файла, затем вводим комментарий к проведенно-

му эксперименту. После подтверждения ввода комментария происходит сохранение данных на диск. Данные сохраняются по умолчанию под именем *TEST.TXT* в папке основной программы. Теперь можно закрыть программу.

### **3.5. Вычислительный эксперимент по оптимизации и геометрии канала волоки в маршруте волочения**

Цель вычислительного эксперимента – получить зависимости, которые позволят определять геометрию канала волоки в зависимости от скорости волочения, диаметров проволоки до и после волоки при отсутствии недопустимого перегрева металла проволоки. В качестве таких формул могут быть использованы регрессионные зависимости вычислительного эксперимента, связывающие указанные параметры.

Под геометрией канала волоки понимается полуугол конуса рабочей зоны волоки, протяженность калибрующего пояска волоки, величины диаметров проволоки до и после волоки, определяющие длину очага деформации и степень деформации.

Длина калибрующей зоны волоки по результатам предыдущих исследований должна быть минимально возможной. Поэтому ее величину рекомендуется принимать 0,2–0,3 диаметра калибрующей зоны, что определено в ранее проведенных исследованиях. Большая длина вызывает рост температуры проволоки, а меньшая длина сократит ресурс волоки из-за повышенного износа перехода между конической рабочей зоной и цилиндрической калибрующей зоной, а также самой калибрующей зоны волоки. В этой связи в качестве геометрии волоки далее анализируется полуугол конической зоны волоки и диаметры проволоки до и после волоки, определяющие степень деформации проволоки и масштабное соотношение размеров очага деформации.

Выполненный вычислительный эксперимент основан на применении численных расчетов с помощью МКЭ. План и результаты вычислений этого эксперимента представлены в табл. 3.3–3.8, в которых имеются следующие параметры:  $\alpha$  – угол конуса волоки, град;  $k$  – коэффициент длины калибрующей зоны;  $T_1$  – температура поверхности проволоки в месте ее выхода из калибрующей зоны волоки, °С;  $T_2$  – температура поверхности проволоки в месте ее входа в калибрующую зону волоки, °С;  $P$  – усилие волочения;  $\gamma$  – коэффи-

коэффициент запаса волочения, равный отношению напряжения волочения к сопротивлению пластической деформации проволоки в волоке.

Особенность построения плана вычислений заключается в том, что учитываются не все диаметры волок в маршруте волочения, а только четыре диаметра, являющиеся границами трех диапазонов диаметров волок в маршрутах волочения.

В табл. 3.3 и 3.4 для проволоки диаметром 1,748 мм скорость волочения 0,598 м/с, для проволоки диаметром 1,054 мм скорость волочения 1,645 м/с, для проволоки диаметром 0,396 мм скорость волочения 11,651 м/с, для проволоки диаметром 0,349 мм скорость волочения 5,0 м/с.

В табл. 3.5 для проволоки диаметром 1,748 мм скорость волочения 0,478 м/с, для проволоки диаметром 1,054 мм скорость волочения 1,316 м/с, для проволоки диаметром 0,396 мм скорость волочения 9,321 м/с, для проволоки диаметром 0,349 мм скорость волочения 12,0 м/с.

В табл. 3.6 для проволоки диаметром 2,230 мм скорость волочения 0,17 м/с, для проволоки диаметром 1,360 мм скорость волочения 0,46 м/с, для проволоки диаметром 0,467 мм скорость волочения 3,89 м/с, для проволоки диаметром 0,412 мм скорость волочения 5,0 м/с.

В табл. 3.7 и 3.8 для проволоки диаметром 2,230 мм скорость волочения 0,273 м/с, для проволоки диаметром 1,360 мм скорость волочения 0,734 м/с, для проволоки диаметром 0,467 мм скорость волочения 6,227 м/с, для проволоки диаметром 0,412 мм скорость волочения 8,0 м/с.

Таблица 3.3

**Значения параметров волочения проволоки диаметром  $d$  из проволоки диаметром  $d_1$  при конечной скорости волочения 15 м/с для диаметра 0,357 и коэффициенте контактного трения  $f = 0,02$**

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$P$ , Н	$\gamma$
1	1,94	1,748	6	0,5	132,75	131,19	968,7	2,75549
2	1,94	1,748	13	0,5	140,2	142,01	1098	2,431
3	1,94	1,748	20	0,5	156,08	153,79	1324	2,01604
4	1,161	1,054	6	0,4	209,73	196,79	575,1	2,6491
5	1,161	1,054	13	0,4	211,1	219,83	629,9	2,41863
6	1,161	1,054	20	0,4	228,64	237,49	738,2	2,0638

Окончание табл. 3.3

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$P$ , Н	$\gamma$
7	0,405	0,396	6	0,4	278,65	171,83	44,14	8,29446
8	0,405	0,396	13	0,4	272,83	178,91	53,7	6,81783
9	0,405	0,396	20	0,4	350,99	239,83	79,15	4,62561
10	0,357	0,349	6	0,4	311,58	183,15	34,65	8,64389
11	0,357	0,349	13	0,4	299,8	190,78	43,43	6,89641
12	0,357	0,349	20	0,4	373,67	253,23	59,22	5,0576

Таблица 3.4

**Значения параметров волочения проволоки диаметром  $d$  из проволоки диаметром  $d_1$  при конечной скорости волочения 15 м/с для диаметра 0,357 и коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$**

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$P$ , Н	$\gamma$
1	1,94	1,748	6	0,5	150,78	153,59	1121	2,38113
2	1,94	1,748	13	0,5	148,62	159,2	1193	2,23742
3	1,94	1,748	20	0,5	162,27	173,04	1382	1,93143
4	1,161	1,054	6	0,4	267,87	270,82	727,6	2,09387
5	1,161	1,054	13	0,4	247,58	291,5	711,8	2,14035
6	1,161	1,054	20	0,4	254,09	300,57	791,2	1,92555
7	0,405	0,396	6	0,4	534,84	330,21	74,3	4,92755
8	0,405	0,396	13	0,4	477,81	315,76	80,3	4,55937
9	0,405	0,396	20	0,4	566,68	359,19	108,2	3,38371
10	0,357	0,349	6	0,4	626,2	372,93	60,93	4,91566
11	0,357	0,349	13	0,4	538,58	343,9	65,96	4,5408
12	0,357	0,349	20	0,4	628,75	383,65	85,74	3,49325

Таблица 3.5

**Значения параметров волочения проволоки диаметром  $d$  из проволоки диаметром  $d_1$  при конечной скорости волочения 12 м/с для диаметра 0,357 и коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$**

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$P$ , Н	$\gamma$
1	1,94	1,748	6	0,5	142,62	143,98	1072	2,48997
2	1,94	1,748	13	0,5	144,17	151,5	1166	2,28923

Окончание табл. 3.5

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$P$ , Н	$\gamma$
3	1,94	1,748	20	0,5	158,47	166,05	1356	1,96847
4	1,161	1,054	6	0,4	254,61	247,61	698,6	2,18079
5	1,161	1,054	13	0,4	234,28	267,95	693,7	2,19619
6	1,161	1,054	20	0,4	244,49	279,75	774,8	1,96631
7	0,405	0,396	6	0,4	485,94	304,59	74,7	4,90117
8	0,405	0,396	13	0,4	437,59	300,65	79,2	4,62269
9	0,405	0,396	20	0,4	504,31	345,56	106,6	3,4345
10	0,357	0,349	6	0,4	563,76	338,33	60,29	4,96784
11	0,357	0,349	13	0,4	490,23	327,04	65,12	4,59937
12	0,357	0,349	20	0,4	588,68	364,62	85,75	3,49284

Таблица 3.6

**Значения параметров волочения проволоки диаметром  $d$  из проволоки диаметром  $d_1$  при конечной скорости волочения 5 м/с для диаметра 0,412 и коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$**

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$P$ , Н	$\gamma$
1	2,45	2,23	6	0,5	159,625	170,355	2139	2,01116
2	2,45	2,23	13	0,5	147,163	166,82	1835	2,34435
3	2,45	2,23	20	0,5	159,098	182,787	1983	2,16938
4	1,5	1,36	6	0,4	244,983	264,285	1260	1,89058
5	1,5	1,36	13	0,4	224,299	259,059	1076	2,21388
6	1,5	1,36	20	0,4	231,935	275,415	1135	2,09879
7	0,494	0,467	6	0,4	455,186	414,388	178,4	2,69179
8	0,494	0,467	13	0,4	359,167	408,166	162,3	2,95881
9	0,494	0,467	20	0,4	361,219	430,865	174,8	2,74723
10	0,42	0,412	6	0,4	386,949	238,298	73,33	5,34503
11	0,42	0,412	13	0,4	374,24	300,252	76,84	5,10087
12	0,42	0,412	20	0,4	394,846	372,581	89,99	4,35549

Таблица 3.7

**Значения параметров волочения проволоки диаметром  $d$   
из проволоки диаметром  $d_1$  при конечной скорости  
волочения 8 м/с для диаметра 0,412 и коэффициенте  
контактного трения  $f = 0,05$**

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$P$ , Н	$\gamma$
1	2,45	2,23	6	0,5	170,847	184,832	2160	1,99161
2	2,45	2,23	13	0,5	154,105	179,876	1853	2,32158
3	2,45	2,23	20	0,5	166,059	196,472	2003	2,14772
4	1,5	1,36	6	0,4	268,687	293,66	1273	1,87127
5	1,5	1,36	13	0,4	239,924	284,192	1087	2,19147
6	1,5	1,36	20	0,4	243,746	298,956	1147	2,07684
7	0,494	0,467	6	0,4	532,783	487,789	180,4	2,66195
8	0,494	0,467	13	0,4	410,398	470,059	164,2	2,92458
9	0,494	0,467	20	0,4	396,831	513,988	177	2,71308
10	0,42	0,412	6	0,4	469,994	277,816	74,08	5,29091
11	0,42	0,412	13	0,4	454,552	344,51	77,11	5,08301
12	0,42	0,412	20	0,4	470,294	416,295	90,9	4,31189

Таблица 3.8

**Значения параметров волочения проволоки диаметром  $d$   
из проволоки диаметром  $d_1$  при конечной скорости  
волочения 8 м/с для диаметра 0,412 и коэффициенте  
контактного трения  $f = 0,02$**

Номер опыта	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha$ , °	$k$	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$P$ , Н	$\gamma$
1	2,45	2,23	6	0,5	137,625	140,461	1567	2,7453
2	2,45	2,23	13	0,5	136,978	145,971	1550	2,77541
3	2,45	2,23	20	0,5	151,917	161,234	1762	2,44147
4	1,5	1,36	6	0,4	203,443	206,136	924,3	2,57723
5	1,5	1,36	13	0,4	200,73	213,632	902	2,64094
6	1,5	1,36	20	0,4	216,704	234,679	1013	2,35156
7	0,494	0,467	6	0,4	317,27	271,314	120,6	3,98189
8	0,494	0,467	13	0,4	270,862	275,499	128	3,75168
9	0,494	0,467	20	0,4	307,94	293,517	149,7	3,20785
10	0,42	0,412	6	0,4	239,42	146,588	40,92	9,57847
11	0,42	0,412	13	0,4	245,592	188,786	49,48	7,9214
12	0,42	0,412	20	0,4	288,945	279,485	64,45	6,08147

При обработке результатов расчета получены следующие зависимости и выводы.

Зависимость температуры поверхности проволоки диаметром 2,230 мм в месте выхода из калибрующей части волокна  $T1$  и в месте входа в калибрующую часть волокна  $T2$  от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05 (рис. 3.20):

$$T1 = 180,735 - 7,23277\alpha + 0,270883\alpha^2 + 81,786V, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (3.45)$$

$$T2 = 167,802 - 4,58622\alpha + 0,209459\alpha^2 + 134,171V, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.46)$$

Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 2,230 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05 (рис. 3.21):

$$P = 2730,49 - 131,76\alpha + 4,63776\alpha^2 + 192,055V, \text{ Н}. \quad (3.47)$$

Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 2,230 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05 (рис. 3.22):

$$\gamma = 1,36067 + 0,145467\alpha - 0,00516314\alpha^2 - 0,208289V. \quad (3.48)$$

Анализ контурного графика на рис. 3.20 показывает, что с ростом скорости волочения минимальный нагрев проволоки обеспечивает угол конуса волокна  $11^\circ$  (полуугол  $5,5^\circ$ ). В соответствии с рис. 3.21 усилие волочения в области  $11^\circ$  на всем диапазоне исследованных скоростей находится в области 1890 Н, что в сравнении с другими значениями усилий волочения приближается к минимальному значению. Поэтому этот угол можно назвать оптимальным с точки зрения оптимизации по усилию волочения. Коэффициент запаса при волочении с углом  $11^\circ$  принимает максимальное значение (рис. 3.22), что позволяет заключить: данный угол оптимален в отношении исключения обрывности.

Формулы (3.45)–(3.48) позволяют вычислять точные значения параметров оптимизации режимов волочения.



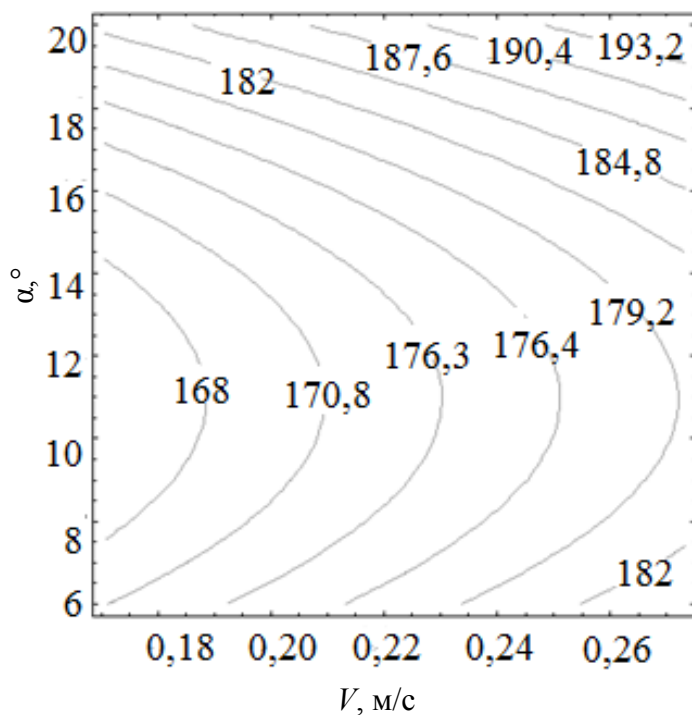


Рис. 3.20. Зависимость максимальной температуры  $T_{\max} = \max(T1, T2)$  поверхности проволоки диаметром 2,230 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

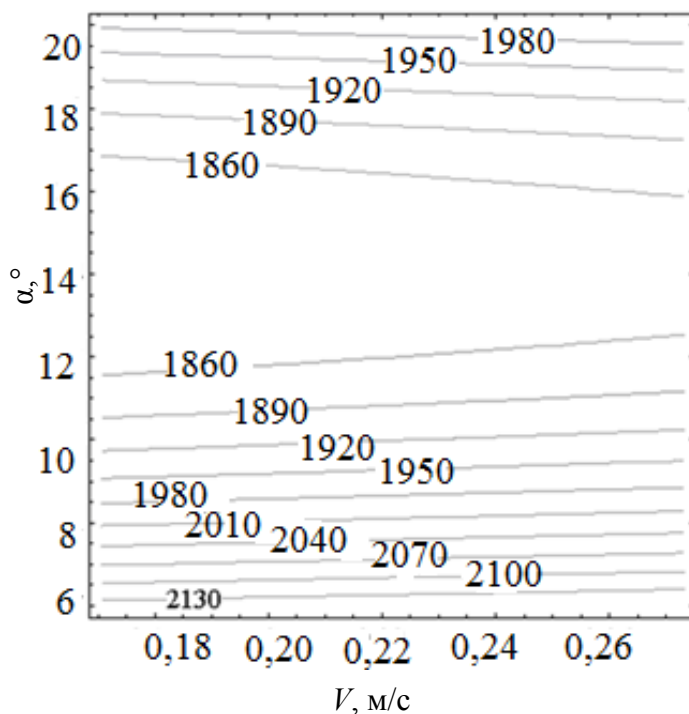


Рис. 3.21. Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 2,230 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

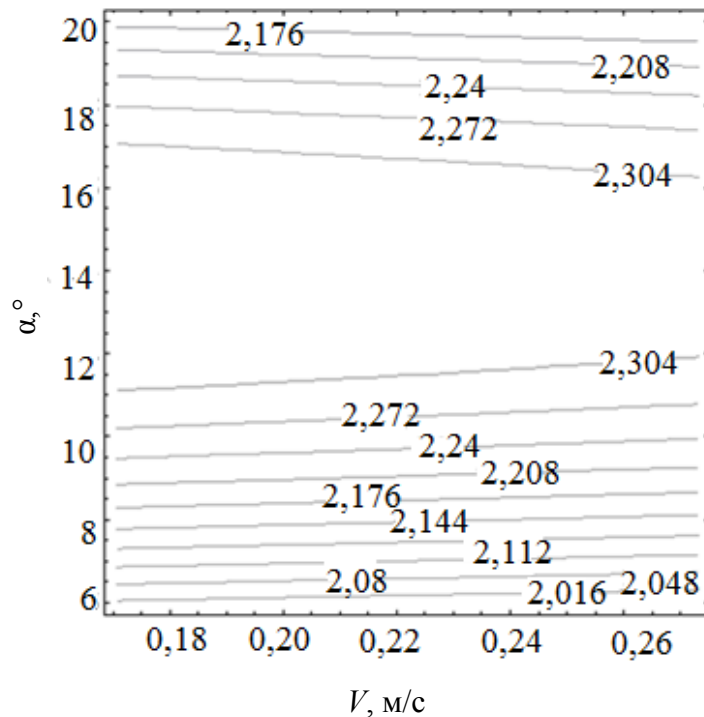


Рис. 3.22. Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 2,230 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

Зависимость температуры поверхности проволоки диаметром 1,360 мм в месте выхода из калибрующей части волоки  $T1$  и в месте входа в калибрующую часть волоки  $T2$  от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05 (рис. 3.23):

$$T1 = 265,33 - 9,43598\alpha + 0,31074\alpha^2 + 61,9158V, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (3.49)$$

$$T2 = 247,133 - 5,49072\alpha + 0,233745\alpha^2 + 94,4949V, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.50)$$

Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 1,360 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05 (рис. 3.24):

$$P = 1593,67 - 73,8316\alpha + 2,4949\alpha^2 + 43,5856V, \text{ Н}. \quad (3.51)$$

Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 1,360 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05 (рис. 3.25):

$$\gamma = 1,30362 + 0,130612\alpha - 0,00445518\alpha^2 - 0,0770837V. \quad (3.52)$$

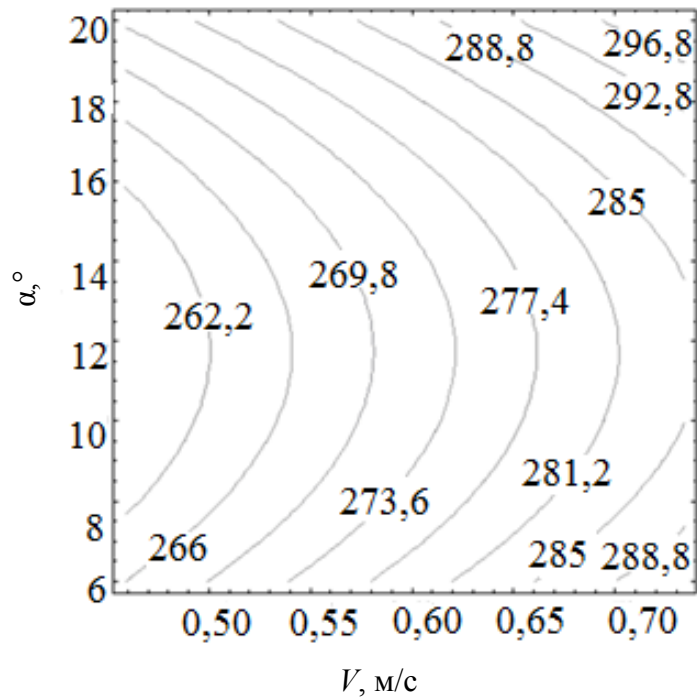


Рис. 3.23. Зависимость максимальной температуры  $T_{\max} = \max(T1, T2)$  поверхности проволоки диаметром 1,360 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

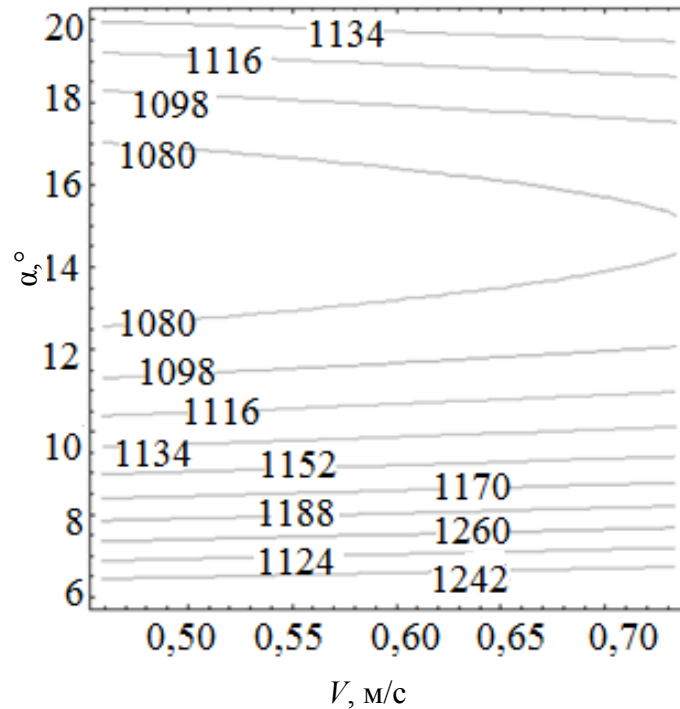


Рис. 3.24. Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 1,360 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

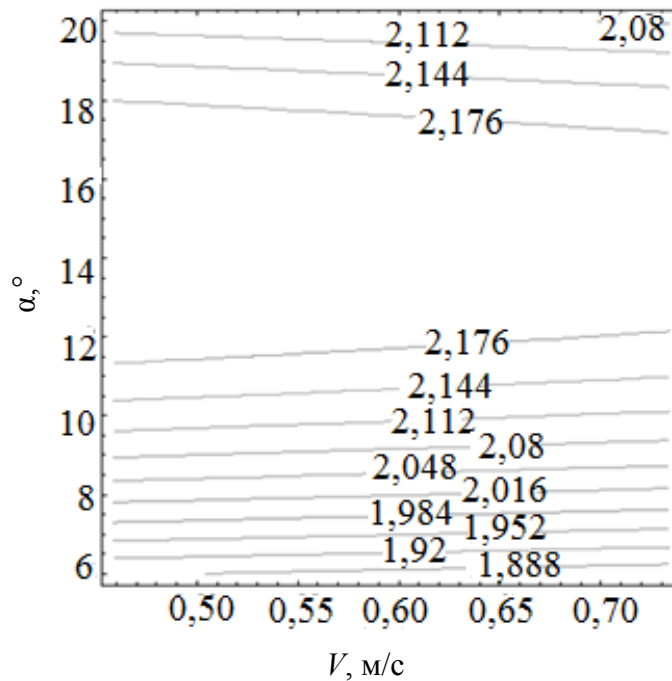


Рис. 3.25. Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 1,360 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

Анализ контурного графика на рис. 3.23 показывает, что с ростом скорости волочения минимальный нагрев проволоки обеспечивает угол конуса волоки  $11,5^\circ$  (полуугол  $5,75^\circ$ ). В соответствии с рис. 3.24 усилие волочения в области  $11,5^\circ$  на всем диапазоне исследованных скоростей находится в области 1098 Н, что в сравнении с другими значениями усилий волочения приближается к минимальному значению. Поэтому этот угол можно назвать оптимальным с точки зрения оптимизации по усилию волочения. Коэффициент запаса при волочении с углом  $11,5^\circ$  принимает максимальное значение (рис. 3.25), что позволяет заключить: данный угол оптимален в отношении исключения обрывности.

Формулы (3.49)–(3.51) позволяют вычислять точные значения параметров оптимизации режимов волочения.

Зависимость температуры поверхности проволоки диаметром 0,467 мм в месте выхода из калибрующей части волоки  $T_1$  и в месте входа в калибрующую часть волоки  $T_2$  от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05:

$$T_1 = 551,157 - 35,6559\alpha + 1,05556\alpha^2 + 23,4749V, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.53)$$

$$T_2 = 339,655 - 10,4916\alpha + 0,462143\alpha^2 + 31,1805V, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.54)$$

Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 0,467 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05:

$$P = 211,76 - 7,89082\alpha + 0,293878\alpha + 0,870817V, \text{ Н.} \quad (3.55)$$

Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 0,467 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05:

$$\gamma = 2,14167 + 0,130189\alpha - 0,00486087\alpha^2 - 0,0140224V. \quad (3.56)$$

Анализ контурного графика на рис. 3.26 показывает, что с ростом скорости волочения минимальный нагрев проволоки обеспечивает угол конуса волюки  $11,5^\circ$  (полуугол  $5,75^\circ$ ). В соответствии с рис. 3.27 усилие волочения в области  $11,5^\circ$  на всем диапазоне исследованных скоростей находится в области 164,8 Н, что в сравнении с другими значениями усилий волочения приближается к минимальному значению. Поэтому этот угол можно назвать оптимальным с точки зрения оптимизации по усилию волочения. Коэффициент запаса при волочении с углом  $11,5^\circ$  приближается к максимальному значению (рис. 3.28), что позволяет заключить: данный угол оптимален в отношении исключения обрывности.

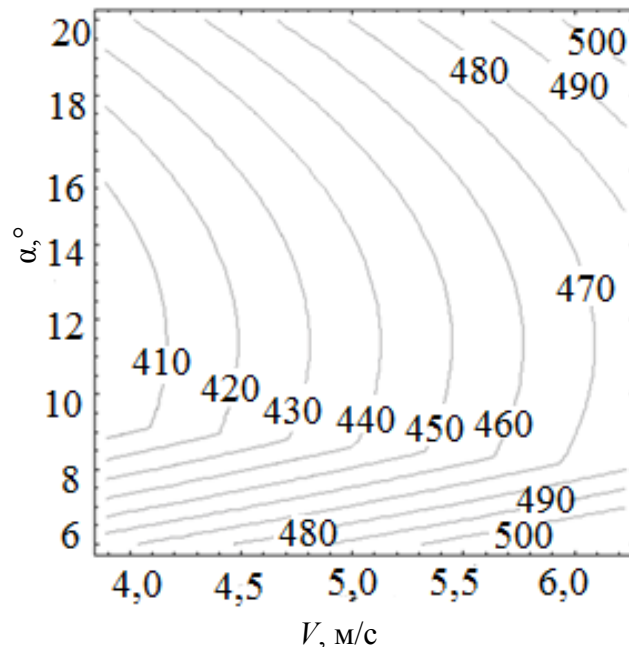


Рис. 3.26. Зависимость максимальной температуры  $T_{\max} = \max(T1, T2)$  поверхности проволоки диаметром 0,467 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

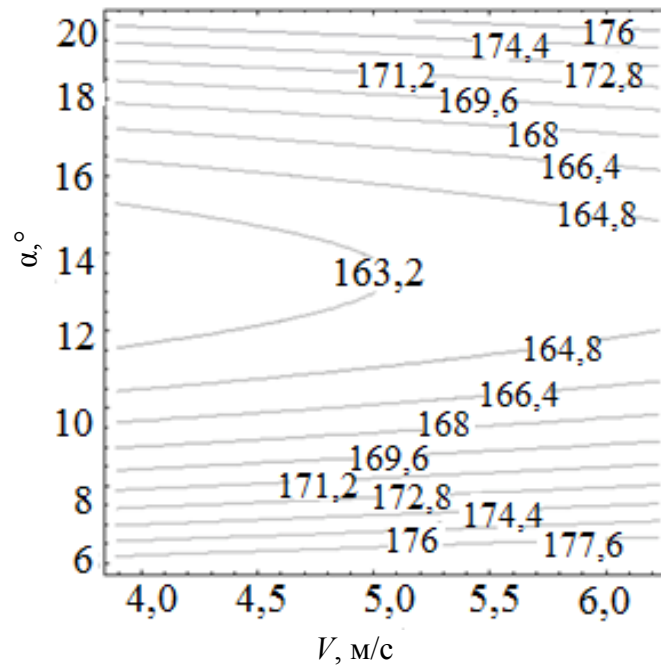


Рис. 3.27. Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 0,467 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

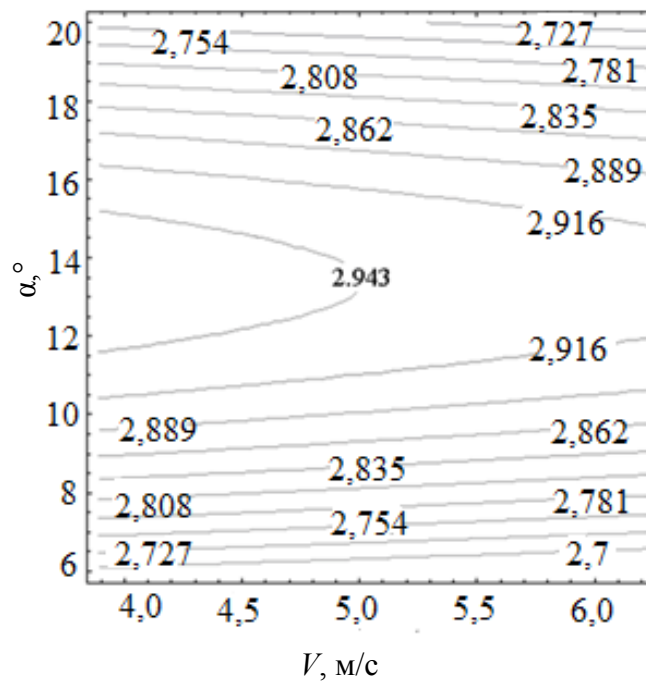


Рис. 3.28. Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 0,467 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

Формулы (3.52)–(3.56) позволяют вычислять точные значения параметров оптимизации режимов волочения.

Зависимость температуры поверхности проволоки диаметром 0,412 мм в месте выхода из калибрующей части волоки  $T1$  и в месте входа в калибрующую часть волоки  $T2$  от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05:

$$T1 = 293,734 - 8,26324\alpha + 0,329077\alpha^2 + 26,5339V, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.57)$$

$$T2 = 117,001 + 7,68989\alpha + 0,0789082\alpha^2 + 14,1656V, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.58)$$

Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 0,412 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05:

$$P = 77,6266 - 1,51041\alpha + 0,104082\alpha^2 + 0,214444V, \text{ Н}. \quad (3.59)$$

Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 0,412 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05:

$$\gamma = 5,17158 + 0,0708949\alpha - 0,00543079\alpha^2 - 0,012842V. \quad (3.60)$$

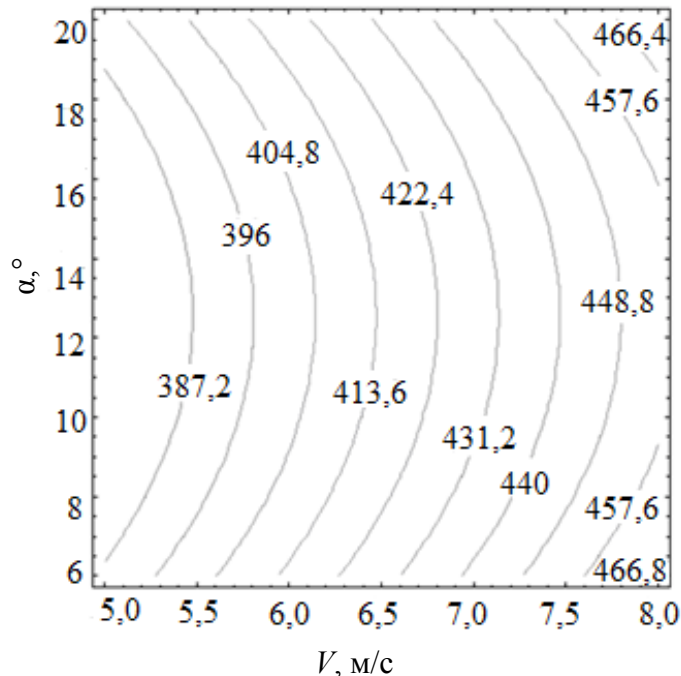


Рис. 3.29. Зависимость максимальной температуры  $T_{\max} = \max(T1, T2)$  поверхности проволоки диаметром 0,412 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

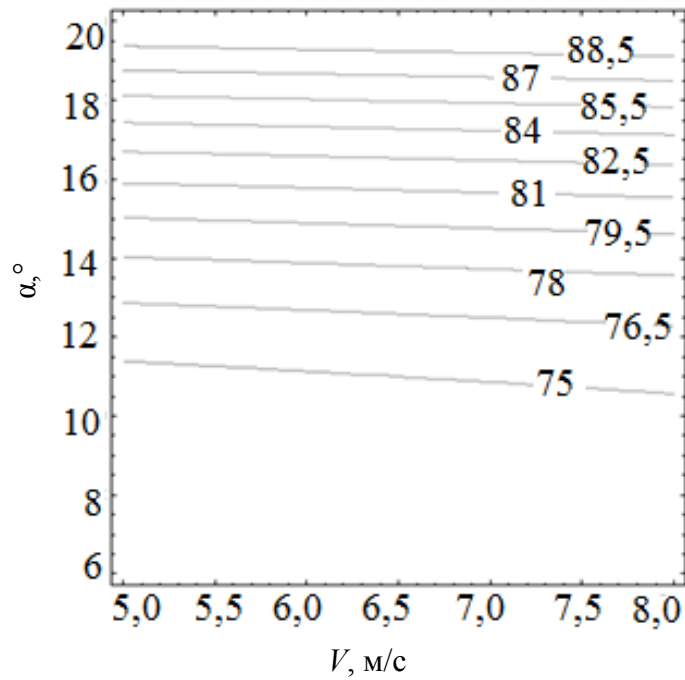


Рис. 3.30. Зависимость усилия волочения проволоки диаметром 0,412 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05

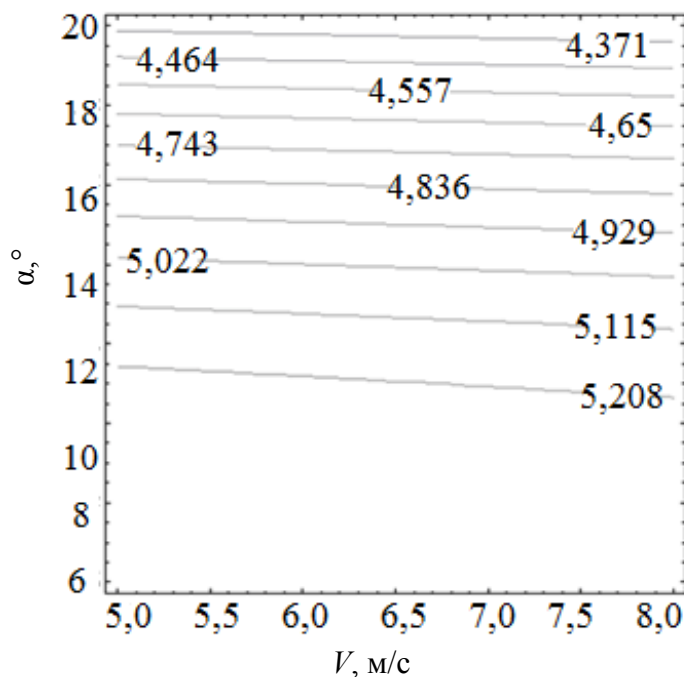


Рис. 3.31. Зависимость коэффициента запаса при волочении проволоки диаметром 0,412 мм от угла  $\alpha$  деформирующей зоны и скорости волочения  $V$  при коэффициенте трения 0,05



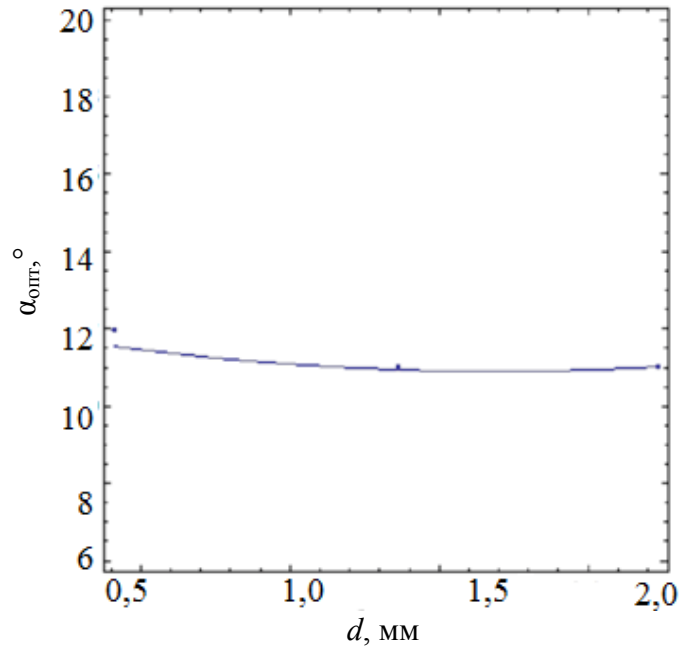


Рис. 3.32. Зависимость оптимального угла волокна от диаметра волокна при волочении проволоки диаметром 0,412 мм со скоростью 5 м/с и коэффициентом трения 0,05

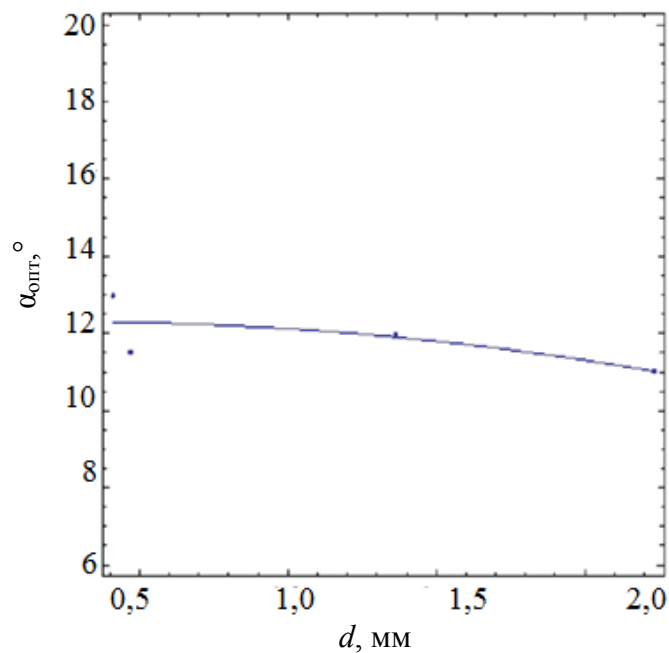
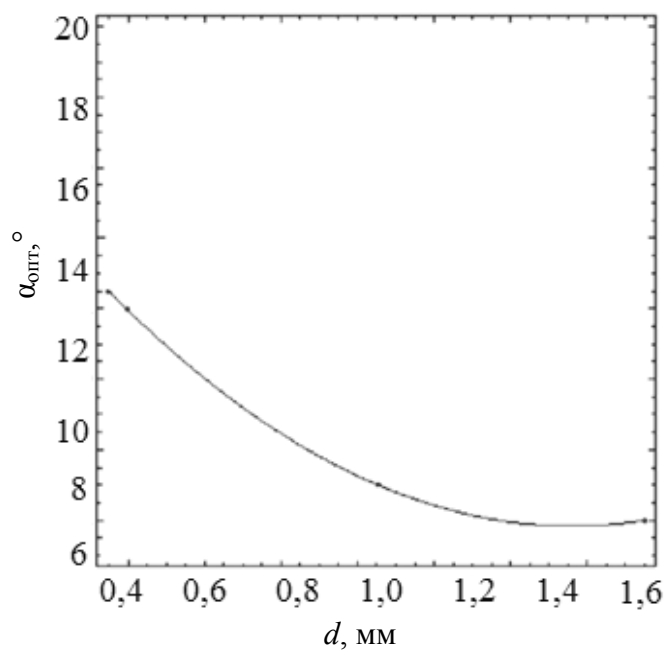
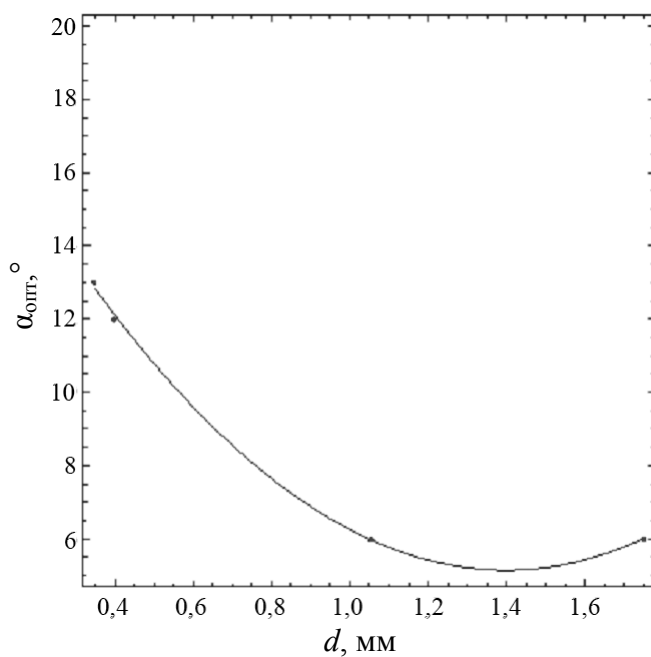


Рис. 3.33. Зависимость оптимального угла волокна от диаметра волокна при волочении проволоки диаметром 0,412 мм со скоростью 8 м/с и коэффициентом трения 0,05



*Рис. 3.34.* Зависимость оптимального угла волокни от диаметра волокни при волочении проволоки диаметром 0,349 мм со скоростью 12 м/с и коэффициентом трения 0,05



*Рис. 3.35.* Зависимость оптимального угла волокни от диаметра волокни при волочении проволоки диаметром 0,349 мм со скоростью 15 м/с и коэффициентом трения 0,05

Анализ контурного графика на рис. 3.29 показывает, что с ростом скорости волочения минимальный нагрев проволоки обеспечивает угол конуса волокна  $12,5^\circ$  (полуугол  $6,25^\circ$ ). В соответствии с рис. 3.30 усилие волочения в области  $12,5^\circ$  на всем диапазоне исследованных скоростей находится в области  $76,5$  Н, что в сравнении с другими значениями усилий волочения приближается к минимальному значению. Поэтому этот угол можно назвать оптимальным с точки зрения оптимизации по усилию волочения. Коэффициент запаса при волочении с углом  $11,5^\circ$  принимает максимальное значение (рис. 3.31), что позволяет заключить: данный угол оптимален в отношении исключения обрывности.

Формулы (3.57)–(3.60) позволяют вычислять точные значения параметров оптимизации режимов волочения.

Таким образом, при волочении с коэффициентом трения  $0,05$  для четырех контрольных волокон, расположенных в маршруте волочения проволоки диаметром  $0,412$  мм на относительно равных промежутках между собой, средние оптимальные углы следующие:

- $11^\circ$  в скоростном диапазоне  $0,17$ – $0,27$  м/с для перехода диаметров проволоки  $2,45$ – $2,23$  мм;
- $11,5^\circ$  в скоростном диапазоне  $0,4$ – $0,75$  м/с для перехода диаметров проволоки  $1,5$ – $1,36$  мм;
- $11,5^\circ$  в скоростном диапазоне  $4$ – $6,5$  м/с для перехода диаметров проволоки  $0,494$ – $0,464$  мм;
- $12,5^\circ$  в скоростном диапазоне  $5$ – $8$  м/с для перехода диаметров проволоки  $0,42$ – $0,412$  мм.

Для четырех приведенных волокон построены аппроксимирующие графики (рис. 3.32, 3.33).

Средней величиной угла можно принять значение  $(11+11,5+11,5+12,5)/4 = 11,6^\circ$  или округленно  $11,5^\circ$ . При технической возможности можно рекомендовать принимать на первых волокнах углы меньшими, чем на последних.

По аналогии с приведенным маршрутом волочения проволоки диаметром  $0,412$  мм проанализирован маршрут волочения проволоки диаметром  $0,349$  мм с коэффициентом трения  $0,05$ . В результате этого анализа в четырех контрольных волокнах, расположенных в маршруте волочения проволоки диаметром  $0,349$  мм на относительно равных промежутках между собой, получены следующие средние оптимальные углы:

- $6^\circ$  в скоростном диапазоне  $0,48$ – $0,60$  м/с для перехода диаметров проволоки  $1,94$ – $1,748$  мм;

– 6,5° в скоростном диапазоне 1,3–1,65 м/с для перехода диаметров проволоки 1,161–1,054 мм;

– 12,4° в скоростном диапазоне 9–12 м/с для перехода диаметров проволоки 0,405–0,396 мм;

– 12,6° в скоростном диапазоне 12–15 м/с для перехода диаметров проволоки 0,357–0,349 мм.

Для четырех волок построены аппроксимирующие графики (рис. 3.34 и 3.35).

Определение единого среднего угла конуса волокна, для рассматриваемого маршрута волочения, диаметром 0,349 мм осложнено в связи с большой разницей оптимальных углов. Поэтому необходимо назначить величины углов конуса волокна в соответствии с указанными оптимальными значениями и возможностями шлифовки и перешлифовки каналов волокон.

### 3.6. Результаты эксперимента и их анализ

#### 3.6.1. Сравнительный анализ численных и экспериментальных значений усилий волочения

Для оценки адекватности численной модели проведена серия экспериментов волочения проволоки с режимами, соответствующими параметрам расчета. В итоге получены сравнительные результаты (табл. 3.9). В табл. 3.9 даны расчетные значения усилий волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 5 м/с по переходам волочения действующего маршрута волочения при коэффициенте трения  $f = 0,05$  и аналогичные экспериментальные значения при действующем коэффициенте трения.

Таблица 3.9

Значения усилий волочения

$i$	$d_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$\varepsilon_i$	Расчетные значения усилий $P_i$ , Н	Экспериментальные значения усилий $P_i$ , Н	Относительное отклонение, %
1	2,230	0,17	0,19	1984,4	1876	6
2	2,010	0,21	0,21	1906,0	1822	4
3	1,821	0,26	0,20	1577,6	1510	4
4	1,650	0,31	0,20	1493,6	1326	11
5	1,500	0,38	0,19	1221,6	1119	8

Окончание табл. 3.9

$i$	$d_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$\varepsilon_i$	Расчетные значения усилий $P_i$ , Н	Экспериментальные значения усилий $P_i$ , Н	Относительное отклонение, %
6	1,360	0,46	0,20	1058,8	972	8
7	1,235	0,56	0,19	902,8	791	12
8	1,122	0,67	0,19	801,2	740	7,5

Анализ табл. 3.9 указывает на то, что экспериментальные значения усилия меньше расчетных значений. Значения полученных относительных отклонений между численными и экспериментальными значениями принято считать допустимыми. Отклонения можно объяснить влиянием расчетных допущений, экспериментальных факторов и тем, что при расчете принимался постоянный коэффициент трения. В реальных условиях деформации величина коэффициента контактного трения не постоянная. Поэтому далее приводятся результаты экспериментальной оценки влияния скорости волочения на усилие волочения.

### 3.6.2. Влияние скорости волочения на усилие волочения

В процессе проведения экспериментов определено влияние скорости волочения на усилие волочения. Использовалась водоземulsionная смазочно-охлаждающая жидкость *VSV77R* с концентрацией 10 %, нагреваемая перед заливкой в волокодержатель до температуры 45 °С.

Обобщенные результаты эксперимента сведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

#### Усилия волочения для разных скоростей волочения и диаметров проволоки, Н

Скорость волочения, м/с	Переход диаметров проволоки			
	с 2,45 на 2,23 мм	с 2,23 на 2,01 мм	с 2,01 на 1,821 мм	с 1,821 на 1,65 мм
0,11	–	1867	–	–
0,16	1841	–	–	–
0,18	–	–	1564	1332
0,5	–	1748	–	–
0,54	–	–	1465	–
0,6	–	–	–	1204

Скорость волочения, м/с	Переход диаметров проволоки			
	с 2,45 на 2,23 мм	с 2,23 на 2,01 мм	с 2,01 на 1,821 мм	с 1,821 на 1,65 мм
0,67	1665	–	–	–
1,15	–	–	1288	1137
1,17	–	1625	–	–
1,2	1610	–	–	–

Из анализа табл. 3.10 следует общий вывод: при увеличении скорости волочения сила волочения уменьшается. Это явление объясняется снижением коэффициента трения от роста скорости волочения. Рост скорости волочения способствует захвату смазки.

На основании экспериментальных данных из табл. 3.10 получены математические зависимости, позволяющие вычислять силу волочения в зависимости от скорости волочения, м/с:

– для перехода диаметров проволоки с 2,45 на 2,23 мм:

$$P = 1724,59 - 81,411V - 11,9077V^2, \text{ Н}; \quad (3.61)$$

– для перехода диаметров проволоки с 2,23 на 2,01 мм:

$$P = 1910,5 - 390,24V + 125,407V^2, \text{ Н}; \quad (3.62)$$

– для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм:

$$P = 1624,85 - 389,849V + 160,058V^2, \text{ Н}; \quad (3.63)$$

– для перехода диаметров проволоки с 1,821 на 1,65 мм:

$$P = 1624,85 - 389,849V + 160,058V^2, \text{ Н}. \quad (3.64)$$

В связи с наличием явного влияния скорости волочения на коэффициент контактного трения далее проводится оценка этого коэффициента.

### 3.6.3. Оценка коэффициента контактного трения

Для экспериментального определения коэффициента контактного трения при волочении применяются различные методы. Например, метод разрезной волоки со встроенными силоизмерительными датчиками для замера осевой силы волочения и радиальной силы, работающей на распор волоки. Существенным недостатком такой схемы является на-

рушение условий подачи смазки в зону деформации волокна из-за наличия разреза волокна по ее оси. Наиболее простым способом может служить метод оценки коэффициента трения путем экспериментального замера силы волочения и последующего пересчета коэффициента трения из аналитической формулы для усилия волочения, в которую подставляется экспериментальное значение силы волочения. Такой метод не лишен недостатков, так как существует погрешность самой аналитической формулы, выводимой с определенными допущениями, погрешность экспериментального измерения силы волочения. Тем не менее это самый удобный способ для экспериментально-теоретического исполнения. Он достаточно точный для оценки относительного изменения коэффициента контактного трения  $f$  от изменяемых режимов волочения.

Формула для определения величины  $f$  основана на формуле для определения напряжения волочения  $\sigma v_i$ . Эта формула позволяет рассчитать усилие волочения:

$$P_i = \left( \sigma s_i (1 + 2f) - \frac{(w_i - \sigma s_{i-1}) \left[ (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}} - 1 \right]}{\frac{f}{\tan(\alpha_i)} (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} - \frac{\sigma s_{i-1} - \left( \frac{\sigma v_{i-1}}{K_i} \right)}{(\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} + 4m_i f \sigma s_i \right) \frac{\pi d_i^2}{4}. \quad (3.65)$$

В формулу (3.65) подставляется экспериментальное значение силы волочения для  $i$ -го перехода волочения и затем с помощью вычислительных методов, реализуемых на компьютере, рассчитывается неизвестная величина  $f$ .

В результате вычислений получены следующие значения  $f$  для последовательного ряда переходов волочения, представленного в табл. 3.9: 0,0457; 0,0481; 0,0439; 0,0427; 0,05364; 0,0429; 0,03744; 0,04251. Среднее значение: 0,0446.

### 3.7. Применение напорных волокон и их влияние на условия волочения

Применение напорных волокон для подачи более плотного слоя смазки к рабочим волокнам является известным техническим решением. Такой метод преимущественно применяется для сухого волочения, т. е. для сухих видов смазки, имеющих повышенную вязкость. Однако прин-

цип нагнетания смазки сохраняется и для менее вязких жидкостей с менее значительной степенью нагнетания смазки к зоне деформации рабочей волокни. На этом основывается проведенная экспериментальная проверка применения напорных волок для «тонкого» волочения с использованием водозмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости *VSV77R* с концентрацией 10 %, нагреваемой перед заливкой в волокодержатель до температуры 45 °С.

Для этих целей был разработан и изготовлен волокодержатель (рис. 3.36). Волокодержатель способен работать как с наличием, так и с отсутствием напорной волокни. В качестве напорных волок использовались волокни из действующего маршрута волочения по принципу выбора третьей волокни от деформирующей волокни против хода волочения.

В результате проведенной серии экспериментов получены усредненные результаты, представленные в табл. 3.11.

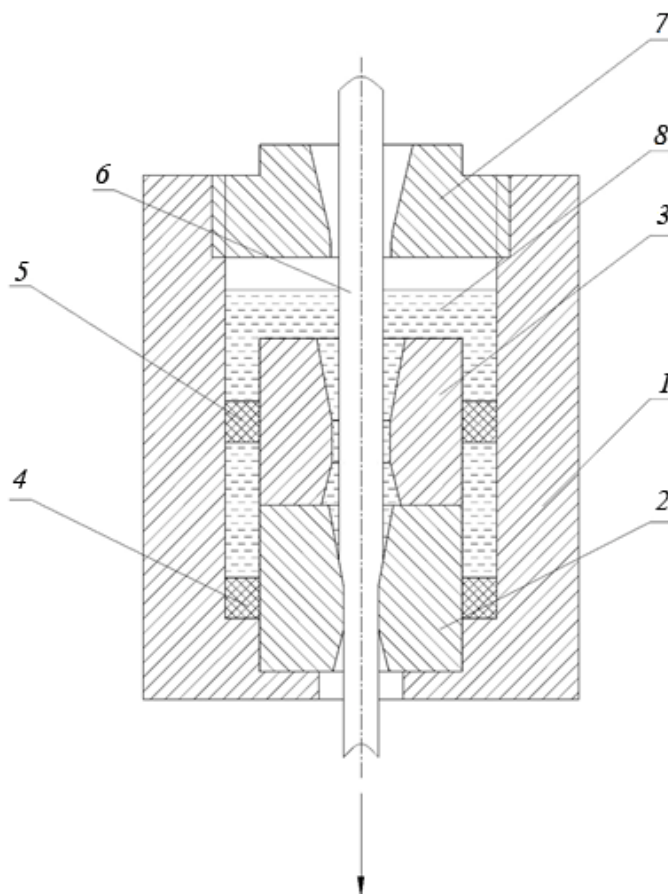


Рис. 3.36. Схема волокодержателя с напорной волокни:  
 1 – корпус; 2 – деформирующая волокни; 3 – напорная волокни;  
 4 – нижнее уплотнение; 5 – верхнее уплотнение; 6 – проволока;  
 7 – крышка; 8 – смазочно-охлаждающая жидкость

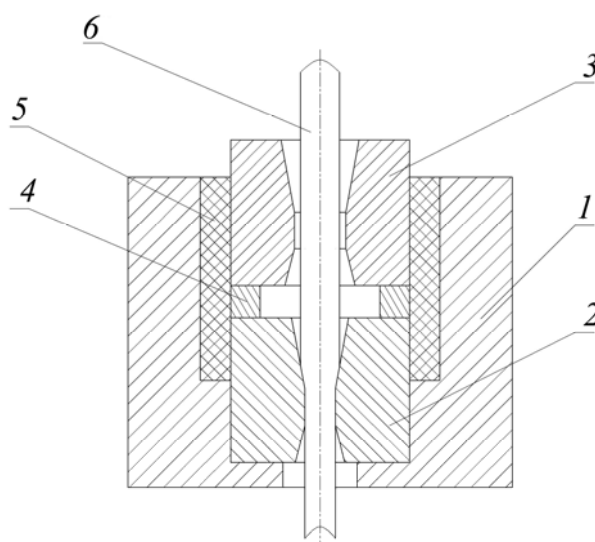


**Результаты эксперимента по исследованию  
применения напорных волок**

Значение усилий волочения	Без напорной волоки	С напорной волокой	Снижение усилия волочения
Усилие волочения со скоростью 0,26 м/с для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм, диаметр напорной волоки 2,23 мм	1510 Н	1382 Н	128 Н
Усилие волочения со скоростью 0,38 м/с для перехода диаметров проволоки с 1,65 на 1,5 мм, диаметр напорной волоки 1,821 мм	1119 Н	1047 Н	72 Н

Анализ табл. 3.9 указывает на эффект снижения усилия волочения от применения напорных волок. Величина снижения усилия может быть повышена при использовании смазок 15 % концентрации. Снижение усилия волочения может быть обосновано более устойчивым и плотным слоем смазки в канале деформирующей волоки при использовании напорной волоки. Величина снижения усилия достаточная, чтобы обосновать дополнительные лабораторные и промышленные испытания напорных волок применительно для «мокрого» волочения.

На основании этого может быть предложена новая схема установки напорных волок в промышленный волочильный стан (рис. 3.37).



*Рис. 3.37.* Схема узла установки напорной волоки в волокодержатель промышленного волочильного стана:  
1 – корпус; 2 – деформирующая волока; 3 – напорная волока;  
4 – кольцо; 5 – уплотнение; 6 – проволока

Корпус 1 (рис. 3.37) может видоизменяться для посадки в волокодержатель стана. Кольцо 4 увеличивает пространство между волокнами с целью возможности сбора латунной стружки, снимаемой с поверхности проволоки при волочении и других осадков. Уплотнение 5 обеспечивает создание избыточного давления смазки между волокнами. При перезаправке проволоки узел разбирается с удалением накопленных осадков.

### 3.8. Построение оптимизированных маршрутов волочения

Методом конечного элемента был проведен расчет НДС и ТП проволоки для переходов действующей технологии «тонкого» волочения проволоки из стали 90 с конечным диаметром 0,412 мм. В процессе расчета варьировались скорость волочения проволоки и коэффициент трения между проволокой и волокой. Результаты расчета представлены в табл. 3.12–3.14. В таблицах использованы следующие обозначения:

–  $d_i$  – диаметр волоки в калибрующей зоне на  $i$ -м переходе;  
 $e_i = \ln \left( \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2} \right)$  – логарифмическая степень деформации на  $i$ -м переходе;

$\sum e_n = \sum_{i=1}^n e_i$  – суммарная логарифмическая степень деформации, накопленная к  $n$ -му переходу волочения;  $V_i$  – скорость волочения на  $i$ -м переходе;  $P_i$  – усилие волочения на  $i$ -м переходе;  $T_i^{\max}$ ,  $T_i^{\min}$  – максимальная и минимальная температура в проволоке на выходе из волоки на  $i$ -м переходе.

Таблица 3.12

**Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 5 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,05$**

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\sum e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
1	2,230	0,17	0,19	0,19	1984,4	153,8	113,8
2	2,010	0,21	0,21	0,40	1906,0	174,8	127,6
3	1,821	0,26	0,20	0,59	1577,6	183,5	130,1

Окончание табл. 3.12

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
4	1,650	0,31	0,20	0,79	1493,6	196,4	136,0
5	1,500	0,38	0,19	0,98	1221,6	206,3	137,4
6	1,360	0,46	0,20	1,18	1058,8	221,5	147,9
7	1,235	0,56	0,19	1,37	902,8	234,1	152,2
8	1,122	0,67	0,19	1,56	801,2	247,1	157,5
9	1,020	0,82	0,19	1,75	701,2	260,8	162,9
10	0,930	0,98	0,18	1,94	607,6	270,6	164,6
11	0,850	1,17	0,18	2,12	518,4	282,5	167,5
12	0,814	1,28	0,09	2,20	280,0	220,4	99,4
13	0,771	1,43	0,11	2,31	308,0	243,0	120,1
14	0,738	1,56	0,09	2,40	248,8	242,1	100,5
15	0,698	1,74	0,11	2,51	264,4	259,7	126,0
16	0,666	1,91	0,09	2,61	220,4	259,7	111,0
17	0,633	2,12	0,10	2,71	222,4	272,2	118,9
18	0,604	2,33	0,09	2,80	186,8	276,8	113,3
19	0,571	2,60	0,11	2,91	192,0	296,6	132,3
20	0,545	2,86	0,09	3,01	150,8	287,8	115,0
21	0,515	3,20	0,11	3,12	158,4	316,8	135,6
22	0,494	3,48	0,08	3,20	104,4	306,5	104,0
23	0,467	3,89	0,11	3,32	96,0	335,4	138,1
24	0,448	4,23	0,08	3,40	68,0	325,6	105,8
25	0,435	4,49	0,06	3,46	43,2	303,9	78,7
26	0,420	4,81	0,07	3,53	33,6	316,8	90,5
27	0,412	5,00	0,04	3,57	31,6	271,1	57,2

Таблица 3.13

**Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые  
параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм  
из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,05$**

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
1	2,23	0,273	0,188	0,188	1960,8	171,0	108,2
2	2,01	0,336	0,208	0,396	1773,2	191,2	121,5
3	1,821	0,410	0,197	0,593	1528,8	202,6	125,3
4	1,65	0,499	0,197	0,791	1370,4	218,6	131,8
5	1,5	0,604	0,191	0,981	1199,6	232,2	135,3

Окончание табл. 3.13

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
6	1,36	0,734	0,196	1,177	1008,0	247,5	147,8
7	1,235	0,890	0,193	1,370	874,8	265,0	152,9
8	1,122	1,079	0,192	1,562	733,6	281,5	158,7
9	1,02	1,305	0,191	1,753	652,4	299,1	164,1
10	0,93	1,570	0,185	1,937	576,0	308,5	166,7
11	0,85	1,880	0,180	2,117	494,0	324,0	169,1
12	0,814	2,049	0,087	2,204	282,4	261,2	105,4
13	0,771	2,284	0,109	2,312	263,6	286,5	122,8
14	0,738	2,493	0,087	2,400	226,8	276,4	107,9
15	0,698	2,787	0,111	2,511	206,8	304,7	128,1
16	0,666	3,062	0,094	2,605	213,6	303,1	114,5
17	0,633	3,389	0,102	2,707	211,6	318,4	124,8
18	0,604	3,722	0,094	2,801	188,0	322,0	117,0
19	0,571	4,165	0,112	2,913	168,8	348,4	135,7
20	0,545	4,572	0,093	3,006	142,4	342,1	119,7
21	0,515	5,120	0,113	3,119	128,4	372,3	139,8
22	0,494	5,565	0,083	3,203	107,6	352,1	110,9
23	0,467	6,227	0,112	3,315	98,0	393,7	142,4
24	0,448	6,766	0,083	3,398	71,2	373,3	112,6
25	0,435	7,176	0,059	3,457	70,4	371,3	84,9
26	0,42	7,698	0,070	3,527	59,2	373,9	99,0
27	0,412	8,000	0,038	3,566	46,4	350,3	60,7

Таблица 3.14

**Расчетные деформационно-кинематические и энергосиловые  
параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм  
из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,02$**

$i$	$D_i$ , мм	$V_i$ , м/с	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i$ , Н	$T_i^{\max}$ , °С	$T_i^{\min}$ , °С
1	2,23	0,273	0,188	0,188	1584,4	134,9	109,9
2	2,01	0,336	0,208	0,396	1448,0	153,5	123,1
3	1,821	0,410	0,197	0,593	1196,0	158,4	126,4
4	1,65	0,499	0,197	0,791	1076,4	168,4	133,1
5	1,5	0,604	0,191	0,981	1007,2	175,6	136,6
6	1,36	0,734	0,196	1,177	825,2	191,0	147,5
7	1,235	0,890	0,193	1,370	700,4	200,0	152,3

$i$	$D_i, \text{мм}$	$V_i, \text{м/с}$	$e_i$	$\Sigma e_i$	$P_i, \text{Н}$	$T_i^{\max}, \text{°C}$	$T_i^{\min}, \text{°C}$
8	1,122	1,079	0,192	1,562	646,0	209,4	158,7
9	1,02	1,305	0,191	1,753	498,4	219,8	163,7
10	0,93	1,570	0,185	1,937	470,0	223,7	165,7
11	0,85	1,880	0,180	2,117	389,6	229,9	169,3
12	0,814	2,049	0,087	2,204	210,0	172,6	102,2
13	0,771	2,284	0,109	2,312	170,4	188,2	121,9
14	0,738	2,493	0,087	2,400	168,4	179,7	105,4
15	0,698	2,787	0,111	2,511	141,6	198,5	127,4
16	0,666	3,062	0,094	2,605	118,4	190,5	113,5
17	0,633	3,389	0,102	2,707	94,0	200,5	122,1
18	0,604	3,722	0,094	2,801	82,4	200,0	115,9
19	0,571	4,165	0,112	2,913	104,0	217,9	134,6
20	0,545	4,572	0,093	3,006	92,8	210,8	118,0

Аппроксимация данных, представленных в табл. 3.12–3.14, методом наименьших квадратов дает следующую зависимость максимальной температуры проволоки в зависимости от частной и суммарной степени деформации на  $i$ -м переходе волочения:

1) для волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 5 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,05$ :

$$T_i = -143,083 + 2989,84e_i - 7811,9e_i^2 + 276,42 \sum e_i - 3436,31e_i \sum e_i + \\ + 12039,2e_i^2 \sum e_i - 49,6256(\sum e_i)^2 + \\ + 870,359e_i(\sum e_i)^2 - 3064,88e_i^2(\sum e_i)^2; \quad (3.66)$$

2) для волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,05$ :

$$T_i = -70,3118 + 2304,39e_i - 5748,29e_i^2 + 168,056 \sum e_i - 1702,78e_i \sum e_i + \\ + 6014,35e_i^2 \sum e_i - 16,3725(\sum e_i)^2 + \\ + 360,445e_i(\sum e_i)^2 - 1179,15e_i^2(\sum e_i)^2; \quad (3.67)$$

3) для волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,02$ :

$$T_i = 340,602 - 2373,68e_i + 6524,43e_i^2 - 147,036 \sum e_i + \\ + 1443,9e_i \sum e_i - 2143,77e_i^2 \sum e_i + \\ + 27,672(\sum e_i)^2 - 155,584e_i(\sum e_i)^2 + 103,969e_i^2(\sum e_i)^2. \quad (3.68)$$

При волочении на различных переходах наблюдаются разные температуры проволоки. С целью повышения качества проволоки желательно иметь минимальной максимальной наблюдаемую температуру проволоки при волочении. Задачу условной минимизации максимальной наблюдаемой температуры проволоки по переходам волочения можно представить в виде:

$$\begin{cases} T_{\max} = \max(T_1, T_2, \dots, T_n) \rightarrow \min; \\ \mu k_i \leq \mu_i \leq \mu k_i(1 + \beta_i), \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (3.69)$$

где  $T_i$  – максимальная температура проволоки на  $i$ -м переходе волочения;  $T_{\max}$  – максимальная температура проволоки по всем переходам волочения;  $\mu k_i$  – кинематическая вытяжка на  $i$ -м переходе волочения;  $\mu_i$  – фактическая вытяжка на  $i$ -м переходе волочения;  $\beta_i$  – коэффициент, учитывающий величину проскальзывания проволоки на  $i$ -м переходе волочения  $\beta_i = 0,01-0,06$ .

Решение данной задачи оптимизации осуществлялось при помощи программного обеспечения *Mathematica*. Результаты решения представлены в табл. 3.15–3.17. В таблицах использованы следующие обозначения:  $d_i$  – оптимизированный диаметр волокна в калибрующей зоне на  $i$ -м переходе;  $d_{old_i}$  – существующий диаметр волокна в калибрующей зоне на  $i$ -м переходе;  $\prod \mu_n = \prod_{i=1}^n \mu_i$  – накопленная к  $n$ -му переходу волочения фактическая вытяжка;  $\mu_i$  – фактическая вытяжка на  $i$ -м переходе волочения;  $T_i$  – оптимизированная максимальная температура проволоки на  $i$ -м переходе волочения;  $T_{old_i}$  – расчетная максимальная температура проволоки на  $i$ -м переходе волочения при существующей технологии;  $V_i$  – скорость тяговых шайб на  $i$ -м переходе;  $V_i$  – скорость волочения на  $i$ -м переходе;  $C_i$  – относительное скольжение проволоки на  $i$ -м переходе.

Таблица 3.15

**Расчетные деформационно-кинематические и тепловые параметры процесса волочения проволоки  
диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 5 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,05$**

$i$	$d_i$ , мм	$d_{old_i}$ , мм	$\mu k_i$	$b_i$	$\mu_i$	$\Pi \mu_i$	$T_i$ , °C	$T_{old_i}$ , °C	$dT_i$ , °C	$B_i$ , м/с	$V_i$ , м/с	$C_i$
1	2,22561	2,23	1,1698	0,0359118	1,21181	1,21181	154,794	153,8	-0,994231	0,28049	0,141394	0,495903
2	2,03235	2,01	1,1698	0,0251546	1,19923	1,45323	161,785	174,8	13,0152	0,328118	0,171343	0,4778
3	1,85609	1,821	1,1698	0,0249143	1,19894	1,74235	171,863	183,5	11,6373	0,383832	0,205479	0,464664
4	1,68161	1,65	1,1698	0,0414428	1,21828	2,12267	194,895	196,4	1,50465	0,449007	0,246358	0,451327
5	1,5388	1,5	1,1698	0,0208757	1,19422	2,53493	191,26	206,3	15,0404	0,525248	0,300133	0,428588
6	1,40324	1,36	1,1698	0,0279903	1,20254	3,04836	209,033	221,5	12,4667	0,614435	0,358425	0,416659
7	1,27285	1,235	1,1698	0,0389654	1,21538	3,70492	233,042	234,1	1,0576	0,718766	0,431022	0,400332
8	1,16734	1,122	1,1698	0,0163548	1,18893	4,4049	223,347	247,1	23,7529	0,840813	0,523856	0,376965
9	1,06439	1,02	1,1698	0,0282127	1,2028	5,29823	248,329	260,8	12,4712	0,983583	0,622829	0,366776
10	0,971423	0,93	1,1698	0,0262969	1,20056	6,36086	260,148	270,6	10,4522	1,1506	0,74914	0,348911
11	0,885874	0,85	1,1698	0,0279239	1,20247	7,64871	276,224	282,5	6,2757	1,34597	0,89939	0,331789
12	0,841136	0,814	1,0753	0,0315298	1,1092	8,48398	223,95	220,4	-3,55035	1,57451	1,08148	0,31313
13	0,796892	0,771	1,0909	0,0212902	1,11413	9,45222	234,978	243,	8,02209	1,69307	1,19959	0,291473
14	0,75763	0,738	1,0753	0,0288563	1,10633	10,4573	240,345	242,1	1,75516	1,84697	1,33649	0,276388
15	0,715592	0,698	1,0909	0,0275383	1,12094	11,722	256,782	259,7	2,91764	1,98605	1,4786	0,255508
16	0,684611	0,666	1,0721	0,0190805	1,09256	12,8069	252,278	259,7	7,42244	2,16658	1,65742	0,235006
17	0,646755	0,633	1,0909	0,0271235	1,12049	14,35	275,002	272,2	-2,80246	2,32279	1,81083	0,220409
18	0,618409	0,604	1,0717	0,0205969	1,09377	15,6957	270,051	276,8	6,74883	2,53393	2,02901	0,199264

Окончание табл. 3.15

$i$	$d_i$ , мм	$dold_i$ , мм	$\mu k_i$	$b_i$	$\mu_i$	$\Pi \mu_i$	$T_i$ , °C	$Told_i$ , °C	$dT_i$ , °C	$B_i$ , м/с	$V_i$ , м/с	$C_i$
19	0,583943	0,571	1,0909	0,0280782	1,12153	17,6032	295,03	296,6	1,56953	2,71562	2,21928	0,182771
20	0,557369	0,545	1,0721	0,0238139	1,09763	19,3218	290,256	287,8	-2,45604	2,96247	2,48899	0,159825
21	0,52634	0,515	1,0909	0,0279386	1,12138	21,667	315,587	316,8	1,21288	3,17606	2,73199	0,139817
22	0,502011	0,494	1,0721	0,025349	1,09928	23,8181	310,345	306,5	-3,84493	3,46476	3,0636	0,115785
23	0,476331	0,467	1,0909	0,0181771	1,11073	26,4554	328,64	335,4	6,75989	3,71457	3,36774	0,0933708
24	0,455195	0,448	1,0719	0,02157	1,09502	28,9692	325,149	325,6	0,450754	4,05223	3,74065	0,076891
25	0,437463	0,435	1,048	0,0331204	1,08271	31,3653	320,905	303,9	-17,0047	4,34358	4,09609	0,0569795
26	0,424224	0,42	1,03601	0,0264266	1,06339	33,3535	304,599	316,8	12,2006	4,55208	4,43488	0,0257462
27	0,412	0,412	1,06022	0	1,06022	35,3621	303,882	271,1	-32,7822	5	5	0

Таблица 3.16

**Расчетные деформационно-кинематические и тепловые параметры процесса волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,05$**

$i$	$d_i$ , мм	$dold_i$ , мм	$\mu k_i$	$b_i$	$\mu_i$	$\Pi \mu_i$	$T_i$ , °C	$Told_i$ , °C	$dT_i$ , °C	$B_i$ , м/с	$V_i$ , м/с	$C_i$
1	2,22857	2,23	1,1698	0,0331601	1,20859	1,20859	171,906	171,	-0,905755	0,448785	0,226231	0,495903
2	2,03698	2,01	1,1698	0,0232121	1,19695	1,44663	180,383	191,2	10,8166	0,524988	0,273421	0,479187
3	1,86747	1,821	1,1698	0,0170837	1,18978	1,72117	188,889	202,6	13,7107	0,614131	0,327272	0,467098
4	1,69399	1,65	1,1698	0,0389062	1,21531	2,09176	213,166	218,6	5,4336	0,718411	0,389383	0,457994
5	1,55253	1,5	1,1698	0,0177186	1,19053	2,4903	214,868	232,2	17,3317	0,840397	0,473222	0,436907
6	1,41278	1,36	1,1698	0,0323311	1,20762	3,00734	238,572	247,5	8,92809	0,983096	0,563384	0,426929



$i$	$d_i$ , мм	$dold_i$ , мм	$\mu k_i$	$b_i$	$\mu_i$	$\Pi \mu_i$	$T_i$ , °C	$Told_i$ , °C	$dT_i$ , °C	$B_i$ , м/с	$V_i$ , м/с	$C_i$
7	1,28606	1,235	1,1698	0,0316175	1,20679	3,62922	253,852	265,	11,1483	1,15003	0,680354	0,408401
8	1,1747	1,122	1,1698	0,0246046	1,19858	4,34992	264,335	281,5	17,1646	1,3453	0,821042	0,389696
9	1,07205	1,02	1,1698	0,0263774	1,20066	5,22276	282,024	299,1	17,0756	1,57373	0,984086	0,37468
10	0,979771	0,93	1,1698	0,0234622	1,19725	6,25292	296,296	308,5	12,2041	1,84095	1,18155	0,358186
11	0,892344	0,85	1,1698	0,0305592	1,20555	7,5382	320,614	324,	3,38637	2,15355	1,41461	0,343127
12	0,845571	0,814	1,0753	0,0357008	1,11369	8,39521	266,688	261,2	-5,48809	2,51922	1,70538	0,323054
13	0,798067	0,771	1,0909	0,0290516	1,12259	9,4244	283,01	286,5	3,49032	2,70892	1,89926	0,298886
14	0,758529	0,738	1,0753	0,0294479	1,10697	10,4325	282,887	276,4	-6,48663	2,95516	2,13209	0,278518
15	0,715575	0,698	1,0909	0,0300287	1,12366	11,7225	304,762	304,7	-0,0622785	3,17768	2,36015	0,257272
16	0,68381	0,666	1,0721	0,02142	1,09506	12,8369	295,634	303,1	7,46637	3,46653	2,652	0,234969
17	0,64698	0,633	1,0909	0,0240088	1,11709	14,34	320,587	318,4	-2,18665	3,71647	2,90412	0,218582
18	0,617822	0,604	1,0717	0,0232511	1,09662	15,7255	316,554	322,	5,44612	4,05429	3,24416	0,199821
19	0,581174	0,571	1,0909	0,0359264	1,13009	17,7713	352,147	348,4	-3,74718	4,34499	3,55761	0,181216
20	0,554337	0,545	1,0721	0,0252502	1,09917	19,5337	340,269	342,1	1,83056	4,73995	4,02042	0,1518
21	0,523769	0,515	1,0909	0,0267923	1,12013	21,8803	367,418	372,3	4,88226	5,0817	4,41913	0,130383
22	0,500383	0,494	1,0721	0,0219734	1,09566	23,9733	359,178	352,1	-7,07835	5,54362	4,94999	0,107083
23	0,474504	0,467	1,0909	0,0193893	1,11205	26,6595	383,121	393,7	10,5791	5,94332	5,4235	0,087463
24	0,454177	0,448	1,0719	0,0183008	1,09152	29,0993	376,583	373,3	-3,28338	6,48357	6,03121	0,0697695
25	0,436165	0,435	1,048	0,0346359	1,0843	31,5523	379,382	371,3	-8,08231	6,94973	6,58317	0,0527455
26	0,424232	0,42	1,03597	0,0203421	1,05705	33,3523	362,787	373,9	11,113	7,28332	7,13812	0,0199366
27	0,412	0,412	1,06026	0	1,06026	35,3621	370,892	350,3	-20,5924	8	8	0

Таблица 3.17

**Расчетные деформационно-кинематические и тепловые параметры процесса волочения проволоки  
диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм со скоростью 8 м/с  
при коэффициенте трения  $f = 0,02$**

<i>i</i>	<i>d<sub>i</sub></i> , мм	<i>dold<sub>i</sub></i> , мм	$\mu k_i$	<i>b<sub>i</sub></i>	$\mu_i$	$\Pi \mu_i$	<i>T<sub>i</sub></i> , °С	<i>Told<sub>i</sub></i> , °С	<i>dT<sub>i</sub></i> , °С	<i>B<sub>i</sub></i> , м/с	<i>V<sub>i</sub></i> , м/с	<i>C<sub>i</sub></i>
1	2,2102	1,1698	0,0504033	1,22876	1,22876	140,743	134,9	-5,84269	0,448785	0,226231	0,495903	2,2102
2	2,01879	1,1698	0,0246339	1,19862	1,47281	142,255	153,5	11,2455	0,524988	0,277984	0,470495	2,01879
3	1,85383	1,1698	0,0137557	1,18589	1,7466	147,39	158,4	11,0103	0,614131	0,333196	0,457451	1,85383
4	1,67912	1,1698	0,0419911	1,21892	2,12897	168,333	168,4	0,0669438	0,718411	0,395135	0,449988	1,67912
5	1,53477	1,1698	0,0232071	1,19695	2,54826	167,879	175,6	7,72095	0,840397	0,481638	0,426892	1,53477
6	1,3926	1,1698	0,0382962	1,2146	3,09511	186,943	191	4,05725	0,983096	0,576496	0,413592	1,3926
7	1,26471	1,1698	0,0364763	1,21247	3,75273	196,389	200	3,61081	1,15003	0,700211	0,391135	1,26471
8	1,15944	1,1698	0,0171348	1,18984	4,46517	192,19	209,4	17,2101	1,3453	0,848985	0,368926	1,15944
9	1,0582	1,1698	0,0262392	1,20049	5,36041	208,304	219,8	11,4965	1,57373	1,01016	0,358112	1,0582
10	0,968244	1,1698	0,0210643	1,19444	6,40269	213,914	223,7	9,78558	1,84095	1,21269	0,34127	0,968244
11	0,884545	1,1698	0,0242773	1,1982	7,6717	226,482	229,9	3,41847	2,15355	1,44849	0,327394	0,884545
12	0,835389	1,0753	0,0426373	1,12115	8,60111	185,11	172,6	-12,5097	2,51922	1,73558	0,311065	0,835389
13	0,792315	1,0909	0,0190524	1,11168	9,56172	184,38	188,2	3,82045	2,70892	1,94584	0,281691	0,792315
14	0,754906	1,0753	0,0244256	1,10156	10,5329	182,837	179,7	-3,13729	2,95516	2,16316	0,268005	0,754906
15	0,713835	1,0909	0,0251926	1,11838	11,7798	196,664	198,5	1,83559	3,17768	2,38286	0,250126	0,713835
16	0,682635	1,0721	0,0199587	1,0935	12,8811	186,187	190,5	4,3135	3,46653	2,66495	0,231234	0,682635
17	0,646515	1,0909	0,0219631	1,11486	14,3607	203,736	200,5	-3,2365	3,71647	2,91412	0,215891	0,646515
18	0,617788	1,0717	0,0218931	1,09516	15,7273	195,685	200,	4,31485	4,05429	3,24883	0,198669	0,617788
19	0,583798	1,0909	0,0265246	1,11984	17,612	217,519	217,9	0,380898	4,34499	3,558	0,181126	0,583798

Окончание табл. 3.17

<i>i</i>	$d_i$ , мм	$dold_i$ , мм	$\mu k_i$	$b_i$	$\mu_i$	$\Pi \mu_i$	$T_i$ , °C	$Told_i$ , °C	$dT_i$ , °C	$B_i$ , м/с	$V_i$ , м/с	$C_i$
20	0,554532	1,0721	0,0337995	1,10834	19,52	215,228	210,8	-4,42821	4,73995	3,98437	0,159406	0,554532
21	0,524847	1,0909	0,0233001	1,11632	21,7905	227,077	236,8	9,72294	5,0817	4,41603	0,130994	0,524847
22	0,502114	1,0721	0,0191203	1,0926	23,8083	215,321	210,8	-4,52132	5,54362	4,92969	0,110746	0,502114
23	0,47627	1,0909	0,0188573	1,11147	26,4622	235,353	240,4	5,04665	5,94332	5,38617	0,0937432	0,47627
24	0,455395	1,0719	0,0204103	1,09378	28,9438	227,944	222,4	-5,54413	6,48357	5,98658	0,0766537	0,455395
25	0,437449	1,048	0,0340961	1,08373	31,3673	225,575	212,2	-13,3746	6,94973	6,54798	0,0578079	0,437449
26	0,424398	1,03516	0,0263598	1,06245	33,3262	213,333	224,2	10,8666	7,28332	7,09626	0,0256828	0,424398
27	0,412	1,06109	0	1,06109	35,3621	216,093	197,4	-18,6926	8	8	0	0,412

# ГЛАВА 4

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ

### 4.1. Факторы процесса волочения

Большинство процессов ОМД являются многофакторными. Влияние каждого по-своему воздействует на конечные механические свойства изделий. В процессе высокоскоростного волочения высокоуглеродистой латунированной проволоки основными факторами являются: содержание углерода, деформационное упрочнение, динамическое упрочнение и температурное старение. В первую очередь количество углерода определяет чувствительность стали к упрочнению и старению.

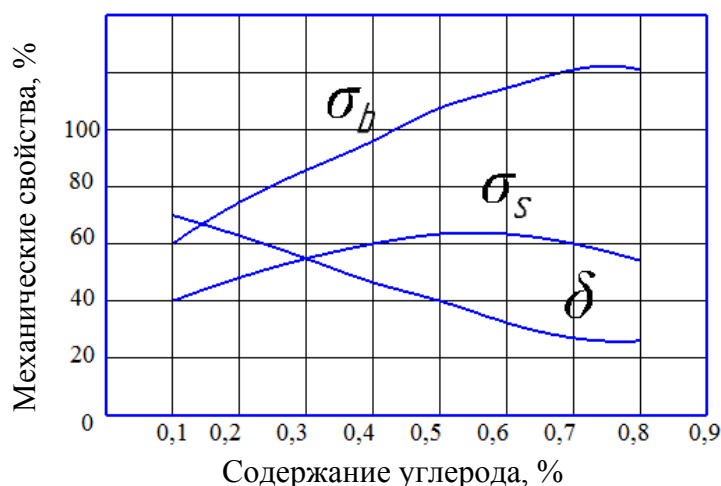


Рис. 4.1. Влияние углерода на механические свойства сталей

Увеличение содержания углерода в стали, как известно, ведет к повышению прочности и уменьшению пластичности. На рис. 4.1 видно, что углеродистые стали обладают меньшим запасом пластичности по сравнению с низкоуглеродистыми сталями. Основная задача высокоскоростного волочения высокоуглеродистых сталей заключается в обеспечении оптимальных условий для сохранения, а по возможности и увеличения, запаса пластичности [21].

Высокая температура (выше 250 °С) проволоки при волочении приводит к развитию процессов старения, вызывающих снижение

пластических свойств проволоки, возникновению тепловых напряжений в протянутом материале, а температура свыше 600 °С – к образованию участков мартенсита на поверхности проволоки, снижению стойкости волок, окислению смазки и повышению коэффициента трения при волочении.

Средняя температура проволоки в процессе волочения в зоне деформации быстро повышается, затем при выходе из калибрующей зоны волоки медленно понижается. Температура поверхности проволоки повышается, затем при выходе также стремительно понижается до средней температуры проволоки, после чего охлаждение идет с той же скоростью, с какой понижается средняя температура проволоки после волочения [22].

С. Ф. Бабылева и А. Н. Адрианова приводят данные о том, что для уменьшения расслаивания высокопрочной проволоки при волочении необходимо ограничить процессы старения уменьшением величины частных обжатий и скоростей волочения.

Исследователи ЦЗЛ Ленинградского сталепрокатного завода установили, что присутствие на поверхности проволоки безуглероженного слоя толщиной в несколько сотых миллиметра исключает образование участков мартенсита, которые вызывают снижение пластичности при нагреве в процессе волочения.

Это можно объяснить тем, что мартенсит образуется вследствие мгновенного нагрева тончайших поверхностных слоев проволоки до температуры, превышающей критическую точку  $A_1$  (600 °С) с последующим быстрым охлаждением в ванне СОЖ. Образование мартенсита можно избежать путем безуглероживания поверхности проволоки перед волочением. Температурное поле, вызванное теплом внешнего трения, возникает в проволоке в течение тысячных или десятитысячных долей секунды. После выхода данного сечения проволоки из очага деформации температурный градиент в сечении исчезает почти с той же скоростью, с какой образовался. При этом скорость охлаждения внешних слоев проволоки значительно превышает минимальную критическую скорость охлаждения, необходимую для образования мартенсита [22].

Высокие напряжения в материалах вызваны мелкими дислокациями, перемещения которых сопоставимы с размерами зерна в металле. Это обстоятельство ограничивает движение дислокации. Температура помогает дислокациям увеличивать диапазон перемещений (рис. 4.2).

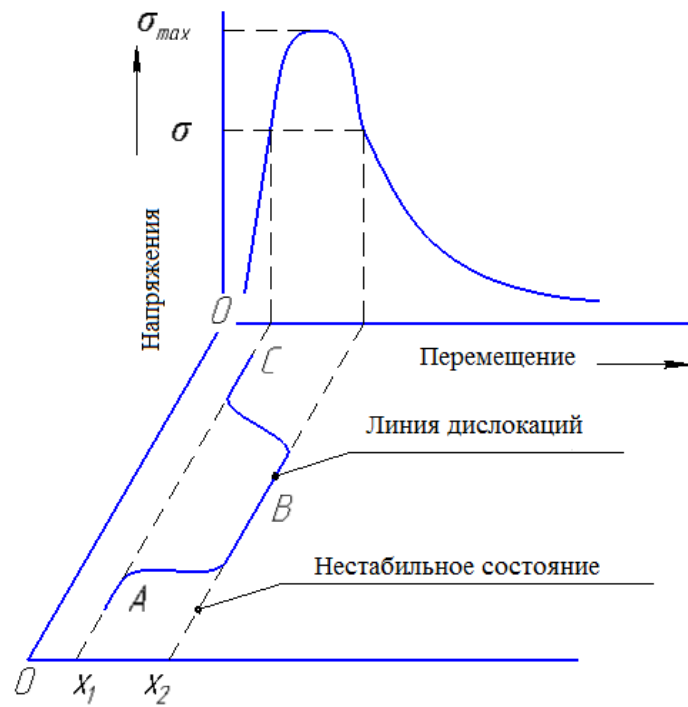


Рис. 4.2. Влияние температуры на напряжения в металлах

Материалы с мелкими дислокациями имеют определенную чувствительность; соответственно, у таких материалов предел текучести снижается с увеличением температуры (рис. 4.3).

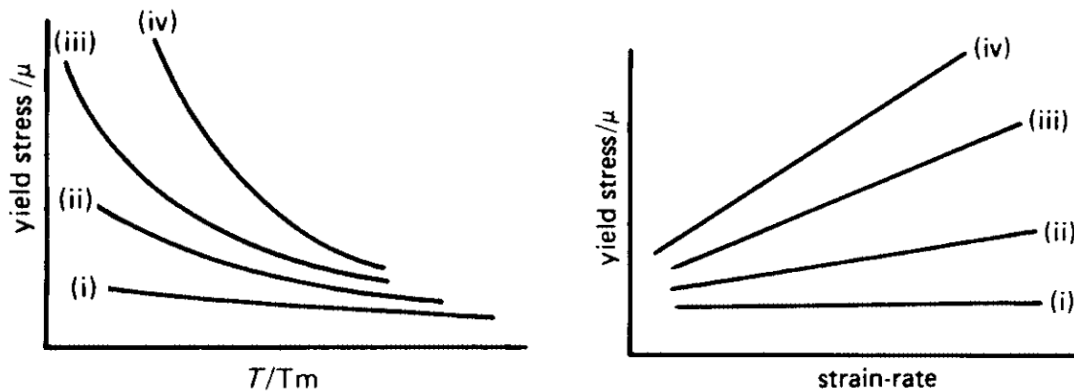


Рис. 4.3. Зависимости предела текучести от температуры и скорости деформации

Рисунок 4.3 показывает, что материалы, предел текучести которых сильно зависит от температуры, более чувствительны к скорости деформации, т. е. чем выше наложенная скорость деформации, тем выше предел текучести. Это возникает в том случае, если тепловая активация менее эффективна по сравнению с высокой скоростью деформации [21].

Влияние диаметра или толщины протягиваемого профиля на напряжение волочения определяется двумя факторами: масштабным и термическим. Это явление проявляется в том, что предел прочности при одинаковом физическом состоянии металла растет с уменьшением диаметра или толщины образца. Этот вопрос подробно рассмотрен Я. Б. Фридманом [23].

Повышение прочности с уменьшением диаметра или толщины образца по «статической теории прочности» академика Я. И. Френкеля объясняется следующим: «Разброс значений прочности определяется статистической вероятностью существования в объеме металла наиболее снижающих прочность комбинаций дефектов и слабых участков его строения. Чем больше объем образца, тем больше вероятность существования снижающих прочность структурных факторов и тем ниже его прочность».

По Фридману, чем тоньше образец, тем более мелкими и направленными становятся кристаллы, а участки строения, ослабляющие прочность, получают такую ориентировку, при которой поперечные сечения ослабляются меньше, что и приводит к повышению предела прочности [23].

При уменьшении диаметра протягиваемой проволоки при прочих равных условиях процесса (степень деформации, угол волоки и т. д.) растет величина контактной поверхности, приходящаяся на единицу объема деформационной зоны. Это приводит к увеличению расхода энергии на образование новых поверхностей и к изменению температуры металла в волочильном канале. При больших скоростях волочения, когда теплота, выделяющаяся на контактных поверхностях в единицу времени, достигает значительной величины, температура деформационной зоны может повыситься, отчего уменьшится сопротивление деформации. При волочении с большими скоростями проволока претерпевает в деформационной зоне частичные структурные изменения, приводящие к падению предела прочности и к возможности увеличения суммарных деформаций между отжигами [24].

Для полного представления напряженного деформированного состояния стали 90 при волочении необходимо определить основные факторы, которые влияют на свойства проволоки при волочении.

Температура и скорость деформации оказывают основное влияние на механические свойства сталей.

В зарубежной литературе часто встречаются следующие математические модели пластического течения металла:

– модель Джонсона–Кука (*Johnson–Cook model*):

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_{\text{КОМН}}}{T_{\text{ПЛ}} - T_{\text{КОМН}}} \right)^m \right), \quad (4.1)$$

где  $\sigma_y$  – предел текучести;  $\varepsilon_p$  – эквивалентная пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}$  – текущая эквивалентная скорость деформации;  $\dot{\varepsilon}_0$  – начальная эквивалентная скорость деформации;  $A, B, C, m, n$  – параметры материала;  $T, T_{\text{КОМН}}, T_{\text{ПЛ}}$  – температура текущая, комнатная и плавления соответственно;

– модель Кумара (*Kumar model*):

$$\sigma_y = B_0 \sin(h^{-1}) \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{A} \right)^{1/n} \cdot \varepsilon_p^{Q/(nRT)} \right], \quad (4.2)$$

где  $\sigma_y$  – предел текучести;  $\varepsilon_p$  – эквивалентная пластическая деформация;  $Q$  – энергия активации;  $T$  – температура;  $A, B_0, n$  – параметры материала;

– модель Зерили–Армстронга (*Zerilli–Armstrong model*):

$$\sigma_y = a + c_1 e^{(-c_2 T + c_3 T \ln(\dot{\varepsilon}_p))} + c_4 \varepsilon_p, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_y$  – предел текучести;  $T$  – температура;  $\dot{\varepsilon}_p$  – эквивалентная скорость деформации;  $\varepsilon_p$  – эквивалентная пластическая деформация;  $a, c_1, c_2, c_3, c_4, n$  – параметры материала;

– модель Нортон–Хоффа (*Norton–Hoff model*):

$$\sigma_y = K (\varepsilon_{p0} + \varepsilon_p)^n \cdot \dot{\varepsilon}^m e^{\left( \frac{\beta}{T_{\text{abs}}} \right)} \quad (4.4)$$

и другие.

Все перечисленные выше модели обладают главным недостатком: применение для узких диапазонов пластической деформации, скорости деформации.



В обобщенном виде для математического описания упругопластических свойств металлов с помощью МКЭ зависимость:

$$\sigma_s^d = f(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T), \quad (4.5)$$

где  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластической деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Высокоскоростное волочение сопровождается высокими скоростями деформации ( $10^2$ – $10^4 \text{ с}^{-1}$ ).

Основной проблемой описания высокоскоростных процессов деформирования является выбор эмпирической зависимости, предсказывающей динамическое упрочнение.

Для высокоскоростных процессов деформирования наибольшее распространение получили следующие зависимости для описания динамического упрочнения [25], [26]:

– модель Джонсона–Кука:

$$\sigma_s^d / \sigma_s^{\text{ст}} = f \left( 1 + C \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{0p}} \right) \right); \quad (4.6)$$

– модель Чао–Вонга:

$$\sigma_s^d / \sigma_s^{\text{ст}} = f \left( C_1 + C_2 \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{0p}} \right) + C_3 \cdot \log \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{0p}} \right) \right); \quad (4.7)$$

– модель Симонда–Купера:

$$\sigma_s^d / \sigma_s^{\text{ст}} = f \left( 1 + C \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{C} \right) \right)^{1/p}. \quad (4.8)$$

В диапазоне скоростей деформирования  $0,01$ – $10 \text{ с}^{-1}$  эти зависимости незначительно отличаются. Для процессов с высокими скоростями деформации ( $> 10 \text{ с}^{-1}$ ) наиболее приемлемы модели Чао–Вонга и Симонда–Купера, так как они точнее описывают высокоскоростное деформирование. Модель Симонда–Купера является универсальной для большинства сталей в высокоскоростных диапазонах нагружения, в отличие от других моделей для большинства металлов [26].

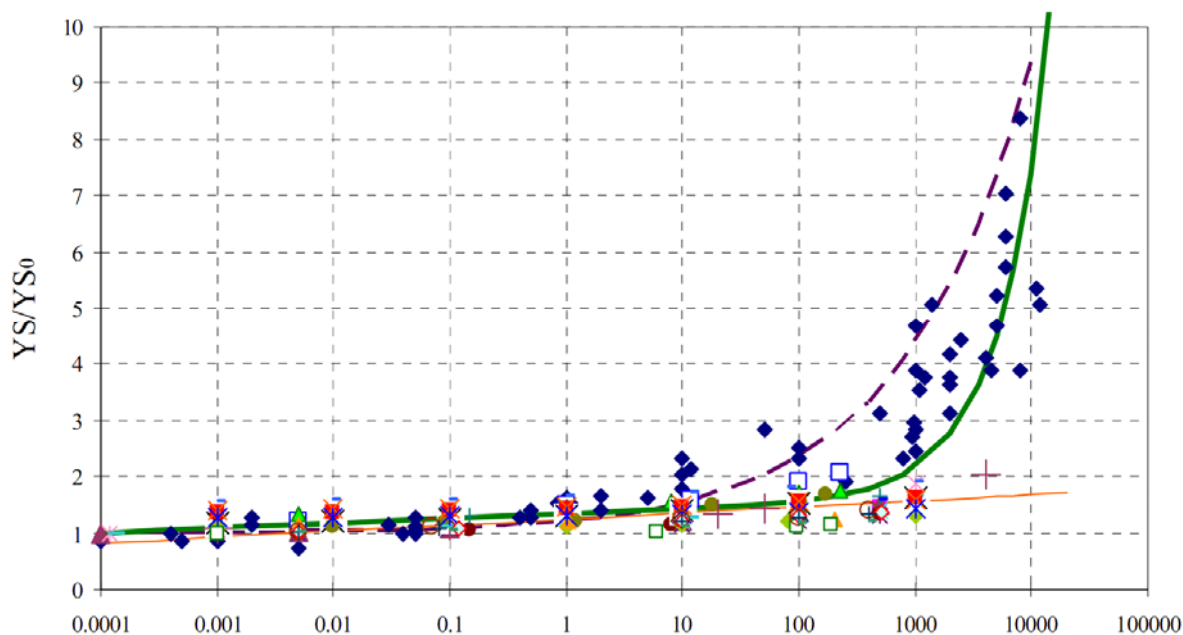


Рис. 4.4. Сравнение различных зависимостей динамического упрочнения:

— — модель Джонсона–Кука; — — модель Чао–Вонга;  
 - - - - модель Симонда–Купера

Как видно из рис. 4.4, в статическом диапазоне эти зависимости незначительно отличаются. Для динамических процессов более приемлемы модели Чао–Вонга и Симонда–Купера. Наибольшее распространение получила модель Симонда–Купера. Эта модель позволяет, корректируя два коэффициента, использовать ее в более широких скоростных диапазонах, что упрощает расчет [26].

Зависимость  $\sigma_s^{ст} = f(\epsilon_p, T)$  будет описывать влияние температуры на деформационное упрочнение с низкими скоростями деформации ( $0,001–10 \text{ с}^{-1}$ ), т. е. статический предел текучести.

Таким образом, используя экспериментальную зависимость  $\sigma_s^{ст} = f(\epsilon_p, T)$  статического упрочнения и модель динамического упрочнения Симонда–Купера, представляется возможным математическое описание упругопластических свойств высокопрочной стали 90 в процессе высокоскоростного волочения проволоки в виде:

$$\sigma_s^d = f(\epsilon_p, T) \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{C} \right)^{1/p} \right), \quad (4.9)$$

где  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $T$  – температура, °С;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластической деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C, p$  – коэффициенты, описывающие характер динамического упрочнения.

Процесс высокоскоростного волочения характеризуется большими суммарными деформациями ( $\varepsilon = 1-4$ ) и высокими скоростями деформирования ( $\dot{\varepsilon} = 100-10000 \text{ с}^{-1}$ ). Уменьшение диаметра проволоки сопровождается как увеличением суммарной истинной деформации, так и увеличением скорости волочения и, соответственно, скорости деформирования. Тепло, выделяемое в процессе волочения, можно разделить на два вида: деформационное тепловыделение и тепло, выделяемое от контактного трения.

Поскольку температура на поверхности проволоки определяется внешним трением, которое в различных частях волоки изменяется по различным законам, следовательно, каждую зону волочения необходимо рассматривать отдельно.

В конической части волоки сила трения с увеличением обжатия увеличивается не прямо пропорционально. В цилиндрической части волоки сила трения уменьшается по мере увеличения частного обжатия.

Поскольку удельные тепловые потоки в цилиндрической и конической частях волоки примерно одинаковы, то при оценке температур в поверхностных слоях проволоки необходимо учесть все тепло внешнего трения в обеих частях волоки.

По данным А. Эйхингера и В. Люга, при волочении углеродистой проволоки (0,6 % С), независимо от структуры металла, около 10 % механической работы идет на увеличение внутренней энергии. Поэтому при волочении углеродистой проволоки, количество тепла, возникающего в очаге деформации, несколько меньше [22].

Законы контактного трения для процессов ОМД разделяют на три группы [27]:

- 1) содержащие в качестве независимой переменной физический фактор (нормальное давление, предел текучести, вязкость смазки и т. д.);
- 2) описывающие распределение сил трения в зоне контакта;
- 3) определяющие среднюю удельную силу трения в очаге деформации.

Наиболее известной и широко применяемой является закон трения Амонтона [24], [27], [28]:

$$F_{\text{тр}} = f N, \quad (4.10)$$

где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения;  $f$  – коэффициент трения;  $N$  – сила нормального давления на поверхности контактируемых тел.

Из формулы (4.10) следует, что при  $f = \text{const}$  сила трения прямо пропорциональна нормальной сжимающей силе. К оценке применимости закона Амонтона следует подходить с учетом условий деформации (шероховатости поверхности инструмента, наличия смазки и др.). Этот закон наиболее точно выполняется при холодной деформации с применением технологических смазок, когда коэффициент трения относительно невелик ( $f < 0,1$ ). При деформации инструмента с грубо-шероховатой поверхностью без смазки этот закон менее справедлив [28].

Двухчленные законы трения Кулона [27]:

$$F_{\text{тр}} = f' N + A, \quad (4.11)$$

где  $f'$  – коэффициент, отличающийся по величине от  $f$  в (4.10);  $A$  – сопротивление скольжению, обусловленное молекулярным схватыванием (адгезионным взаимодействием).

Закон Кулона отражает физические представления, согласно которым возникновение сил трения объясняется действием двух причин: механическим зацеплением неровностей и молекулярным притяжением.

В процессе практического применения формул, выведенных с использованием двухчленного закона трения, часто возникают трудности из-за недостаточной изученности эмпирических констант  $f'$  и  $A$ .

Большое распространение в теории обработки металлов давлением получил закон трения, предложенный Э. Зибелем [27]:

$$F_{\text{тр}} = f_{\sigma} \sigma_{\text{T}}, \quad (4.12)$$

где  $f_{\sigma}$  – показатель сил трения;  $\sigma_{\text{T}}$  – предел текучести деформируемого металла.

По своему физическому содержанию закон Зибеля в большей степени соответствует жестким условиям трения, когда велико отношение давления к пределу текучести металла, инструмент имеет грубую поверхность, отсутствует технологическая смазка и т. д.

Для дальнейших исследований принимаем экспериментальную зависимость  $\sigma_s^{\text{ст}} = f(\varepsilon_p, T)$  статического упрочнения и модель дина-

мического упрочнения Симонда–Купера  $\sigma_s^{\text{д}} / \sigma_s^{\text{ст}} = f\left(1 + C\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{C}\right)\right)^{1/p}$ ,

которые используются в зависимости для определения сопротивления пластической деформации:

$$\sigma_s^d = f(\varepsilon_p, T) \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{C} \right)^{1/p} \right), \quad (4.13)$$

где  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $T$  – температура, °С;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластической деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C$ ,  $p$  – коэффициенты, описывающие характер динамического упрочнения.

Принимаем закон Амонтона, описывающий граничное трение при волочении:

## 4.2. Разработка закона упрочнения стали при волочении на повышенных скоростях

В процессе высокоскоростного волочения на станах тонкого волочения со скольжением протягиваемая проволока из высокоуглеродистой стали 90 и 95 подвергается воздействию многих взаимосвязанных факторов. Особенно актуально для высокоскоростного волочения углеродистой проволоки влияние скорости волочения на характер упрочнения.

Установлено, что зависимость предела текучести проволоки при растяжении от логарифмической степени деформации близка к прямолинейной и называется линейным законом пластичности [29]:

$$\sigma_s^{\text{CT}} = \sigma_{s0} + B\varepsilon, \quad (4.14)$$

где  $\sigma_{s0}$  – предел текучести материала до деформации, МПа;  $B$  – параметр материала, характеризующий статическое упрочнение материала, равный тангенсу угла наклона прямой.

Так как зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние проволоки при волочении для углеродистых сталей, имеют одинаковый общий вид, то за базовый вариант принимаем закон упрочнения для проволоки из стали 90. Для стали 95 значения  $\sigma_{s0}$  будет отличаться на 5–10 %. Такой вывод можно сделать из диаграмм растяжения углеродистой проволоки.

Построение зависимости (4.14) возможно по диаграммам растяжения проволоки перед тонким волочением и после. В соответствии

с ГОСТ 1497–84 скорость деформации рабочей части образца проволоки на стадии текучести должна быть в пределах от 0,00025 до 0,0025 с<sup>-1</sup> [10]. Из [11] известно, что диапазон скоростей деформации 10<sup>-5</sup>–1 с<sup>-1</sup> характеризуется деформационным упрочнением и может быть описан статическим пределом текучести.

Скоростная зависимость напряжения течения представляется как результат конкурирующих процессов упрочнения и разупрочнения. С ростом скорости деформации увеличивается сопротивление скольжению, связанное с трением при движении дислокаций, и уменьшается от тепла, выделяемого от пластической деформации. Суммарным эффектом является рост прочностных характеристик [21], так как при высоких скоростях деформирования высокая температура (450–550 °С), образующаяся от контактного трения на поверхности проволоки за короткие промежутки времени (0,1–0,001 с<sup>-1</sup>) оказывает незначительное разупрочнение. Быстрый нагрев и охлаждение поверхностных слоев высокоуглеродистой проволоки в большей степени влияют на структурные превращения углерода на поверхности проволоки, что в сумме с динамическим упрочнением ведет к потере пластичности [21].

Повышение предела текучести от 913 до 3000 МПа проволоки из стали 90 после высокоскоростного волочения объясняется не только деформационным, но и динамическим упрочнением, часть которого сохраняется после волочения [32].

Были проведены механические испытания проволоки (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Результаты заводских испытаний проволоки на разрыв**

Диаметр проволоки, мм	Длина образца, мм	Скорость растяжения, мм/мин	Температура испытания, °С	Условный предел текучести, МПа	Предел прочности на разрыв, МПа	$K_{\sigma}$
1,94	250	25,4	20	913	1302	
				914	1302	
				915	1301	
				910	1302	
Среднее значение				913	1302	0,701
0,349	250	25,4	20	2884	3155	
				2893	3150	
				2874	3177	
				2975	3173	
Среднее значение				2907	3164	0,92

Из табл. 4.1 видно, что запас пластичности после волочения уменьшился, но при этом увеличился предел прочности почти в 3 раза, что и объясняется динамическим упрочнением. Однако, как известно из литературных источников [21], [32], температура при статическом нагружении снижает прочность стали.

Проведенные опыты на растяжение на разрывной машине *INSTRON 5567*, в том числе и с нагревом проволоки до 300 °С, позволяют оценить влияние температуры, образующейся от пластической деформации при волочении.

Известно, что отношение предела текучести к пределу прочности при статическом нагружении  $K_{\sigma} = \sigma_s^{ст} / \sigma_B^{ст}$  для проволоки диаметром 1,94 и 0,349 мм соответственно равно 0,701 и 0,92. С целью получения более точных значений предела текучести проводили оценку влияния температурного фактора по пределу прочности на разрыв. Оценку влияния температуры проводили определением отношения предела прочности при 300 °С к пределу прочности при 20 °С:

$$K_T = \sigma_B^{300} / \sigma_B^{20}. \quad (4.15)$$

Таблица 4.2

Результаты испытаний проволоки на разрыв при 20 и 300 °С

Скорость растяжения, мм/мин		Ø 1,94 мм			Ø 0,349 мм		
		10	25,4	500	10	25,4	500
Предел прочности, МПа (заводские испытания при 20 °С)		–	1301,75	–	–	3163,75	–
Предел прочности, МПа ( <i>INSTRON</i> 5567)	20 °С	1311,95	–	1327,44	3271,93	–	2622,08
		1312,06	–	1327,00	2912,57	–	2678,94
		1312,39	–	1325,75	2879,29	–	3346,47
		–	–	–	3249,02	–	–
	Среднее	1312,13	–	1326,73	3078,20	–	2882,50
Предел прочности, МПа ( <i>INSTRON</i> 5567)	300 °С	1249,06	–	1244,07	2400,08	–	2666,34
		1264,99	–	1243,63	2432,66	–	2494,64
		1232,99	–	1240,34	2251,05	–	2471,81
		–	–	–	–	–	–
	Среднее	1249,01	–	1242,68	2361,26	–	2544,26

Окончание табл. 4.2

Температурный коэффициент $K_T$	0,952	–	0,9366	0,727	–	0,883
	0,944			0,805		
Предел прочности при 300 °С, МПа	1228,85			2546,82		
Предел текучести при 300 °С, МПа	860,19			2339,73		

Анализ табл. 4.2 показывает, что температурное разупрочнение проволоки из стали 90 увеличивается с ростом деформационного и динамического упрочнения. Этот вывод можно сделать, сравнивая значения температурного коэффициента  $K_T$  для волочения проволок  $\varnothing 1,94$  и  $\varnothing 0,349$  мм.

По результатам статического нагружения (табл. 4.2) было получено уравнение, позволяющее оценить влияние температуры на линейный закон упрочнения:

$$\sigma_s^{ct} = f(\varepsilon_p, T) = 916,7721 + 591,8984\varepsilon_p - 0,1886T - 0,5352\varepsilon_p T. \quad (4.16)$$

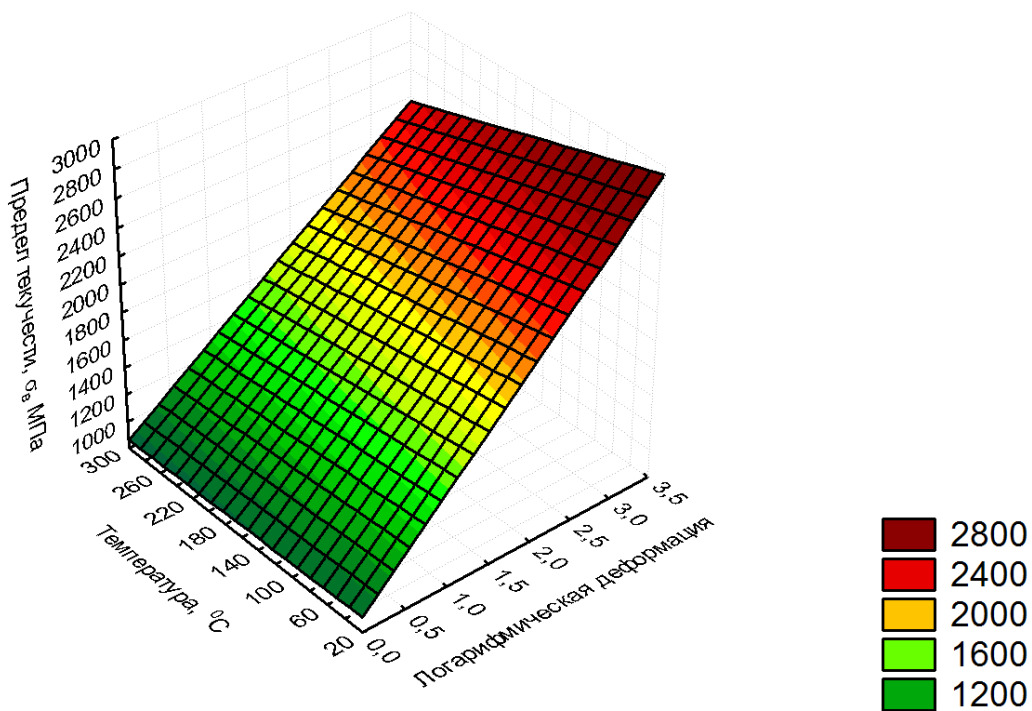


Рис. 4.5. График поверхности для функции  $\sigma_s^{ct} = f(\varepsilon_p, T)$



Так как часть динамического упрочнения сохраняется в проволоке после волочения и уже учтена в уравнении (4.16), то используя зависимость Симонда–Купера, можно вычислить предел текучести в очаге деформации с учетом динамического упрочнения:

$$\sigma_s^d = (916,7721 + 591,8984\varepsilon_p - 0,1886T - 0,5352\varepsilon_p T) \times \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{1 \cdot 10^7} \right)^{\frac{1}{13,288}} \right), \quad (4.17)$$

где  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластической деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C, p$  – коэффициенты описывающие характер динамического упрочнения ( $C = 1 \cdot 10^7$ ,  $p = 13,288$ ).

Коэффициенты  $C$  и  $p$  были выбраны с учетом частичного динамического упрочнения проволоки и характерны для большинства углеродистых сталей [26].

Исследуя маршрут волочения высокоуглеродистой латунированной проволоки  $\varnothing 0,349$  мм из проволооченной заготовки  $\varnothing 2,19$  мм из стали 90 с конечной скоростью волочения 5 м/с, установлен характер изменения скорости деформации (рис. 4.6).

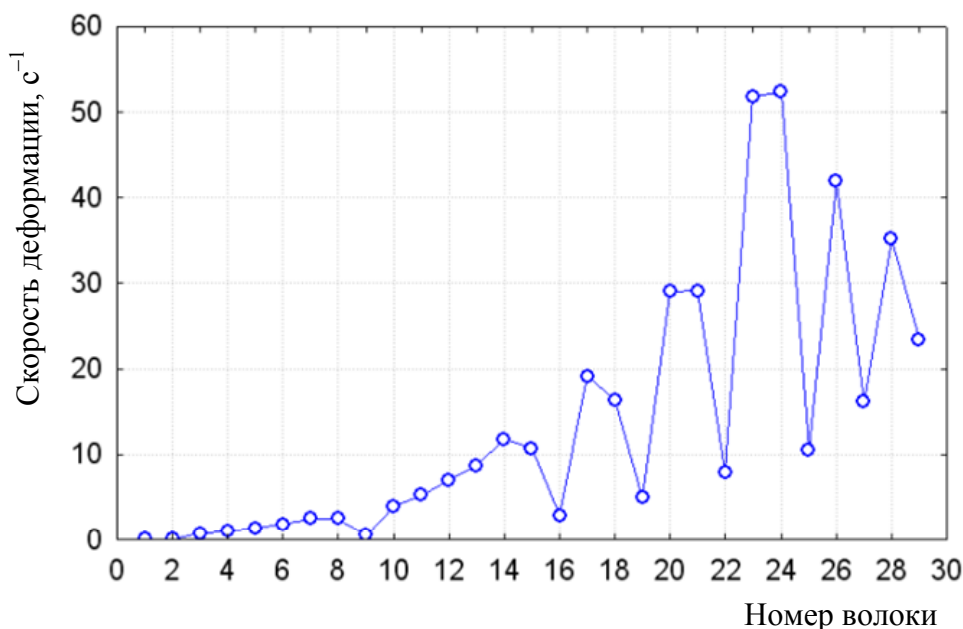


Рис. 4.6. Рост скорости деформации

Анализируя график скорости деформации на рис. 4.6 по исследуемому маршруту волочения, можно сделать вывод, что значительное влияние динамического упрочнения проявляется на последних переходах волочения.

Получена новая зависимость для расчета предела текучести высокоуглеродистой стали 90, учитывающая влияние температурных, деформационных и скоростных условий деформации проволоки. Она позволит значительно повысить точность численных расчетов режимов высокосортного волочения высокоуглеродистой проволоки, распределений температур, деформаций и напряжений по сечению тонкой проволоки при волочении. Это позволит прогнозировать и качество получаемой проволоки.

### **4.3. Оптимизация геометрии волочильного инструмента**

Одной из главных задач, поставленных перед метизным производством, является повышение производительности на всех переделах. Основным вариантом повышения производительности тонкого волочения является повышение скорости волочения, что значительно увеличивает температурно-деформационные параметры процесса. При этом параметры волочения на последовательных переходах волочения взаимосвязаны. По всему маршруту волочения скорость волочения постепенно увеличивается, изменяется температура проволоки в очаге деформации, диаметр проволоки, прочностные и пластические свойства проволоки, а также условия смазывания [33]. В общем случае сопротивление деформации является сложной функцией, зависящей от степени накопленной деформации, температуры, скорости деформации и истории деформирования. При этом значительную роль играет скорость деформации, с повышением которой независимо от значений температуры и степени деформации сопротивление деформации увеличивается, снижается пластичность проволоки и как следствие ее качество [34].

Основной задачей оптимизации геометрии рабочей части волоки является поиск таких значений углов деформирующих и длин калибрующих волок по маршруту волочения, которые обеспечивают минимально возможную скорость деформации проволоки на переходах волочения без снижения скорости волочения на выходе из последней волоки.

Рассмотрим схему очага деформации проволоки 1 в волоке 2 на рис. 4.7. Заготовка с начальным диаметром  $d_0$  деформируется на диаметр  $d_1$  в конической волоке 2 с полууглом конуса  $\alpha_B$  к оси волочения  $z$  со скоростью волочения  $V_B$ .

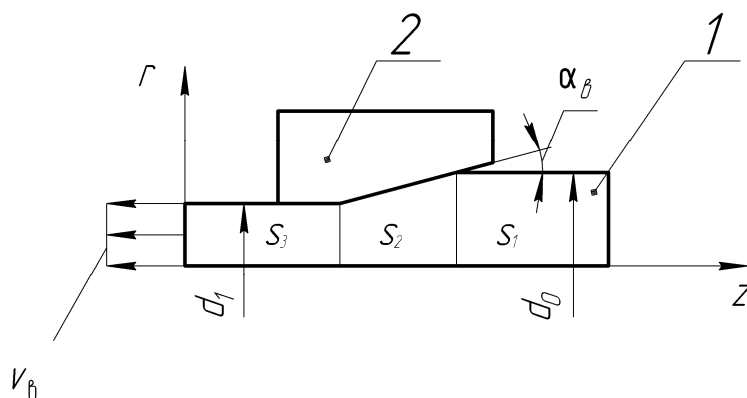


Рис. 4.7. Схема процесса волочения  
1 – деформируемая проволока; 2 – волока

В процессе пластического деформирования в проволоке можно выделить три основных зоны:  $S_1$ ,  $S_3$  – до деформации и после соответственно, а  $S_2$  – является зоной интенсивной деформации, в которой скорость деформации распределена неравномерно. Характер распределения скорости деформации в  $S_2$  может оказать существенное влияние на качество проволоки.

Аналитические зависимости для приближенного вычисления оптимального угла не позволяют учесть характер деформационного упрочнения, контактное трение и температуру в очаге деформации [35]. В работах по оптимизации геометрии волоки [35], [36] исследуется влияние величины угла конической и длины цилиндрической части волоки на стойкость волок и на температурно-силовые параметры волочения.

В работе [34] предлагается оценка усредненной по зоне деформации скорости деформации при волочении:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{4(\ln \sqrt{\lambda} + 2\text{tg}(\alpha_B)/(3\sqrt{3}))V_B \text{tg}(\alpha_B)}{d_1(\sqrt{\lambda} - 1)\sqrt{\lambda}}, \quad (4.18)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;  $\lambda = \frac{d_0^2}{d_1^2}$ ;  $\alpha_B$  – угол между образующей конической части волоки и осью волочения;  $V_B$  – скорость волочения.

Исследования основаны на использовании МКЭ, позволяющем анализировать НДС и ТП очага деформации проволоки в волоке.

Расчет скорости деформации в зависимости от угла  $\alpha_v$  образующей конуса волоки, скорости волочения  $V_v$  и логарифмической степени деформации  $\epsilon_p$  проводим с использованием МКЭ, применяя постановку задачи, описанную в работе [37].

Для проведения анализа используется маршрут волочения проволоки из стали 90 конечным диаметром 0,349 мм из заготовки диаметром 1,94 мм с конечной скоростью 12 м/с при коэффициенте трения  $f = 0,05$ .

Результаты расчета получены в виде полей распределения скорости деформации в очаге деформации с использованием цветовой индикации, сноски на которые представлены в табл. 4.3. Используя инструменты анализа решений, полученных с использованием МКЭ, были вычислены значения средней  $\dot{\epsilon}_{cp}$  и максимальной  $\dot{\epsilon}_{max}$  скоростей деформации в очаге деформации и температуры поверхности проволоки в начале калибрующей зоны и представлены в табл. 4.3.

Анализируя результаты компьютерного моделирования представленных в виде цветовой индикации полей распределения средней  $\dot{\epsilon}_{cp}$  и максимальной  $\dot{\epsilon}_{max}$  скоростей деформации проволоки, можно сделать следующие заключения:

- так как увеличение угла конической зоны  $\alpha_v$  уменьшает объем зоны деформации, то это приводит к интенсификации процессов деформирования и росту сопротивления пластической деформации;
- повышение интенсивности пластической деформации приводит к увеличению тепловыделения от пластической деформации.

Таблица 4.3

**Исходные параметры исследуемого маршрута волочения**

$i$	$d$ , мм	$V$ , м/с	$e$	$\Sigma e$	$k$	$\alpha_v$ , °	$\dot{\epsilon}_{cp}$	$\dot{\epsilon}_{max}$	$T_{II}$ , °С
1	1,748	0,478	0,208	0,208	0,5	3	46,58	203,01	142
7	1,054	1,316	0,193	1,220	0,4	3	212,08	906,05	263
22	0,396	9,321	0,045	3,178	0,4	3	4658,56	9891,49	306
25	0,349	12,000	0,045	3,431	0,4	3	4995,76	17624,80	325
1	1,748	0,478	0,208	0,208	0,5	6,5	110,03	435,33	151
7	1,054	1,316	0,193	1,220	0,4	6,5	484,95	1758	253
22	0,396	9,321	0,045	3,178	0,4	6,5	8084,74	31785	343

$i$	$d$ , мм	$V$ , м/с	$e$	$\Sigma e$	$k$	$\alpha_b$ , °	$\dot{\epsilon}_{cp}$	$\dot{\epsilon}_{max}$	$T_{ш}$ , °С
25	0,349	12,000	0,045	3,431	0,4	6,5	9349,95	47775	352
1	1,748	0,478	0,208	0,208	0,5	10	163,74	481,86	164
7	1,054	1,316	0,193	1,220	0,4	10	725,34	2659,22	271
22	0,396	9,321	0,045	3,178	0,4	10	9957,73	56228,2	485
25	0,349	12,000	0,045	3,431	0,4	10	13524,94	94159,6	516

Примечание:

- 1)  $i$  – номер перехода волочения;
- 2)  $d$  – диаметр калибрующей части волокна;
- 3)  $e$  – логарифмическая степень деформации:

$$e_i = \ln \left( \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2} \right);$$

- 4)  $\Sigma e$  – суммарная логарифмическая степень деформации:

$$\Sigma e_i = \sum_{j=1}^i e_j;$$

- 5)  $V_b$  – скорость волочения;
- 6)  $\alpha_b$  – полуугол между образующей конической части волокна и осью волочения;
- 7)  $k$  – относительная длина калибрующей зоны волокна, равная  $l_k/d_k$ ;
- 8)  $\dot{\epsilon}_{cp}$  – средняя скорость деформации в конической зоне волокна,  $c^{-1}$ ;
- 9)  $\dot{\epsilon}_{max}$  – максимальная скорость деформации в конической зоне волокна,  $c^{-1}$ .

На рис. 4.8 и 4.9 представлены графики поверхностей распределения значений средней  $\dot{\epsilon}_{cp}$  и максимальной  $\dot{\epsilon}_{max}$  скоростей деформации проволоки по всему маршруту волочения в зависимости от угла конической части волокна  $\alpha_b$  и суммарной степени деформации  $\Sigma e$ .

Анализируя графики поверхностей распределения значений средней  $\dot{\epsilon}_{cp}$  и максимальной  $\dot{\epsilon}_{max}$  скоростей деформации, можно сделать вывод о том, что влияние угла конической части волокна  $\alpha_b$  на значения средней и максимальной скоростей деформации особенно проявляется на последних переходах волочения. Так, при увеличении угла от 3 до 10° в конце маршрута волочения наблюдается рост скорости деформации с 5000–13000  $c^{-1}$  до максимальных значений – 17000–94000  $c^{-1}$ .

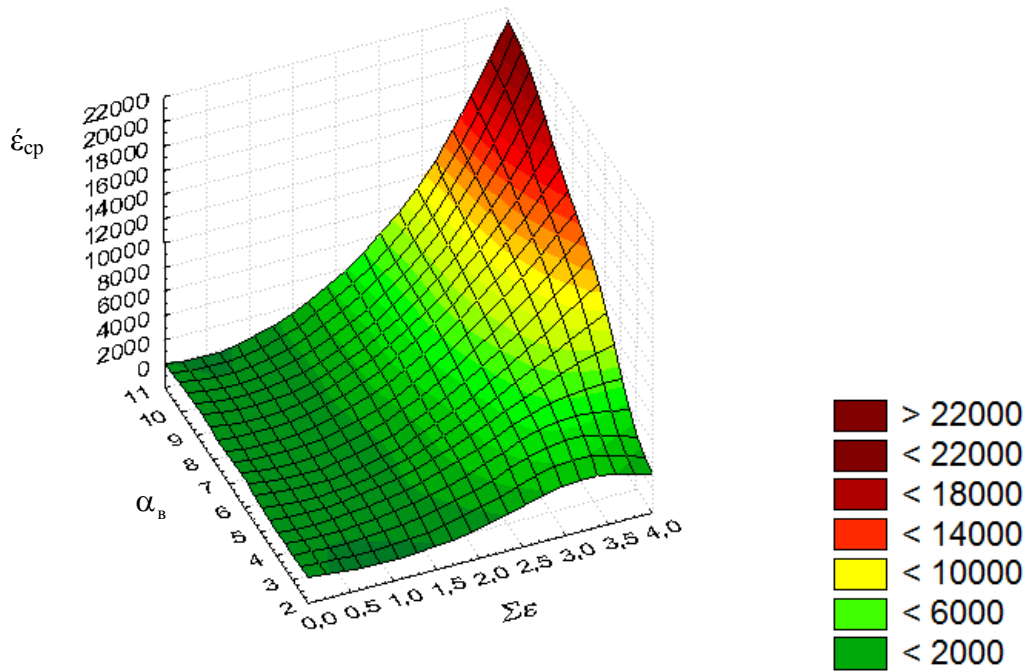


Рис. 4.8. Поверхность распределения значений средней скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{\text{cp}}$  в зависимости от суммарной степени пластической деформации  $\Sigma e$  и угла конической части волокна  $\alpha_{\text{в}}$

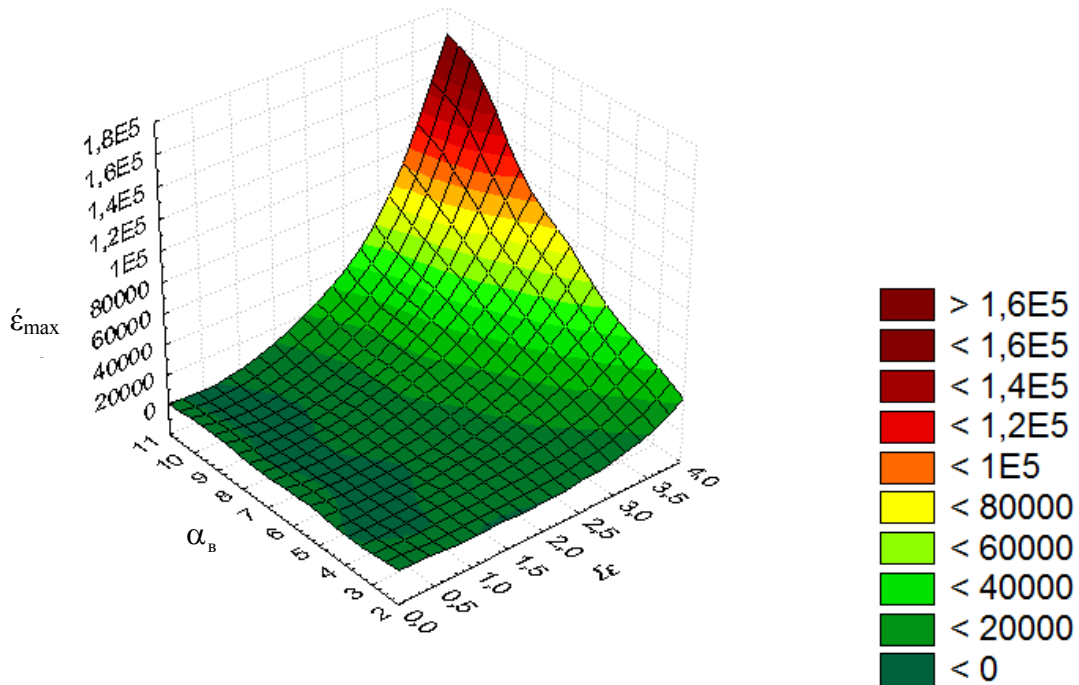


Рис. 4.9. Поверхность распределения значений максимальной скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{\text{max}}$  в зависимости от суммарной степени пластической деформации  $\Sigma e$  и угла конической части волокна  $\alpha_{\text{в}}$

Начиная с 12–16 переходов волочения с суммарной степенью деформации  $\sum e = 2–2,5$ , в исследуемом маршруте волочения со значением угла конической части волоки  $\alpha_b = 6^\circ$  наблюдается рост средней  $\dot{\epsilon}_{cp}$  и максимальной  $\dot{\epsilon}_{max}$  скоростей деформации. Снижение значений средней и максимальной скоростей деформации возможно за счет уменьшения угла конической части волоки на последних переходах волочения после 12–16 переходов.

Уменьшение значений средней и максимальной скоростей деформации за счет уменьшения угла конической части волоки позволяет также снизить температуру поверхности проволоки в начале калибровочной зоны  $T_n$ .

На рис. 4.10 представлены графики температуры  $T_n$  поверхности проволоки в начале калибрующей зоны волоки в зависимости от максимальной (а) и средней (б) скоростей деформации.

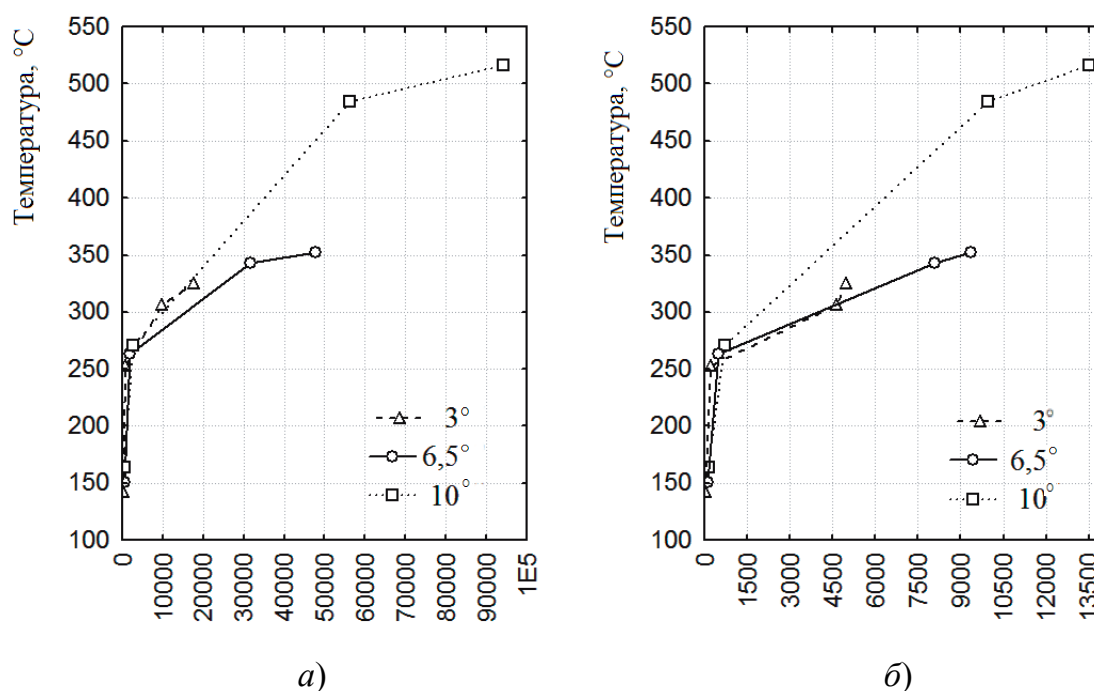


Рис. 4.10. Графики влияния максимальной  $\dot{\epsilon}_{max}$  (а) и средней  $\dot{\epsilon}_{cp}$  (б) по деформирующей зоне скоростей деформации проволоки на температуру поверхности проволоки в начале калибрующей зоны волоки

Анализ графиков на рис. 4.10 показал, что на 1–7 переходах изменение угла конической части волоки  $\alpha_b$  не влияет в значительной степени на температуру  $T_n$  поверхности проволоки в начале калибрующей

зоны. Начиная с 7 перехода, увеличение угла конической части волоки  $\alpha_B$  от  $3^\circ$  до  $10^\circ$  отражается на расширении диапазона значений средней и максимальной скоростей деформации, что и вызывает увеличение температуры поверхности проволоки. Увеличение диапазона температур и скоростей деформации происходит на последних переходах волочения, начиная с 12–16 переходов. Уменьшение угла конической части волоки  $\alpha_B$  на последних переходах волочения в исследуемом маршруте позволит снизить температуру  $T_n$  проволоки в начале калибровочной зоны в среднем на  $50\text{--}70^\circ\text{C}$ .

Длина калибрующей зоны волоки может в значительной степени оказать влияние на температуру поверхности проволоки на выходе из волоки. На рис. 4.11–4.14 представлены графики температуры в зависимости от коэффициента длины калибрующей зоны  $k$  для разных диаметров проволоки и углов конической части волоки согласно плану численного эксперимента (табл. 4.3).

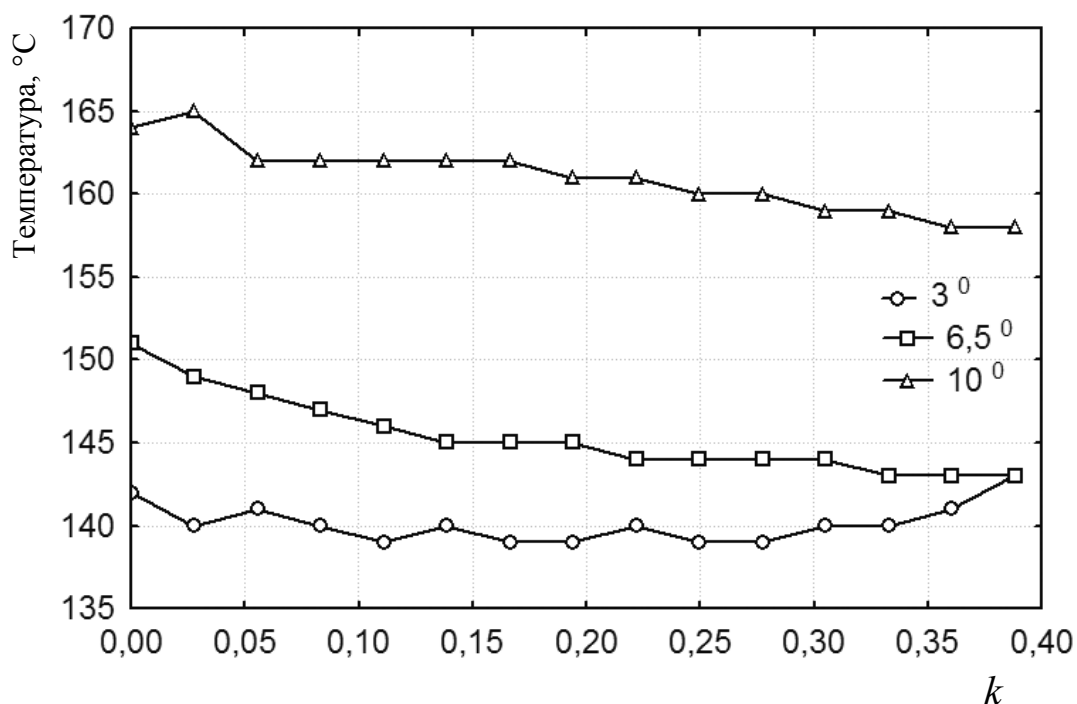


Рис. 4.11. График распределения температуры поверхности проволоки по длине калибрующей зоны волоки в зависимости от  $\alpha_B$  ( $d_1 = 1,748$  мм,  $V_B = 0,478$  м/с)



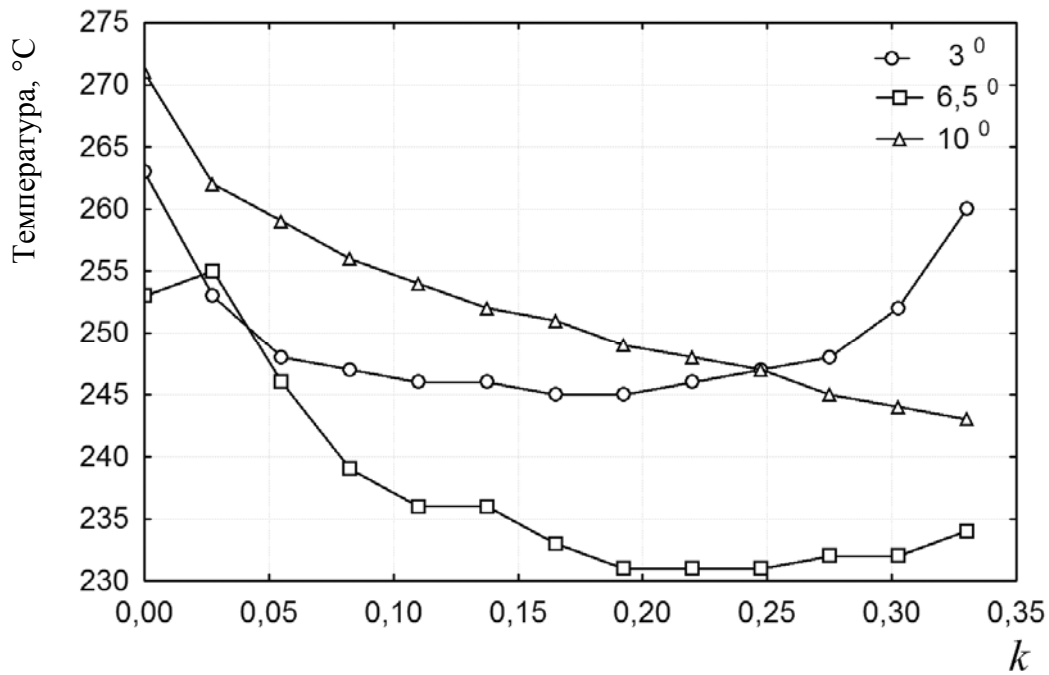


Рис. 4.12. График распределения температуры поверхности проволоки по длине калибрующей зоны волокни в зависимости от  $\alpha_B$  ( $d_1 = 1,054$  мм,  $V_B = 1,316$  м/с)

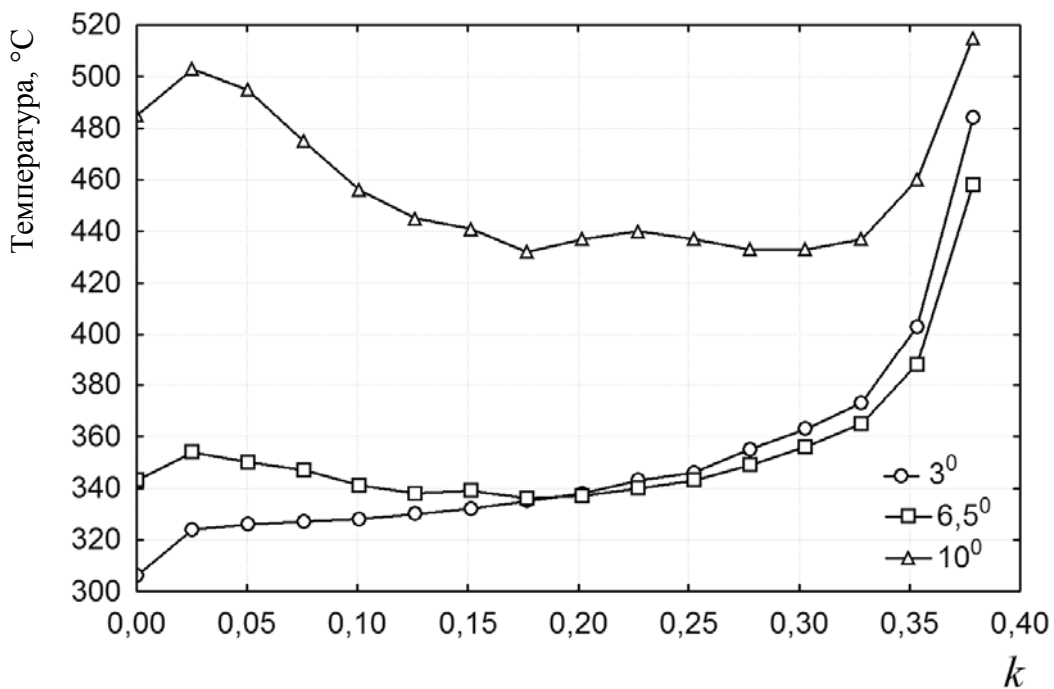


Рис. 4.13. График распределения температуры поверхности проволоки по длине калибрующей зоны волокни в зависимости от  $\alpha_B$  ( $d_1 = 0,396$  мм,  $V_B = 9,321$  м/с)

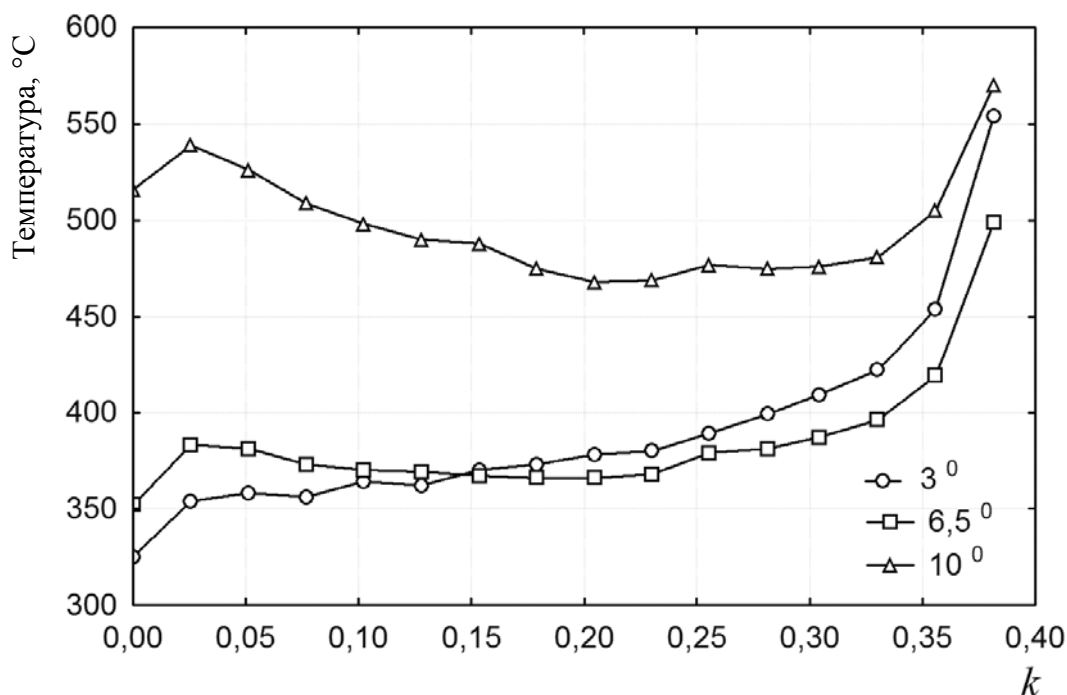


Рис. 4.14. График распределения температуры поверхности проволоки по длине калибрующей зоны волокна в зависимости от  $\alpha_B$  ( $d_1 = 0,349$  мм,  $V_B = 12$  м/с)

Анализ графиков на рис. 4.11–4.14 показал, что используемое значение коэффициента длины калибрующей зоны ( $k = 0,4–0,5$ ) на первых 7 переходах с углом конической части  $\alpha_B = 6^\circ$  не вызывает увеличения температуры поверхности проволоки по длине калибрующей зоны волокна. Однако на последних переходах (начиная с 12–16) при различных углах конической части волокна наблюдается повышение температуры поверхности проволоки (150–200 °С) в конце калибрующей зоны. Так, уменьшение длины калибрующей зоны волокна с 0,4 до 0,3 на последних переходах исследуемого маршрута волочения позволит снизить температуру проволоки даже при неизменном значении угла конической части волокна.

Проведенные исследования по оптимизации геометрии рабочей части волокна в зависимости от скорости деформации показали, что изменение угла конической части волокна в значительной степени влияет на скорость деформации на последних переходах волочения. Уменьшение коэффициента длины калибрующей зоны волокна на последних переходах позволит снизить температуру поверхности проволоки.

Полученная оптимальная геометрия волок по переходам волочения представлена в табл. 4.4.

## Оптимальная геометрия волок

Номер перехода	$\alpha_b$	$k$
1–7	$6^\circ \pm 1$	$0,4 \pm 0,1$
8–14	$5-6^\circ$	$0,35 \pm 0,05$
15–22	$4-6^\circ$	$0,3 \pm 0,05$

Для унификации процесса перешлифовки конических и калибрующих зон волок необходимо получить минимальное количество геометрических форм и размеров зон волок. Для этого необходимо провести рациональное объединение полученных оптимальных геометрий волок по переходам волочения.

Рекомендуется принять единый угол конической зоны волоки  $\alpha_b = 6^\circ$  с допуском  $-2^\circ$  по всему маршруту волочения; рекомендуется принять коэффициент длины калибрующих зон волок  $k = 0,4 \pm 0,05$  для 1–14 переходов и  $k = 0,35 \pm 0,05$  для 16–22 переходов.

#### 4.4. Исследование контактного трения в волоке

Контактное трение в процессе волочения оказывает существенное влияние на энергосиловые параметры процесса, износ инструмента – волок, на свойства технологических смазок. Значение величины силы контактного трения при волочении определяется законом Амонтона–Кулона. В соответствии с этим законом сила трения зависит от нормального контактного давления в волоке и коэффициента контактного трения [38]. Для расчета режимов волочения, а также для их оптимизации используются зависимости, включающие коэффициент контактного трения. В этой связи повышение точности в определении коэффициента контактного трения обеспечивает повышение точности расчетов режимов волочения.

На коэффициент контактного трения при волочении оказывают влияние химический состав и качество поверхности обрабатываемой проволоки и рабочего канала инструмента, свойства технологической смазки, температура в зоне контакта, геометрия рабочего канала волоки, суммарная степень деформации обрабатываемой проволоки, отражающая ее упрочнения и скорость протяжки проволоки через волоку (скорость волочения). В данной работе исследуется влияние степени

деформации и скорости тонкого волочения с использованием водоэмульсионной СОЖ на величину коэффициента контактного трения. Такой процесс иначе называют мокрым волочением.

В условиях мокрого волочения, когда толщина смазки намного меньше входного диаметра рабочего конуса волокна, толщина смазочного слоя прямо пропорциональна вязкости смазки и скорости волочения [38], [39]:

$$\xi = \frac{6\nu\eta}{\varepsilon\rho\operatorname{tg}\alpha}, \quad (4.19)$$

где  $\nu$  – скорость волочения;  $\eta$  – кинематический коэффициент вязкости;  $\varepsilon$  – суммарная деформация;  $\rho$  – давление в смазочном клине на входе в очаг деформации.

Из уравнения (4.19) следует, что при повышении скорости волочения толщина слоя смазки в очаге деформации будет расти пропорционально, однако с ростом температуры, сопровождающим увеличение скорости волочения, проходит через максимум и начинает уменьшаться. Повышение температуры при этом вызвано динамическим ростом прочности проволоки на высоких скоростях [40].

Для оценки влияния скорости волочения на величину коэффициента контактного трения была проведена серия опытов на волочильном стенде однократного волочения при различных скоростях волочения. В опытах использовалась СОЖ для станов тонкого волочения *VSV77* с концентрацией 10 %, предварительно нагретая до температуры 40 °С, соответствующей температуре ванны с СОЖ в реальных условиях мокрого волочения на станах тонкого волочения. Диаметры протягиваемой проволоки соответствовали первым четырем переходам маршрута волочения проволоки из стали 90  $\varnothing$  0,412 мм из заготовки  $\varnothing$  2,45 мм с конечной скоростью волочения 5 м/с. Средняя температура проволоки на выходе из волокна в эксперименте составляла 180–250 °С.

Для определения коэффициента трения использовался метод усилия волочения [38]: в процессе волочения измеряют тяговое усилие  $P_i$  (табл. 4.5). В одну из теоретических (наиболее обоснованных) формул усилия волочения подставляют значения предела текучести металла и геометрические параметры; затем подбирают такое значение  $f$ , при котором достигается совпадение экспериментальных и расчетных данных по напряжению волочения.

Таблица 4.5

## Результаты эксперимента по определению усилия волочения

D, мм	Суммарная деформация	Скорость волочения $V_{vi}$ , м/с								
		0,11	0,17	0,21	0,26	0,31	0,5	0,6	0,74	1,15
2,230	0,19		1831,3	1646,3					1646,3	
			1806,8	1665,3					1597,3	
			1820,4	1657,1					1597,3	
	Среднее		1819,5	1656,2					1613,6	
2,010	0,40		1866,7		1782,3			1755,1		1635,4
			1869,7		1746,9			1746,9		1635,4
			1858,5		1771,4			1763,3		1638,1
	Среднее	1865,0		1766,9			1755,1			1636,3
1,821	0,59		1610,9		1510,2			1453,1		1409,5
			1578,2		1526,5			1463,9		1417,7
			1567,4		1485,7			1442,2		1379,6
	Среднее		1585,5		1507,5			1453,1		1402,3
1,650	0,79		1322,4			1232		1197,3		1112,9
			1298,0			1216,3		1194,6		1148,3
			1311,6			1243,5		1202,7		1145,6
	Среднее		1310,7			1230,6		1198,2		1135,6

Формула для определения величины  $f$  основана на формуле [36] для определения напряжения волочения:

$$P_i = (\sigma_{s_i} (1 + 2f) - \frac{(w_i - \sigma_{s_{i-1}}) \left[ (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}} - 1 \right]}{\frac{f}{\tan(\alpha_i)} (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}}) \frac{\sigma_{s_{i-1}} - \left( \frac{\sigma_{v_{i-1}}}{K_i} \right)}{(\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} + 4m_i f \sigma_{s_i} \frac{\pi d_i^2}{4}, \text{ Н.} \quad (4.20)$$

В формулу (4.21) подставляется экспериментальное значение силы волочения для  $i$ -го перехода волочения и затем с помощью вычислительных методов, реализуемых в компьютерных математических пакетах, рассчитывается неизвестная величина  $f$ .

Результаты определения коэффициента трения

D, мм	Сум- марная дефор- мация	Скорость волочения $V_i$ , м/с								
		0,11	0,17	0,21	0,26	0,31	0,5	0,6	0,74	1,15
2,23	0,19		0,0434	0,0366					0,03484	
2,01	0,40	0,05		0,0456			0,0451			0,0397
1,82	0,59		0,0477		0,0437		0,0409			0,0384
1,65	0,79		0,0418			0,03723		0,0354		0,0318

Анализируя табл. 4.6, можно сделать вывод, что коэффициент трения снижается с увеличением скорости от 0,11 до 1,15 м/с во всех экспериментах. В экспериментальных значениях коэффициента трения с параметрами заводского маршрута с ростом скорости и степени деформации снижение коэффициента трения проявляется неоднозначно.

В связи с этим оценку изменения коэффициента трения от скорости волочения и суммарной деформации проводили по величине изменения экспериментального коэффициента трения.

Так как при построении заводского маршрута волочения принимали коэффициент трения, равный 0,05 [37], а его экспериментальные значения, соответствующие параметрам заводского маршрута, не постоянны (0,0434, 0,0456, 0,0437, 0,0372), то за базовую величину коэффициента трения принимаем значение 0,05:

$$\Delta f = f_i - f_{\text{баз}}, \quad (4.21)$$

где  $\Delta f$  – изменение коэффициента трения;  $f_i$  – значение экспериментальных значений коэффициента трения;  $f_{\text{баз}}$  – значение коэффициента трения, принимаемого в расчете маршрута волочения.

Далее, подставляя значения из табл. 4.6 в выражение (4.22), получаем величину отклонения значения коэффициента трения от базового значения 0,05. Результаты расчета приведены в табл. 4.7.

Полученные данные из табл. 4.7 с помощью дополнительной аппроксимации графически интерпретированы в поверхность, представленную на рис. 4.15.

Таблица 4.7

Отклонения базового значения коэффициента трения ( $10^{-3}$ )

$D$ , мм	Суммарная деформация	Скорость волочения $V_i$ , м/с								
		0,11	0,17	0,21	0,26	0,31	0,5	0,6	0,74	1,15
2,23	0,19		-6,6	-13,4					-15,16	
2,01	0,40	0		-4,4			-4,9			-10,3
1,82	0,59		-2,3		-6,3		-9,1			-11,6
1,65	0,79		-8,2			-12,77		-14,6		-18,2

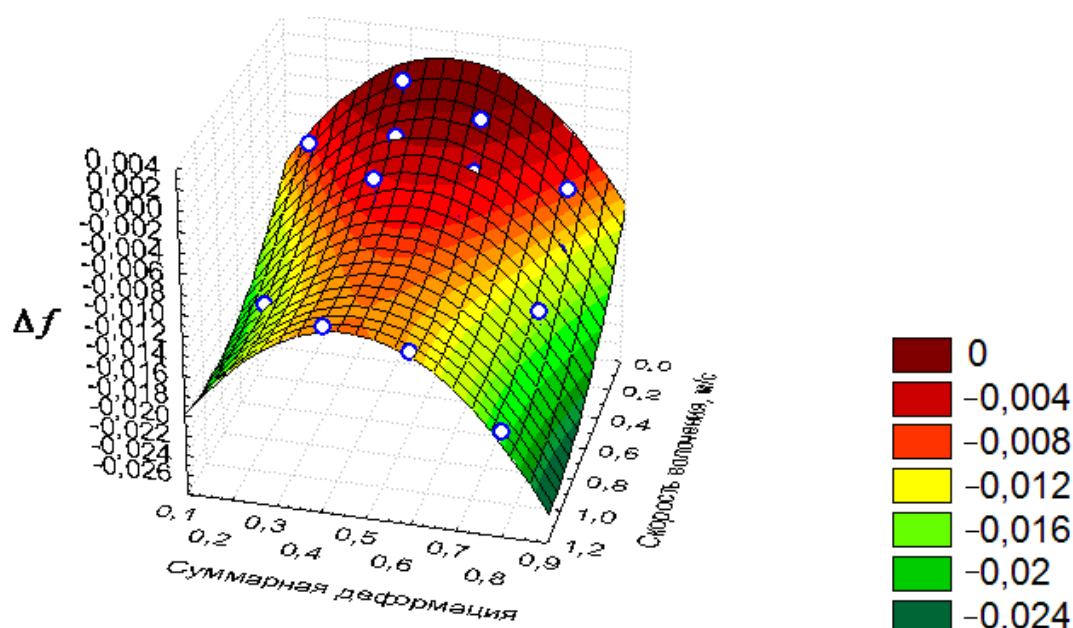


Рис. 4.15. Отклонение коэффициента контактного трения

На основе построенной поверхности (рис. 4.15) получена математическая зависимость:

$$\begin{aligned} \Delta f = & -0,0179 - 0,0194V_B + 0,0779\varepsilon_p + \\ & + 0,0103V_B^2 - 0,0047V_B\varepsilon_p - 0,0786\varepsilon_p^2, \end{aligned} \quad (4.22)$$

где  $V_B$  – скорость волочения, м/с;  $\varepsilon_p$  – суммарная пластическая деформация.

Выражая из (4.22)  $f_i$ , получаем откорректированный коэффициент контактного трения в зависимости от скорости волочения и суммарной деформации:

$$f_i = f_{\text{баз}} + \Delta f. \quad (4.23)$$

Сравнение расчетных коэффициентов контактного трения с экспериментальными приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

**Сравнение результатов расчетных и экспериментальных значений коэффициента трения**

Скорость волочения	Суммарная деформация	$\Delta f$	$f_{\text{расч}}$	$f_{\text{экс}}$	Относительная погрешность, %
0,17	0,19	-0,00909	0,040911	0,0434	-5,7341
0,21	0,19	-0,00974	0,040256	0,0366	9,989727
0,74	0,19	-0,01531	0,034687	0,03484	-0,43915
0,11	0,4	-0,00153	0,048468	0,05	-3,06434
0,21	0,4	-0,00333	0,046669	0,0456	2,345241
0,5	0,4	-0,00738	0,042619	0,0451	-5,50111
1,15	0,4	-0,01017	0,039834	0,0397	0,336902
0,17	0,59	-0,00277	0,047229	0,0477	-0,98826
0,26	0,59	-0,00437	0,045632	0,0437	4,420229
0,5	0,59	-0,00781	0,042189	0,0409	3,151198
1,15	0,59	-0,01118	0,038823	0,0384	1,101927
0,17	0,79	-0,00904	0,040955	0,0418	-2,02105
0,31	0,79	-0,01159	0,038412	0,03723	3,173623
0,6	0,79	-0,01557	0,034427	0,0354	-2,74876
1,15	0,79	-0,01837	0,031629	0,0318	-0,53918

Из табл. 4.8 видно, что относительная погрешность в определении коэффициента контактного трения по выражению (4.22) не превышает 10 %.

В результате проведенных исследований получена формула для расчета коэффициента контактного трения при волочении в зависимости от суммарной степени деформации обрабатываемой проволоки и скорости волочения. Суммарная степень деформации проволоки отражает характер влияния степени упрочнения на коэффициент контактного трения.

Полученная зависимость отражает характер изменения коэффициента контактного трения от величины скорости волочения и суммарной степени деформации проволоки и может быть использована для расчета коэффициента контактного трения при разработке и оптимизации маршрутов волочения.



## ГЛАВА 5

# РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

### 5.1. Разработка математической модели процесса волочения в сдвоенных волокнах

Конструкции станов со скольжением, петлевого и прямоточного типов предусматривают создание регулируемого противонатяжения при волочении, чего нет на станах магазинного типа.

С момента появления способа волочения со скольжением продолжается поиск метода наиболее оптимального для полной синхронизации скоростей движения проволоки и тянущих барабанов [42]. Управление скоростью скольжения проволоки позволяет создавать наиболее благоприятные условия волочения проволоки и лучше контролировать процесс волочения проволоки. К таким условиям можно отнести противонатяжение, снижение коэффициента контактного трения.

Создание эффекта противонатяжения проволоки – это эффективный способ снижения давления металла на инструмент, улучшение условий для прохождения смазки в очаг деформации, более благоприятное и равномерное распределение температуры по сечению проволоки и т. д., что в комплексе приводит к значительному улучшению работоспособности инструмента и качества проволоки.

Напряжение и сила волочения – одни из основных характеристик процесса деформации при изготовлении проволоки. Знание этих величин необходимо при проектировании и разработке технологического процесса. Силовые условия процесса волочения определяют стабильность пластического формоизменения и производительность волочильного стана, расход энергии и требуемую мощность оборудования, служат основными факторами при расчете конструктивных параметров основного и вспомогательного оборудования.

Теоретическое определение напряжения и силы волочения возможно только при некоторых допущениях, которые хотя и упрощают реальный процесс, приближая его к идеальной схеме, но позволяют с достаточной для практических целей точностью устанавливать энергосиловые условия процесса. Следующие основные допущения представлены ниже.

Деформация проволоки начинается в геометрической плоскости входа металла в очаг деформации и заканчивается в геометрической плоскости выхода. Не учитывается влияние зон внеконтактной деформации.

Скорость деформации в данном сечении проволоки одинакова и изменяется только в направлении волочения. Используется гипотеза плоских сечений: сечения, плоские до деформации, остаются плоскими и в процессе деформации. Однако опыты с координатной сеткой показывают значительный изгиб вертикальных линий и неприменимость гипотезы плоских сечений.

Рассмотрим волочение сплошного профиля круглого сечения через волоку с конической формой рабочей зоны при указанных допущениях.

Составим дифференциальное уравнение равновесия элементарного объема металла, выделенного в очаге деформации на расстоянии  $x$  от плоскости выхода (рис. 5.1):

$$-\sigma_x F_x + (\sigma_x + d\sigma_x)(F_x + dF_x) + p_x \sin \alpha dF_k + t_x \cos \alpha dF_k = 0, \quad (5.1)$$

где  $\sigma_x$  – долевые растягивающие напряжения;  $p_x$ ,  $t_x$  – удельная сила и напряжение контактного трения;  $F_x$  – площадь поперечного сечения полосы на расстоянии  $x$  от плоскости выхода;  $dF_x$  – площадь контакта элементарного объема с волокой;  $\alpha$  – полуугол волоки.

Примем закон контактного трения в виде закона Амонтона–Кулона

$$t_x = fp_x. \quad (5.2)$$

Тогда уравнение (5.1) запишем в виде:

$$\frac{d\sigma_x}{dF_x} - \frac{\sigma_x}{F_x} + \frac{P_x}{F_x}(1 + f \operatorname{ctg} \alpha) = 0. \quad (5.3)$$

Уравнение (5.3) удобно решать в функции текущего значения вытяжки  $\mu_x = \frac{F_0}{F_x}$ :

$$\frac{d\sigma_x}{d\mu_x} - \frac{\sigma_x}{\mu_x} + \frac{P_x}{\mu_x}(1 + f \operatorname{ctg} \alpha) = 0. \quad (5.4)$$

Приближенное условие пластичности для разноименной схемы напряженного состояния при волочении имеет вид:

$$\sigma_1 - (-\sigma_x) = \sigma_{xs}; \quad \sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_{xs}, \quad (5.5)$$

где  $\sigma_1 = \sigma_x$  – долевое растягивающее напряжение;  $\sigma_2 = \sigma_3 = p_x \cos \alpha + t_x \sin \alpha = p_x (\cos \alpha + f \sin \alpha)$  – вертикальная составляющая удельной силы и напряжения трения.

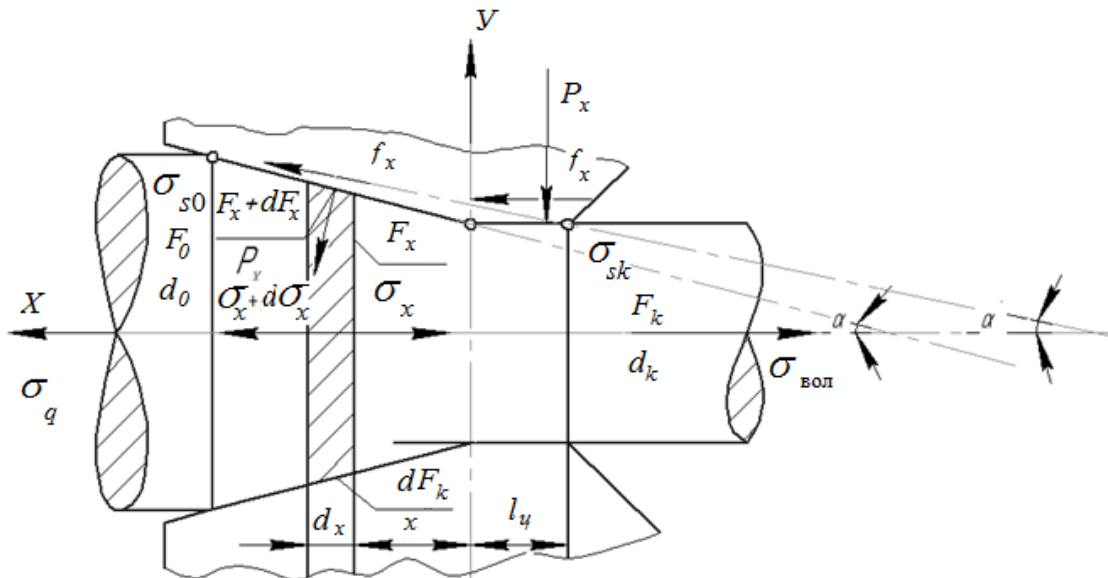


Рис. 5.1. Схема сил, действующих в очаге деформации при волочении

Для полууглов волокни  $\alpha = 4-6^\circ$ , значение  $\cos \alpha$  близко к 1, а произведение  $f = 0,03-0,06$  является бесконечно малой величиной второго порядка. Поэтому примем, что

$$\sigma_2 = \sigma_3 = p_x. \quad (5.6)$$

При принятых допущениях условие пластичности будет

$$\sigma_x + p_x = \sigma_{sx}, \quad (5.7)$$

где  $\sigma_{sx} = \sigma_{s0} + m(\mu_x - 1)$  – текущее значение предела текучести по [22];  $m$  – модуль упрочения,

$$m = \frac{\sigma_{sk} - \sigma_{s0}}{\mu - 1}, \quad (5.8)$$

где  $\sigma_{s0}$ ,  $\sigma_{sk}$  – соответственно начальное и конечное значение пределов текучести материала при конечной вытяжке  $\mu$  за проход.

Решение уравнения (5.4) с учетом (5.7) при граничных условиях:  $\mu_x = 1$ ,  $\sigma_x = \sigma_q$  ( $\sigma_q$  – напряжение противонапряжения) устанавливает распределение долевого растягивающего напряжения по длине очага деформации:

$$\sigma_x = \sigma_{sx} - \frac{(m - \sigma_{s0})(\mu_x^{fctg\alpha} - 1)}{fctg\alpha \cdot \mu_x^{fctg\alpha}} - \frac{\sigma_{s0} - \sigma_q}{\mu_x^{fctg\alpha}}. \quad (5.9)$$

С учетом условия пластичности найдем закон распределения удельного давления по длине очага деформации, при волочении в монолитной волоке:

$$p_x = \frac{(m - \sigma_{s0})(\mu_x^{fctg\alpha} - 1)}{fctg\alpha \cdot \mu_x^{fctg\alpha}} - \frac{\sigma_{s0} - \sigma_q}{\mu_x^{fctg\alpha}}. \quad (5.10)$$

Принимая значение  $\mu_x = \mu$  в уравнении (5.9), получаем напряжение волочения:

$$\sigma_{вол} = \sigma_{sk} - \frac{(m - \sigma_{s0})(\mu_x^{fctg\alpha} - 1)}{fctg\alpha \cdot \mu_x^{fctg\alpha}} - \frac{\sigma_{s0} - \sigma_q}{\mu_x^{fctg\alpha}}. \quad (5.11)$$

Уравнение (5.11) определяет напряжение волочения, необходимое для пластического формоизменения при данной вытяжке за проход, преодоления внешнего трения в рабочей зоне волоки и противонапряжения.

Результаты расчетов показывают, что для преодоления сил контактного трения с учетом геометрии очага деформации необходимо затратить от 50 до 200 % полезной мощности, и это значение будет тем больше, чем выше потери на трение и меньше полуугол волоки. Поэтому учет потерь на трение при расчете силовых условий в процессе волочения необходим.

В работе [22] показано, что при сложившейся в сталепроволочном производстве практике сухого волочения стальной углеродистой проволоки можно использовать формулу (5.12):

$$T_B = 0,6d_0^2 \sqrt{q\sigma_B}, \quad (5.12)$$

где  $T_B$  – сила волочения;  $q$  – величина частного обжатия;  $\sigma_B = \frac{\sigma_{B0} + \sigma_{Bk}}{2}$  – предел прочности проволоки.

Силу волочения можно найти на основании мощности, потребляемой волочильным станом, кгс:

$$T_B = 102 \frac{N_B \eta}{V_B}, \quad (5.13)$$

где  $N_B$  – мощность, расходуемая на волочение, кВт;  $\eta = 0,87-0,95$  – КПД стана;  $V_B$  – скорость волочения, м/с.

Несмотря на принятые допущения теоретические расчеты дают удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных за счет усреднения вносимых в расчет величин.

Предпочтительно применение уравнения (5.12), имеющего лучшую сходимость с экспериментальными данными при волочении стальной проволоки различных типоразмеров в широком диапазоне химического состава.

Теоретические уравнения для определения силы и напряжения волочения наглядно отражают влияние основных технологических факторов (угла рабочей зоны волоки, единичного обжатия, коэффициента трения, противонатяжения, сопротивления металла деформации) на силовые условия процесса.

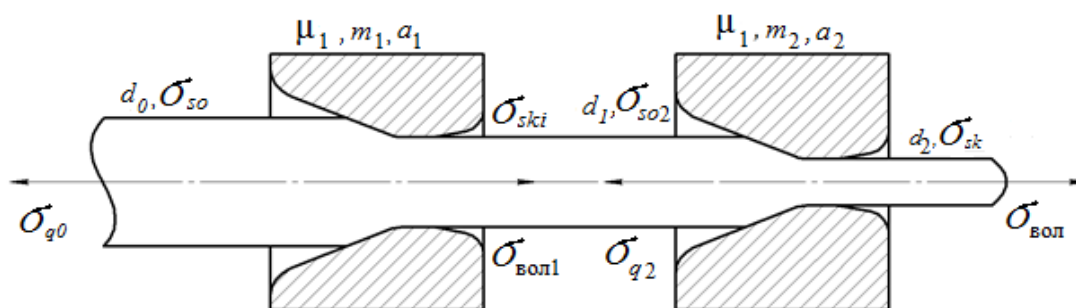


Рис. 5.2. Схема волочения в сдвоенных волоках

На основании уравнения (5.11) напряжения волочения в первой и второй волоках:

$$\sigma_{вол1} = \sigma_{sk1} - \frac{(m_1 - \sigma_{s0})}{a_1 \mu_1^{a_1}} - \frac{\sigma_{s0} - \sigma_{q0}}{\mu_1^{a_1}}; \quad (5.14)$$

$$\sigma_{вол} = \sigma_{sk} - \frac{(m_2 - \sigma_{s02})}{a_2 \mu_2^{a_2}} - \frac{\sigma_{s02} - \sigma_{q2}}{\mu_2^{a_2}}. \quad (5.15)$$

Подставляя в (5.15) условие  $\sigma_{q2} = \sigma_{вол1}$  и учитывая, что  $\sigma_{sk1} = \sigma_{s02}$  (рис. 5.2), определяем напряжение волочения при деформации металла в сдвоенном инструменте:

$$\sigma_{вол} = \sigma_{sk} - \sigma_{s0} \left\{ \frac{\left[ \frac{m_2 - m_1(\mu_1^{a1} - 1)}{\sigma_{s0}} - 1 \right] (\mu_2^{a2} - 1)}{a_2 \mu_2^{a2}} + \frac{\left( \frac{m_1 - 1}{\sigma_{s0}} \right) (\mu_1^{a1} - 1)}{a_1 \mu_1^{a1} \mu_2^{a2}} + \frac{1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{s0}}}{\mu_1^{a1} \mu_2^{a2}} \right\}. \quad (5.16)$$

Введение дополнительного деформирующего инструмента в линию волочения приводит к увеличению общего напряжения волочения. Не рассматривая вопрос распределения обжатий в сдвоенном инструменте, отметим, что величина суммарной деформации ( $\mu = \mu_1 \mu_2$ ), как и величины вытяжки за проход при обычном волочении, должна соответствовать критерию запаса прочности полосы  $\gamma$  между инструментом и тянущим барабаном:

$$\gamma = \frac{\sigma_{sk}}{\sigma_{вол}}. \quad (5.17)$$

Предельное значение коэффициента запаса  $\gamma$ , обеспечивающее стабильный безобрывной процесс волочения, установлено из практики изготовления проволоки различных типоразмеров, представленных в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Значения коэффициента запаса  $\gamma$**

Диаметр проволоки, мм	Коэффициент запаса $\gamma$
1,0	1,4
1,0–0,4	1,5
0,4–0,1	1,6
0,1–0,05	1,8
0,05–0,015	2,0
Прутки и профиль	1,35–1,4

Применение напорных волок для подачи более плотного слоя смазки к рабочим волокнам является известным техническим решением [43]. Такой метод преимущественно применяется для сухого волочения, т. е. для сухих видов смазки, имеющих повышенную вязкость. Однако принцип нагнетания смазки сохраняется и для менее вязких жидкостей с менее значительной степенью нагнетания смазки к зоне деформации рабочей волоки. На этом основывается проведенная экспериментальная проверка применения напорных волок для «тонкого» волочения с использованием водоэмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости *VSV77 R* с концентрацией 10 %, нагреваемой перед заливкой в волокодержатель до температуры 45 °С.

Для этих целей был разработан и изготовлен волокодержатель (рис. 5.3). Волокодержатель способен работать как с наличием, так и с отсутствием напорной волоки. В качестве напорных волок использовались волоки из действующего маршрута волочения по принципу выбора третьей волоки от деформирующей волоки против хода волочения.

В результате проведенной серии экспериментов получены усредненные результаты, представленные в табл. 5.2 [44].

Таблица 5.2

**Результаты эксперимента по исследованию применения напорных волок**

<b>Параметр волочения</b>	<b>Усилие волочения со скоростью 0,26 м/с для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм, диаметр напорной волоки 2,23 мм</b>	<b>Усилие волочения со скоростью 0,38 м/с для перехода диаметров проволоки с 1,65 на 1,5 мм, диаметр напорной волоки 1,821 мм</b>
Без напорной волоки	1510 Н	1119 Н
С напорной волокой	1382 Н	1047 Н
Снижение усилия волочения	128 Н	72 Н

Анализ табл. 5.2 показывает эффект снижения усилия волочения от применения напорных волок. Величина снижения усилия может быть повышена при использовании смазок 15%-й концентрации. Снижение усилия волочения может быть обосновано более устойчивым и плотным слоем смазки в канале деформирующей волоки при использовании напорной волоки. Величина снижения усилия достаточная, чтобы обосновать дополнительные лабораторные и промышленные испытания напорных волок применительно для «мокрого» волочения.

На основании этого может быть предложена новая схема установки напорных волок в промышленный волочильный стан (см. рис. 5.3).

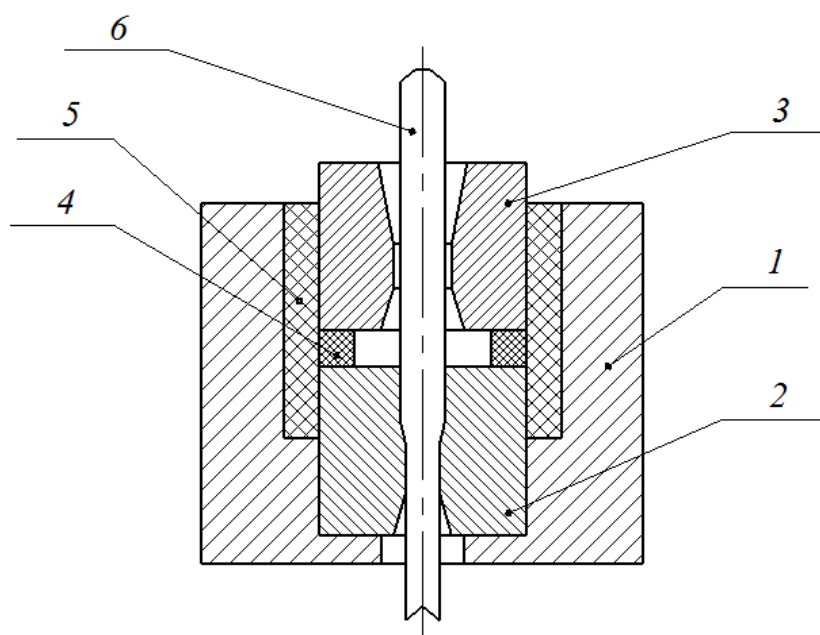


Рис. 5.3. Схема узла установки напорной волоки в волокодержатель промышленного волочильного стана:

1 – корпус; 2 – деформирующая волока;  
3 – напорная волока; 4 – кольцо; 5 – уплотнение;  
6 – проволока

Корпус 1 может видоизменяться для посадки в волокодержатель стана. Кольцо 4 увеличивает пространство между волоками с целью возможности сбора латунной стружки, снимаемой с поверхности проволоки при волочении и других осадков. Уплотнение 5 обеспечивает создание избыточного давления смазки между волоками. При перезаправке проволоки узел разбирается с удалением накопленных осадков.



Таким образом, математическая модель волочения проволоки в сдвоенных волоках главным образом включает расчет напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации с учетом контактного трения проволоки с волокой. Проведение исследований позволило учесть эффект от введения дополнительных волок на напряженно-деформированное состояние проволоки при волочении в сдвоенных волоках и влияния на свойства проволоки.

## **5.2. Разработка зависимостей для построения маршрута волочения тонкой проволоки по температурному критерию**

Актуальной проблемой для метизного производства является решение оптимизационных задач. Одна из таких задач – оптимизация маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой латунированной проволоки по температурному критерию. Оптимизация по температурному критерию подразумевает расчет температуры проволоки по маршруту волочения. На основании распределения температуры проволоки по маршруту волочения определяются переходы волочения, требующие снижения температуры. Снижение температуры высокоуглеродистой проволоки в процессе волочения способствует повышению пластических свойств проволоки. Пластические свойства проволоки формируют технологичность следующей за волочением операции: свивки проволоки в металлокорд. В процессе свивки металлокорда тонкая проволока испытывает сложную деформацию изгиба и кручения. Таким образом, пластические свойства тонкой проволоки, сформированные после волочения, оказывают влияние на качество металлокорда: прямолинейность и обрывность как всего металлокорда, так и отдельных проволок металлокорда.

В связи с этим возникает задача разработать зависимости, позволяющие оптимизировать маршруты волочения тонкой проволоки для металлокорда по температурному критерию, которые наиболее точно будут отражать изменение температуры тонкой проволоки в зависимости от параметров маршрута волочения. К основным параметрам маршрута волочения можно отнести скорость волочения, суммарную деформацию проволоки за весь маршрут волочения и частную (единичную) деформацию на каждом переходе волочения.

На температуру поверхности проволоки в очаге деформации при волочении оказывает влияние скорость волочения, угол конической зоны и длина цилиндрической зоны волоки, частная логарифмическая деформация, коэффициент трения, содержание углерода в проволоке, формирующее прочностные и пластические свойства проволоки после волочения.

Первый вариант маршрута волочения тонкой проволоки диаметром 350 мкм из заготовки диаметром 1900 мкм по маршруту волочения – 1830–1680–1543–1417–1301–1195–1097–1007–924–849–780–717–659–605–556–511–470–432–397–371–350 с конечной скоростью волочения проволоки 10 м/с.

Второй вариант маршрута волочения тонкой проволоки диаметром 300 мкм из заготовки диаметром 1,98 мм по маршруту волочения – 1945–1770–1610–1465–1335–121–1104–1025–1006–916–834–760–693–633–591–579–529–494–484–443–413–405–370–345–339–317–305<sup>x</sup>–299 с конечной скоростью волочения проволоки 8 м/с. Нижним подчеркиванием указаны переходы волочения, в которых установлены сдвоенные волоки. Волока 305<sup>x</sup> установлена в дополнительном волокодержателе на стенке ванны.

В двух исследуемых вариантах маршрутов волочения проволока изготовлена из стали 80К с механическими характеристиками заготовки и тонкой проволоки, полученными в результате стандартных испытаний на осевое растяжение [45]. Результаты испытаний определения механических параметров приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

**Результаты испытаний на растяжение**

Механические характеристики	Маршрут волочения № 1		Маршрут волочения № 2	
	Заготовка $d = 1,89$	Тонкая проволока $d = 0,35$	Заготовка $d = 1,98$	Тонкая проволока $d = 0,30$
Модуль упругости $E$ , ГПа	185,33	203,93	176,67	202,16
Условный предел текучести $\sigma_y$ , МПа	879,47	2853,64	889,16	3132,81
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	1274,54	3056,33	1284,30	3376,13
Максимальное удлинение при растяжении $A_t$ , %	7,90	2,42	8,30	2,64

Анализ табл. 5.3 показывает, что отличие в значениях механических параметров для проволочной заготовки в двух вариантах не превышает 10 %. Ввиду необходимости достижения требуемой прочности тонкой проволоки механические параметры, такие как условный предел текучести и максимальное удлинение, изменяются в зависимости от параметров маршрута волочения.

На рис. 5.4 представлены результаты определения напряжения начала текучести (условный предел текучести  $\sigma_y$ ) и максимального напряжения при разрыве (предел прочности  $\sigma_b$ ) при испытаниях на осевое растяжение проволочной заготовки и тонкой проволоки в исследуемых маршрутах волочения. Полученные значения напряжений аппроксимированы линейной зависимостью, представленной на рис. 5.4.

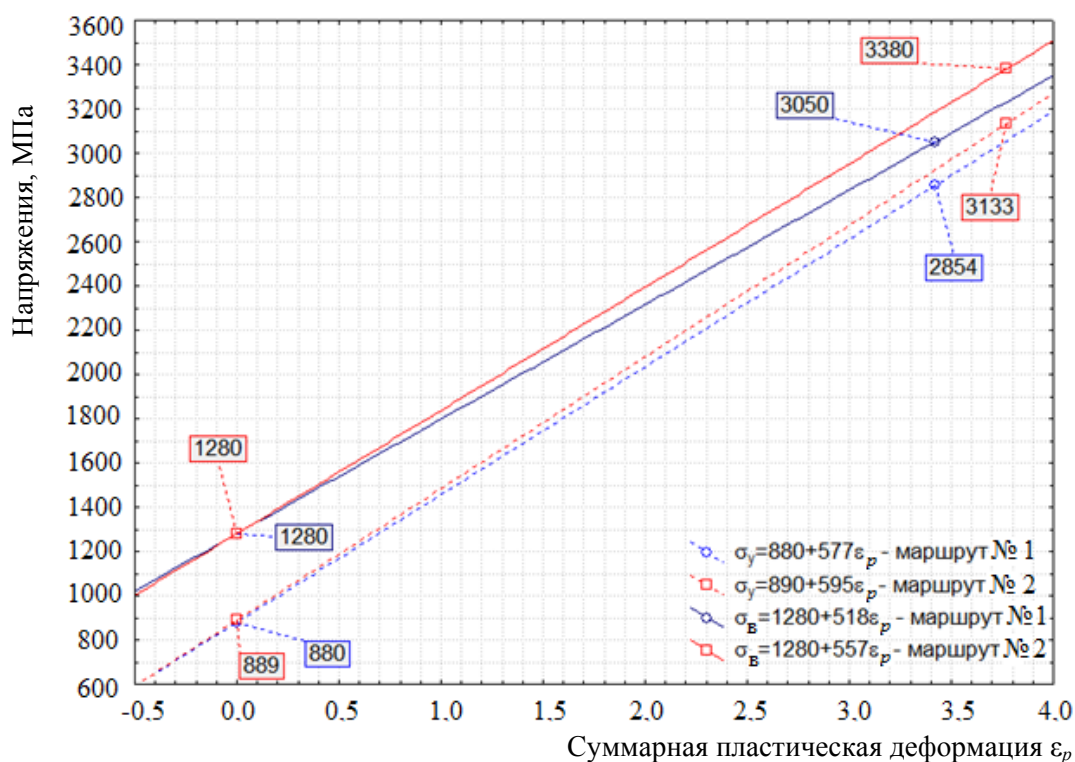


Рис. 5.4. Зависимости условного предела текучести и предела прочности от суммарной пластической деформации

Анализируя графики на рис. 5.4, можно отметить, что при меньшей суммарной пластической деформации проволоки в первом маршруте происходит снижение ее механических параметров (условного предела текучести и предела прочности) по сравнению со вторым маршрутом.

Изменение диаметров и скоростей волочения проволоки по маршруту волочения для двух вариантов учитывает возможности и особенности конструкций станков тонкого волочения со скольжением и представлено на рис. 5.5–5.7.

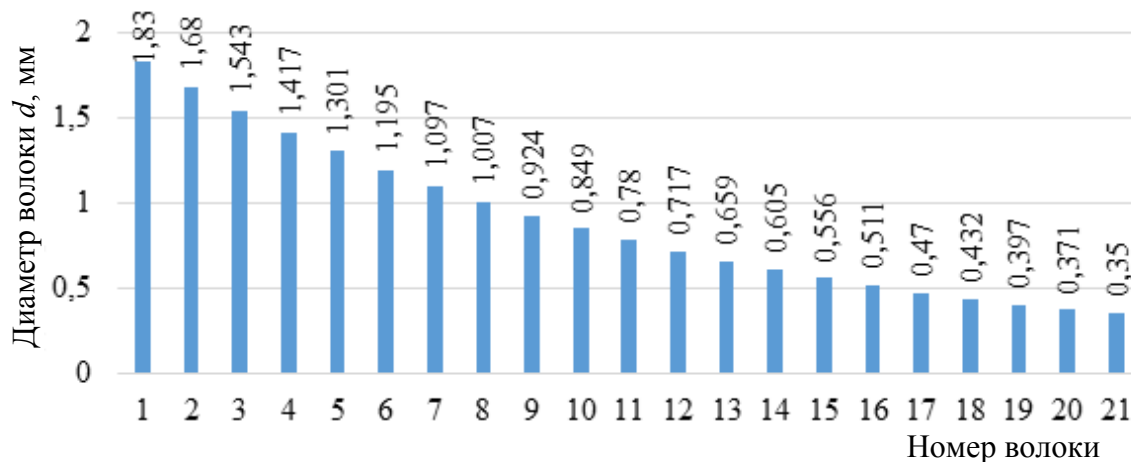


Рис. 5.5. Изменение диаметров проволоки в маршруте волочения № 1

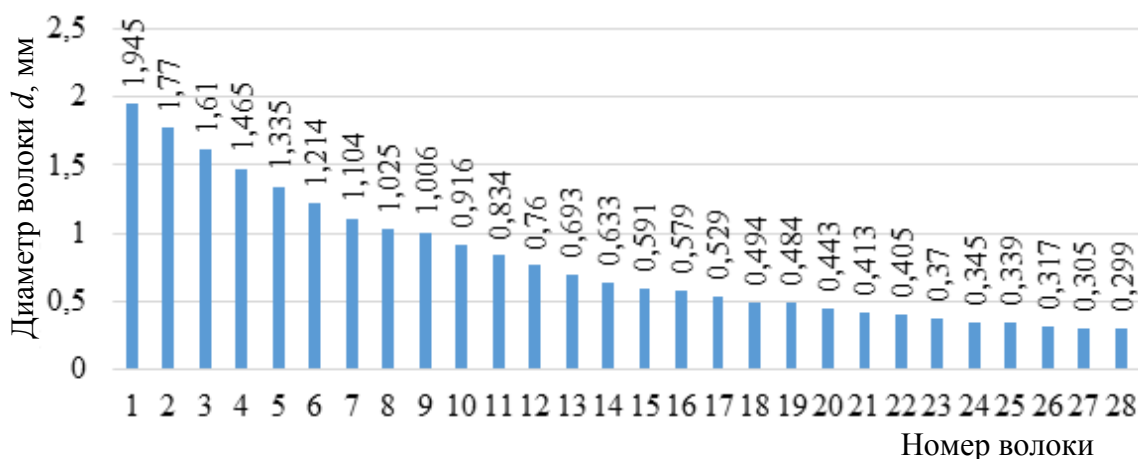


Рис. 5.6. Изменение диаметров проволоки в маршруте волочения № 2

Анализируя изменение диаметров проволоки на графиках (рис. 5.5 и 5.6), можно сделать заключение, что изменение диаметров проволоки по маршруту волочения в двух вариантах практически совпадает. Однако скорость волочения в первом маршруте увеличивается значительно (рис. 5.7), что предположительно влияет на пластические свойства тонкой проволоки  $0,35HT$  по сравнению с  $0,30SHT$ . Изменение диаметров и скоростей волочения проволоки в большей степени характеризует кинематические особенности процесса волочения на станках тонкого воло-

чения со скольжением. Для проведения качественной оценки процесса высокоскоростного волочения тонкой проволоки следует оценить изменение температуры поверхности проволоки по маршруту волочения.

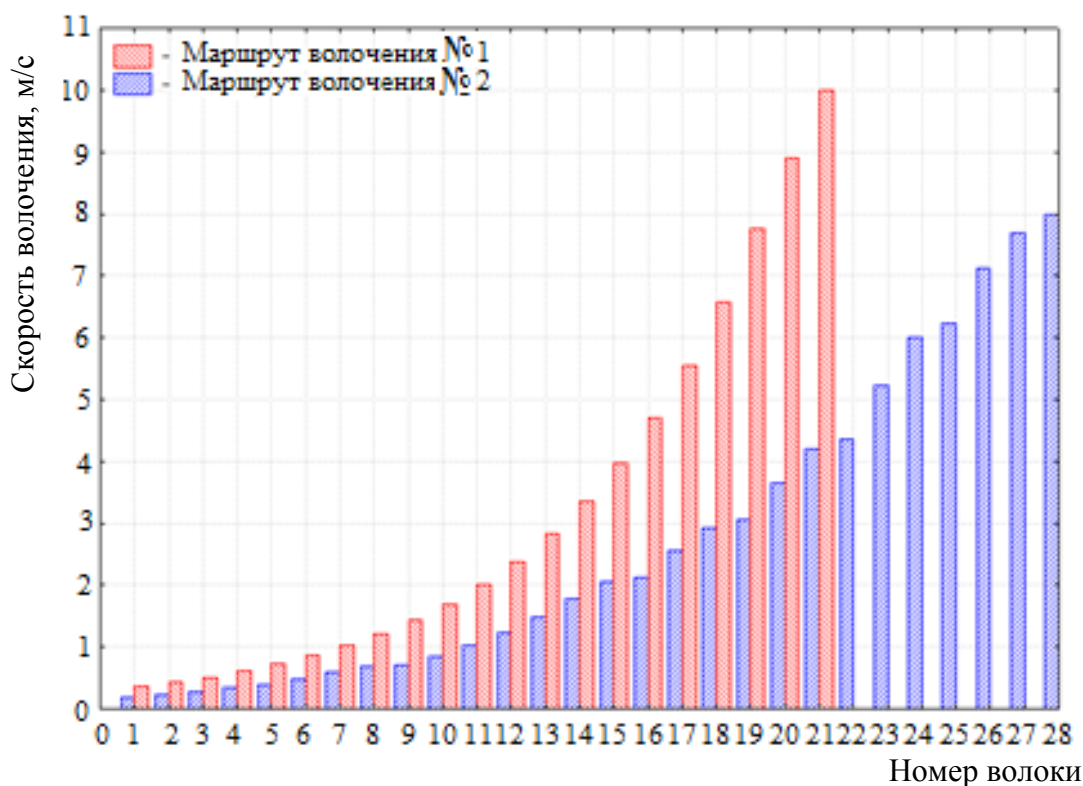


Рис. 5.7. Изменение скоростей волочения по маршрутам волочения

Температуру поверхности проволоки определяли двумя способами:  
 – используя известную зависимость, предложенную Красильщиковым [23]:

$$t_{n_i} = t_{0_i} + 0,3\sigma_{b_i} \left( 1 - \frac{1}{\mu_i} \right) + 2,75\sigma_{b_i} \sqrt{V_i d_i \cdot 10^{-3}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (5.18)$$

– используя математическое моделирование процесса волочения тонкой проволоки, описанное в [27].

Как видно из выражения (5.18), температура поверхности проволоки зависит не только от параметров процесса волочения (частная вытяжка –  $\mu$ , скорость волочения –  $V_{\text{вол}}$ , диаметр проволоки –  $d$ ), но и от механических свойств проволоки (предел прочности –  $\sigma_b$ ).

Описание закона упрочнения при численном моделировании основано на изменении предела текучести проволоки по всему маршруту

волочения с учетом динамического упрочнения. На рис. 5.4 представлены зависимости условного предела текучести и предела прочности от суммарной пластической деформации в процессе волочения проволоки для двух маршрутов волочения.

На рис. 5.8 и 5.9 представлены результаты определения температур поверхности проволоки по переходам волочения для двух вариантов маршрутов.

Как видно из графиков на рис. 5.8 и 5.9, значения температуры поверхности, полученные с помощью численного моделирования  $T_{ч.м}$ , превышают значения температуры  $T_{теор}$ , рассчитанные по зависимости (5.18) в основном в середине маршрута волочения для двух вариантов.

Анализ графиков показывает, что изменение значений температуры поверхности проволоки  $T_{ч.м}$  в большей степени отражает влияние скорости волочения и частной логарифмической деформации проволоки по маршруту волочения в двух вариантах.

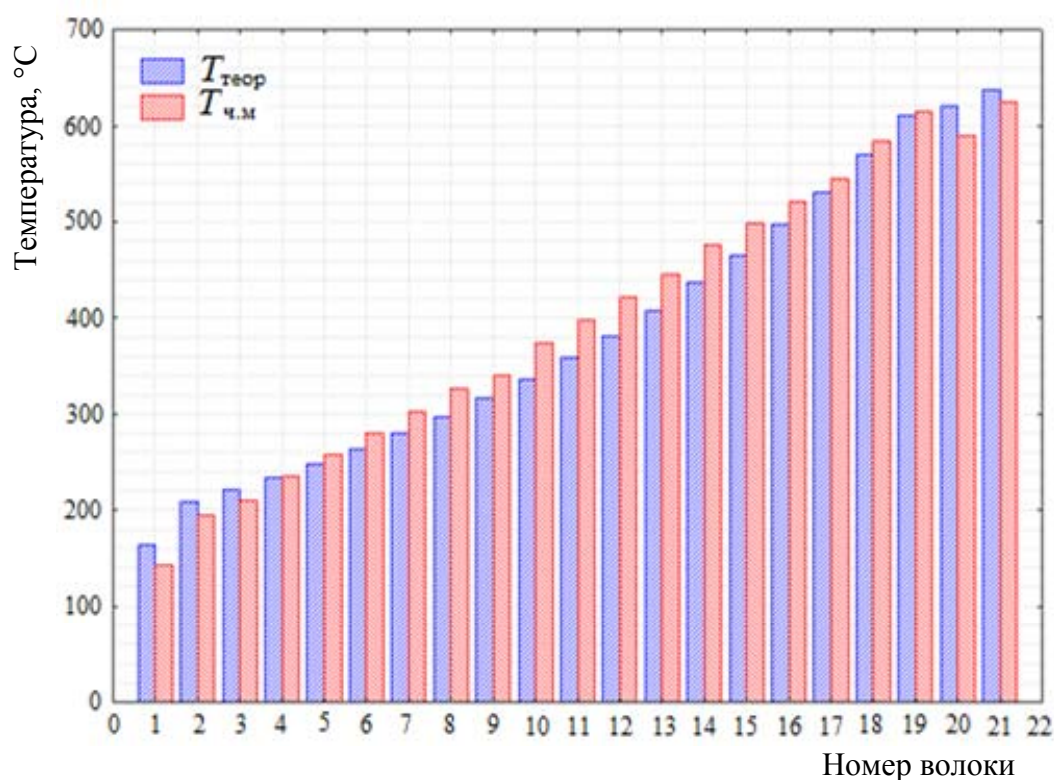


Рис. 5.8. Сравнение значений температур поверхности проволоки для маршрута волочения № 1

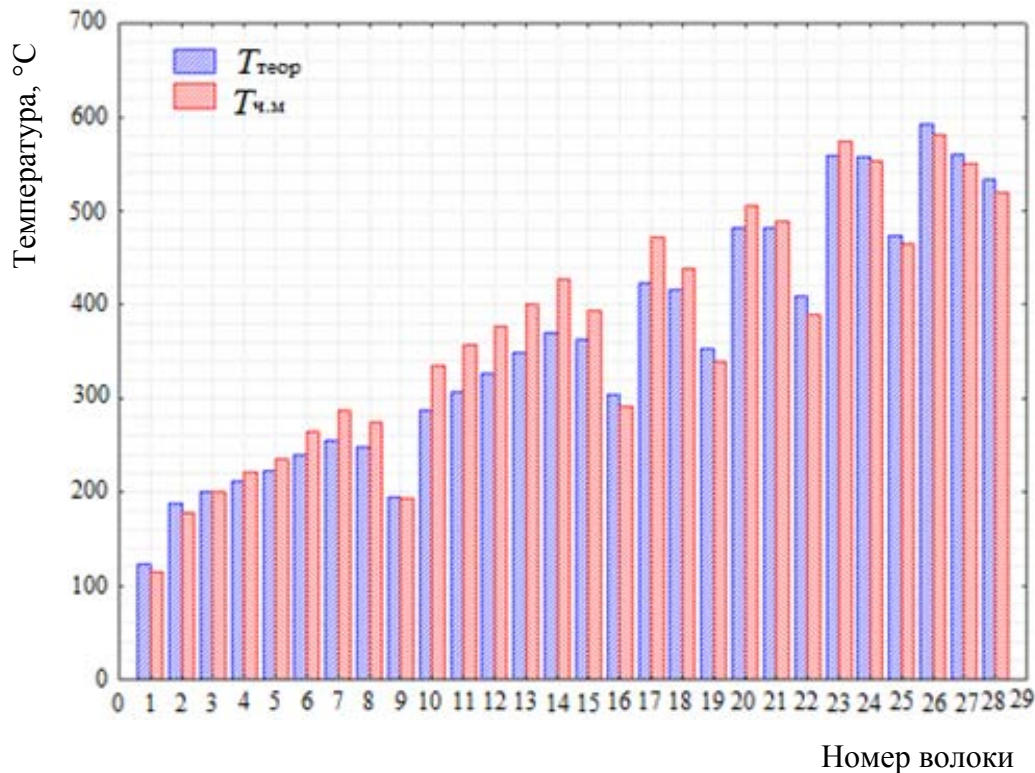


Рис. 5.9. Сравнение значений температур поверхности проволоки для маршрута волочения № 2

На температуру поверхности проволоки в очаге деформации при волочении оказывает влияние скорость волочения, угол конической зоны проволоки, частная логарифмическая деформация, коэффициент трения, содержание углерода в проволоке, формирующее прочностные и пластические свойства проволоки после волочения [46]. В исследуемых маршрутах волочения угол конической зоны составляет  $\alpha = 12^\circ$ , а коэффициент контактного трения при определении температуры принимали  $f = 0,05$ .

На скорость деформации проволоки при волочении влияют скорость волочения, частная вытяжка и угол конической части проволоки. В общем виде зависимость средней скорости деформации в проволоке от вышеперечисленных параметров имеет вид [47]:

$$\dot{\varepsilon}_p = f(\mu_i, \alpha) \frac{V_{\text{вол}}}{d_i}, \quad (5.19)$$

где  $\mu_i$  – частная вытяжка;  $\alpha$  – угол конической части проволоки;  $V_{\text{вол}}$  – скорость волочения, мм/с;  $d_i$  – диаметр проволоки, мм.

На основании зависимости температуры поверхности проволоки и средней скорости деформации от скорости волочения и геометриче-

ских параметров волоки (угол конической зоны, частная вытяжка, длина калибрующей зоны) была изучена зависимость температуры поверхности проволоки от скорости деформации в виде

$$T_{\text{пов}} = f\left(\dot{\varepsilon}_p\right), \quad (5.20)$$

где  $\dot{\varepsilon}_p$  – средняя в очаге деформации скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\dot{\varepsilon}_p = f(\varepsilon_{pi}) \frac{V_{\text{вол}}}{d_i}. \quad (5.21)$$

Данная зависимость рассматривается для условий исследуемых маршрутов волочения: проволока изготовлена из стали 80К, геометрические параметры волоки ( $\alpha = 12^\circ$ ,  $k = 0,4$ ), коэффициент контактного трения принят  $f = 0,05$ .

На рис. 5.10 представлены зависимости температур поверхности проволоки  $T_{\text{теор}}$  и  $T_{\text{ч.м}}$  от средней скорости деформации для двух маршрутов волочения.

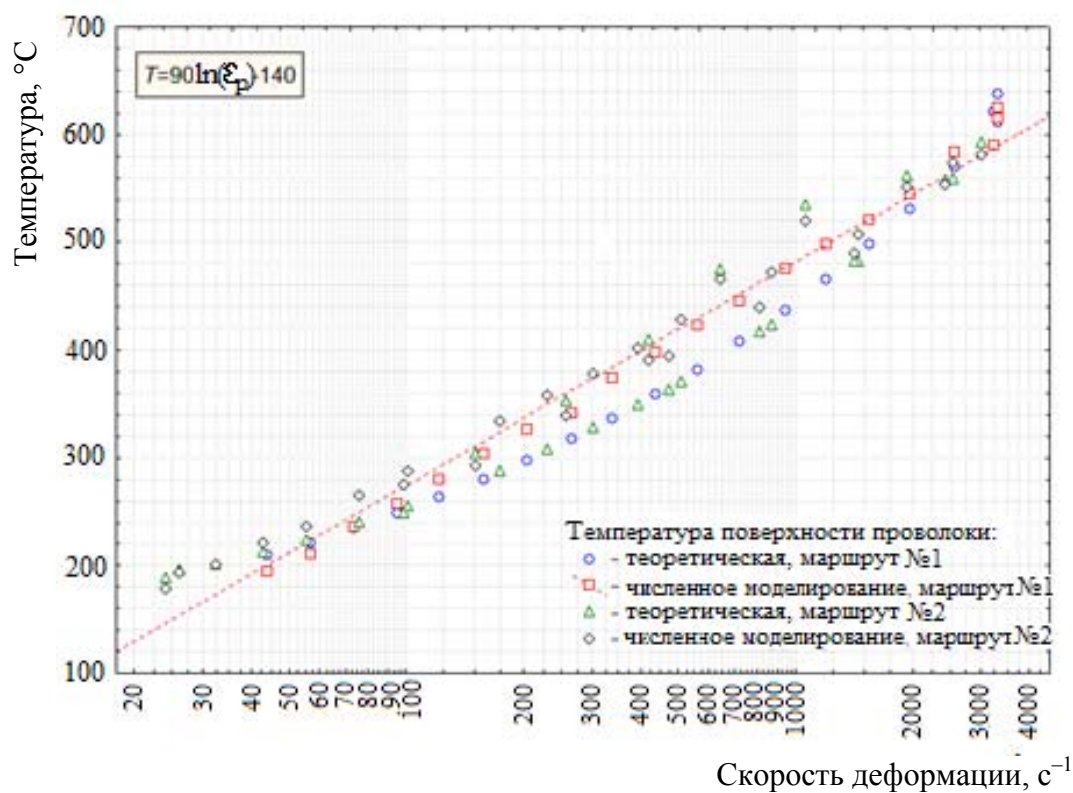


Рис. 5.10. Определение зависимости температуры от скорости деформации проволоки при волочении



Как видно из графика (рис. 5.10), на значения температуры, определенной с помощью метода конечных элементов в двух маршрутах, в большей степени влияет скорость деформации.

Таким образом, зависимость температуры, рассчитанной с помощью метода конечных элементов с использованием законов упрочнения для стали 80К, в большей степени имеет зависимость от средней скорости деформации. А так как средняя скорость деформации зависит от параметров процесса волочения, то изменение режимов волочения проволоки также отразится на изменении температуры поверхности проволоки.

### **5.3. Разработка методики построения маршрута волочения с учетом кинематики волочильного стана**

#### ***5.3.1. Общие положения***

Методика построения маршрута волочения тонкой латунированной проволоки основана на наличии связи между механическими свойствами проволоки и напряженным, деформационным, кинематическим, температурным состоянием проволоки в каждой волоке при ее волочении на многократных станах мокрого волочения.

Методика позволяет совершенствовать действующие и разрабатывать новые маршруты волочения для получения необходимого уровня пластических свойств тонкой проволоки, а также с целью повышения производительности [48].

Исходными данными для расчета являются механические свойства, содержание углерода в проволочной заготовке, кинематика волочильного стана.

В основе методики расчета заложен принцип, который состоит в значении максимальной мгновенной температуры высокоуглеродистой проволоки в процессе многократного волочения. В общем виде связь между максимальной температурой проволоки при волочении и изменением механических свойств тонкой проволоки представлена на рис. 5.11.

При проектировании маршрута волочения необходимо соблюдение основных положений, обеспечивающих оптимальный и эффективный процесс волочения:

1. Коэффициент запаса волочения, определяемый отношением предела текучести проволоки при деформации в волоке к напряжению волочения, должен находиться в пределах 1,25–3.

2. Мощность мотора привода стана должна быть выше на 30 % мощности волочения для всего маршрута волочения.

3. Коэффициент скольжения (или коэффициент износа волок) должен определяться в диапазоне 0–0,05 (кроме первого перехода волочения).

4. Максимальная мгновенная температура поверхности проволоки определяет снижение пластичности проволоки и как следствие величину обрывности металлокорда, свиваемого из этой проволоки после волочения. Допустимое значение указанной температуры устанавливается из графика на рис. 5.11 в зависимости от уровня обрывности проволоки при свивке в металлокорд.

Исходные данные, необходимые для расчета, представлены в табл. 5.4.

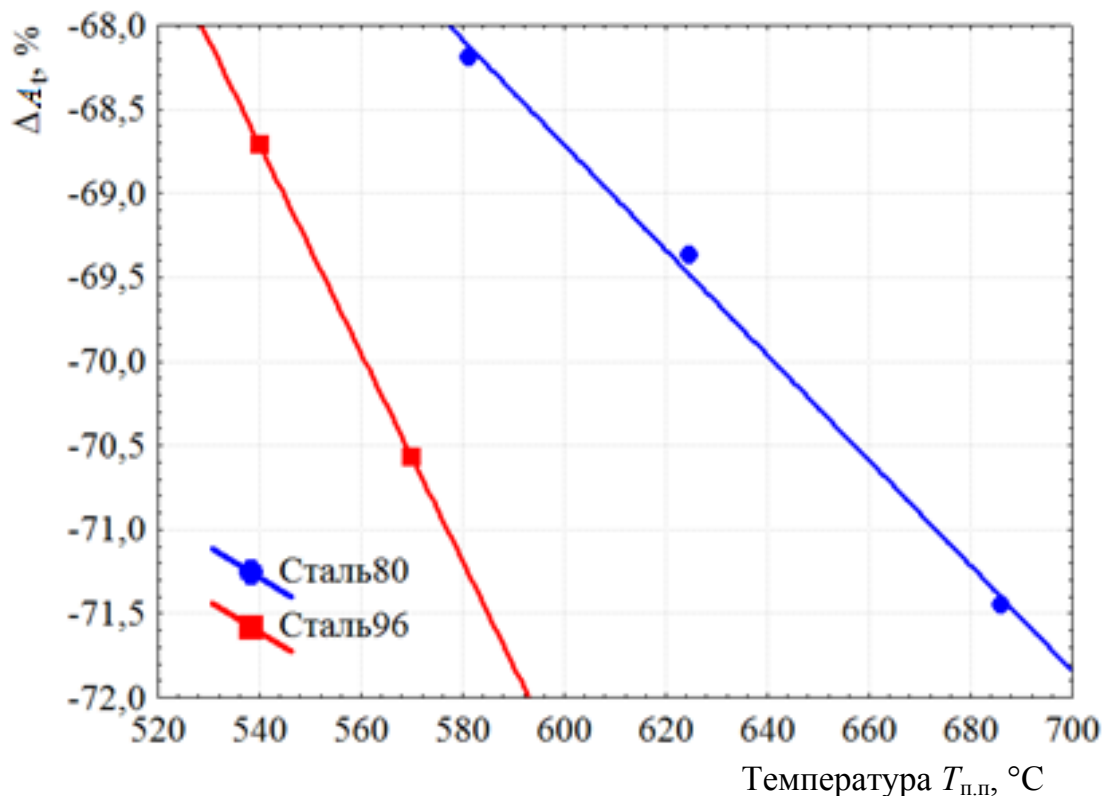


Рис. 5.11. Зависимость изменения относительного удлинения проволоки в процессе волочения от максимальной температуры поверхности проволоки для сталей 80 и 96

Таблица 5.4

## Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Диаметр проволочной заготовки	$d_0$	мм	–
Диаметр тонкой проволоки	$d_k$	мм	–
Временное сопротивление разрыву проволочной заготовки	$\sigma_{в0}$	МПа	–
Временное сопротивление разрыву тонкой проволоки	$\sigma$	МПа	–
Максимальная скорость проволоки на выходе из волочильного стана	$V_k$	м/с	–
Полуугол конической зоны волоки	$\alpha$	град	6
Температура ванны СОЖ	$t_0$	°С	40
Напряжение противонапряжения проволоки на входе в волочильный стан	$\sigma_{v0}$	МПа	–
Максимальное количество волок	$m$	шт.	–
Мощность двигателя привода волочильного стана	$N_{\text{паспорт}}$	кВт	–
Коэффициент полезного действия привода волочильного стана	$\eta$	%	85–90
Коэффициент контактного трения в волоке	$f$	–	0,05
Паспортные кинематические вытяжки ( $\mu n_i$ ) для $m$ волок	$\mu n_i$	–	$\mu n_{21} = 1,0986$ $\mu n_{20} = 1,12457$ $\mu n_i = 1,1702$
Содержание углерода в проволоке в относительных единицах	$C$	–	–
Коэффициент износа волоки	$\beta$	–	$\beta_{21} = 0,013$ $\beta_{20} = 0,014$ $\beta_i = 0,03$
Число витков проволоки на тяговом шкиве	$\nu_{si}$	–	$\nu_{s1-3} = 3,5$ $\nu_{s4-6} = 2,5$ $\nu_{s7-10} = 2,5$ $\nu_{s11-14} = 2,5$ $\nu_{s15-20} = 1,5$
Коэффициент трения скольжения между поверхностями проволоки и тяговых шкивов	$f_s$	–	0,07

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Диаметры тяговых шайб	$D_{ni}$	мм	$D_{21} = 200$ $D_{20} = 192,2$ $D_{19} = 171,0$ $D_{18} = 146,2$ $D_{17} = 125,0$ $D_{16} = 106,9$ $D_{15} = 91,4$ $D_{14} = 78,16$ $D_{13} = 200,0$ $D_{12} = 171,0$ $D_{11} = 146,2$ $D_{10} = 125$ $D_9 = 106,0$ $D_8 = 91,4$ $D_7 = 78,1$ $D_6 = 200,0$ $D_5 = 171,0$ $D_4 = 146,2$ $D_3 = 125$ $D_2 = 106,0$ $D_1 = 91,4$ $D_0 = 78,16$

### 5.3.2. Расчет деформационно-кинематических параметров волочения

Расчет основных параметров режимов волочения для маршрута волочения латунированной высокоуглеродистой проволоки проводится в следующей последовательности.

Рекомендуемый диаметр проволочной заготовки:

$$d_0 = \frac{\sigma_b^2 d_k}{(10(100c - 6d_k + A))^2}, \text{ мм}, \quad (5.22)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности готовой проволоки, МПа; принимается из технологических требований;  $c$  – содержание углерода в металле проволоки в относительных единицах;  $A$  – коэффициент, учитывающий вид термообработки заготовки под волочение: для термически обработанной патентированием проволоки  $A = 53$ .

Суммарная фактическая вытяжка:

$$\mu\Sigma_{ТВ} = \frac{d_0^2}{d_k^2}. \quad (5.23)$$

Частные вытяжки:

– для последнего 21-го перехода принимается:

$$(\mu_n = \mu n_n(1 + \beta_{21})); \quad (5.24)$$

– для предпоследнего 20-го перехода принимается:

$$\mu_{n-1} = \mu n_{n-1}(1 + \beta_{20}); \quad (5.25)$$

– для предпоследнего 19-го перехода принимается:

$$\mu_{n-2} = \mu n_{n-2}(1 + \beta_{19}); \quad (5.26)$$

– для предпоследнего 18-го перехода принимается:

$$\mu_{n-3} = \mu n_{n-3}(1 + \beta_{18}); \quad (5.27)$$

– для предпоследнего 17-го перехода принимается:

$$\mu_{n-4} = \mu n_{n-4}(1 + \beta_{17}); \quad (5.28)$$

– для первого перехода принимается:

$$\mu_1 = \mu n_1(1 + \beta_{20}); \quad (5.29)$$

– для всех других переходов  $\mu_i$  вычисляется:

$$\mu_i = 10^a. \quad (5.30)$$

$$a = \frac{\log(\mu\Sigma_{ТВ}) - \log(\mu_1) - \log(\mu_{n-4}) - \log(\mu_{n-3}) - \log(\mu_{n-2}) - \log(\mu_{n-1}) - \log(\mu_n)}{n - 6}. \quad (5.31)$$

Коэффициент износа:

$$\beta_i = \frac{(\mu)_i}{(\mu n)_i} - 1. \quad (5.32)$$

Определение скоростей волочения проволоки, м/с:

$$V_n^{\max} = \frac{\left[ t_{\text{доп}} - t_0 - 0,3\sigma \left( 1 - \frac{1}{(\mu)_n} \right) \right]^2}{7,563\sigma^2 d_k \cdot 10^{-6}}. \quad (5.33)$$

Полученное значение  $V_n^{\max}$  не должно превышать максимальную скорость волочения на выбранном волочильном стане.

$$V_{i-1} = \frac{V_i}{(\mu)_i}. \quad (5.34)$$

Линейные скорости вращения тяговых шайб, м/с:

$$B_{i-1} = \frac{B_i}{(\mu n)_i}. \quad (5.35)$$

Величины относительного скольжения:

$$C_i = \frac{B_i - V_i}{B_i}. \quad (5.36)$$

Диаметры волок, мм:

$$d_i = \frac{d_{i-1}}{\sqrt{\mu_i}}. \quad (5.37)$$

Пределы прочности проволоки, МПа:

$$\sigma_{b_i} = \sigma_{b_{i-1}} \sqrt{\frac{d_{i-1}}{d_i}}. \quad (5.38)$$

Средняя температура сечения проволоки и температура поверхности проволоки, °С:

– средняя температура сечения проволоки:

$$t_{c_i} = t_{0_i} + 0,45\sigma_{b_i} \left(1 - \frac{1}{\mu_i}\right); \quad (5.39)$$

– средняя температура поверхности проволоки:

$$t_{n_i} = t_{0_i} + 0,3\sigma_{b_i} \left(1 - \frac{1}{\mu_i}\right) + 2,75\sigma_{b_i} \sqrt{V_i d_i \cdot 10^{-3}}. \quad (5.40)$$

### 5.3.3. Расчет энергосиловых режимов волочения

Основные энергосиловые режимы волочения для прямоточных, петлевых, магазинных волочильных станов и волочильных станов со скольжением определяются:

– модули упрочнения проволоки, МПа:

$$w_i = \frac{\sigma_{S_i} - \sigma_{S_{i-1}}}{\mu_i - 1}, \quad (5.41)$$

где  $\sigma_{S_i}$  – предел текучести металла проволоки, принимаемый равным усредненному значению  $\frac{\sigma_{bi}}{1,2}$ ;

– напряжения волочения, МПа:

$$\sigma_{v_i} = \sigma_{S_i} (1 + 2f) - \frac{(w_i - \sigma_{S_{i-1}})((\mu_i)^a - 1)}{a(\mu_i)^a} - \frac{\sigma_{S_{i-1}} - (q_i \sigma_{v_{i-1}})}{(\mu_i)^a} + 2f\sigma_{S_i}, \quad (5.42)$$

где  $a = \frac{f}{\tan(\alpha_i)}$  – вспомогательный коэффициент ( $\alpha_i$  – полуугол деформирующей зоны волокна);  $q$  – коэффициент противонатяжения.

Для станов со скольжением для первого перехода  $q_1 = 0$ , для остальных переходов  $q_i$  вычисляется по формуле

$$q_i = \frac{1}{e^{(2\pi s_{i-1} f_s)}}, \quad (5.43)$$

где  $s_{i-1}$  – число витков проволоки на расположенном перед  $i$ -й волокой на тяговом шкиве.

Коэффициента запаса волочения:

$$\gamma_i = \frac{\sigma_{S_i}}{\sigma_{v_i}}. \quad (5.44)$$

Усилия волочения  $P_i$  и усилия противонатяжения  $Q_i$ , Н:

$$P_i = \sigma_{v_i} \frac{\pi(d_i)^2}{4}; \quad (5.45)$$

$$Q_i = q \left[ \sigma_{v_{i-1}} \frac{\pi(d_{i-1})^2}{4} \right]. \quad (5.46)$$

Мощность волочения, кВт:

$$N_i = \left[ \frac{V_i}{102\eta} \left( P_i - Q_i + \frac{s\sigma_{S_i}(d_i)^3}{D_i} \right) + (1 - \eta) \frac{V_i}{102\eta} (P_i - Q_i) \right] 0,1, \quad (5.47)$$

где  $s$  – коэффициент, равный для последнего перехода 0,34, для остальных переходов  $s = 0,68$ ;  $D_i$  – диаметры тяговых барабанов или шкивов.

#### **5.3.4. Введение сдвоенных волок в маршрут волочения**

После добавления в маршрут волочения сдвоенных волок производится перерасчет в последовательности:

1. Пределы прочности проволоки, МПа:

$$\sigma_{b_i} = \sigma_{b_{i-1}} \sqrt{\frac{d_{i-1}}{d_i}}. \quad (5.48)$$

2. Частные вытяжки:

$$\mu_i = \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2}. \quad (5.49)$$

3. Скорости волочения, м/с:

$$V_{i-1} = \frac{V_i}{(\mu)_i}. \quad (5.50)$$

Средняя температура сечения проволоки и температура поверхности проволоки, °С:

– средняя температура сечения проволоки:

$$t_{c_i} = t_{0_i} + 0,45\sigma_{b_i} \left(1 - \frac{1}{\mu_i}\right); \quad (5.51)$$

– средняя температура поверхности проволоки:

$$t_{n_i} = t_{0_i} + 0,3\sigma_{b_i} \left(1 - \frac{1}{\mu_i}\right) + 2,75\sigma_{b_i} \sqrt{V_i d_i \cdot 10^{-3}}. \quad (5.52)$$

#### **5.3.5. Применение методики расчета маршрута волочения проволоки диаметром 0,35UT мм из стали 96**

Основные параметры маршрута волочения ультравысокопрочной проволоки (UT) диаметром 0,35 мм из стали 96 представлены в виде графиков на рис. 5.12–5.14. На рисунках представлено сравнение параметров маршрутов волочения без сдвоенных волок и с использованием сдвоенных волок.



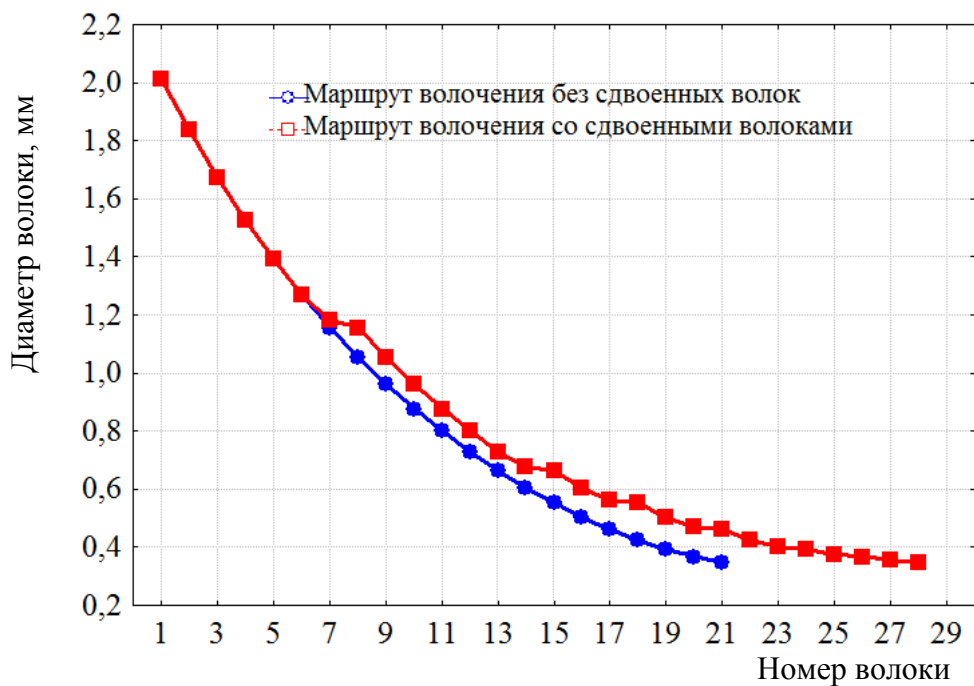


Рис. 5.12. Изменение диаметров проволоки в маршруте волочения проволочной заготовки диаметром 2,145 мм из стали 96



Рис. 5.13. Изменение температуры поверхности проволоки  $T_{п.п}$  в маршруте волочения проволочной заготовки диаметром 2,145 мм из стали 96

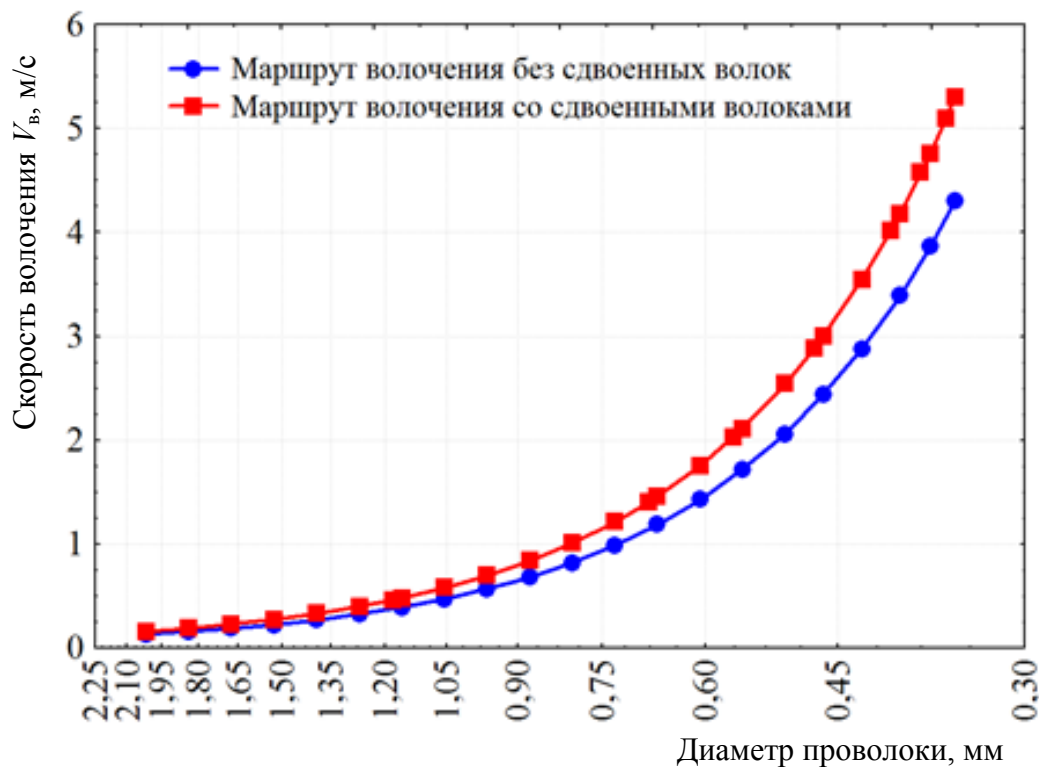


Рис. 5.14. Изменение скорости волочения проволоки  $V_v$  в маршруте волочения проволочной заготовки диаметром 2,145 мм из стали 96

Как видно из рис. 5.13 и 5.14, использование дополнительных волок в маршруте волочения позволяет увеличить скорость волочения, не изменяя температурный режим волочения.

#### 5.4. Математическое описание механических свойств готовой тонкой проволоки в зависимости от режимов волочения

Целью исследования является изучение влияния режимов волочения стальной углеродистой латунированной проволоки на станах тонкого волочения на формирование механических характеристик тонкой проволоки в процессе тонкого волочения.

В данном исследовании объектом исследований являются механические характеристики проволочной латунированной заготовки и тонкой проволоки, формируемые в процессе тонкого волочения.

Предметом исследований служит взаимосвязь механических характеристик тонкой латунированной проволоки, формируемых в про-

цессе тонкого волочения с режимами волочения на волочильных станках тонкого волочения.

Для исключения возможного влияния масштабного фактора маршруты волочения выбирали по диаметру тонкой проволоки. При этом в маршрутах тонкого волочения варьировались диаметры проволоочной заготовки, кинематические параметры режимов волочения: максимальная скорость волочения в волочильном стане  $V_B$  и суммарная логарифмическая степень деформации проволоки за весь маршрут волочения, определяемая по известной зависимости (5.53):

$$\varepsilon_i = \ln\left(\frac{D_i^2}{d_i^2}\right), \quad (5.53)$$

где  $D_i$  – диаметр проволоочной заготовки, мм;  $d_i$  – диаметр тонкой проволоки, мм.

Температура проволоки в процессе волочения изменяется в широком диапазоне значений (от 100 до 680 °С). Так как снижение максимальной температуры проволоки в маршруте волочения позволяет повысить пластические свойства тонкой проволоки после волочения, то целесообразно принять максимальную температуру поверхности проволоки в маршруте волочения за характерный параметр маршрутов волочения [49]. Температура проволоки определялась численным моделированием с помощью МКЭ на основании зависимостей механики деформируемого твердого тела и теории пластичности [50].

На рис. 5.15–5.17 представлены основные параметры режимов волочения исследуемых маршрутов волочения (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Основные параметры маршрутов волочения

Номер маршрута волочения	Диаметр проволоочной заготовки $D$ , мм	Диаметр тонкой проволоки $d$ , мм	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	1,90	0,35	624,7	3,37	10
2	1,98	0,3	581,3	3,75	8
3	1,77	0,3	686,1	3,54	16

*Примечание:*  $X_1$  – максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения  $T$ , °С;  $X_2$  – суммарная логарифмическая деформация тонкой проволоки;  $X_3$  – максимальная скорость волочения  $V_B$ , м/с.

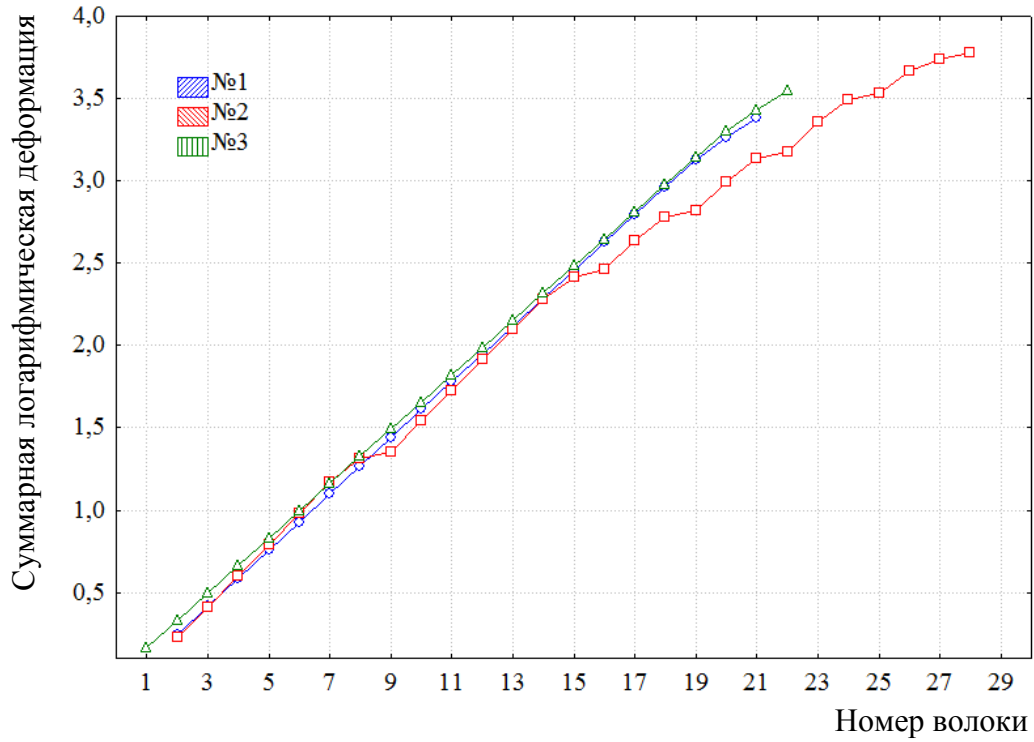


Рис. 5.15. Изменение суммарной логарифмической степени деформации проволоки в исследуемых маршрутах волочения

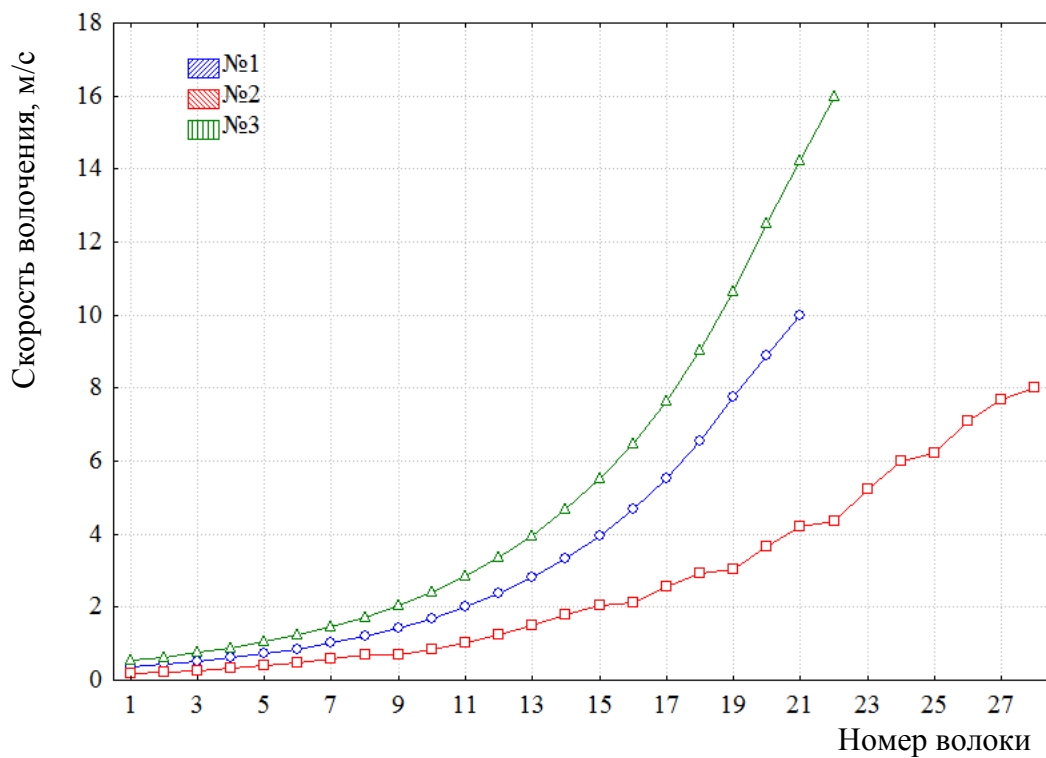


Рис. 5.16. Изменение скорости волочения проволоки в исследуемых маршрутах волочения

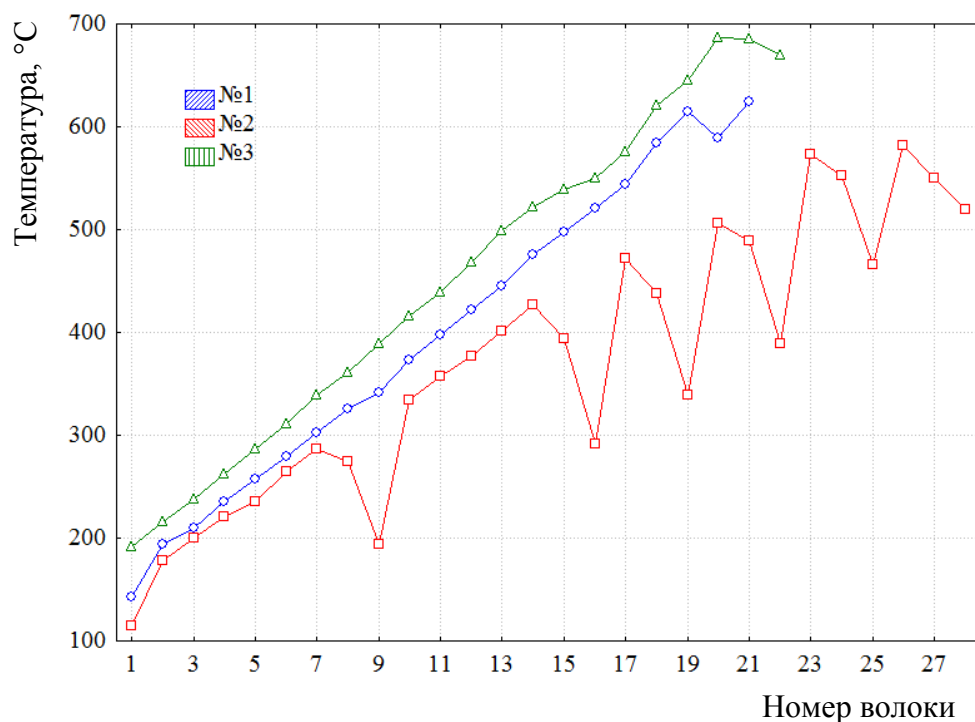


Рис. 5.17. Изменение температуры поверхности проволоки в исследуемых маршрутах волочения

На основании данных лабораторных испытаний на осевое растяжение образцов из проволочной заготовки и тонкой проволоки после волочения проведен анализ изменения механических параметров. В ходе испытаний определяли: модуль упругости проволоки, условный предел текучести, предел прочности, относительное удлинение при разрыве (табл. 5.6). Образцы изготавливались из проволочной заготовки и тонкой проволоки согласно [45]. Для проведения испытаний на осевое растяжение были выбраны следующие образцы:

- 1) для проволочной заготовки было исследовано 15 партий образцов для каждого маршрута волочения;
- 2) для тонкой проволоки было исследовано 60 партий для каждого маршрута волочения.

В партии по 3 образца. Образцы внутри партии вырезаны из близлежащих участков проволочной заготовки и тонкой проволоки, равномерно распределенных по всей длине.

Первоначально производилась обработка результатов внутри каждой партии: определялось среднее значение каждого из исследуемых механических параметров трех образцов. Дальнейший анализ производился по средним значениям всех партий для каждого определяемого механического параметра. Результаты представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

## Результаты определения механических параметров

Механические характеристики	Основные статистики	Маршрут волочения					
		№ 1		№ 2		№ 3	
		$d = 1,9$	$d = 0,35$	$d = 1,98$	$d = 0,30$	$d = 1,77$	$d = 0,30$
Модуль упругости $E$ , ГПа	Среднее	185,33	203,93	176,67	202,16	176,09	205,7
	Минимум	145,26	193,48	144,91	188,71	155,59	194,22
	Максимум	214,25	209,83	205,5	220,54	205,86	215,78
	СКО	18,26	3,52	18,95	6,29	12,78	5,69
Условный предел текучести $\sigma_y$ , МПа	Среднее	879,47	2853,64	889,16	3132,81	886,02	3077,14
	Минимум	861,95	2786,95	881,73	3071,48	882,13	3029,02
	Максимум	888,34	2901,34	899,64	3170,56	889,94	3113,94
	СКО	6,37	44,85	4,51	19,79	2,26	19,54
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Среднее	1274,54	3056,33	1284,30	3376,13	1271,80	3235,57
	Минимум	1272,07	3005,33	1281,31	3351,00	1268,00	3227,18
	Максимум	1277,06	3088,52	1288,28	3390,00	1275,00	3255,49
	СКО	1,58	33,13	2,20	5,63	1,82	8,36
Максимальное удлинение при растяжении $A_b$ , %	Среднее	7,90	2,42	8,30	2,64	7,95	2,27
	Минимум	7,31	2,11	7,47	2,29	7,33	2,02
	Максимум	10,37	2,59	9,01	2,81	8,61	2,41
	СКО	0,73	0,10	0,48	0,09	0,40	0,08

Анализируя табл. 5.6, можно отметить, что среднее квадратичное отклонение (СКО) условного предела текучести и предела прочности выше, несмотря на увеличенное количество партий тонкой проволоки по отношению к количеству партий проволочной заготовки в пределах соответствующего маршрута волочения. При определении средних значений модуля упругости и максимального удлинения при растяжении наблюдается обратная закономерность. СКО уменьшается с увеличением количества партий тонкой проволоки по сравнению с количеством партий проволочной заготовки.

Также из табл. 5.6 видно, что механические характеристики в исследуемых маршрутах волочения для проволочной заготовки имеют различные, но близкие значения, что объясняется различными условиями средне-грубого волочения, режимами патентирования и масштабным фактором проволочной латунированной заготовки.

Относительные изменения механических характеристик в каждом маршруте волочения представлены на рис. 5.18. Относительное изменение условного предела текучести и предела прочности оценивали по отношению  $\sigma_y/\sigma_B$  тонкой проволоки к проволочной заготовке.

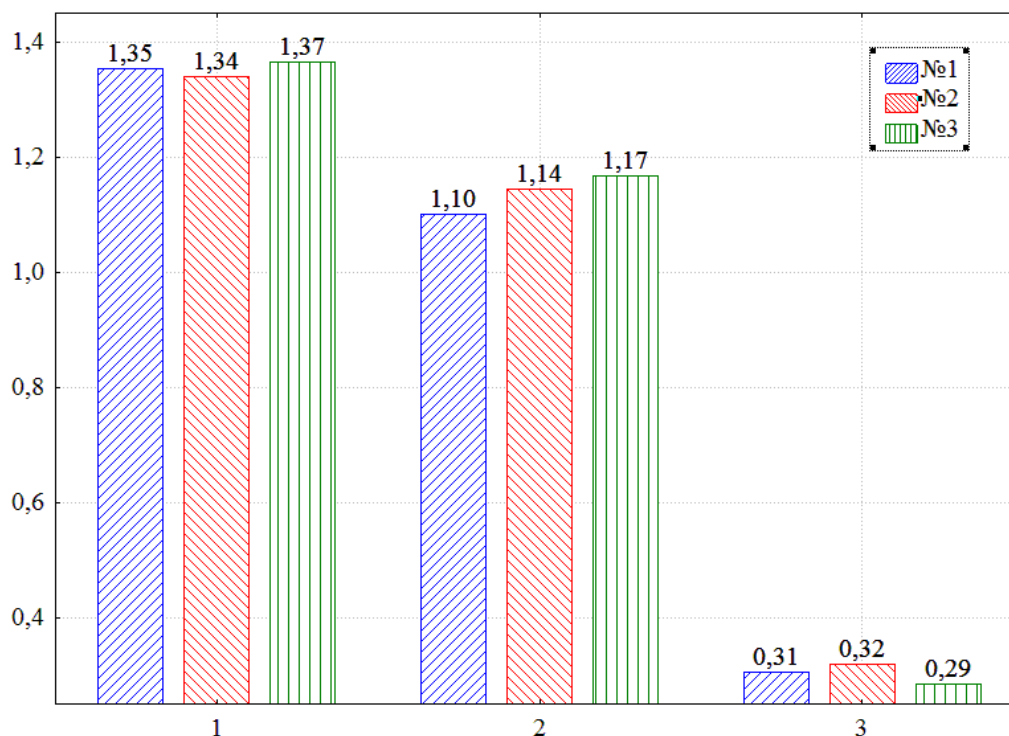


Рис. 5.18. Относительное изменение механических свойств проволочной заготовки после тонкого волочения:  
 1 – отношение условного предела текучести к пределу прочности; 2 – модуль упругости; 3 – максимальное относительное удлинение при растяжении

Анализ рис. 5.18 показывает, что отношение  $\sigma_y/\sigma_B$  увеличилось в среднем на 35 % во всех маршрутах волочения, а относительное удлинение уменьшилось в среднем на 30 %. Модуль упругости увеличился в среднем на 13,67 %.

Относительное изменение механических характеристик проволоки представлено в табл. 5.7.

Таблица 5.7

**Относительное изменение механических характеристик проволоки**

Маршрут волочения	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
№ 1	1,353	1,100	0,3060
№ 2	1,340	1,144	0,3180
№ 3	1,365	1,168	0,2855

*Примечание:*  $Y_1$  – относительное изменение соотношения условного предела текучести к пределу прочности  $\sigma_y/\sigma_B$ ;  $Y_2$  – относительное изменение модуля упругости  $E$ ;  $Y_3$  – относительное изменение максимального удлинения при растяжении  $A_t$ .

Влияния параметров маршрута волочения на относительное изменение механических характеристик оценивали с помощью коэффициента корреляции  $R$  [30].

$$R = \frac{\sum (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\left\{ \left[ \sum (X_j - \bar{X})^2 \right] \left[ \sum (Y_j - \bar{Y})^2 \right] \right\}^{1/2}}, \quad (5.54)$$

где  $X_j$ ,  $Y_j$  – параметры маршрутов волочения и относительное изменение механических характеристик проволоки после волочения.

Результаты оценки представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

**Корреляционная матрица  $R_{xy}$**

	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$Y_1$	0,993	-0,571	0,954
$Y_2$	0,439	0,590	0,594
$Y_3$	-0,999	0,421	-0,991

Анализ табл. 5.8 показывает, что соотношение  $\sigma_y/\sigma_B$  и максимальное удлинение в большей степени зависят от температуры поверхности проволоки, чем от скорости волочения ( $R_{11} > R_{31}$  и  $R_{13} > R_{33}$ ). Следует отметить, что скорость волочения и температура поверхности проволоки при волочении взаимосвязаны, однако на формирование пластических свойств проволоки температура оказывает большее влияние.



Низкая взаимосвязь относительного изменения модуля упругости с параметрами маршрута волочения может быть обусловлена его природой, так как модуль упругости является одной из наиболее стабильных механических характеристик металлов и мало зависит от различных факторов [23]. Это позволяет сделать предположение о том, что модуль упругости не зависит от кинематических параметров маршрутов волочения и формируется в основном за счет структуры в процессе патентирования. Тогда значение среднеквадратичного отклонения модуля упругости может служить мерой, характеризующей качество проволочной заготовки, так как модуль упругости для сталей одной марки величина постоянная.

Коэффициенты линейных уравнений регрессий в виде  $Y_j = A + B \cdot X_j$  определенные аппроксимацией методом наименьших квадратов для коэффициентов корреляции  $R > 0,9$  представлены в табл. 5.9.

Таблица 5.9

**Значения коэффициентов уравнений линейной регрессии**

	$X_1$		$X_3$	
	$A$	$B$	$A$	$B$
$Y_1$	1,204	0,0002	1,3202	0,0029
$Y_3$	0,4998	-0,0003	0,3475	-0,0039

Полученные уравнения регрессии позволяют с достаточной точностью прогнозировать формирование основных механических характеристик, определяемых испытаниями на осевое растяжение в зависимости от параметров режимов волочения, определяемых с помощью численных расчетов.

## **ГЛАВА 6**

### **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОЛОЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ И УЛЬТРАВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛЕЙ 85, 90, 95 ДИАМЕТРОМ 0,2–0,5 мм С МАКСИМАЛЬНЫМИ СКОРОСТЯМИ ВОЛОЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 8–18 м/с**

Наибольший вклад в формирование свойств тонкой высокоуглеродистой проволоки для металлокорда имеет процесс тонкого волочения. При тонком волочении проволочной патентированной латунированной заготовки формируются все основные механические свойства тонкой проволоки.

Основной технологической задачей тонкого волочения является достижение оптимальной пластичности тонкой проволоки для обеспечения благоприятных условий последующего процесса свивки тонкой проволоки в металлокорд при сохранении прочности.

В этой связи возникает необходимость в оптимизации маршрутов тонкого волочения с целью повышения пластических свойств тонкой проволоки.

#### **6.1. Разработка критериев оценки эффективности маршрутов волочения проволоки**

По мере прохождения проволоки через волоки по маршруту волочения в волочильном стане нарастает суммарная пластическая деформация проволоки, увеличивается скорость волочения, возрастает температура проволоки в очаге деформации.

Основными источниками тепла при волочении являются: контактное трение на поверхности проволоки и внутреннее трение в проволоке. С ростом скорости волочения в маршруте волочения возрастает и температура проволоки. Максимальная температура проволоки в очаге деформации в процессе волочения формируется на поверхности проволоки. Слишком высокая температура проволоки при волочении приводит к развитию процессов старения, вызывающих снижение пластических свойств проволоки, возникновению тепловых напряжений, снижению стойкости волочильного инструмента, окислению смазки и повышению коэффициента трения [51].

В этой связи повышение пластических свойств тонкой проволоки при волочении возможно при снижении максимальной температуры проволоки в маршруте волочения.

Распределение деформации по сечению проволоки в очаге деформации и после выхода из очага деформации различно, так как параметры деформирования проволоки в каждой волоке изменяются по всему маршруту волочения.

Деформации при волочении в поперечном сечении проволоки характеризуются наличием слоев с различной степенью деформации. Более деформированные слои проволоки обладают минимальной пластичностью, снижающей ее величину в целом по сечению проволоки. Неравномерность деформации является также источником возникновения остаточных напряжений в тонкой проволоке после волочения. Наличие остаточных напряжений в проволоке после волочения совместно с остаточными напряжениями в проволоках и в металлокорде после свивки формируют прямолинейность металлокорда.

В процессе тонкого волочения, характеризующемся поверхностным наклепом, поверхностные слои проволоки стремятся сохранить остаточное увеличение размеров. Менее деформированные внутренние слои проволоки препятствуют этому. Вследствие чего в поверхностных слоях проволоки возникают сжимающиеся осевые и окружные остаточные напряжения [52]. Остаточные напряжения в тонкой проволоке будут тем выше, чем выше исходная прочность при осевом растяжении тонкой проволоки и градиент неравномерности деформации в тонкой проволоке после волочения. В идеальном случае неравномерность деформации должна отсутствовать, а в реальном – должна быть минимизирована.

### ***6.1.1. Температурный критерий оптимизации маршрутов тонкого волочения***

Для оценки оптимизации маршрута волочения тонкой проволоки вследствие снижения максимальной температуры проволоки предлагается использовать интегральный температурный коэффициент расхождения параметров волочения, определяемый по зависимости

$$K_T = \frac{\left(\frac{T_{\text{опт}}}{T_{\text{баз}}}\right)^{50} + \left(\frac{V_{\text{баз}}}{V_{\text{опт}}}\right)^{15}}{2}, \quad (6.1)$$

где  $T_{\text{опт}}$  – максимальная температура поверхности проволоки в оптимизированном маршруте волочения;  $T_{\text{баз}}$  – максимальная температура

поверхности проволоки в базовом маршруте волочения;  $V_{\text{баз}}$  – скорость волочения проволоки на выходе из волочильного стана в базовом маршруте волочения;  $V_{\text{опт}}$  – скорость волочения проволоки на выходе из волочильного стана в оптимизированном маршруте волочения.

Для базового маршрута волочения  $K_T = 1$ , так как в этом случае  $T_{\text{опт}} = T_{\text{баз}}$ . После внесения изменений в маршрут волочения величина  $K_T$  рассчитывается повторно. При полученном  $K_T > 1$  новый маршрут тонкого волочения имеет более низкую эффективность, при  $K_T < 1$  его эффективность возрастает.

Выполнение этого критерия снижает эффект деформационного старения высокоуглеродистой проволоки, который уменьшает ее пластичность.

Таким образом, температурный критерий [51] характеризует эффективность маршрута тонкого волочения и заключается в определении максимальной допустимой мгновенной температуры поверхности проволоки в маршруте волочения.

### ***6.1.2. Деформационный критерий оптимизации маршрутов тонкого волочения***

Формирование в сечении проволоки высокого градиента неравномерной деформации негативно сказывается на пластических свойствах проволоки и является причиной появления остаточных напряжений.

Компоненты тензора деформации  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  максимальны в центре очага деформации проволоки при волочении. Тогда согласно критерию пластичности сплошных сред, предложенному Мизесом, неравномерность деформации проволоки по сечению определяется главным образом величиной сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{rz}$ . Параметры, влияющие на величину деформации сдвига  $\varepsilon_{rz}$ , определяют степень неравномерности деформации проволоки по сечению. Увеличение единичных обжатий и уменьшение угла конической части волоки снижают неравномерность деформаций [24].

На рис. 6.1 представлены типичные графики распределения пластической деформации в поперечном сечении тонкой проволоки радиусом  $R$  для двух вариантов маршрутов волочения, отличающихся величиной обжатий в конце маршрута тонкого волочения. Для оценки неравномерности пластической деформации в поперечном сечении проволоки предлагается использовать деформационный критерий.

Предлагаемый критерий позволяет одновременно оценить разницу между максимальной и минимальной накапливаемой пластической деформацией, сосредоточенной в поверхностных и внутренних слоях проволоки, а также вид кривой действительного распределения пластической деформации (рис. 6.1). Такой принцип оценки формирования неравномерности деформаций в процессе тонкого волочения в проволоке предлагается как деформационный критерий, описываемый выражением

$$K_\varepsilon = \frac{2(\varepsilon_{R/2} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_R - \varepsilon_0}, \quad (6.2)$$

где  $\varepsilon_{R/2}$  – величина пластической деформации на расстоянии, равном половине радиуса окружности поперечного сечения деформируемой проволоки;  $\varepsilon_0$  – величина пластической деформации в центре поперечного сечения проволоки соответствует минимальному значению деформации;  $\varepsilon_R$  – величина пластической деформации в поверхностных слоях поперечного сечения проволоки соответствует максимальному значению деформации.

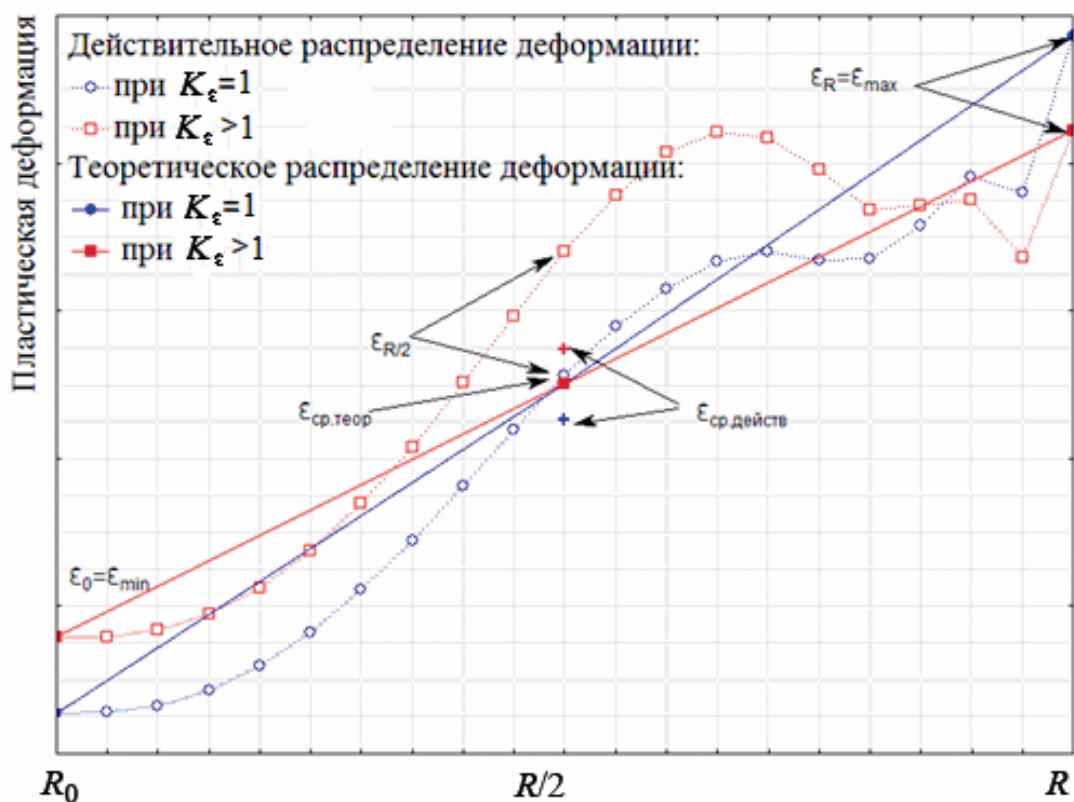


Рис. 6.1. Распределение пластической деформации в поперечном сечении тонкой проволоки

Проводя одновременно анализ выражения (6.2) и графиков на рис. 6.1, можно отметить, что в основе деформационного критерия лежит сравнение значений деформации на расстоянии, равном половине радиуса окружности поперечного сечения деформируемой проволоки  $\varepsilon_{R/2}$ , со средними значениями пластической деформации  $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$ , полученными как среднее от теоретической суммы минимальной  $\varepsilon_{\text{min}} = \varepsilon_0$  и максимальной деформации  $\varepsilon_{\text{max}} = \varepsilon_R$  в сечении проволоки. Таким образом, как видно из рис. 6.1, при изменении распределения деформации по сечению проволоки значение  $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$  не изменяется. Изменяется в значительной степени значение  $\varepsilon_{R/2}$  в сравнении со значениями средней деформации  $\varepsilon_{\text{ср.действ}}$ , полученными как среднее значение от действительной суммы всех значений на кривой распределения деформации по отношению к  $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$ .

Так как деформационная неравномерность одновременно с суммарной степенью деформации проволоки возрастает от перехода к переходу маршрута волочения, то представляя значения  $\varepsilon_{R/2}$  и  $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$  относительно значений  $\varepsilon_{\text{min}} = \varepsilon_0$  в каждом переходе волочения, будет определена степень неравномерности деформации в поперечном сечении проволоки в каждом переходе и изменение относительно остальных переходов маршрута волочения.

С целью экспериментального анализа неравномерности деформации по сечению проволоки при волочении использовался метод определения микротвердости металла в разных точках поперечного сечения тонкой проволоки.

Микротвердость по поперечному сечению проволоки определяли проведением испытаний на микротвердомере ПМТ-3 по вдавливанию микроиндентора в поперечное сечение проволоки согласно [53]. На рис. 6.2, а представлена схема контрольных точек для измерения микротвердости проволоки [54].

На рис. 6.2, б представлен образец тонкой проволоки с отпечатками после внедрения микроиндентора для определения распределения микротвердости в поперечном сечении проволоки.

Значение твердости по Виккерсу вычисляют по формуле [26]:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2}, \quad (6.3)$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;  $\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный  $136^\circ$ ;  $F$  – нагрузка, Н;  $d$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

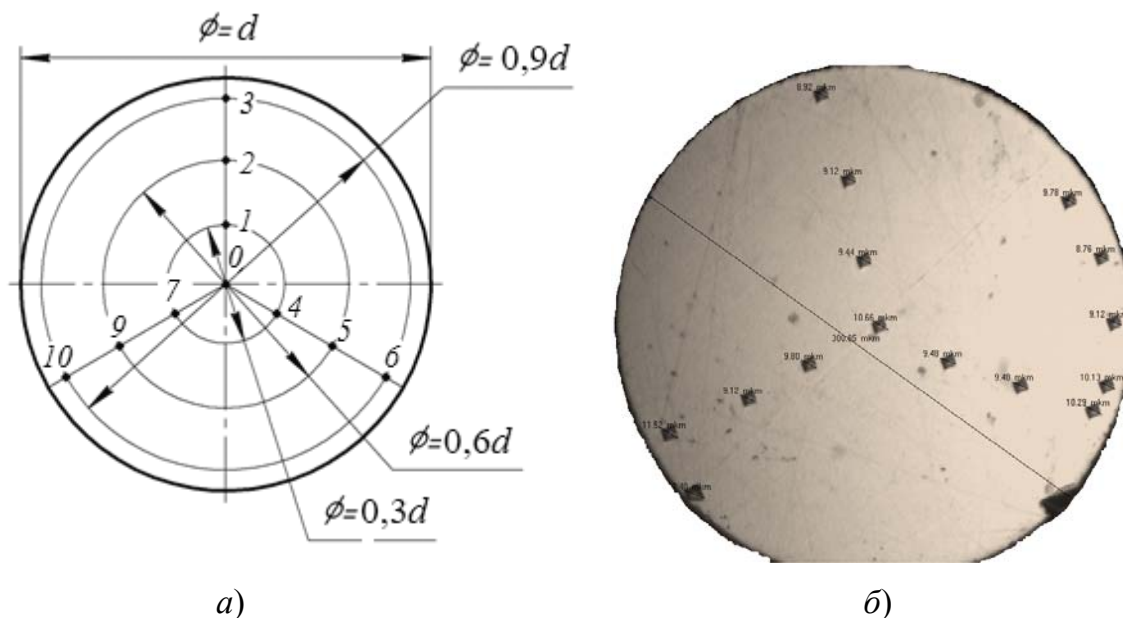


Рис. 6.2. Определения микротвердости в поперечном сечении проволоки  $d = 0,35$  мм:

*a* – схема внедрения микроиндентора в образец проволоки;  
*б* – сечение образца проволоки после измерения микротвердости

В результате испытания образцов на микротвердость были получены следующие значения микротвердости, представленные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

**Значения микротвердости для образцов проволоки в поперечном сечении**

Номер образца	Диаметр проволоки	Нагрузка, Н	Значение микротвердости $HV$ , ед.			
			Центр, $d = 0$	$d = 0,3\emptyset$	$d = 0,6\emptyset$	$d = 0,9\emptyset$
1	$\emptyset 0,35$	0,05	1089,4	861,2	929,8	1004,9
				931,7	747,6	1004,9
				1089,4	929,7	544,6
Среднее значение			1089,40	960,77	869,03	851,47

В соответствии с [52], [55] значения микротвердости могут использоваться для определения механических характеристик исследуемых образцов. Это дает возможность с помощью измерения микротвердости сечения проволоки оценить характер распределения механических свойств металла в сечении проволоки. Полученные экспериментальные распределения могут являться качественным доказательством адекватности численных расчетов.

В зависимости от микротвердости уравнение для расчета пластичности имеет вид [25]:

$$\delta = 1 + \frac{1}{\sin \gamma \cdot \ln(\sin \gamma)} (1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}, \quad (6.4)$$

где  $\gamma$  – угол между осью пирамиды (индентора) и ее гранью, для пирамидального индентора Виккерса  $\gamma = 68^\circ$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона для данного материала (сталь 80),  $\nu = 0,29$ ;  $HV$  – твердость по Виккерсу, ед.;  $E$  – модуль Юнга,  $E = 205000$  МПа.

В соответствии с формулой (6.4) был произведен расчет пластичности для исследуемых образцов. Полученные значения представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

**Значения пластичности проволоки в поперечном сечении**

Номер образца	Диаметр проволоки	Значение пластичности			
		Центр, $d = 0$	$d = 0,3\emptyset$	$d = 0,6\emptyset$	$d = 0,9\emptyset$
1	$\emptyset 0,35$	0,9589	0,968	0,965	0,962
			0,965	0,972	0,962
			0,959	0,965	0,979
Среднее значение		0,9589	0,9638	0,9672	0,9679

Качественное сравнение расчетного распределения осевой пластической деформации (рис. 6.3, график № 2) с экспериментальным распределением пластичности на рис. 6.3 (график № 1) показывает, что распределение расчетной осевой пластической деформации обратно пропорционально распределению экспериментальной пластичности. Полученное сравнение указывает на адекватность численного расчета, так как пластичность и степень деформации, сопровождаемая упрочнением, находятся в обратной зависимости.



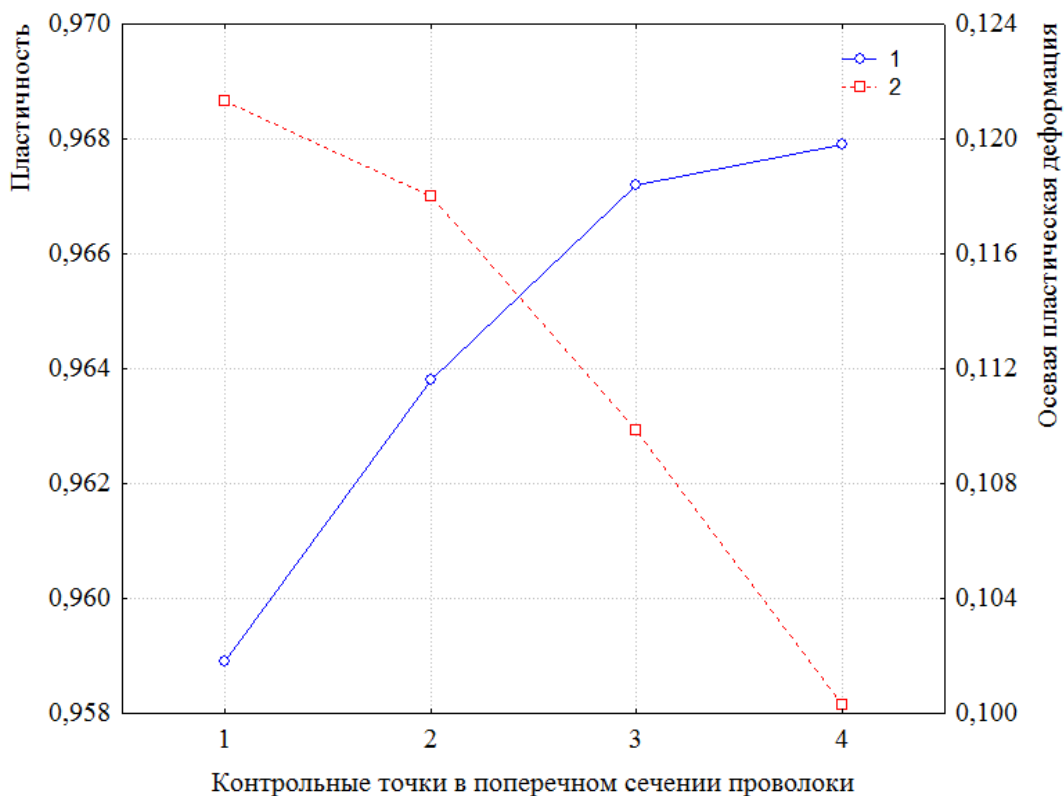


Рис. 6.3. Сравнение значений экспериментального определения пластичности (график № 1) с распределением осевой пластической деформацией (график № 2) в поперечном сечении проволоки диаметром 0,35 мм

Используя деформационный критерий, представляется возможным корректировка параметров маршрута волочения для улучшения распределения пластической деформации по сечению готовой тонкой проволоки. Равномерное распределение деформации будет способствовать снижению остаточных напряжений и позволит повысить пластические свойства тонкой проволоки.

### 6.1.3. Оценка оптимизации маршрута волочения

Оценка оптимизации маршрута волочения на примере маршрута волочения тонкой проволоки диаметром 0,35 мм из заготовки диаметром 2,20 мм.

В данном маршруте волочения базовый вариант имел 27 волок с пониженными обжатиями в шести местах маршрута. В результате предварительного численного расчета температурных и деформационных полей было определено, что максимальная температура на поверхности проволоки ( $T_{\text{баз}} = 570 \text{ }^\circ\text{C}$ ) соответствует 25-й волоке маршрута волочения.

В данном случае наиболее рациональным способом снижения температуры поверхности проволоки является уменьшение единичного обжатия проволоки в 25-й волоке за счет замены единичного обжатия 12,7 % на два пониженных обжатия 9,36 и 3,7 %.

Численный расчет оптимизированного маршрута волочения подтвердил снижение максимальной температуры поверхности проволоки в 25-ой волоке. Распределение температур проволоки в продольном сечении очага деформации 25-й волоки показано на рис. 6.4.

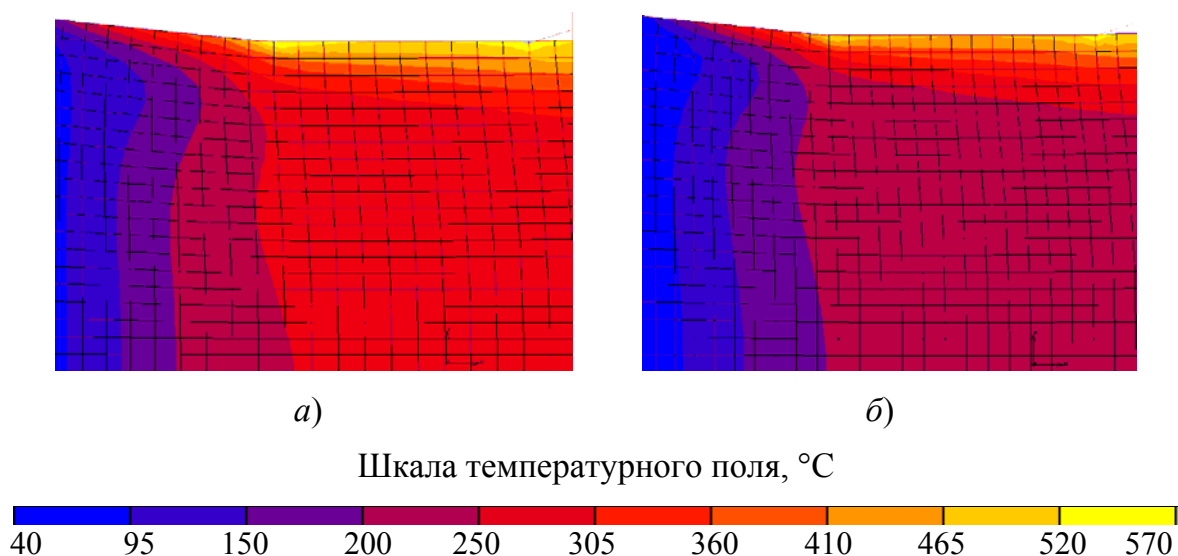


Рис. 6.4. Температурное поле проволоки в очаге деформации 25-й волоки:

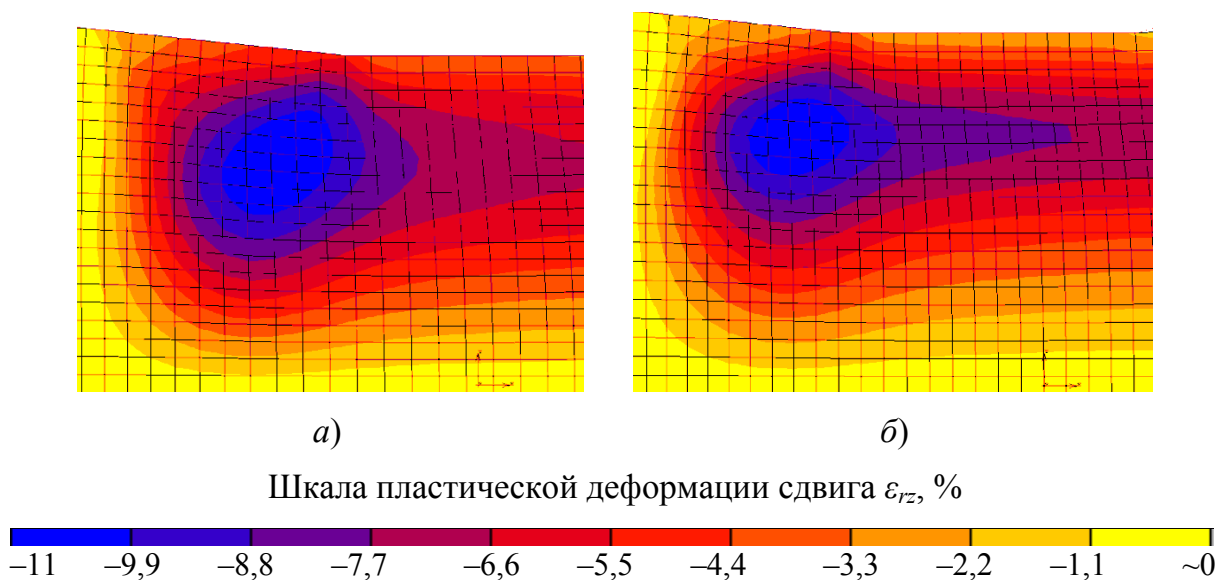
*а* – диаметром  $d = 370$  мкм в базовом маршруте волочения  $T_{\text{баз}} = 570$  °С; *б* – диаметром  $d = 377$  мкм в оптимизированном маршруте волочения,  $T_{\text{опт}} = 540$  °С

На основании результатов проведенной оптимизации (снижение температуры поверхности проволоки) произведена оценка оптимизации данного маршрута волочения по температурному критерию  $K_T$  согласно выражению (6.1). Полученное значение температурного критерия ( $K_T = 0,533$ ) указывает на положительный эффект оптимизации при снижении максимальной температуры поверхности проволоки в базовом маршруте волочения  $T_{\text{баз}} = 570$  °С до температуры поверхности проволоки в оптимизированном маршруте волочения  $T_{\text{опт}} = 540$  °С.

Так как уменьшение единичного обжатия проволоки в 25-й волоке за счет разбивки обжатия для снижения степени деформации, то уменьшение максимальной температуры поверхности проволоки повлияет на распределение деформаций в оптимизированном маршруте волочения.

Распределение пластической деформации в поперечном сечении проволоки получено численным расчетом с использованием метода конечных элементов.

Распределение деформаций сдвига в проволоке в продольном сечении очага деформации 25-й волоки показано на рис. 6.5.



*Рис. 6.5.* Поле деформаций сдвига  $\varepsilon_{rz}$  в 25-й волоке:  
*a* – с единичным обжатием  $H = 12,7\%$  и углом конической части  
 волоки  $\alpha = 12^\circ$ ; *б* – с единичным обжатием  $H = 9,36\%$   
 и углом конической части волоки  $\alpha = 12^\circ$

Анализируя распределение полей деформации сдвига на рис. 6.5 в виде цветокодированных изображений, можно отметить, что с уменьшением единичного обжатия при волочении поле максимальных значений деформации сдвига смещается к поверхности проволоки, что приводит к перераспределению суммарной пластической деформации между внутренними и поверхностными слоями проволоки.

На рис. 6.6 показан расчет коэффициента деформационной неравномерности  $K_\varepsilon$  в виде графика для базового и оптимизированного маршрута волочения.

Анализируя совместно выражение (6.2) и график коэффициента деформационной неравномерности  $K_\varepsilon$  на рис. 6.6, получаем, что при  $K_\varepsilon = 1$  пластическая деформация между слоями от центра до поверхности в поперечном сечении тонкой проволоки распределена равномерно. Тогда чем ближе значение коэффициента  $K_\varepsilon$  стремится к единице, тем равномернее распределена суммарная пластическая деформация в проволоке.

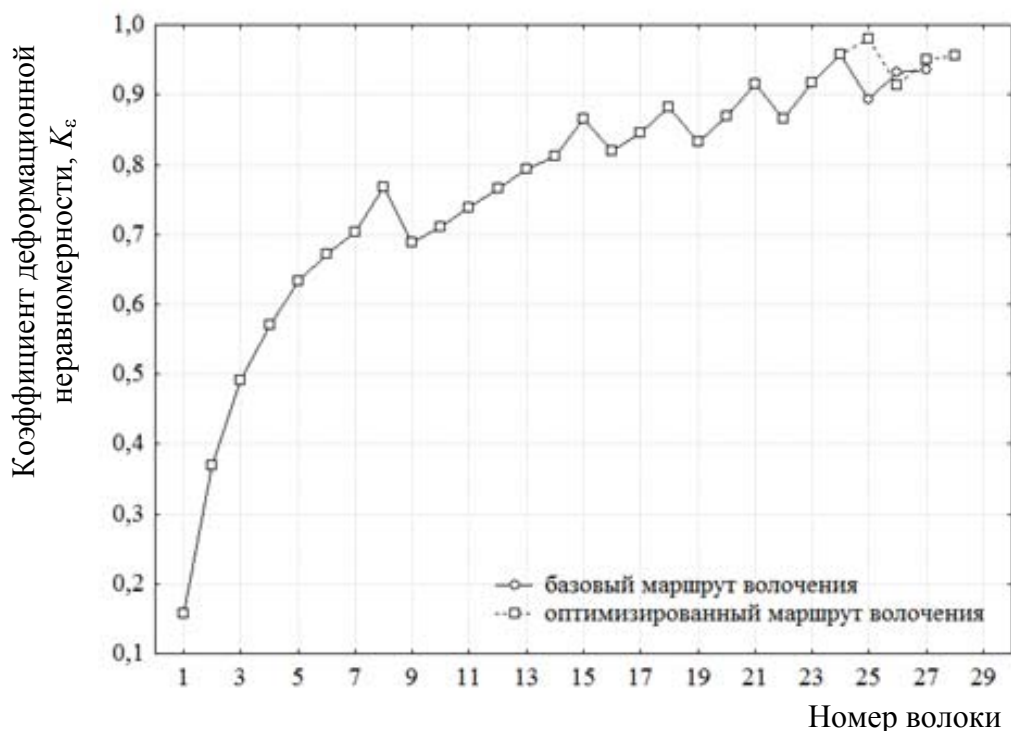


Рис. 6.6. Изменение коэффициента деформационной неравномерности  $K_\epsilon$  в базовом и оптимизированном маршруте волочения

Сравнивая базовый маршрут волочения с маршрутом с пониженным единичным обжатием тонкой проволоки по температурному и деформационному критерию, можно увидеть улучшение пластических характеристик тонкой ультравысокопрочной проволоки по таким показателям, как полное удлинение (на 6 %), число реверсивных скручиваний (в 9,14 раз) и число скручиваний двух проволок на базе 250 мм под нагрузкой 20 % от разрывного усилия (в 1,85 раза) [56].

## 6.2. Исследование способов снижения неравномерности деформации проволоки по поперечному сечению

Исследование по снижению неравномерности деформации проволоки в поперечном сечении проводилось, используя численное моделирование, реализуемое с помощью метода конечных элементов. Расчет маршрута волочения тонкой проволоки 0,35HT выявил наличие неравномерного распределения деформации в поперечном сечении проволоки. На основании полученных расчетов проведена оценка

маршрута волочения, используя совместно деформационный и температурный критерий оптимизации. На основании численных расчетов были предложены способы снижения неравномерности деформации в поперечном сечении проволоки в исследуемом маршруте волочения. Расчет маршрутов волочения тонкой проволоки основан на использовании численного метода, реализуемого с помощью метода конечных элементов [50].

На основании статистических данных результатов испытаний на осевое растяжение образцов проволоки формируются основные механические параметры проволоки, необходимые для численного расчета (табл. 6.3).

Таблица 6.3

**Исходные параметры проволоки 0,35HT  
для численного расчета**

Марка стали	80К
Диаметр заготовки $D$ , мкм	1900
Диаметр тонкой проволоки $d$ , мкм	350
Суммарная логарифмическая деформация $\varepsilon_p$	3,38
Модуль упругости заготовки $E$ , ГПа	185,33
Модуль упругости тонкой проволоки $E$ , ГПа	203,93
Условный предел текучести заготовки $\sigma_y$ , МПа	879,47
Условный предел текучести тонкой проволоки $\sigma_y$ , МПа	2853,6
Временное сопротивление разрыву заготовки $\sigma_b$ , МПа	1274,54
Временное сопротивление разрыву тонкой проволоки $\sigma_b$ , МПа	3056,33
Максимальное удлинение при растяжении заготовки $A_t$ , %	7,90
Максимальное удлинение при растяжении тонкой проволоки $A_t$ , %	2,42

Для реализации расчета необходимо сформировать исходные данные маршрута волочения. К ним относятся: скорость волочения, параметры геометрии волоки, механические параметры проволочной заготовки и тонкой проволоки, изменение диаметров проволоки по переходам маршрута волочения (рис. 6.7 и 6.8).

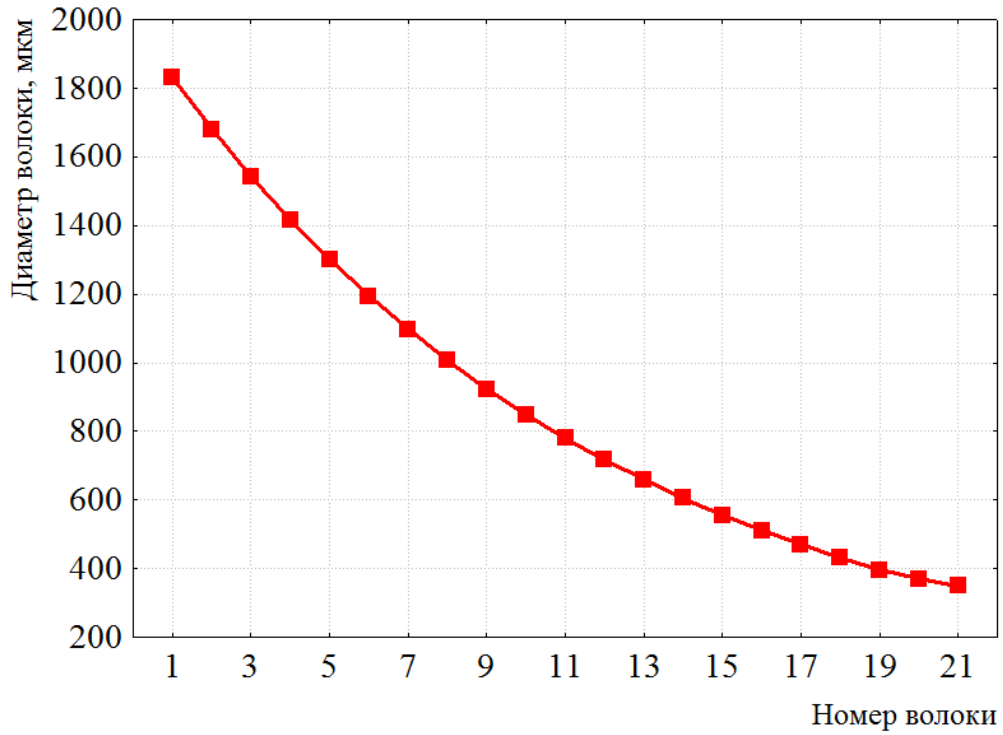


Рис. 6.7. Изменение диаметров проволоки в маршруте волочения

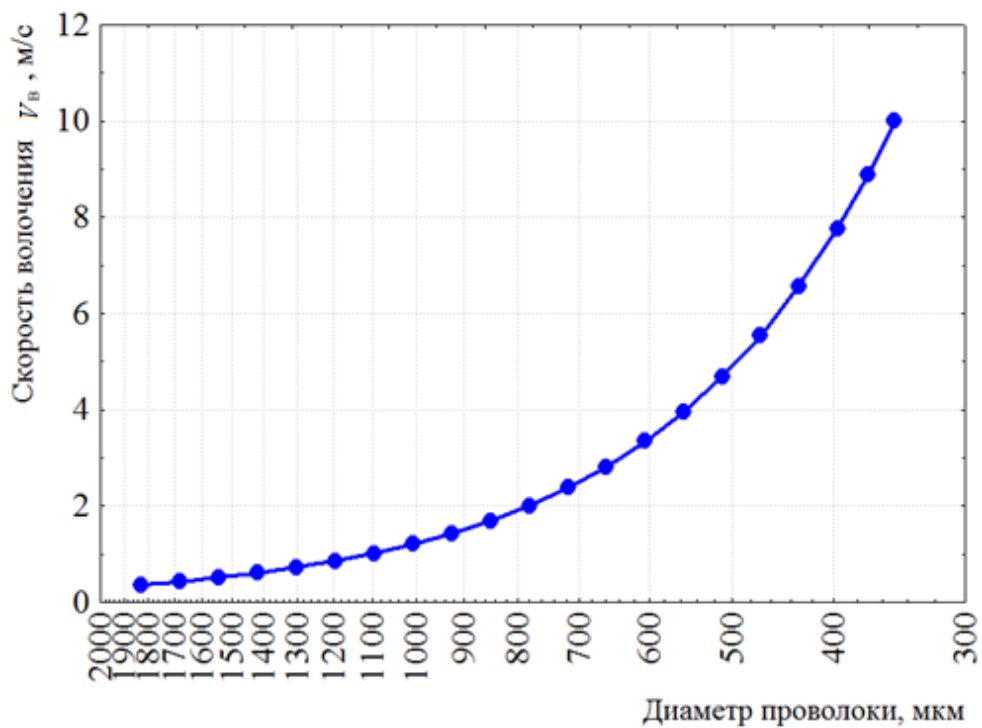


Рис. 6.8. Изменение скорости волочения проволоки в маршруте волочения

Основными ограничениями в реализации оптимизационной задачи являлись: фиксированная конечная скорость волочения тонкой проволоки в волочильном стане, жесткая кинематика волочильного стана, фиксированные параметры волочильного инструмента – волокни (угол конической части волокни  $\alpha = 12^\circ$ , коэффициент калибрующей части волокни  $k = d/l$  равный 0,4).

Значения температуры поверхности проволоки, полученные численным методом  $T_{п.числ}$ , сравнивали с значениями температуры поверхности, рассчитанной по известной зависимости  $T_{п.теор}$  [30]:

$$t_{n_i} = t_{o_i} + 0,3\sigma_{b_i} \left( 1 - \frac{1}{\mu_i} \right) + 2,75\sigma_{b_i} \sqrt{V_i d_i} 10^{-3}. \quad (6.5)$$

Результаты численного расчета температур поверхности проволоки  $T_{п.числ}$  по переходам волочения в базовом варианте исследуемых маршрутов волочения в сравнении с аналитическим расчетом  $T_{п.теор}$  согласно выражению (6.3) представлены на рис. 6.9.

Результаты численного расчета распределения температуры поверхности проволоки и пластической деформации в поперечном сечении проволоке по переходам волочения в базовом варианте исследуемого маршрута волочения представлены на рис. 6.9 и 6.10.

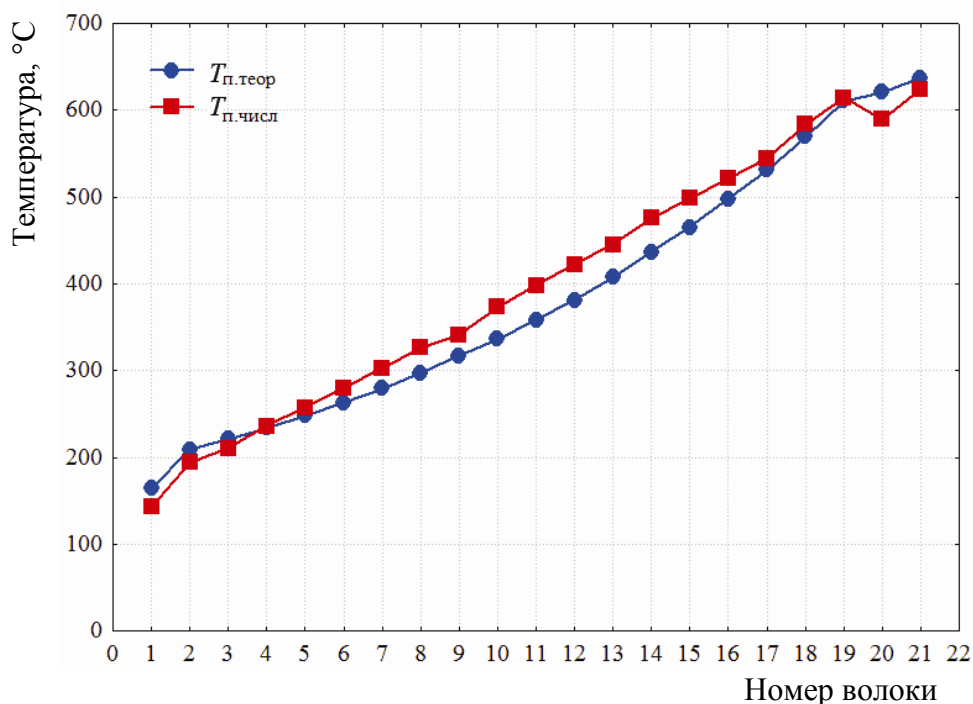


Рис. 6.9. Изменение температур поверхности проволоки в маршруте тонкого волочения проволоки 0,35HT

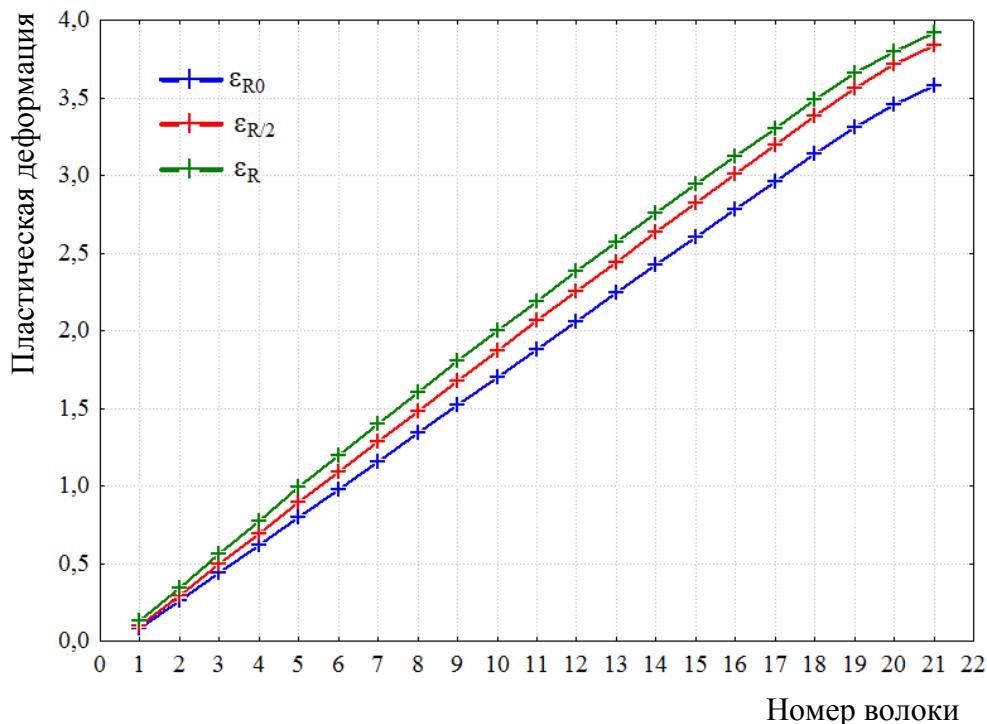


Рис. 6.10. Распределение суммарной пластической деформации в поперечном сечении проволоки 0,35НТ

Анализ рис. 6.10 показывает, что в тонкой проволоке 0,35НТ формируется значительная неравномерность деформации в поверхностных слоях тонкой проволоки.

### 6.3. Исследование влияния растяжения тонкой проволоки на ее прямолинейность

#### 6.3.1. Определение механических свойств тонкой проволоки

Оценка механических свойств тонкой проволоки и предварительное растяжение проволоки перед свивкой проводились на разрывной машине *INSTRON 5969*.

Образцы проволоки были изготовлены из тонкой латунированной проволоки марки 80К диаметром  $d = 0,35$  мм. Длина образца составляет  $l_0 = 600$  мм. Скорость растяжения  $V_p = 10$  мм/мин.



Таблица 6.4

### Определение механических характеристик

Номер опыта	Номер образца	$\sigma_y/\sigma_b$	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Модуль упругости, ГПа
0	1	0,9413	3128,98	2945,25	191,63
	2	0,9091	3133,98	2849,23	197,18
	3	0,8919	3156,06	2815,07	198,16
Среднее	–	0,9141	3139,67	2869,85	195,66

На основании табл. 6.4 принято выбрать диапазон величин усилия предварительного растяжения проволоки при дальнейших исследованиях, соответствующий уровню среднего значения  $\sigma_y/\sigma_b = 0,91$ .

#### 6.3.2. Проведение испытаний на осевое растяжение тонкой углеродистой проволоки

Испытания проведены согласно плану нагружения (табл. 6.5). Шесть образцов нагружаются до необходимого значения и используются для свивки. Три образца подтягиваются до необходимого уровня и используются для контроля изменения механических свойств после суточной выдержки на катушке. Контроль осуществляется путем испытания образцов на разрыв.

Таблица 6.5

#### План нагружения тонкой проволоки

Номер опыта/ номер повтора	Номер образца	$\sigma_{max}/\sigma_b$	Напряжение максимальное
1.1	1	0,6	1818,92
	2		1819,04
1.2	3		1818,97
	4		1818,95
1.3	5		1818,96
	6		1818,95
1.4	7		1818,93
	8		1818,96
	9		1818,95

Окончание табл. 6.5

Номер опыта/ номер повтора	Номер образца	$\sigma_{\max}/\sigma_B$	Напряжение максимальное
2.1	1	0,7	2130,79
	2		2130,79
2.2	3		2130,76
	4		2130,80
2.3	5		2130,73
	6		2130,77
2.4	7		2130,78
	8		2130,75
	9		2130,78
3.1	1	0,8	2442,59
	2		2442,55
3.2	3		2442,65
	4		2442,58
3.3	5		2442,64
	6		2442,55
3.4	7		2442,57
	8		2442,58
	9		2442,63
4.1	1	0,9	2754,39
	2		2754,36
4.2	3		2754,36
	4		2754,39
4.3	5		2754,37
	6		2754,43
4.4	7		2754,41
	8		2754,40
	9		2754,40
5.1	1	0,98	2962,33
	2		2962,30
5.2	3		2962,24
	4		2962,24
5.3	5		2962,30
	6		2962,27
5.4	7		2962,31
	8		2962,24
	9		2962,25

Оценка изменения прямолинейности проволок после осевого нагружения осуществлялась до и после выдержки на катушке в течение суток (рис. 6.10).

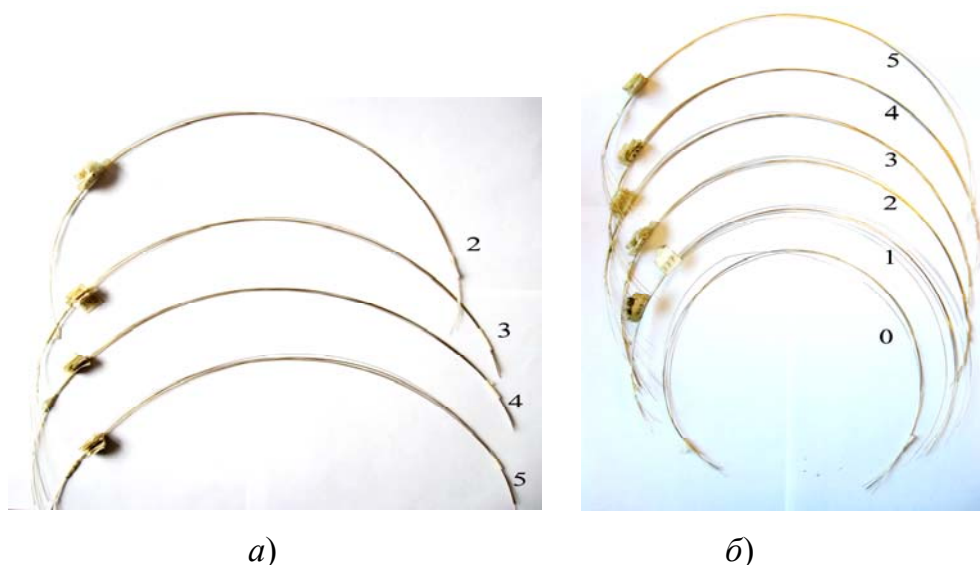


Рис. 6.11. Сравнение изменения прямолинейности проволоки:  
 а – после растяжения; б – после растяжения и выдержки на катушке 1 сутки

Примечание: 0 – проволока без растяжения; 1 – растяжение с максимальным усилием  $\sigma_{\max} = 0,6\sigma_b$ ; 2 –  $\sigma_{\max} = 0,7\sigma_b$ ; 3 –  $\sigma_{\max} = 0,8\sigma_b$ ; 4 –  $\sigma_{\max} = 0,9\sigma_b$ ; 5 –  $\sigma_{\max} = 0,98\sigma_b$ .

Качественное сравнение прямолинейности проволок, изображенных на рис. 6.11 позволяет сделать заключение о том, что рост растягивающих нагрузок в тонкой проволоке повышает ее прямолинейность после снятия нагрузки.

Количественная оценка прямолинейности проводилась согласно схеме, приведенной на рис. 6.12.

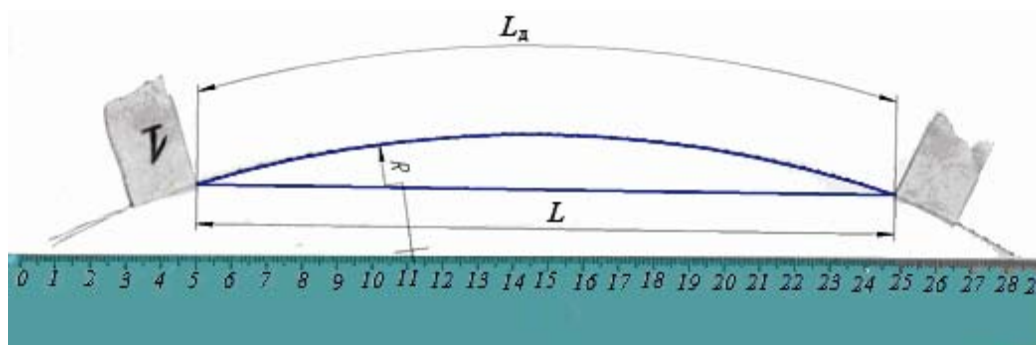


Рис. 6.12. Схема измерения параметров отклонения от прямолинейности проволоки и свитой проволоки

### 6.3.3. Расчет отклонения от прямолинейности

Расчет отклонения от прямолинейности  $\Delta$  проволоки определяли по формуле (6.4):

$$\Delta = R - \sqrt{R^2 - (L/2)^2}. \quad (6.6)$$

Результаты расчета представлены на рис. 6.13 в виде графиков относительного изменения прямолинейности  $\Delta_0/\Delta_i$  проволоки без нагружения  $\Delta_0$  к прямолинейности нагруженных проволок  $\Delta_i$  в зависимости от величины усилия предварительного осевого нагружения проволоки  $\sigma_{\max}$ , отнесенного к пределу прочности  $\sigma_b$ .

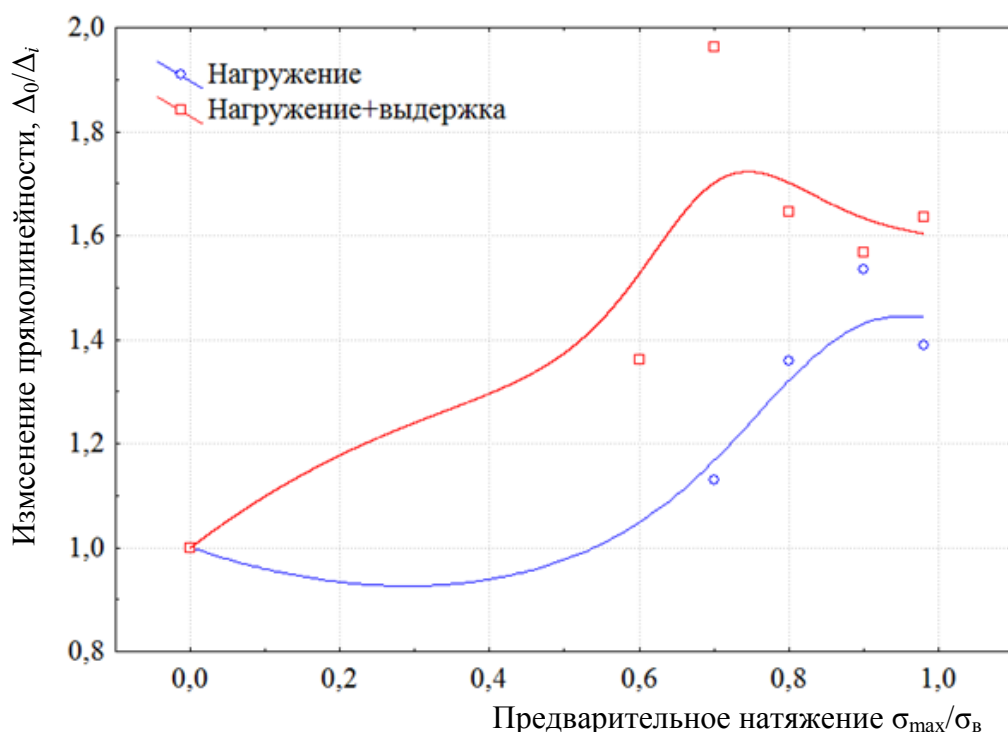


Рис. 6.13. Изменение прямолинейности проволоки в зависимости от степени предварительного осевого нагружения и времени выдержки на катушке

Анализ графиков на рис. 6.13 показывает, что растяжение проволоки повышает ее прямолинейность в диапазоне нагружения 70–90 % от разрывного усилия. После суточной выдержки на катушке максимальное улучшение прямолинейности проволоки наблюдается у проволок, нагруженных с усилием 70 % от разрывного усилия.

После выдержки на катушке проволоку испытывали на разрыв с определением основных механических параметров. Результаты представлены в табл. 6.6.

Таблица 6.6

**Механические параметры проволоки  
после выдержки на катушке**

Номер образца	Предварительная нагрузка $\sigma_{\max}/\sigma_B$	$\sigma_y/\sigma_B$	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Модуль упругости	Относительное удлинение при разрыве, %
0	1	0,766	3037,26	2326,25	183,15	3,00
1	0,6	0,815	3088,40	2517,77	185,37	2,90
2	0,7	0,805	3078,31	2477,72	187,36	2,86
3	0,8	0,845	3096,02	2614,72	187,11	2,83
4	0,9	0,923	3016,72	2783,85	184,41	2,30
5	0,98	0,929	3078,02	2828,56	180,77	2,15

Анализ табл. 6.6 показывает, что с увеличением степени предварительного нагружения проволоки происходит снижение ее пластических свойств: увеличение предела текучести и снижение относительного удлинения при разрыве.

#### **6.4. Разработка высокоэффективных способов волочения проволоки**

На основе проведенных исследований разработаны нижеследующие высокоэффективные способы волочения проволоки.

##### **6.4.1. Маршрут волочения с дополнительной предчистовой волокой**

Предназначен для волочения проволоки 0,35НТ из стали 80 со скоростью волочения 10 м/с.

В маршрут волочения введена дополнительная предчистовая волока, образующая сдвоенную волоку совместно с волокой  $d = 0,35$  мм на последнем 21-м переходе (рис. 6.14). Маршрут позволяет снизить неравномерности деформации в проволоке.

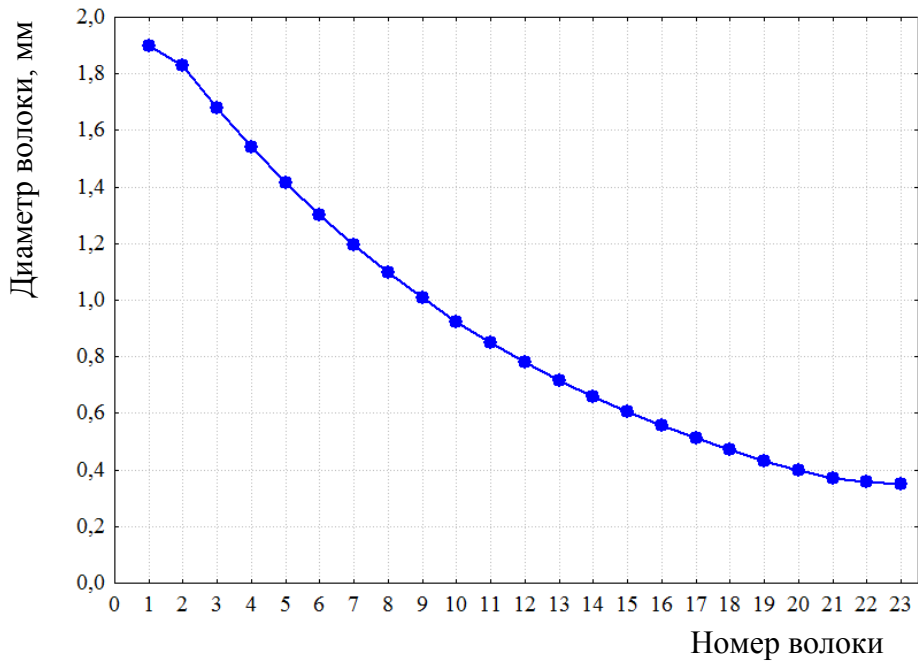


Рис. 6.14. Изменение диаметра проволоки в маршруте волочения тонкой проволоки 0,35HT

Результаты расчета температуры поверхности проволоки в исследуемом маршруте волочения (см. рис. 6.14) представлены на рис. 6.15.

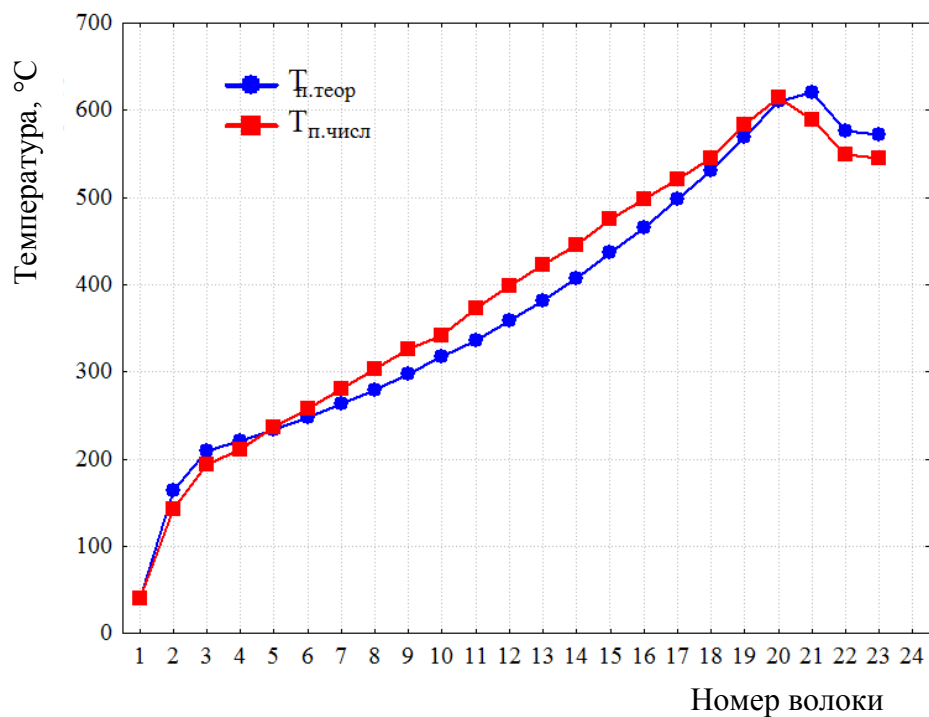


Рис. 6.15. Изменение расчетных значений температуры поверхности проволоки в маршруте волочения тонкой проволоки 0,35HT

Анализ значений температуры поверхности показывает на приблизительно одинаковый уровень температур в новом маршруте.

На рис. 6.16 представлены графики распределения деформации в сечении проволоки для двух последних волок двух вариантов маршрутов волочения.

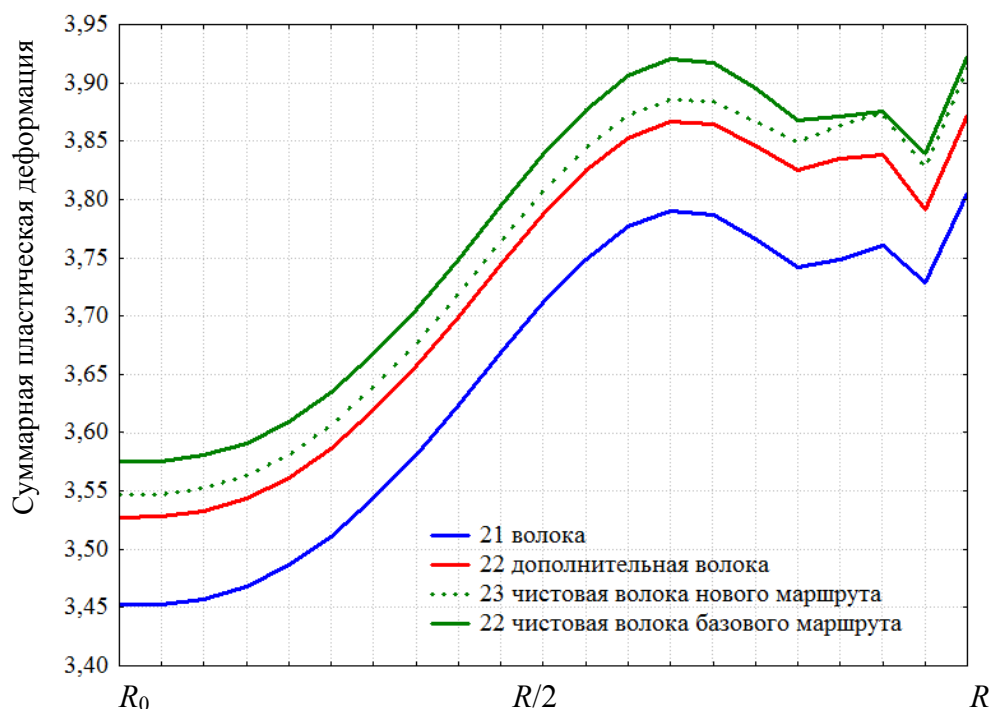


Рис. 6.16. Изменение распределения пластической деформации в поперечном сечении проволоки до и после введения дополнительной проволоки

Анализ рис. 6.16 показывает, что значение коэффициента неравномерности  $K_{\sigma}$  в тонкой проволоке после введения дополнительной проволоки в маршрут волочения снизилось с 1,5228 до 1,4188.

После проведения численного расчета для определения влияния дополнительной проволоки на пластические свойства тонкой проволоки были проведены механические испытания на осевое растяжение проволоки, изготовленной по предложенному маршруту волочения с дополнительной проволокой.

Отобранные образцы тонкой проволоки с нового, а также с исходного маршрутов испытывались на осевое растяжение. Данные испытаний сведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

**Данные лабораторных испытаний механических параметров тонкой проволоки**

Маркировка образцов	Предел прочности $\sigma_{в}$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{у}$ , МПа	$\sigma_{у}/\sigma_{в}$ , %	Удлинение $A_5$ , %	Модуль упругости $E$ , ГПа	Реверсивные скручивания
<i>Образцы тонкой проволоки исходного маршрута</i>						
Партия № 1	2945,4	2720,3	92,39	2,26	196543	54,67
Партия № 2	2998,96	2641,2	88,07	2,65	202266	50,28
Среднее	2983,93	2658,72	89,12	2,54	200600	51,69
<i>Образцы тонкой проволоки с маршрута с дополнительной волокой</i>						
Партия № 1	2982,15	2701,97	90,57	2,40	201024,67	52,87
Партия № 2	2949,23	2685,03	91,04	2,34	197523,33	54,00
Среднее	2976,67	2699,15	90,65	2,39	200441,11	53,06

Анализ табл. 6.7 показывает, что незначительное влияние введения дополнительной волоки на пластические свойства тонкой проволоки можно объяснить незначительным изменением коэффициента  $K_{\sigma}$  с 1,5228 до 1,4188.

**6.4.2. Маршрут волочения с уменьшенным числом волок**

С целью повышения равномерности деформации в проволоке при тонком волочении из исходного маршрута волочения исключили первую волоку. Это обеспечило возможность перераспределения вытяжек (обжатий) по маршруту волочения для повышения их значений в первой половине маршрута волочения (рис. 6.17). При этом все кинематические параметры маршрута волочения остались в допустимых пределах.

На рис. 6.18 и 6.19 представлены результаты численного расчета некоторых параметров нового маршрута. Сравнение рис. 6.15 и 6.18 показывает, что уменьшение количества волок в маршруте волочения существенно не изменяет температуру поверхности проволоки при волочении. Сравнение рис. 6.16 и 6.19 показывает, что оптимизированный маршрут отличается снижением неравномерности деформации. Значение коэффициента неравномерности деформации  $K_{\sigma}$  для исходного варианта маршрута волочения 1,5228, для маршрута волочения с уменьшенным числом волок –  $K_{\sigma} = 1,2137$ .



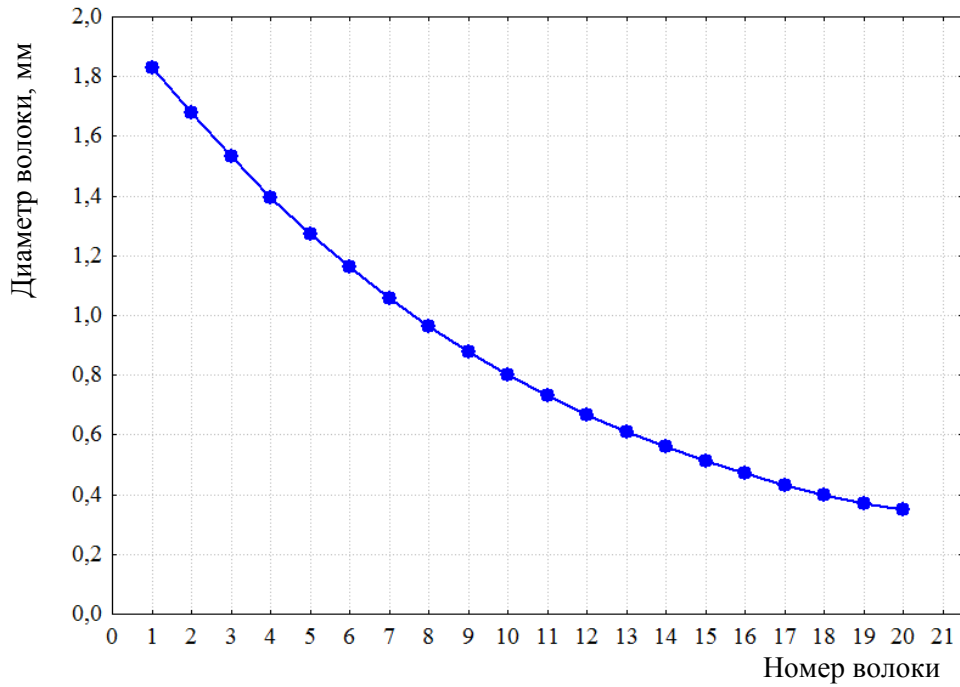


Рис. 6.17. Изменение диаметра проволоки в маршруте волочения тонкой проволоки 0,35НТ

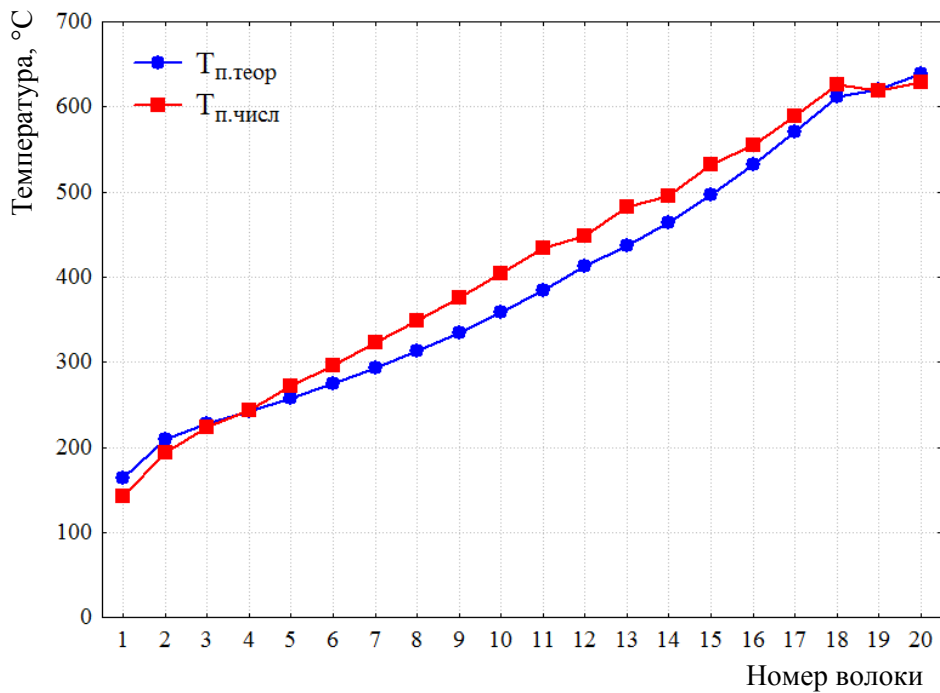


Рис. 6.18. Изменение температур поверхности проволоки по переходам волочения в маршруте тонкого волочения для проволоки 0,35НТ с уменьшенным числом волок

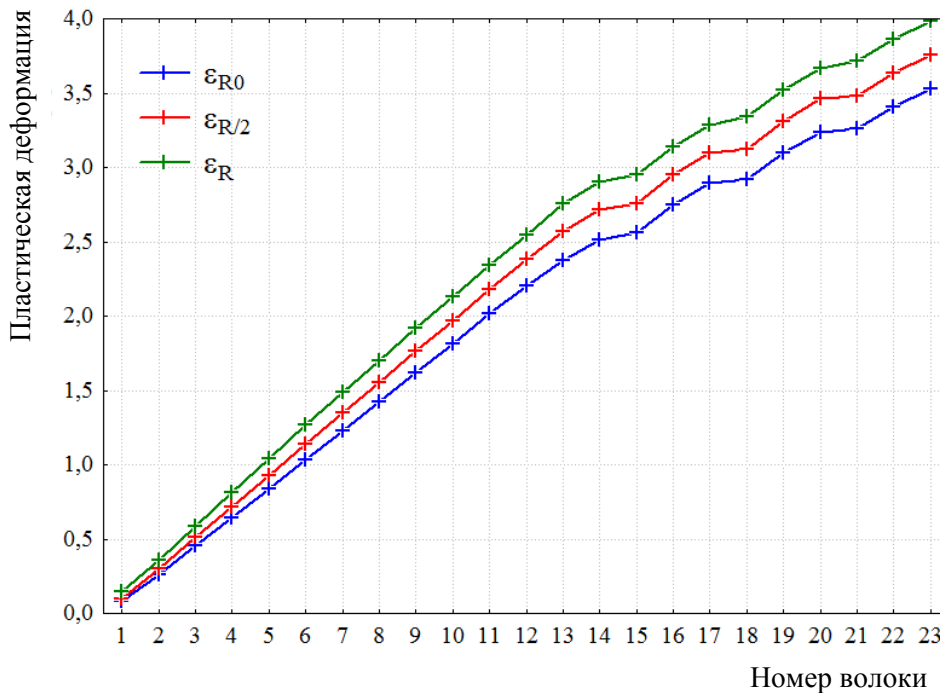


Рис. 6.19. Распределение суммарной пластической деформации в сечении проволоки с уменьшенным числом волок

Результаты лабораторных испытаний тонкой проволоки, изготовленной по маршруту волочения с уменьшенным количеством волок, представлены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

**Результаты лабораторных испытаний тонкой проволоки**

Маркировка образцов	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_y$ , МПа	$\sigma_y/\sigma_B$ , %	Удлинение при растяжении $A_t$ , %	Модуль упругости $E$ , ГПа	Реверсивные скручивания
<i>Проволока с нового маршрута, количество испытаний – 10</i>						
Среднее	3084,5	2892,5	93,74	2,177	213,240	53,20
<i>Проволока с базового маршрута, количество испытаний – 10</i>						
Среднее	3071,0	28153	91,67	2,296	204,458	53,4

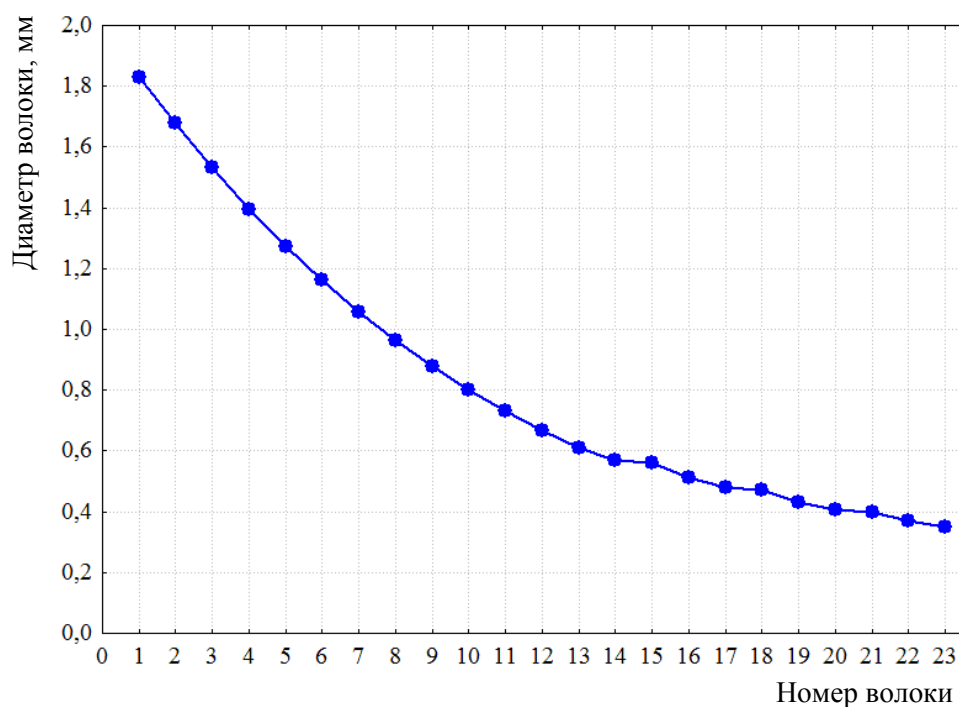
Результаты лабораторных испытаний тонкой проволоки не позволяют сделать однозначный вывод о изменении ее пластических, так как соотношение  $\sigma_y/\sigma_B$  в тонкой проволоке в новом маршруте волочения выше по сравнению с тонкой проволокой по исходным маршрута волочения на 2 %, что свидетельствует о снижении пласти-

ческих свойств тонкой проволоки в оптимизированном маршруте волочения. Сравнивая результаты лабораторных испытаний тонкой проволоки нового маршрута волочения с результатами тонкой проволоки, изготовленной по базовому маршруту волочения, можно отметить, что снижение пластичности тонкой проволоки, изготовленной по опытному маршруту, находится в допустимых пределах и незначительно влияет на ее механические характеристики.

Использование в маршруте волочения уменьшенного числа волок позволит снизить материальные и временные затраты на обслуживание маршрута волочения, без изменения механических характеристик тонкой проволоки.

### ***6.4.3. Маршрут тонкого волочения с тремя дополнительными волокнами***

В маршрут волочения с уменьшенным числом волок вводятся три дополнительные волокна (рис. 6.20) под номерами 15, 18, 21.



*Рис. 6.20.* Изменение диаметра проволоки в маршруте волочения тонкой проволоки 0,35НТ

Результаты расчета температуры поверхности проволоки и ее неравномерности деформации представлены на рис. 6.21 и 6.22.

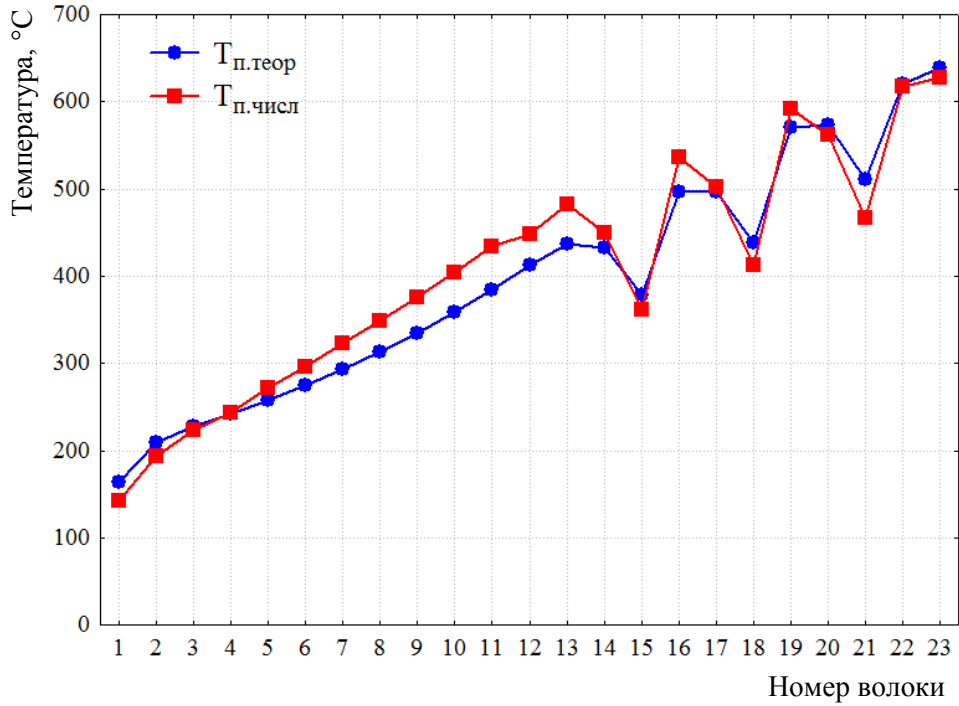


Рис. 6.21. Изменение температур поверхности проволоки в маршруте волочения для проволоки 0,35HT с тремя дополнительными волокнами

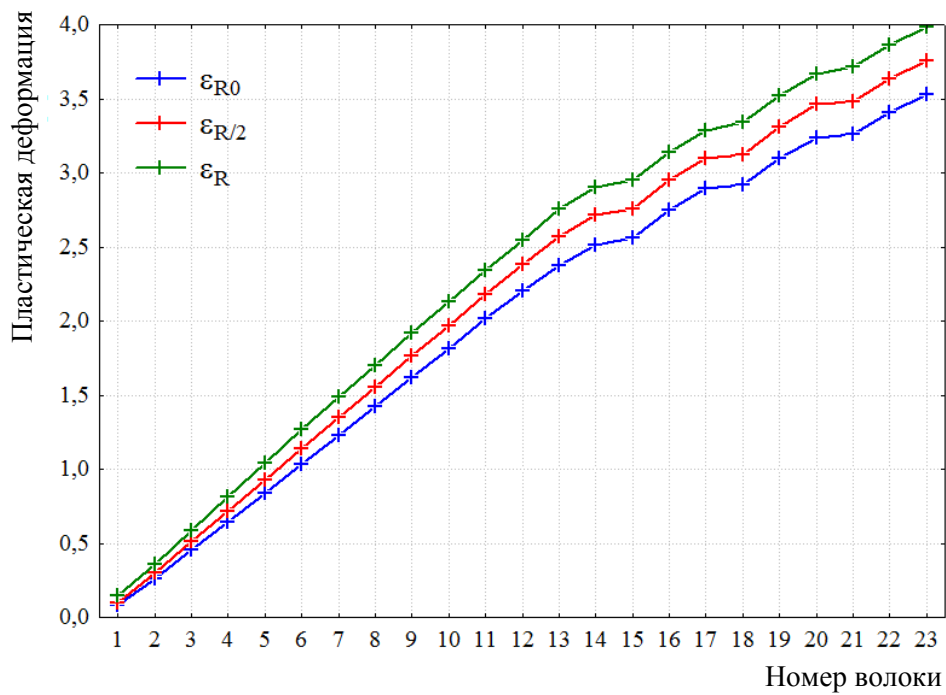


Рис. 6.22. Распределение суммарной пластической деформации в сечении проволоки с тремя дополнительными волокнами

Анализ рис. 6.21 и 6.22 показывает, что степень неравномерности в предложенном маршруте с тремя дополнительными волокнами снизилась до  $K_{\sigma} = 0,9956$ . Максимальная температура поверхности проволоки осталась в оптимизированном маршруте и сохранилась на уровне серийного маршрута волочения (рис. 6.15 и 6.22).

После проведения численного расчета и определения влияния дополнительной проволоки на пластические свойства тонкой проволоки, были проведены механические испытания на осевое растяжение проволоки, изготовленной по предложенному маршруту волочения с тремя дополнительными волокнами.

Отобранные образцы тонкой проволоки с предложенного, а также с базового маршрутов испытывались на осевое растяжение. Данные испытаний сведены в табл. 6.9.

Таблица 6.9

**Результаты лабораторных испытаний тонкой проволоки**

Маркировка образцов	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_y$ , МПа	$\sigma_y/\sigma_b$ , %	Удлинение при растяжении $A_t$ , %	Модуль упругости $E$ , ГПа	Реверсивные скручивания
Партия № 1 (10 испытаний)						
Среднее	2992,59	2707,03	90,46	2,349	197,73	54,4
Партия № 2 (10 испытаний)						
Среднее	2995,48	2795,96	93,34	2,278	197,91	54,7
Партия № 3 (10 испытаний)						
Среднее	3022,05	2828,23	93,59	2,234	199,66	54,4
Партия № 4 (5 испытаний)						
Среднее	2979,8	2852,03	95,71	2,225	197,45	55,3
Базовый маршрут волочения (5 испытаний)						
Среднее	2987,9	2860,1	95,72	2,189	196,43	54,5

Анализ таблицы показывает, что предложенный маршрут волочения с тремя дополнительными волокнами позволил увеличить пластические характеристики тонкой проволоки в среднем по всем партиям: соотношение  $\sigma_y/\sigma_b$  снизилось на 4 %, а удлинение тонкой проволоки при растяжении  $A_t$  увеличилось на 5 %.

Сводный анализ по равномерности деформации для описанных выше маршрутов волочения представлен на рис. 6.23. Из этого рисунка

следует, что в соответствии с деформационным критерием оптимизации маршрута волочения наиболее оптимальным маршрутом следует признать маршрут волочения на 20 переходов с тремя дополнительными волокнами.

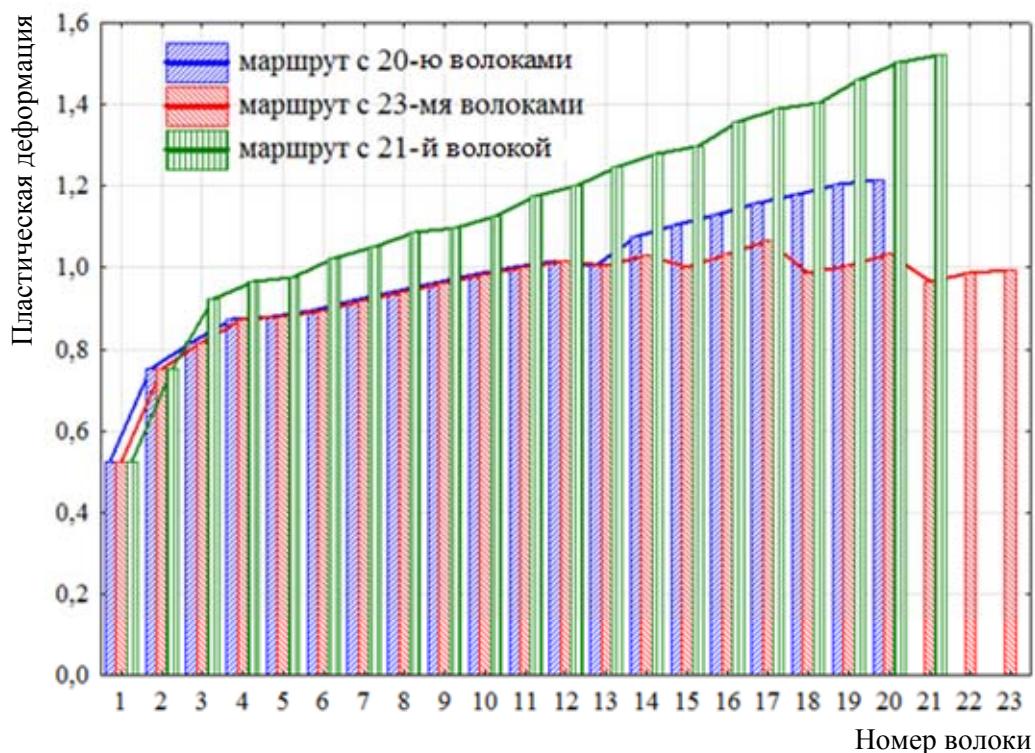


Рис. 6.23. Изменение деформационного критерия  $K_\sigma$  в исследуемых маршрутах волочения

На основе анализа маршрута волочения тонкой проволоки диаметром 0,35НТ предложены три варианта маршрута волочения:

1. Введение в базовый маршрут волочения дополнительной проволоки для уменьшения величины вытяжек в последних двух волокнах не привело к существенному увеличению пластических свойств тонкой проволоки.

2. Уменьшение общего количества волок до 20-ти за счет увеличенных вытяжек на первых 12 волокнах показало незначительные изменения пластических свойств тонкой проволоки в допустимых пределах. Базовый маршрут имеет  $K_\sigma = 1,5228$ , предложенный маршрут на 20 переходов имеет  $K_\sigma = 1,2137$ . Данный маршрут волочения может использоваться для снижения материальных и временных затрат по настройке и обслуживанию станов тонкого волочения.

3. Маршрут волочения тонкой проволоки  $0,35HT$  с увеличенными вытяжками в первых 12-ти волоках и уменьшенными вытяжками в конце маршрута волочения за счет использования трех дополнительных волок показал снижение неравномерности деформации по сечению проволоки ( $K_{\sigma} = 0,9956$ ) и улучшение всех пластических характеристик тонкой проволоки в среднем на 5 %.

Изменение максимальной температуры поверхности проволоки в процессе волочения по трем вариантам было не существенным, так как условия трения в волочильном инструменте и скорость волочения проволоки на последнем переходе не изменялись.

## **ГЛАВА 7**

### **АНАЛИЗ ИСХОДНОГО УРОВНЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА**

В процессе свивки металлокорда проволока подвергается крутящим и изгибающим напряжениям. Это в совокупности с напряженно-деформированным состоянием проволоки в процессах волочения и свивки, а также с уровнем внутренних остаточных напряжений, возникающих в проволоке после волочения, делает невозможным прогнозирование изменения свойств проволоки и корда известными расчетными способами. Для корректного расчета свивки металлокорда требуется точный прогноз обрывности проволоки и уровень внутренних остаточных напряжений, возникающих при волочении. На ранних этапах исследований использовались методы аналитического расчета, в том числе с помощью ЭВМ.

На данный момент существует несколько методик аналитического расчета технических и механических характеристик проволоки и металлокорда, которые описаны в работах [57] и [58]. Суть методик заключается в анализе смещения волокон проволоки при свивке металлокорда и получении численных значений предела текучести проволоки, степени упрочнения проволоки при свивке, крутящего и изгибающего момента. Геометрические характеристики металлокорда выводятся из условия касания эллипсов.

Несмотря на наличие расчетных методик и различных способов подхода, имеющиеся варианты расчетов не дают точного результата при относительно больших деформациях проволоки. Как известно, различные конструкции металлокорда, а также способы свивки требуют к себе индивидуального подхода, а значит, аналитические методы не всегда будут подходить для расчетов, так как невозможно их унифицировать. Поэтому на данном этапе необходимо более глубокое изучение данной проблемы, так как уровень исследований в этом направлении относительно низкий.

#### **7.1. Методы аналитического расчета процесса свивки металлокорда**

Имеющиеся аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния проволоки при свивке металлокорда эффективно и достаточно точно работают в упругой зоне, т. е. при наличии только



упругой деформации проволоки. Такой подход можно использовать только при расчетах свивки определенных типов корда с большим шагом свивки и малым диаметром корда, так как предполагается, что возникающая в процессе свивки пластическая деформация незначительна и ею можно пренебречь. Однако известно, что после расплетения металлокорда проволока сохраняет форму спирали, что свидетельствует о значительных пластических деформациях проволоки в процессе свивки металлокорда [57].

Схема для расчетов согласно работе [58] представлена на рис. 7.1.

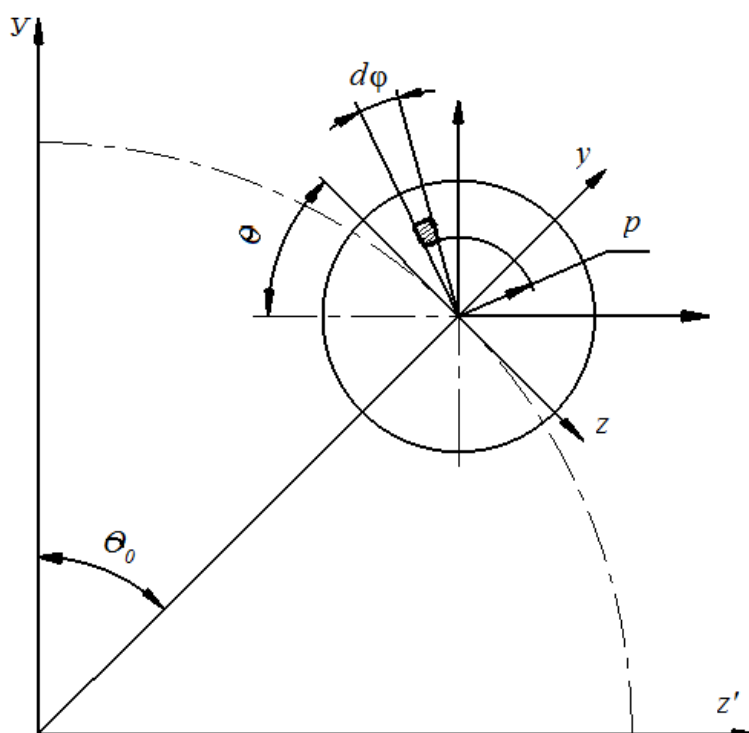


Рис. 7.1. Схема смещения волокон проволок

Для аналитических расчетов необходимо принимать ряд допущений: проволока при свивке испытывает только изгибающую деформацию, т. е. кручением пренебрегают. Следовательно, условием наличия пластических деформаций будет:

$$\varepsilon_{1j} E \geq \sigma_T; \quad (7.1)$$

$$\varepsilon_{1j} = \frac{r_i}{r_{срi}} (\sin \alpha_i^2), \quad (7.2)$$

где  $\varepsilon_{1j}$  – относительное удлинение в крайнем волокне при свивке проволок в прядь;  $E$  – модуль упругости материала проволоки;  $r_i$  – радиус

поперечного сечения проволоки;  $r_{срi}$  – средний радиус повива проволоки;  $\alpha_i$  – угол свивки проволок в прядь.

При аналитическом анализе упрочнением проволоки при свивке пренебрегают.

Учитывая все упрощения и допущения, конечные формулы для определения изгибающих моментов имеют довольно громоздкую форму в интегральном виде. Поэтому расчеты целесообразно проводить с помощью ЭВМ, и даже это не дает окончательный результат. Необходимо проводить анализ полученных решений и сводить их в таблицу, а также строить по полученным значениям графики для удобства пользования. Все эти шаги дополнительно усложняют процесс решения.

Для определения крутящего момента, возникающего при свивке металлокорда, используют решения уравнений для изгибающих моментов совместно с диаграммами технологических крутящих моментов. В работе [58] представлена методика составления и решения уравнений для изгибающих и крутящих моментов в пряди металлокорда для определенных конструкций, что существенно ограничивает применение данных уравнений для других типов и конструкций корда.

Существует методика, описанная в работе [59], согласно которой отдельные проволоки в металлокорде представлены в виде спиралей, обернутых вокруг оси металлокорда. При этом кривизна спирали ( $K$ ) представляется как изменение направления вектора  $p$  вокруг вектора бинормали  $b$ , а изменение направления бинормали определяет величину кручения  $T$  вокруг вектора касательной  $p$  в сторону направления развития спирали (рис. 7.2).

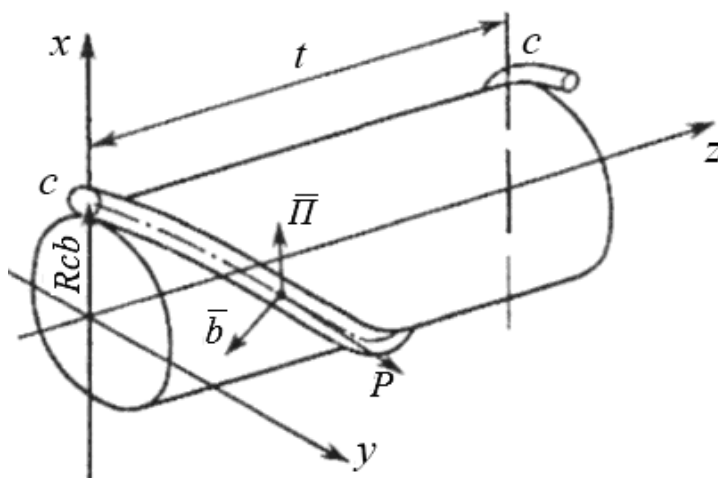


Рис. 7.2. Аналитический анализ свивки металлокорда

Согласно рис. 7.2 значение величины кручения может быть найдено по следующей формуле (7.3):

$$T = \frac{t}{2\pi R_{\text{св}}^2 + \frac{t^2}{2\pi}}, \quad (7.3)$$

где  $t$  – шаг свивки, мм;  $R_{\text{св}}$  – радиус свивки металлокорда, мм.

Однако следует отметить, что данная формула работает только для машин двойного кручения без дополнительной подкрутки проволоки в ротационной размотке, что позволяет сделать вывод о сильной ограниченности области применения аналитических зависимостей. Максимальные значения деформаций будут иметь место на поверхности проволоки.

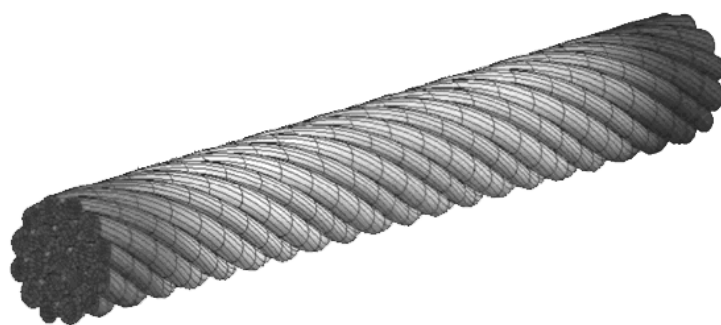
Таким образом, для корректного решения задачи необходимо для каждого случая подбирать свою методику анализа крутящих и изгибающих моментов.

## **7.2. Обзор способов численного моделирования процесса свивки металлокорда. Использование метода конечных элементов для моделирования свивки металлокорда**

Использование численного моделирования, основанного на методе конечных элементов, позволяет получить общую картину напряжений и деформаций проволоки в процессе свивки в металлокорд с высокой точностью расчетов. При таком подходе расчеты целесообразно выполнять при помощи ЭВМ. Главными задачами при численном моделировании является правильное построение модели с точки зрения геометрии, а также выбор оптимального типа сетки конечных элементов. От выбранного типа конечного элемента, его геометрической формы будет зависеть точность и длительность расчетов, а также адекватность построенной модели. Также важно правильно определить и задать граничные условия модели. В процессе расчета процесса недопустимо искажение геометрических размеров конечного элемента более 30 %. Этого возможно добиться при расположении элементов сетки вдоль оси проволоки и параллельно друг другу. Данная особенность построения сетки была представлена в работе [60].

После выбора типа конечного элемента сетки и ее построения задаются внутренние и внешние воздействия, граничные и начальные условия, такие, как начальная температура проволоки, материал проволок, коэффициент контактного и внутреннего трения, скорость деформации (свивки) и другие аспекты, направление и скорость скручивания проволоки.

На данный момент имеются работы, в которых определены механические характеристики кордов и канатов. Однако способ определения данных характеристик носит характер стандартного испытания на разрыв при осевом растяжении всей конструкции уже геометрически свитого металлокорда. Такие работы не дают представления о изменении НДС проволоки в процессе свивки. Основным недостатком такого подхода при моделировании является построение геометрической модели корда уже в готовом свитом виде (рис. 7.3). В такой модели нельзя проследить изменение внутренних напряжений в каждом слое проволок непосредственно в процессе свивки в металлокорд. Поэтому для более точного определения необходимых характеристик металлокорда необходимо осуществить моделирование непосредственно свивки проволок в металлокорд.



*Рис. 7.3.* Геометрическая численная модель корда

На рис. 7.3 представлен пример численного моделирования процесса осевого растяжения каната. Моделирование этого процесса аналогично испытаниям для определения агрегатной прочности каната при растяжении [61]. Численное моделирование, в отличие от аналитических способов, с достаточной точностью показывает картину напряжений и деформаций не только в упругой, но и в пластической зоне деформации. Это является основным преимуществом над аналитическими расчетами.

Численное моделирование при достаточном уровне адекватности модели дает возможность проводить численные эксперименты

относительно быстро по сравнению с натурным экспериментом. Дополнительное преимущество численного моделирования над экспериментом заключается в возможности широко варьировать диапазонами изменения исследуемых факторов. При проведении натуральных экспериментальных исследований достаточно тяжело обеспечить проведение абсолютно идентичных условий эксперимента. Это связано с высокой долей погрешности, которую оказывают внешние факторы, способные повлиять на результаты эксперимента. Также сложность состоит в ограничении по увеличению числа варьируемых параметров и диапазона их изменения из-за значительного увеличения числа опытов в эксперименте.

Учитывая то, что для каждого эксперимента необходимо запускать оборудование, потребляющее энергию, а также использовать в экспериментах дорогостоящие материалы, стоимость экспериментальных исследований может значительно превышать стоимость приобретения программных пакетов для численного моделирования с использованием ЭВМ.

Численная модель процесса свивки позволяет представить распределения напряжений и деформаций в виде цветокодированных полей. На рис. 7.4 представлены результаты численного расчета эквивалентной деформации свивки  $\varepsilon_{св}$  [76].

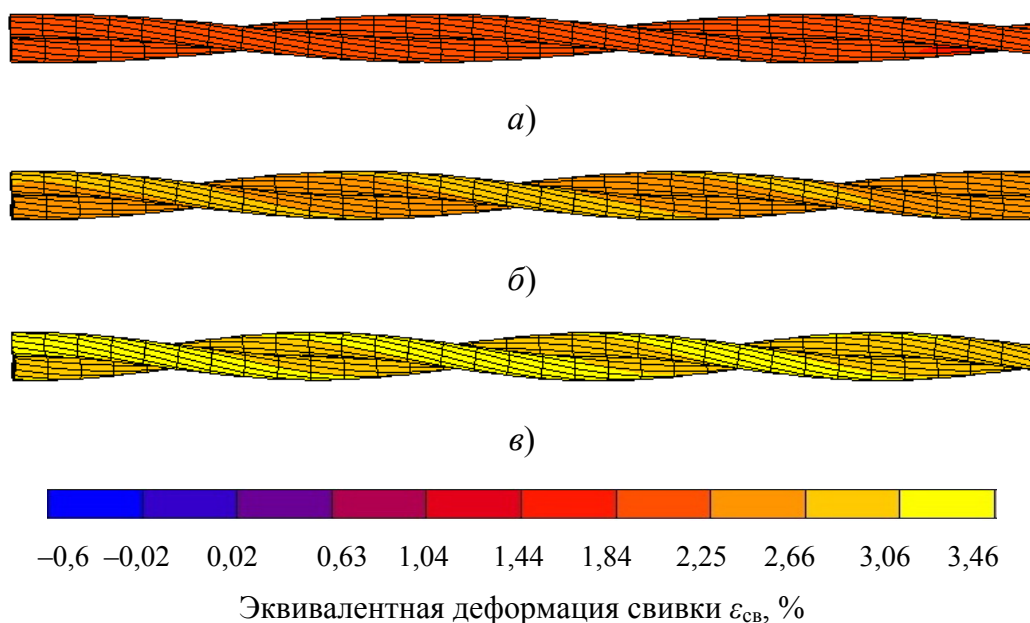


Рис. 7.4. Сравнение деформированного состояния металлокorda. Этапы свивки:  
*a* – шаг свивки 16; *б* – шаг свивки 12; *в* – шаг свивки 8

В процессе свивки в каждом элементе проволоки происходит изменение деформаций кручения, изгиба и осевого растяжения. В связи со сложностью определения деформированного состояния суммарное действие всех деформаций для удобства и упрощения дальнейшего анализа необходимо привести к виду простого деформированного состояния. Самым распространенным и простым в определении является деформированное состояние проволоки при испытаниях на осевое растяжение. Поэтому суммарную деформацию проволоки в процессе свивки приводят к виду эквивалентной деформации при простом деформированном состоянии. Приведенная к простому виду деформация называется эквивалентной деформацией свивки  $\varepsilon_{св}$ .

Любая численная модель требует экспериментального подтверждения адекватности полученных результатов. После достижения предполагаемого результата необходимо провести опыты для подтверждения результатов численной модели. В случае допустимого соответствия результатов моделирования с результатами эксперимента адекватность и работоспособность численной модели будет доказана.

Экспериментальная проверка численной модели свивки металлокорда проводилась в лабораторных условиях на стенде по имитации условий свивки.

Лабораторный стенд для имитации условий свивки позволяет реализовывать деформации, испытываемые проволокой в процессе свивки в металлокорд. Стенд, в частности, позволяет имитировать режимы деформации проволоки на каждом отдельном этапе свивки металлокорда. При этом представляется возможность воспроизводить критические условия деформации, приводящие к разрушению проволоки.

На сегодняшний день существует несколько основных путей изучения области свивки металлокорда: аналитический расчет, экспериментальные исследования и численное моделирование. В последнее время наибольший вес приобретает именно моделирование, так как оно лишено недостатков остальных методов и имеет значительные преимущества по сравнению с ними. Основными преимуществами являются: повышенная точность расчетов, возможность доступного представления результатов по всему сечению проволоки и металлокорда, учет конструкции, диаметра, шага свивки и других технических характеристик металлокорда, относительно низкие затраты по сравнению с экспериментальными исследованиями.

## ГЛАВА 8

# ЗАКОНЫ УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА

В процессе пластической деформации металла происходит изменение сопротивления пластической деформации металла. В большинстве процессов обработки металлов давлением (ОМД) происходит увеличение сопротивления пластической деформации, сопровождаемое упрочнением металла. В процессе упрочнения происходит изменение механических свойств деформированного металла в сторону увеличения пределов прочности и текучести и снижения пластических свойств металла.

Законы изменения сопротивления пластической деформации для каждого процесса ОМД с учетом его особенностей выражаются кривыми упрочнения. Кривые упрочнения дают зависимость величины напряжения, действующего в пластически деформируемом теле при линейном напряженном состоянии, от величины деформации.

Так как напряжения, вызывающие пластическую деформацию, зависят от многих факторов, то кривые упрочнения для каждого металла и типа деформации следует устанавливать применительно к конкретным температурно-скоростным условиям деформирования.

Меняющиеся в зависимости от величины и скорости деформации напряжения, вызывающие пластическую деформацию при линейном напряженном состоянии при данных температурно-скоростных условиях деформирования, называются напряжением текучести или сопротивлением пластической деформации и обозначаются обычно  $\sigma_s$ .

Для экспериментального определения  $\sigma_s$  необходимо создать такие условия деформирования, при которых деформация равномерно распределена по деформируемой части тела или заготовки, а напряженное состояние линейное. Наиболее подходящими для построения кривых упрочнения являются данные, получаемые при испытании на растяжение или сжатия. Однако такие испытания не подходят для свивки металлокорда, так как при свивке имеет место упругопластический изгиб и кручение.

Наиболее интенсивное увеличение  $\sigma_s$  происходит в начальной стадии деформирования, а при некоторых значениях степени деформации дальнейшая деформация не вызывает значительного увеличения напряжения текучести. Данный пик имеет название порог упрочнения [64].

## 8.1. Обоснование выбора закона упрочнения по отношению к кручению и изгибу

Существуют кривые упрочнения трех родов: кривая упрочнения первого рода, в которой выражена зависимость напряжения текучести от относительного удлинения образца; кривая упрочнения второго рода, в которой выражена зависимость напряжения текучести от относительного сужения образца и кривая упрочнения третьего рода, в которой выражена зависимость напряжения текучести от истинной деформации образца. Стоит отметить, что показатели истинной деформации имеют достаточную точность в относительно узком диапазоне степени деформации  $\varepsilon = 0,01-0,12$ . В связи с этим данную кривую упрочнения используют редко.

Кривая упрочнения первого рода представлена на рис. 8.1.

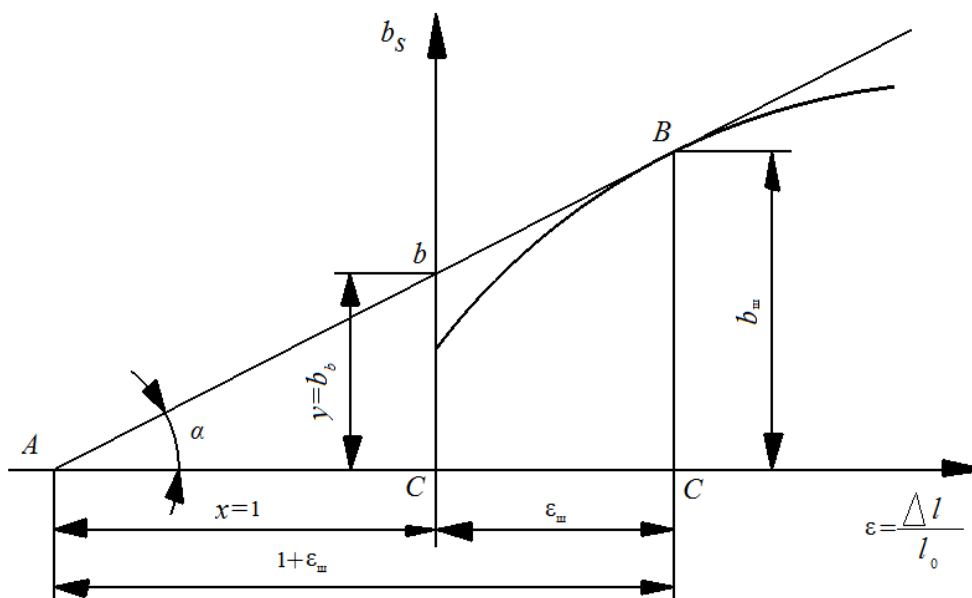


Рис. 8.1. Кривая упрочнения первого рода

Зависимость напряжения текучести от деформации носит сложный нелинейный характер. Для поиска зависимостей, описывающих кривую упрочнения, удобно использовать линейную аппроксимацию данной кривой. В качестве прямой, приближенно характеризующей изменение напряжения текучести в зависимости от деформации, принимают касательную, проведенную к кривой упрочнения в точке, соответствующей окончанию этапа равномерного удлинения при растяжении образца проволоки. Этому моменту соответствует максимум на кривой упрочнения.



При растяжении образца проволоки поперечное сечение проволоки будет уменьшаться с увеличением доли растяжения и пластической деформации. В процессе растяжения упрочнение способствует росту усилия, в то время как уменьшение площади поперечного сечения способствует уменьшению усилия. На этапе линейного растяжения велико влияние упрочнения на увеличение усилия.

Кривая упрочнения второго рода представлена на рис. 8.2.

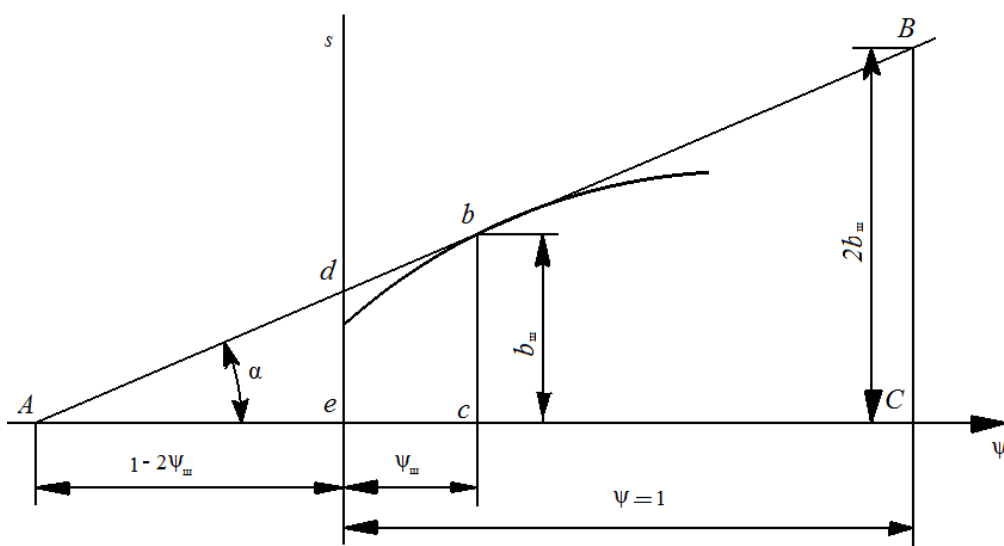


Рис. 8.2. Кривая упрочнения второго рода

Кривыми упрочнения можно пользоваться для анализа характера и степени влияния упрочнения на величину необходимых для деформации усилий при обработке металлов давлением, в частности, волочения проволоки и свивки проволоки в металлокорд.

Для облегчения аналитического решения задачи по установлению влияния упрочнения на величину усилий деформирования и на распределение напряжений в деформируемом теле необходимо кривую упрочнения представлять в виде некоторых выражений, которые связывают напряжение текучести и степень деформации.

Для этой цели проводят серию испытаний на растяжение тонкой проволоки. Испытания проводятся по ГОСТ 10446–80 и для образцов диаметром менее 2 мм, при этом измеряют относительное сужение, отклонение при измерении должно составлять не более 1 % [65].

Однако в условиях свивки металлокорда проволоки подвергаются в основном кручению и изгибу, поэтому целесообразно учитывать результаты испытаний проволоки на скручивание. Испытания на скручивание проводят согласно ГОСТ 1545–80 на оборудовании, удовлетворяющем специальным требованиям. Губки захвата должны

иметь твердость не менее 62 HRCэ (61 HRC). На губках захватов допускается наличие насечки, не вызывающей разрушения образца в захватах машины. Захваты машины должны быть соосны. Отклонение от соосности не должно превышать 1 мм при расстоянии между захватами 100 мм. Один из захватов машины должен вращаться вокруг оси, не перемещаясь вдоль осевой линии, другой – иметь только продольное перемещение [66].

К образцу проволоки должно быть приложено предварительное натяжение, величина которого не должна превышать 2 % от разрывного усилия. Если разрушение образца произошло в захватах машины или вблизи захватов (на расстоянии менее  $2d$ ) и образец при этом не выдержал требуемое число скручиваний, то испытание должно быть повторено на другом образце.

За результат испытания принимается число скручиваний, которое выдерживает образец до разрушения или без разрушения до заданного числа скручиваний. Для оценки механических свойств проволоки необходимо знать количество скручиваний вокруг оси проволоки до разрушения образца.

Также для определения пределов текучести проволоки можно использовать данные, полученные из испытания на кручение, выполняемые по ГОСТ 3565–80. Для определения предела текучести при кручении вычисляют относительный сдвиг в процентах по формуле [67]:

$$\gamma_{\text{пц}} = \frac{\varphi_{\text{пц}} D}{2l} 100, \quad (8.1)$$

где  $\varphi_{\text{пц}}$  – угол закручивания образца на его расчетной длине, равный пределу пропорциональности при кручении, рад;  $D$  – диаметр рабочей части образца, мм;  $l$  – расчетная длина образца, мм.

Прибавляют к относительному сдвигу допуск на остаточный сдвиг в размере 0,3 % и далее расчет ведут с учетом прибавки.

Продолжают нагружение образца, пока не будет достигнут угол  $\varphi$ , соответствующий шагу свивки, затем нагружение  $T$  фиксируют на текущем уровне. Предел текучести вычисляют по формуле (8.2):

$$\tau_{0,3} = \frac{T}{W_p}; \quad (8.2)$$

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16}, \quad (8.3)$$

где  $W_p$  – полярный момент сопротивления сечения кручению, мм<sup>3</sup>.

Закон упрочнения характеризуется касательной к кривой упрочнения и в общем виде для кривой первого рода выглядит как [68]:

$$\sigma_s = \sigma_{ш} + \sigma_{ш}\varepsilon; \quad (8.4)$$

$$\sigma_{ш} = \frac{P}{F}, \quad (8.5)$$

где  $\sigma_{ш}$  – напряжения в проволоке, возникающие при образовании «шейки», МПа;  $\varepsilon$  – соответствующая степень деформации проволоки;  $P$  – усилие растяжения проволоки в момент образования «шейки», Н;  $F$  – площадь поперечного сечения проволоки в момент образования «шейки», мм.

Данный закон носит линейный характер и имеет долю погрешности. Для более точного определения свойств проволоки используют степенную зависимость вида

$$\sigma_s = \sigma_T + C\varepsilon^n, \quad (8.6)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести ненагруженного образца проволоки, зависящий от свойств материала, МПа;  $n$  – показатель упрочнения.

Выбор закона, описывающего изменение сопротивления пластической деформации, зависит от теории прочности, которая наилучшим образом подходит для конкретного процесса ОМД. Известны следующие теории прочности: первая теория прочности – теория наибольших нормальных напряжений; вторая теория прочности – теория наибольших деформаций; третья теория прочности – теория наибольших касательных напряжений; четвертая теория прочности (энергетическая) – теория наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения; теория прочности Мора – теория предельных напряженных состояний.

Теория наибольших нормальных напряжений – основана на гипотезе о том, что опасное состояние материала наступает тогда, когда наибольшее по абсолютной величине нормальное напряжение достигает значения, соответствующего опасному состоянию при простом растяжении или сжатии.

Вторая теория прочности – теория наибольших относительных удлинений исходит из гипотезы о том, что разрушение связано с величиной наибольших относительных удлинений. Следовательно, опасное состояние материала наступает тогда, когда наибольшая по модулю относительная линейная деформация достигает значения, соответствующего опасному состоянию при простом растяжении или сжатии.

Третья теория прочности – теория наибольших касательных напряжений. В основу теории положена гипотеза о том, что два напряженных состояния – сложное и линейное – эквиваленты в смысле прочности, если наибольшие касательные напряжения одинаковы.

Энергетическая теория прочности (теория наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения) исходит из предпосылки о том, что количество потенциальной энергии формоизменения, накопленной к моменту наступления опасного состояния (текучести материала), одинаково как при сложном напряженном состоянии, так и при простом растяжении.

Теория прочности Мора не содержит критериальной гипотезы и состоит в установлении определенной зависимости прочностных свойств материала от вида его напряженного состояния. За характеристики напряженного состояния в общем случае принимается наибольшее касательное напряжение и нормальное, действующее на той площадке, на которой действует это касательное [69]. Наиболее полной и точной является теория Мора. Все ее положения были проверены экспериментально.

Для свивки металлокорда также можно использовать третью теорию прочности наибольших касательных напряжений, так как при свивке металлокорда проволоки подвергаются крутящим и изгибающим напряжениям, действующим по спиральной траектории, осью которой является ось металлокорда. При кручении проволоки наибольший эффект будут оказывать именно касательные напряжения. Однако данные теории будут нести в себе определенную долю погрешности, так как рассчитаны на деформацию изотропных тел, а в случае свивки металлокорда проволока имеет ярко выраженную анизотропию свойств.

## **8.2. Определение закона упрочнения для свивки проволоки в металлокорд 0,35HT; 0,30HT; 0,30SHT**

Для линейной аппроксимации кривой упрочнения необходимо определить параметры линейной функции, представленной в виде

$$y(x) = kx + b, \quad (8.7)$$

где  $y(x)$  – функция линейной аппроксимации кривой упрочнения;  $k$  – коэффициент, численно равный тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс;  $x$  – аргумент функции, относительная степень деформации;  $b$  – число, обозначающее уровень подъема прямой над осью абсцисс.

Считая началом координат точку пластического течения металла, принимаем  $b = \sigma_T$ . Тогда:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{(\sigma_B - \sigma_T)z}{\delta - \varepsilon_{\text{упр}}}; \quad (8.8)$$

$$z = \frac{\delta}{\sigma_B}, \quad (8.9)$$

где  $z$  – масштабный коэффициент;  $\delta$  – максимальное удлинение при растяжении, %;  $\varepsilon_{\text{упр}}$  – относительная степень деформации в упругой области, %.

Принимая, получаем значение коэффициента  $k$  для каждого из видов металлокорда. Для определения параметров, входящих в зависимость (8.8), необходимо определить механические свойства тонкой проволоки с помощью стандартных испытаний на осевое растяжение.

Обработка данных на осевое растяжение исследуемых проволок для металлокорда представлена в табл. 8.1.

Таблица 8.1

**Обработка данных на осевое растяжение проволоки  
после тонкого волочения**

Механические характеристики	3+8×0,35HT	2+2×0,30SHT	2×0,30HT
Модуль упругости $E$ , ГПа	203,93	202,16	205,7
Условный предел текучести $\sigma_T$ , МПа	2853,64	3132,81	3077,14
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	3056,33	3376,13	3235,57
Относительное удлинение при растяжении $\delta$ , %	2,42	2,64	2,27

Данные на осевое растяжение проволок после свивки в металлокорд представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

**Обработка данных на осевое растяжение проволоки  
после свивки металлокорда**

Механические характеристики	3+8×0,35HT	2+2×0,30SHT	2×0,30HT
Модуль упругости $E$ , ГПа	157,81	180,14	2,36
Условный предел текучести $\sigma_T$ , МПа	2520,75	2980,54	2849,94
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	2898,17	3204,98	3092,37
Относительное удлинение при растяжении $\delta$ , %	2,82	2,36	2,52

Для  $3+8 \times 0,35HT$  коэффициент и угол наклона прямой к оси абсцисс будет соответственно равен

$$k = \frac{(3056,33 - 2853,64) \cdot 2,42 / 3056,33}{2,42 - 0,02} = 0,067. \quad (8.10)$$

Тогда для данного корда закон упрочнения проволоки после тонкого волочения будет выглядеть:

$$\sigma(\varepsilon) = 2853,64 + 0,067\varepsilon. \quad (8.11)$$

После свивки:

$$\sigma(\varepsilon) = 2520,75 + 0,131\varepsilon. \quad (8.12)$$

Для металлокорда  $2+2 \times 0,30SHT$ :

$$k = 0,073; \quad (8.13)$$

$$\sigma(\varepsilon) = 3132,81 + 0,073\varepsilon. \quad (8.14)$$

После свивки:

$$\sigma(\varepsilon) = 2980,54 + 0,071\varepsilon. \quad (8.15)$$

Для металлокорда  $2 \times 0,30HT$ :

$$k = 0,05; \quad (8.16)$$

$$\sigma(\varepsilon) = 3077,14 + 0,05\varepsilon. \quad (8.17)$$

После свивки:

$$\sigma(\varepsilon) = 2849,94 + 0,079\varepsilon. \quad (8.18)$$

Проанализировав законы упрочнения проволоки после тонкого волочения (перед свивкой) и после свивки, а также сравнив их, можно увидеть, что проволока после свивки в металлокорд больше подвержена упрочнению. Это происходит из-за крутящих и изгибающих напряжений, возникающих в проволоке в процессе свивки. Доля пластической деформации при свивке более значительная по сравнению с тонким волочением.

Для определения компонент напряжений и деформации в процессе дальнейшего анализа принято использовать линейный закон упрочнения совместно с энергетической теорией прочности Губера–Мизеса. Однако данная модель работает только для изотропных тел. Для тел, обладающих выраженной анизотропией свойств, рекомендуется использовать другие модели упрочнения и, следовательно, необ-

ходимо будет осуществлять степенную аппроксимацию кривой упрочнения для более точных результатов. На данном этапе был использован линейный закон для простоты расчетов и наглядности решения.

В процессе волочения и свивки металлокорда проволоки испытывают холодную пластическую деформацию, вследствие чего подвергаются упрочнению. Эффект упрочнения увеличивает предел прочности и условный предел текучести металла проволоки.

Для более точного определения механических свойств металлокорда необходимо учитывать эффект упрочнения металла. Однако стандартные кривые упрочнения трех родов, зависящие только от материала, не подходят из-за того, что при их построении использовался металл с изотропной и равноосной структурой. В данном случае при свивке металлокорда используется проволока, только что прошедшая этап тонкого волочения. В таком состоянии металл проволоки имеет вытянутую структуру зерна и ярко выраженную анизотропию свойств. Поэтому необходимо преобразовывать законы упрочнения, учитывая данный аспект, а также то, что проволока в процессе свивки подвергается крутящим и изгибающим напряжениям.

## ГЛАВА 9

# ПОСТРОЕНИЕ АДЕКВАТНОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВИВКИ ПРОВОЛОКИ С ОЦЕНКОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И ЕЕ ОСТАТОЧНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

### 9.1. Общая характеристика пакетов прикладных программ для моделирования процессов ОМД

Математическая модель – это система математических соотношений – формул, уравнений, неравенств, отражающих существенные свойства объекта или явления. Чтобы описать явление, необходимо выявить самые существенные его свойства, закономерности, внутренние связи, роль отдельных характеристик явления. Выделив наиболее важные факторы, можно пренебречь менее существенными. Наиболее эффективно математическую модель можно реализовать в виде вычислительного эксперимента.

Основные требования, предъявляемые к моделям:

- универсальность – характеризует полноту отображения моделью изучаемых свойств реального объекта;
- адекватность – способность отражать нужные свойства объекта с погрешностью не выше заданной;
- точность – оценивается степенью совпадения значений характеристик реального объекта и значения этих характеристик, полученных с помощью моделей;
- экономичность – определяется затратами ресурсов ЭВМ памяти и времени на ее реализацию и эксплуатацию.

На данный момент существует множество прикладных пакетов программ для построения математических моделей и проведения численного моделирования. Среди них пакеты *ANSYS*, *Marc*, *Simufact*, *LS DYNA*, модули программных пакетов КОМПАС, *SolidWorks*, а также библиотеки свойств материалов, таких как *Matilda*.

Так как указанные пакеты вычислений достаточно дорогостоящие, перспективно использование бесплатных программных пакетов, работающих на операционных системах *LINUX*. В таких пакетах используется открытый исходный код. Примером такого программного



пакета для численного моделирования является *SALOME-MECA*, включающий возможности моделирования мультифизических процессов. *SALOME-MECA* является оболочкой для интегрирования решателя (*Code-Aster*) совместно с пре- и постпроцессором (*SALOME*).

*Code-Aster* – открытый расчетный (МКЭ) пакет, распространяемый под лицензией *GNU GENERAL PUBLIC LICENSE*. Разработан и сертифицирован специально для французской энергетической отрасли (в том числе расчет строительных конструкций, оснований и т. д.). Существуют дистрибутивы для *Win32* и *Linux*.

*SALOME* – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования. Представляет собой набор пре- и постпроцессинга. Задумана как связующее программное обеспечение *CAD-CAE*, она объединяет в себе различные модули, применяемые в приложениях численного моделирования. САПР-средства в *SALOME* имеют достаточно тесную связь с платформой *Open CASCADE Technology*. Продукты марки *SALOME* распространяются на условиях *GNU Lesser General Public License*. Платформа *SALOME* используется как база для проекта *NURESIM (European Platform for Nuclear Reactor Simulations)*, который предназначен для полномасштабного моделирования ядерных реакторов. В основе *SALOME* лежит концепция объектно-ориентированного программирования. *SALOME* представляет собой набор модулей, которые позволяют выполнять инженерные задачи.

Дальнейшее численное моделирование процесса свивки проволоки в металлокорд осуществляется с использованием программного пакета *SALOME-MECA*.

## **9.2. Описание универсальной математической модели процесса свивки проволоки в металлокорд с использованием метода конечных элементов**

### ***9.2.1. Описание геометрической модели и основные упрощения***

Напряженно-деформированное состояние объема  $V$  проволоки рассматривается в трехмерной постановке. На рис. 9.1 изображены область проволоки и граничные условия. В направлении оси  $z$  проволока имеет длину, значительно преувеличивающую очаг деформации, поэтому за очаг деформации (основной участок концентрации НДС)

принимая фрагмент проволоки, равный шагу металлокорда. Пространственная постановка задачи допускает движения свиваемых проволок в процессе свивки вдоль оси металлокорда, что соответствует реальным условиям свивки.

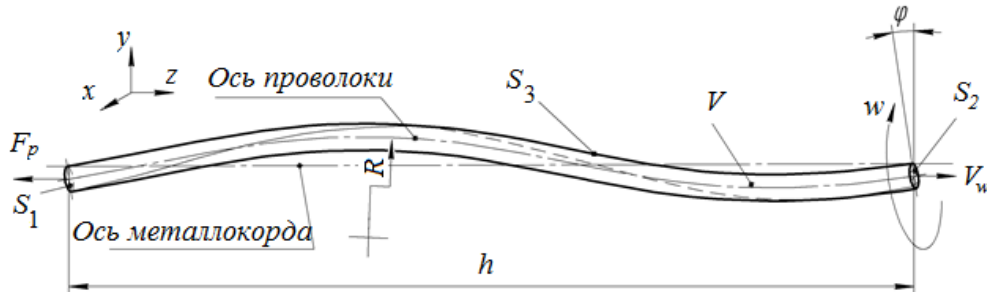


Рис. 9.1. Геометрия задачи и граничные условия

Предположим, что КЭ модель проволоки  $V$  своей правой частью ограничена и прикреплена к поверхности  $S_2$  с заданными на ней перемещениями  $U(w, V_w)$ , которые передаются от узлов канатной машины в процессе свивки проволоке. К противоположной стороне модели на поверхности  $S_1$  приложена сила равная усилию торможения на питающих катушках  $F_p$ .

Исследуемый объем проволоки разбиваем на конечные элементы с шестью узловыми точками, представленными на рис. 9.2.

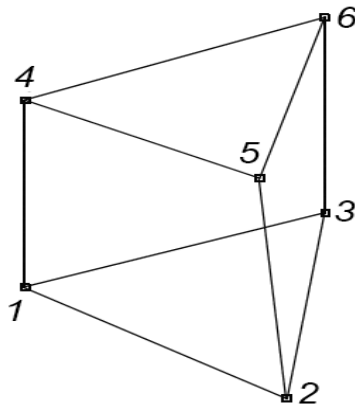


Рис. 9.2. Тип расчетного конечного элемента

Задача сводится к определению напряженно-деформированного состояния объема проволоки при кручении с изгибом в пространственной постановке с учетом контактного взаимодействия с другими проволоками. Решение задачи представляется возможным при следующих основных упрощениях:

– материал проволоки считаем сплошным, несжимаемым и упруго-пластичным;

– предполагается, что температура проволоки во всех точках изменяется в узком диапазоне температур, не влияющем на структурные свойства проволоки и не изменяющем механические характеристики;

– считаем, что пластическая деформация металла проволоки приводит к увеличению предела упругости при повторной деформации того же знака и уменьшению его при повторной деформации противоположного знака (эффект Баушингера) [70];

– предполагается, что область контакта по контуру между телами мала по сравнению с их размерами и не изменяется при деформации. Так, в рамках конечно-элементного представления контакт рассматривали как узел, принадлежащий двум проволокам [72]. Приращения упругих и пластических деформаций, причем полные деформации включают линейные и нелинейные составляющие, вызванные заданными перемещениями, изменяют напряженно-деформированное состояние каждого элемента расчетной области  $V$ .

### 9.2.2. Начальные и граничные условия

С учетом принятых приближений и упрощений уравнение перемещения для каждого элемента модели в дифференциальном виде будет иметь следующий вид [19]:

$$M\{\ddot{U}\} + K\{U\} = \{F(t)\}, \quad (9.1)$$

где  $M$ ,  $K$  – соответственно матрицы масс и жесткости;  $\{F(t)\}$  – суммарный вектор сил, действующих на узел.

$$K_{эл} = \int_{V_{эл}} \beta^T L \beta dV_{эл}, \quad (9.2)$$

где  $V_{эл}$  – объем элемента;  $\beta^T$  – матричный оператор;  $\beta$  – соотношение между деформациями и перемещениями,  $\varepsilon = \beta U$ ;  $L$  – соотношение между деформациями и напряжениями;  $\sigma = L\varepsilon$ ;

$$M_{эл} = \int_{V_{эл}} N^T \rho N dV_{эл}, \quad (9.3)$$

где  $N^T$  – матричный оператор  $N$ ;  $\rho$  – плотность материала элемента.

Для однозначного решения дифференциального уравнения необходимо задать:

– начальные условия:

$$\{U(t=0)\} = \{U_0\}; \quad (9.4)$$

$$\{\dot{U}(t=0)\} = \{\dot{U}_0\}; \quad (9.5)$$

– силовые граничные условия:

$$\{F_z(t)\} = F_p(t) \cdot \vec{n}Z = \text{const на } S1; \quad (9.6)$$

– кинематические граничные условия:

$$\{U_x(t)\} = 0; \quad (9.7)$$

$$\{U_y(t)\} = 0 \text{ на } S1; \quad (9.8)$$

$$\{\dot{U}(t)\} = \{\dot{U}^*(t)\} \text{ на } S2. \quad (9.9)$$

На поверхности  $S3$  в зоне контакта проволок действуют силы трения Амонтона–Кулона:

$$\{F_\tau(t)\} = f \{F_n(t)\} \frac{\{V_r(t)\}}{\|\{V_r(t)\}\|}, \quad (9.10)$$

где  $\{F_\tau(t)\}$  – сила трения на поверхности контакта;  $\{F_n(t)\}$  – нормальная сила, действующая на поверхность контакта;  $\{V_r(t)\}$  – скорость относительного скольжения на поверхности контакта;  $f$  – коэффициент контактного трения проволок при свивке.

Из решения системы дифференциальных уравнений (9.1)–(9.9) с помощью методов, применяемых в большинстве универсальных пакетов решателей инженерного анализа (*ANSYS*, *MSC.MARC*, *CodeAster*), могут быть определены перемещения в заданный момент времени, через которые затем находятся напряжения и деформации. Матрицы жесткости и масс получаются интегрированием по объему конечных элементов.

### 9.2.3. Законы упрочнения материала

Для свивки металлокорда 0,30НТ используется стальная латунированная проволока из стали марки К80. Предел прочности находится в пределах 3200 МПа.

Учитывая, что при повышении скорости деформации растет неравномерность напряженно-деформированного состояния, это приводит

к локализации деформации и разрушению проволоки [70]. С возрастанием скорости деформации возрастает доля упругих деформаций, но при этом уменьшается запас пластичности [73].

Для расчетов используется принятая энергетическая теория прочности Мизеса – модель пластичности с пределом текучести в виде мультипликативной зависимости, включающая деформационное пластическое упрочнение и эффект Баушингера [74]:

$$\sigma_{\varepsilon}(\varepsilon_{\rho}, \dot{\varepsilon}_{\rho}, T) = [A + B(\varepsilon_{\rho})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{\rho}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - T_{\text{отн}}], \quad (9.11)$$

где  $\sigma_{\varepsilon}$  – напряжение текучести, МПа;  $\varepsilon_{\rho}$  – пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_{\rho}$  – интенсивность пластических деформаций;  $T_{\text{отн}}$  – относительная температура, отнесенная к температуре плавления.

При моделировании процесс принимается изотермическим, т. е. без изменения температуры во времени.

Материал проволоки принят однородным, изотропным и несжимаемым.

### 9.3. Оценка полученных данных и проверка адекватности модели

Сложность трехмерного деформированного состояния проволок в процессе свивки не позволяет определить деформированное состояние проволок аналитическими методами [59], поэтому использовалось численное моделирование свивки проволок в металлокорд, основанное на МКЭ. Численная модель свивки металлокорда [75] позволяет определить значения эквивалентной деформации свивки проволок металлокорда в зависимости от режимов свивки на канатных машинах двойной свивки.

Численное моделирование деформированного состояния проволок позволяет определить количественные значения деформации, эквивалентной осевому растяжению, и сравнить с относительным удлинением проволоки. Натурные испытания на скручивание позволяют смоделировать условия, при которых происходит разрыв проволоки.

Определение влияния запаса пластических свойств на обрывность металлокорда  $2 \times 0,30HT$  в зависимости от режима свивки проволок проводили на лабораторном стенде (рис. 9.3). На лабораторном стенде был изготовлен фрагмент металлокорда  $2 \times 0,30HT$ , представленный на рис. 9.4.

Изготовление фрагмента металлокорда происходило в следующей последовательности. Для формирования в металлокорде  $2 \times 0,30HT$  требуемого шага свивки ( $t = 14$  мм) проволока подкручивается до предварительного шага  $t_n = 14$  мм, затем прядь докручивается до максимального шага свивки (имитируя торсионное устройство) и снова раскручивается до готового шага свивки металлокорда  $t_k = 14$  мм. Величина дополнительной подкрутки определяется опытным путем в зависимости от величины остаточных упругих напряжений, раскручивающих корд после свивки.

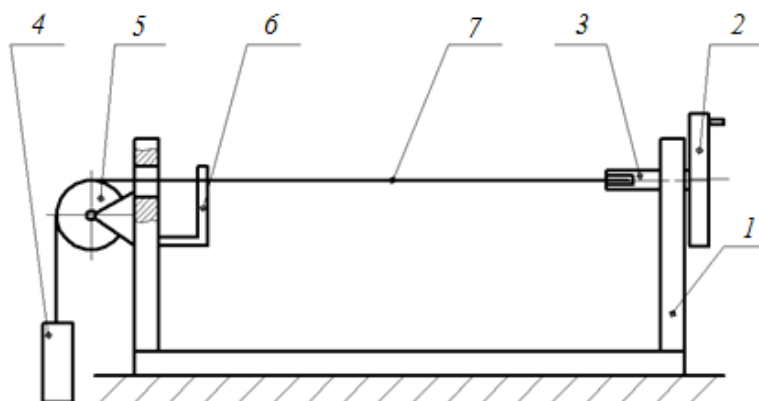


Рис. 9.3. Кинематическая схема лабораторного стенда для свивки металлокорда:

1 – станина; 2 – маховик; 3 – зажим; 4 – груз;  
5 – ролик; 6 – шаблон; 7 – проволока

Сравнение образцов металлокорда  $2 \times 0,30HT$ , полученного с использованием лабораторного стенда и в промышленных условиях, представлено на рис. 9.4.



Рис. 9.4. Образец металлокорда  $2 \times 0,30HT$ :

№ 1 – промышленный образец;  
№ 2 – экспериментальный образец

Для моделирования свивки проволоки с пониженными пластическими свойствами использовали дополнительную подкрутку проволоки в процессе свивки [76]. Для этого необходимо увеличить

количество дополнительных оборотов проволоки на лабораторном стенде (табл. 9.1) по сравнению с технологией изготовления аналогичного корда в промышленных условиях.

Нагружение кручением проволок в металлокорде  $2 \times 0,30HT$  на лабораторном стенде проводилось в соответствии с табл. 9.1.

Таблица 9.1

Схема нагружения проволок в металлокорде  $2 \times 0,30HT$

Номер опыта	Предварительная свивка		Дополнительная свивка	
	Количество основных оборотов	Шаг свивки $t$ , мм	Количество дополнительных оборотов $n$ , шт.	Шаг свивки $t_{max}$ , мм
1	20	14	10	9,3
2	20	14	15	8
3	20	14	20	7

Далее аналогичное нагружение при свивке проволок по табл. 9.1 моделировалось с использованием численного моделирования. В результате численного моделирования определены численные значения деформированного состояния проволок при свивке в металлокорд  $2 \times 0,30HT$ . Распределение численных значений эквивалентной деформации свивки ( $\epsilon_{св}$ ) в поперечном сечении проволок в процессе свивки представлено на рис. 9.5.

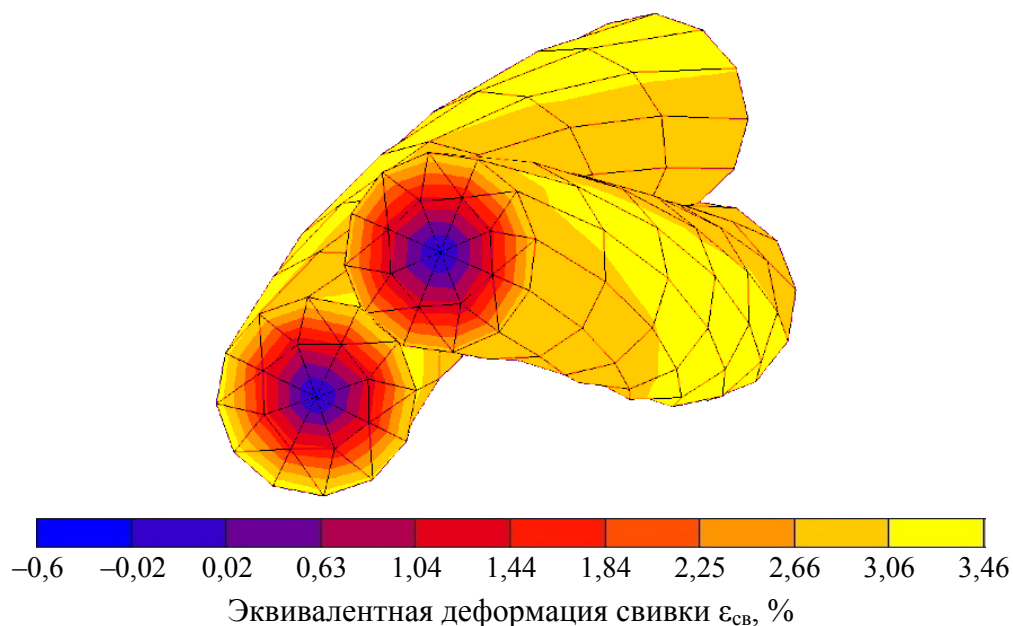


Рис. 9.5. Распределение эквивалентной деформации свивки по сечению металлокорда  $2 \times 0,30HT$

Анализ распределения по сечению металлокорда эквивалентной деформации свивки  $\varepsilon_{св}$ , представленного на рис. 9.6, показывает, что максимальные значения эквивалентной деформации свивки  $\varepsilon_{св}$  концентрируются на поверхности проволоки, а степень проникновения к центру проволоки зависит от величины дополнительного подкручивания.

На рис. 9.6 показан фрагмент свитых проволок с выраженным расслоением поверхностного слоя, полученный с помощью электронной микроскопии.

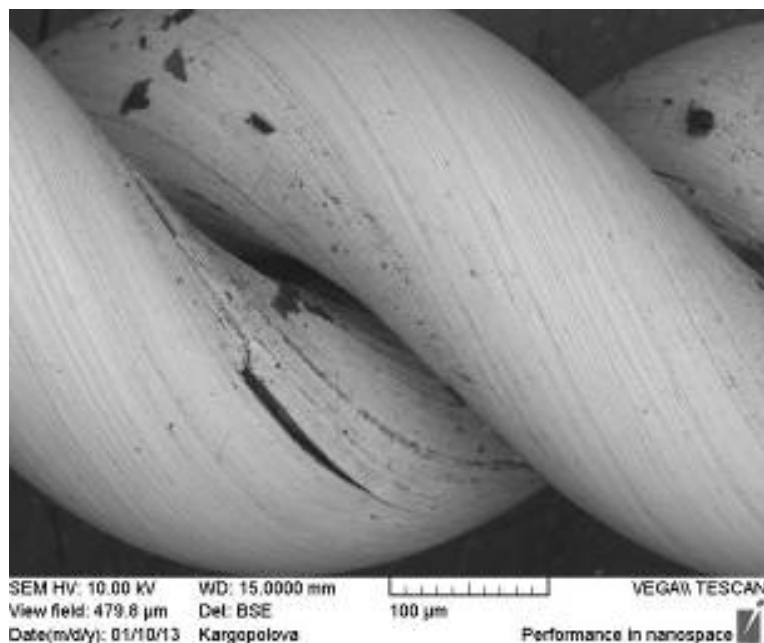


Рис. 9.6. Фрагмент свитых проволок

Анализ рис. 9.6 показывает, что расслоение поверхностного слоя проволоки при свивке соответствует форме и направлению концентрации значений максимальной деформации свивки проволоки, что доказывает адекватность численного моделирования и возможность объяснения механизма разрушения проволоки в процессе свивки.

Деформация на поверхности проволоки может достигать критической величины, что влечет зарождение трещин на поверхности проволоки (см. рис. 9.6).

При свивке металлокорда на поверхности проволоки эквивалентная деформация при кручении и изгибе увеличивается, что ведет к образованию микротрещин и концентраторов напряжений. В дальнейшем микротрещины сливаются в макротрещины, и разрушение проволоки идет непосредственно в этих местах.



Анализ результатов численного моделирования показывает, что наибольшие напряжения проволока испытывает по внешней винтовой линии, в направлении нормальном направлению спиральной траектории свивки. Этот факт доказывает, что геометрия модели была задана верно, а результаты соотносятся с реальным поведением проволоки, что доказывает адекватность модели свивки.

#### **9.4. Исследования закономерностей деформации проволоки во время свивки**

В процессе свивки металлокорда на проволоку действуют растягивающие, крутящие и изгибающие напряжения и деформации. Эквивалентная деформация является приведенной деформацией для оценки полного деформационного воздействия на проволоку при свивке в канатной машине. При траектории свивки предусмотрены зоны больших деформаций проволоки по сравнению с остальными зонами канатной машины. В таких зонах и производятся этапы свивки проволок в металлокорд, причем деформация проволок может осуществляться в различных направлениях. Однако в абсолютном выражении суммарная эквивалентная деформация всегда возрастает. Диаметр металлокорда, агрегатная прочность, сила сцепления с резиной зависят от проволок и расположения их в металлокорде.

Нераскручиваемость металлокорда обеспечивается дополнительным подкручиванием пряди в торсионном устройстве для достижения проволоками деформации в пластической области. После дополнительного подкручивания шаг металлокорда несколько увеличивается и далее раскручивается в обратном направлении в области упругих деформаций. Величина дополнительного подкручивания металлокорда создается частотой вращения торсионного устройства.

Для полноценного анализа процесса свивки проволоки в металлокорд необходимо изучить и описать процессы, происходящие в канатной машине в процессе свивки металлокорда. На рис. 9.7 показан общий вид канатной машины двойного кручения *TD2/202*, а на рис. 9.8 приведена кинематическая схема этой канатной машины.

В табл. 9.2 представлены основные технологические параметры канатной машины *TD2/401*.

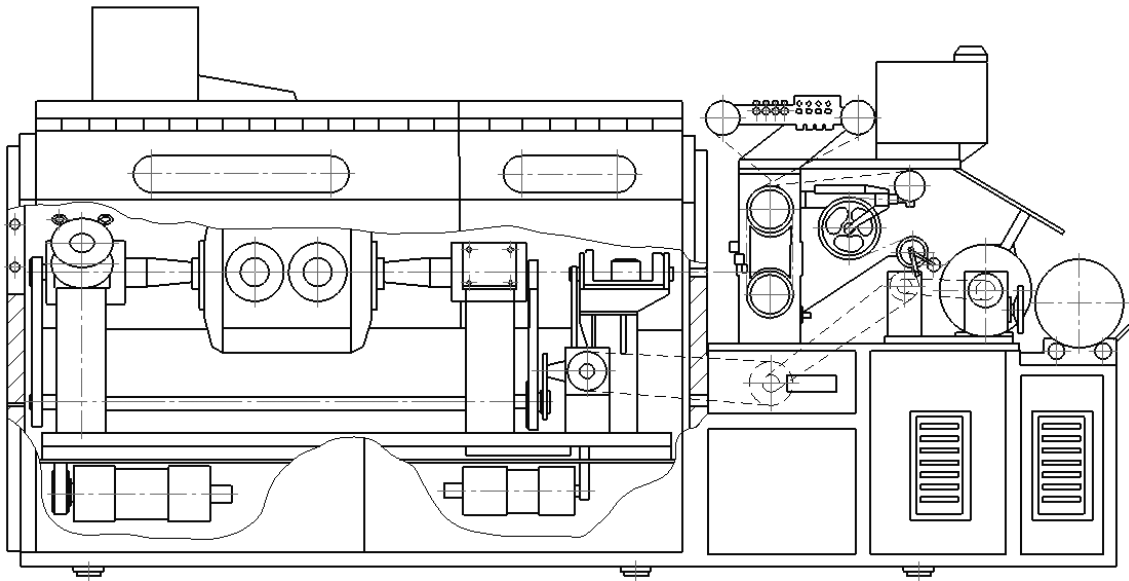


Рис. 9.7. Общий вид канатной машины TD2/401

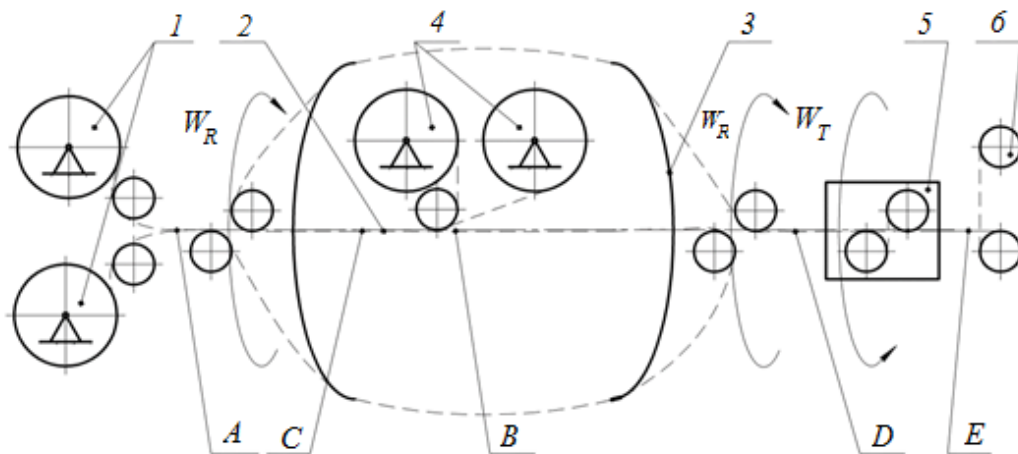


Рис. 9.8. Кинематическая схема канатной машины TD2/401:  
 1 – внешние питающие катушки; 2 – пучок проволоки; 3 – тазы;  
 4 – внутренние питающие катушки; 5 – торсион; 6 – кабан

Таблица 9.2

**Параметры канатных машин TD2/401**

Параметр	Значение
Частота вращения ротора $w_R$ , мин <sup>-1</sup>	3500 ± 500
Направление свивки	Левое
Шаг свивки $t$ , мм	14 ± 1
Натяжение размотки проволок питания внутренних и наружных катушек Н	40 ± 5
Частота вращения торсиона $w_T$ , мин <sup>-1</sup>	3000 ± 500

Как видно из табл. 9.2, основными кинематическими параметрами канатной машины для свивки металлокорда являются скорости вращения ротора 3 и торсиона 4, натяжение размотки проволок на наружных и внутренних питающих катушках 1 и 4 соответственно (см. рис. 9.8).

В соответствии с приведенной кинематической схемой (см. рис. 9.8) и параметрами канатной машины (см. табл. 9.2) выполнен численный расчет процесса свивки проволоки в металлокорд  $2+1 \times 0,30HT$  и  $2+2 \times 0,30SHT$ .

Величина эквивалентной деформации свивки характеризует потери пластических свойств проволоки в процессе свивки. Изменение эквивалентной деформации свивки представлено на рис. 9.9 и 9.10.

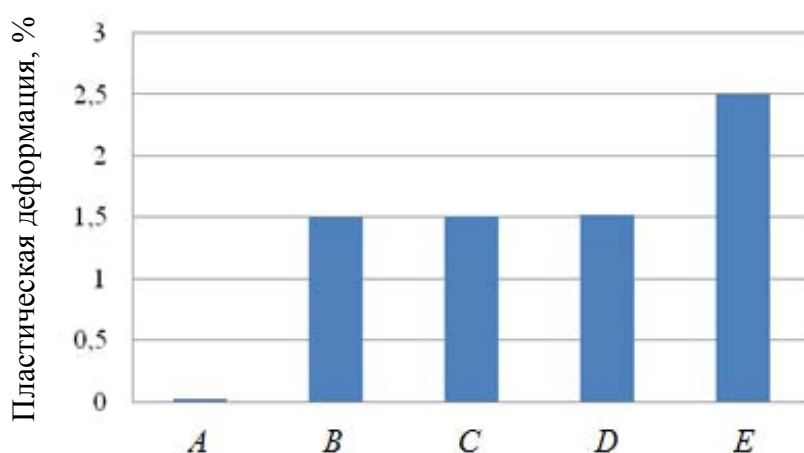


Рис. 9.9. Изменение эквивалентной деформации свивки для  $2+1 \times 0,30HT$

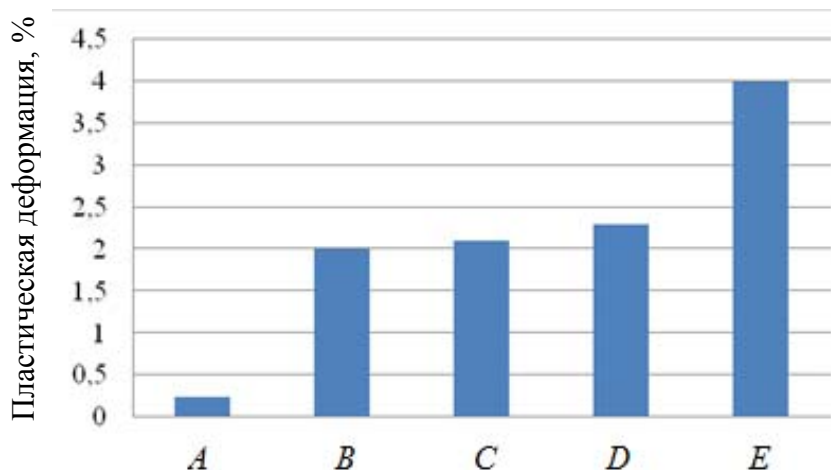


Рис. 9.10. Эквивалентная деформация свивки для  $2+2 \times 0,30SHT$

На графиках изображены характерные участки деформации проволоки в процессе свивки корда  $2+1 \times 0,30HT$  и  $2+2 \times 0,30SHT$  на канатной машине  $TD2/401$ .

Анализ графиков, представленных на рис. 9.9 и 9.10, показывает, что максимальная деформация проволоки при свивке в металлорд возникает в торсионном устройстве. При этом значение эквивалентной деформации свивки достигает максимальных значений. Поэтому в случае свивки проволоки с недостаточным запасом пластических свойств в этом месте канатной машины возрастает вероятность обрыва проволоки.

На рис. 9.11 представлена кинематическая схема канатной машины  $Ri10-BM$ , используемая для свивки металлордов  $3+2 \times 0,35UT$  и  $4+3 \times 0,35UT$  из ультравысокопрочной латунированной проволоки с содержанием углерода 0,96 %. Свивка металлорда из этой проволоки часто сопровождается обрывами проволоки. Численное моделирование процесса свивки такой проволоки позволит определить главные причины обрыва проволоки и принять меры для их устранения. В табл. 9.3 приведены параметры этой канатной машины, принятые для численного моделирования.

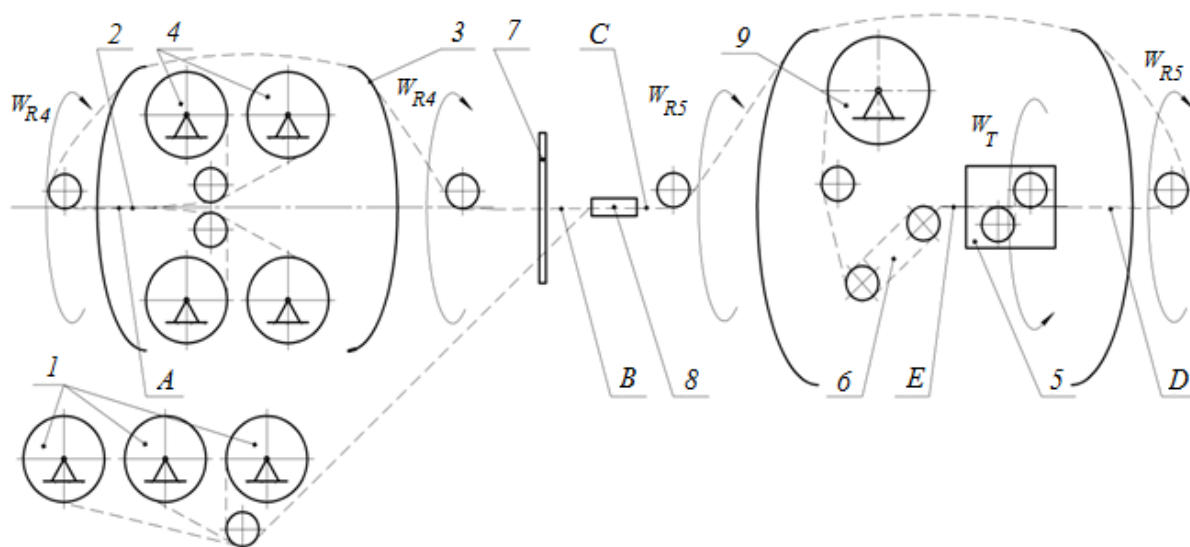


Рис. 9.11. Кинематическая схема канатной машины  $Ri10-BM$ :  
 1 – внешние питающие катушки; 2 – пучок проволоки; 3 – тазы;  
 4 – питающие катушки ротационного блока; 5 – торсион;  
 6 – кабестан; 7 – шаблон; 8 – собирающая фильера;  
 9 – приемная катушка

Таблица 9.3

**Параметры канатной машины *Ri10-ВМ***

Параметр	<b>3+2×0,35UT</b>	<b>4+3×0,35UT</b>
	Значение	
Частота вращения ротора $w_{R4}$ , мин <sup>-1</sup>	2000 ± 50	2000 ± 50
Частота вращения ротора $w_{R5}$ , мин <sup>-1</sup>	2000 ± 50	2000 ± 50
Направление свивки	Левое	Левое
Шаг свивки $t$ , мм	18 ± 0,7	18 ± 0,7
Суммарное натяжение размотки проволок питания внутренних и наружных катушек Н	110 ± 5 65 ± 5	110 ± 5 65 ± 5

Как видно из табл. 9.3, параметры свивки металлокордов 3+2×0,35UT и 4+3×0,35UT на канатной машине полностью совпадают.

На рис. 9.12 и 9.13 представлены графики изменения эквивалентной деформации свивки проволоки в процессе свивки металлокорда 3+2×0,35UT и 4+3×0,35UT.

Оценивая графики, представленные на рис. 9.9, 9.10, 9.12 и 9.13, видно, что максимальная деформация проволоки при свивке ее в металлокорд происходит на завершающем этапе свивки в канатной машине: в торсионном блоке. Схема торсионного блока представлена на рис. 9.14.

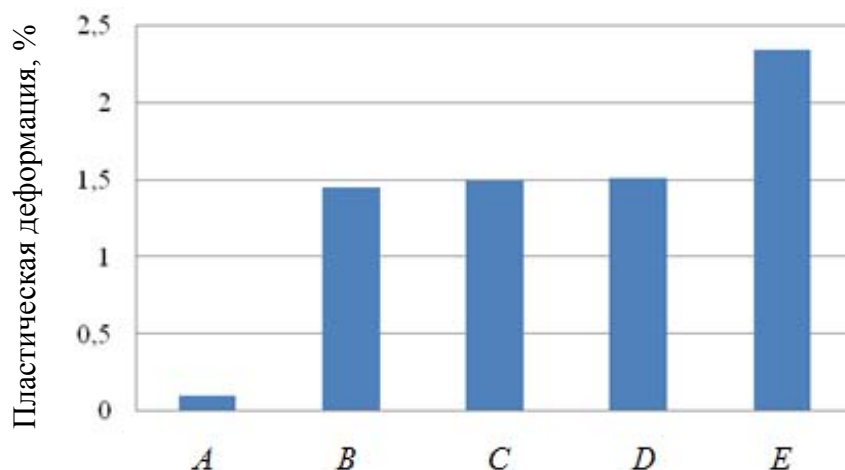


Рис. 9.12. Изменение эквивалентной деформации свивки для 3+2×0,35UT

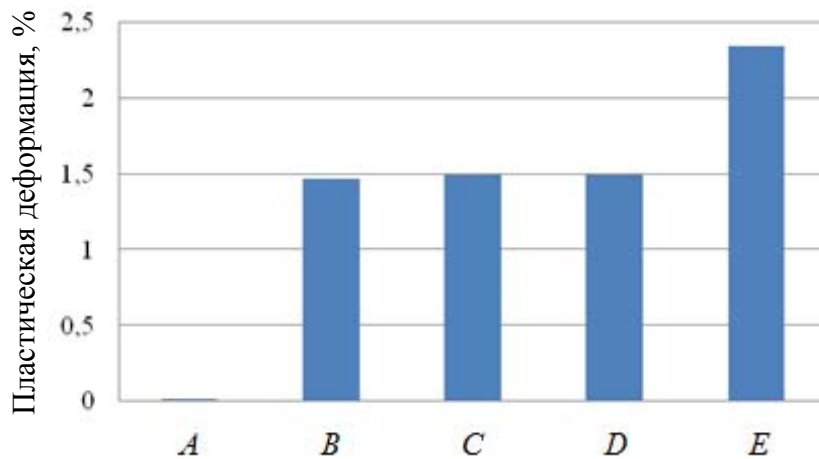


Рис. 9.13. Изменение эквивалентной деформации свивки для  $4+3 \times 0,35UT$

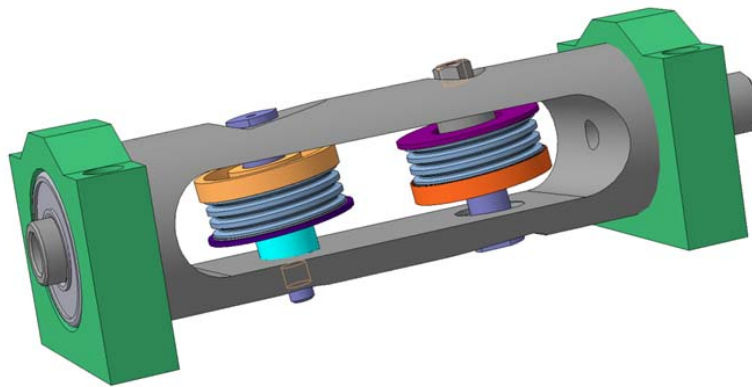


Рис. 9.14. Схема торсионного блока в канатной машине

Конструктивной особенностью торсионного блока является схема заправки металлокорда, обеспечивающая дополнительную подкрутку металлокорда для формирования окончательного шага свивки и нераскручиваемость конструкции металлокорда после снятия всех действующих в процессе свивки нагрузок. Поэтому в торсионном блоке резко возрастает вероятность обрыва металлокорда. Это происходит вследствие деформирования проволок металлокорда выше предельно возможной деформации проволоки.

Для оценки вероятности обрыва проволоки в процессе свивки удобно использовать показатель проволоки, определяемый количеством реверсивных скручиваний  $R_{rev}$  проволоки в металлокорд. При этом необходимо ввести параметр  $\rho$  – отношение расстояния от поверхности проволоки до точки сечения проволоки, в которой эквивалентная деформация  $\varepsilon_{cb}$  при кручении равна критическому значению

относительного удлинения  $\delta$  к радиусу проволоки  $R$ . То есть величина  $\rho$  определяется следующим выражением:

$$\rho = \left(1 - \frac{r}{R}\right) 100 \%, \quad (9.12)$$

где  $\rho$  – относительное расстояние от поверхности проволоки, %;  $r$  – радиус окружности в поперечном сечении проволоки, в котором эквивалентная деформация  $\varepsilon_{св}$  равна критическому значению относительного удлинения  $\delta$ , мм;  $R$  – радиус исследуемой проволоки, мм.

На рис. 9.15 представлена зависимость количества реверсивных скручиваний металлокорда  $R_{rev}$  от величины  $\rho$ , полученная на основании результатов численного моделирования (см. рис. 9.5).

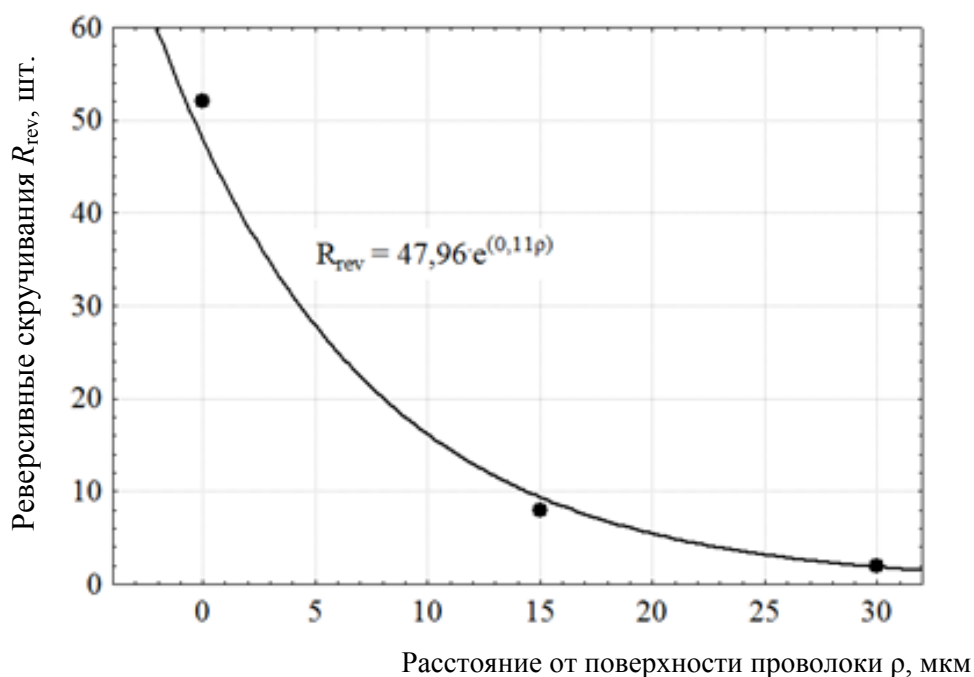


Рис. 9.15. Количество реверсивных скручиваний  $R_{rev}$  в зависимости от относительного расстояния  $\rho$

Анализ зависимости на рис. 9.15 показывает, что с увеличением дополнительных оборотов при свивке, выраженных через  $R_{rev}$ , происходит распространение критической деформации к центру проволоки, что приводит к возможному разрушению проволоки по всему сечению при свивке или ее дальнейшей обработке. На этом основании представляется возможным снижать обрывность металлокорда повышением запаса пластических свойств проволоки.

## ГЛАВА 10

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ НА ЕЕ ОБРЫВНОСТЬ В ПРОЦЕССЕ СВИВКИ В МЕТАЛЛОКОРД И ПРЯМОЛИНЕЙНОСТЬ МЕТАЛЛОКОРДА ПОСЛЕ СВИВКИ

Металлокорд представляет собой металлическое изделие в виде свитой пряди проволок и является основным армирующим элементом резинотехнических изделий. Металлокорд изготавливают на канатных машинах двойного кручения последовательной скруткой тонкой латунированной углеродистой и высокоуглеродистой стальной проволоки. В результате свивки в металлокорд проволока деформируется в объемную спираль. Порядок свивки определяет конструкцию металлокорда. В процессе свивки проволока испытывает крутящие и растягивающие напряжения, что вызывает деформации в проволоке. Повышенные деформации вызывают обрывность металлокорда – обрыв тонкой проволоки в процессе свивки. Производство металлокорда с низкой обрывностью при свивке и высокой прямолинейностью на сегодняшний день является важной производственной задачей.

Современные тенденции развития заключаются в производстве высокопрочного и сверхвысокопрочного металлокорда, что позволяет уменьшить массу металлокорда при сохранении его прочности на уровне обычного металлокорда, следствием чего является снижение массы шины, снижение потерь на качение и расхода топлива [77]. Однако при изготовлении высокопрочного металлокорда наблюдается повышенная обрывность проволок на этапе свивки, что существенно снижает производительность.

Основным направлением повышения прочностных свойств металлокорда является применение высокоуглеродистой и легированной стальной проволоки. Однако повышенное содержание углерода в стали вызывает технологические сложности в производстве катанки и тонкой проволоки. В стальной проволоке с повышенным содержанием углерода быстрее происходит упрочнение.

В связи с повышением автоматизации производства шин и резиновых полотен ужесточились требования по прямолинейности металлокорда. Прямолинейность металлокорда должна находиться в узкой



области значений. В связи с этим регламентируется отклонение от прямолинейности. Metalлокорд с повышенным отклонением от прямолинейности плохо укладывается при производстве шин и вызывает изменения формы резинового полотна.

Направления повышения технологических свойств metalлокорда: остаточного кручения, нераскручиваемости и прямолинейности, совершенствование конструкции metalлокорда и улучшение латунного покрытия тонкой проволоки для повышенной адгезии с резиной. Улучшение качества стали и совершенствование процессов волочения при изготовлении metalлокорда приводит к повышению прочностных свойств тонкой проволоки, однако при повышении прочности проволоки уменьшается ее пластичность.

Цель этапа: теоретический анализ влияния механических параметров тонкой проволоки на ее обрывность в процессе свивки в metalлокорд и прямолинейность metalлокорда после свивки.

### **10.1. Изменение свойств тонкой проволоки в процессе волочения и свивки**

На качество metalлокорда влияет комплекс свойств тонкой проволоки. Комплекс механических характеристик тонкой проволоки для metalлокорда окончательно формируется на этапе тонкого волочения. Пластическая деформация проволоки в процессе волочения приводит к возрастанию предела прочности, уменьшению относительного удлинения, снижению ударной вязкости. Как следствие, снижается пластичность металла проволоки.

Влияние содержания углерода на механические свойства тонкой проволоки показано на рис. 10.1 [77].

На предел прочности готовой проволоки существенно влияют суммарная степень деформации при волочении между термообработками, а также содержание углерода в стали. Из рис. 10.1 видно, что чем выше содержание углерода, тем больше степень упрочнения металла. Также стальная проволока с повышенным содержанием углерода имеет пониженную исходную пластичность в отожженном состоянии из-за наличия цементита. Это необходимо учитывать при проектировании технологии волочения, так как появляются ограничения по скорости деформации, степени деформации, вытяжке, температуре деформации.

В процессе волочения проволока приобретает анизотропию свойств вследствие контактного трения, величины вытяжки, усилия противонатяжения. С точки зрения микроструктуры анизотропия свойств проволоки выражена вытянутой формой зерен металла проволоки. Перлитные включения с увеличением степени деформации проволоки передвигаются в разных направлениях, образуя нитевидные волокна и располагаясь параллельно друг другу. Данные формирования могут служить причиной появления трещин вдоль оси проволок в процессе свивки из-за деформаций кручения [78].

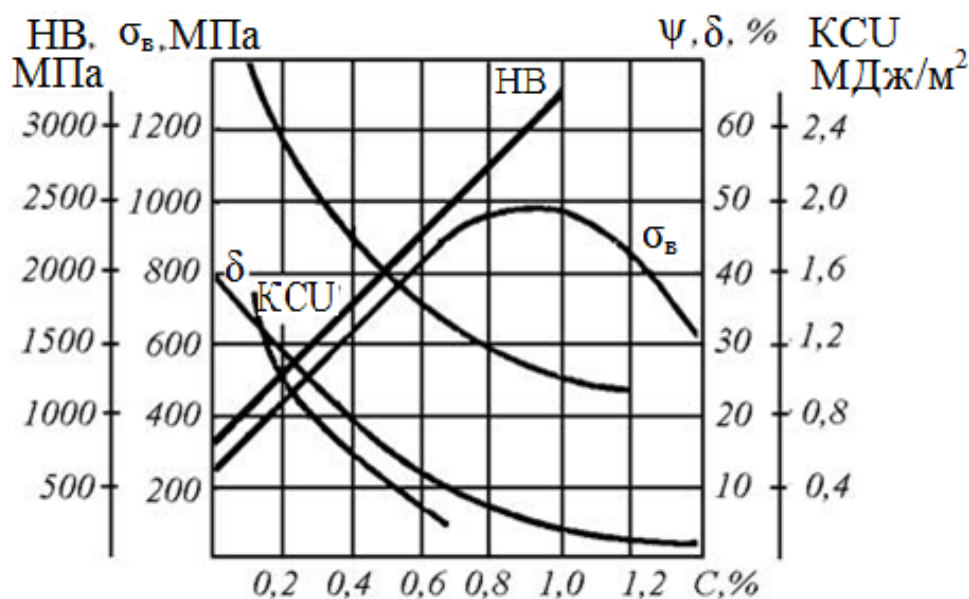


Рис. 10.1. Влияние углерода на механические свойства сталей

Анизотропия свойств тонкой проволоки вызвана неравномерностью деформации в процессе волочения. Неравномерность деформации влияет на образование остаточных напряжений после процесса волочения. Остаточные напряжения с помощью механизма релаксации переходят в пластическую деформацию, что отрицательно влияет на прямолинейность металлокорда. Поэтому при производстве металлокорда необходимо найти баланс между прочностными и пластическими характеристиками проволоки.

В процессе свивки металлокорда в проволоке возникают деформации кручения и изгиба. Стоит отметить, что деформации кручения преобладают перед деформациями изгиба при свивке металлокорда. Геометрическое суммирование деформаций проволоки в процессе свивки дает эквивалентную деформацию свивки  $\epsilon_{св}$ . На основании численной модели свивки металлокорда [79] представляется возможным определить

значения эквивалентной деформации свивки  $\varepsilon_{\text{св}}$  проволок металлокорда в зависимости от режимов свивки на канатных машинах двойного кручения. Область максимальных эквивалентных деформаций располагается на поверхности проволоки, выраженная область максимальной эквивалентной деформации свивки превышает значение относительной деформации удлинения при растяжении  $\delta$  [80]. В областях, где деформации превышают критическое значение относительного удлинения, образуются микротрещины, которые при дальнейшей деформации перерастают в макротрещину [81]. Такая трещина развивается на поверхности проволоки по ее длине и распространяется к осевым слоям проволоки.

Очевидно, что уменьшение шага свивки увеличит изгибающие деформации в проволоке. Это приведет к повышению эквивалентной деформации свивки. При превышении значения критической деформации, которая находится в окрестностях значения относительного удлинения  $\delta$  проволоки, образуется трещина. Она, разрастаясь, образует осевые разрывы в проволоках, уменьшая опасное сечение. В результате происходят обрывы проволоки при свивке металлокорда. При обрыве металлокорда катушка считается неполной и подлежит отбраковке, сортировке и, если возможно, исправлению. Обрывы проволоки при свивке снижают общую производительность стана.

## **10.2. Основные факторы, влияющие на обрывность металлокорда**

На обрывность металлокорда в процессе свивки оказывает влияние совместное воздействие режимов свивки и механических свойств свиваемой тонкой проволоки.

По значению модуля упругости возможна качественная оценка вероятности обрывов металлокорда. Причиной этой зависимости служит то, что при высоком модуле упругости в деформированном металле внутренние напряжения возрастают интенсивнее. Тогда достижение предела текучести деформируемого металла происходит при меньшей степени упругой деформации [82]. Увеличение значения модуля упругости повышает относительную обрывность металлокорда при условии равенства остальных механических свойств. Эта зависимость имеет прямо пропорциональный характер. В действительности для различных по диаметру и классу прочности тонких проволок при изменении модуля упругости происходит изменение комплекса механических

свойств. Поэтому оценивать обрывность проволоки при свивке исключительно по модулю упругости можно только для металлокордов похожих конструкций.

Согласно теории пластического разрушения обрыв проволоки происходит вследствие: выхода дислокаций, возникающих около неметаллических включений и других неоднородностей, к поверхности проволоки при кручении и изгибе; роста тонких трещин; деформационного разупрочнения и образования полос скольжения; роста дислокаций при их пересечении в случае сложного трехосного деформированного состояния. Согласно деформационному механизму пластического разрушения можно сделать заключение о том, что такой вид разрушения зависит от истории деформации, от отношения диаметра проволоки к расстоянию между включениями и от анизотропии свойств тонкой проволоки. Из механических свойств на обрывность проволоки при свивке металлокорда также влияют предел прочности и относительное удлинение.

Большинство обрывов происходит вследствие дефектов правильного металлургического передела из-за ликваций и неметаллических включений на поверхности проволоки и в осевой зоне. Это связано со спецификой деформирования проволоки в торсионном блоке канатных машин. В торсионном блоке канатной машины витые изделия подвергаются преимущественно знакопеременному кручению с напряжениями выше предела текучести стали, т. е. с пластической деформацией, а также изгибу в устройстве двухплоскостной рихтовки, применяемой с целью снятия свивочных напряжений. Торсионный блок показан на рис. 9.14.

На обрывность оказывает влияние схема свивки проволок в металлокорд на канатной машине. Чем сложнее конструкция металлокорда и кинематическая схема канатной машины, тем больше необходимо проволоке преодолеть изгибов и кручений на конструктивных элементах канатной машины. Это повышает вероятность обрыва проволоки, особенно в торсионном блоке, где проволока получает максимальную деформацию.

В современном производстве металлокорда применяются канатные машины двойного кручения из-за высокой производительности, малой инерционности, относительной простоты конструкции. Недостатком машин двойного кручения являются повышенные требования к качеству проволоки, к чистоте металла, количеству неметаллических включений, а также наличию рисок и царапин на поверхности. Схема машины двойного кручения представлена на рис. 10.2 [83].

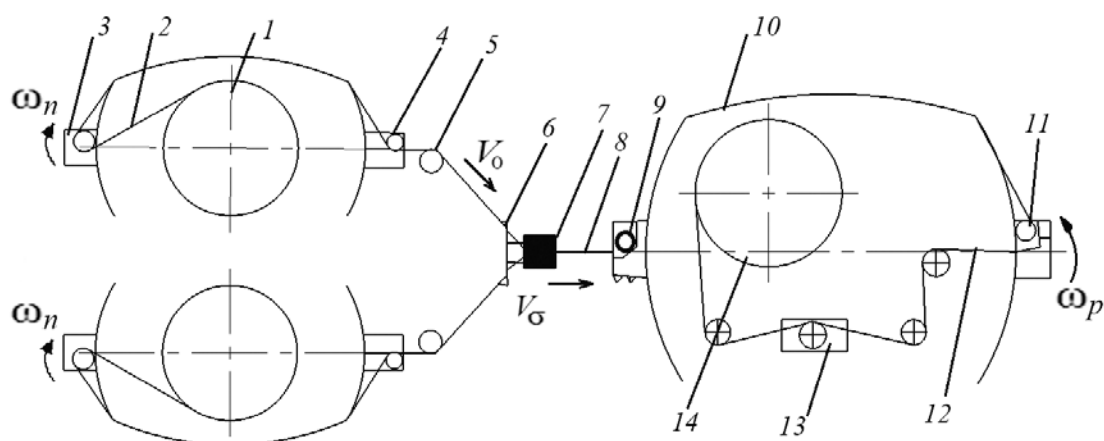


Рис. 10.2. Кинематическая схема машины двойного кручения с внешним расположением питающих катушек и узлом подкрутки проволок:

- 1 – питающая катушка; 2 – проволока; 3 – первичная подкрутка;  
 4 – вторичная подкрутка; 5 – направляющие ролики;  
 6 – распределительный шаблон; 7 – плашки; 8 – витая структура;  
 9 – первичная свивка; 10 – «баллон»; 11 – вторичная свивка;  
 12 – витая структура с номинальным шагом;  
 13 – торсионный блок; 14 – приемная катушка

Для процесса пластического формоизменения характерна неоднородность деформации, что приводит к различной по величине и направлению деформации отдельных зерен металла. Обычно зерна имеют достаточно четкие границы и могут быть использованы как естественные черты, позволяющие не только качественно, но, в некоторых случаях, количественно оценить деформированное состояние рассматриваемой области.

Существует достаточно точный способ количественной оценки степени деформации. На свободной поверхности тела или на поперечном срезе делается микрошлиф необходимых размеров. На данный микрошлиф до деформации наносят сетку углублений или выявляют характерные точки и границы зерен. Далее определяют расстояние между характерными точками или параметры сетки оптическими и визуальными методами. Степень деформации характеризуется изменением положений точек или изменением формы решетки, искажением углов ребер решетки. Погрешность измерений деформаций таким способом обычно несущественна. Однако эта методика имеет существенный недостаток: необходимость изготовления шлифов и измерения расстояния между опорными точками до деформации тела, что увеличивает трудоемкость метода [84].

### **10.3. Определение параметров тонкой проволоки, влияющих на прямолинейность металлокорда после свивки**

К технологическим характеристикам металлокорда относятся прямолинейность, остаточное кручение и раскручиваемость. Прямолинейность – способность корда свободно лежать в горизонтальной плоскости между двумя параллельными линиями, находящимися на заданном расстоянии друг от друга. Одна из методик определения прямолинейности металлокорда проводится на столе длиной 6 м и шириной не менее 0,4 м с начерченными параллельно длинным сторонам стола по всей его длине двумя линиями, расстояние между которыми равно 75 мм. На одном конце стола находится устройство, обеспечивающее свободное вращение катушки с металлокордом вокруг горизонтальной оси. Образец длиной 6 м после размотки с катушки без натяжения помещают между начерченными на столе линиями. Металлокорд считается прямолинейным, если он не касается ни одной из них. Пересечение свободным концом корда какой-либо из линий на длине до 0,5 м в расчет не принимается [86]. Методика определения прямолинейности металлокорда может отличаться в зависимости от специфики производства предприятия и места проведения анализа: в лаборатории или непосредственно в цеху.

При свивке металлокорда в проволоках возникают остаточные напряжения, которые отрицательно влияют на прямолинейность и нераскручиваемость, а также на механические свойства металлокорда. Для снятия этих напряжений в линии после свивочных плашек устанавливают рихтовальные устройства в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Металлокорд, проходя между роликами, симметрично изгибается. В некоторых случаях проволоку деформируют в двухпластинчатом деформаторе. При этом ей придают такую форму, которую она должна иметь в свитой пряди, а за счет обтяжки уравнивают натяжение отдельных проволок [87].

На прямолинейность металлокорда оказывает влияние релаксация остаточных напряжений проволоки, которая вызвана неравномерностью деформаций при волочении. Релаксация представляет собой механизм перехода упругой деформации в пластическую при постоянной суммарной деформации. Поэтому пластическая деформация растет за счет уменьшения упругой. При этом напряжения в металле снижаются [88]. Для повышения прямолинейности металлокорда необходимо повысить равномерность распределения остаточных

напряжений, а также повысить однородность деформации при волочении. Чем пластичнее проволока, тем больше  $\delta$  и тем больше неравномерность деформаций при волочении.

Значение относительного удлинения характеризует пластичность и представляет собой запас пластической деформации проволоки до разрушения. Чем меньше относительное удлинение, тем меньше остаточных напряжений перейдет в пластическую деформацию с помощью механизма релаксации. Однако малое значение  $\delta$  приведет к высокой хрупкости металла проволоки и высокой обрывности при свивке металлокорда. В связи с этим необходимо найти оптимальное значение  $\delta$  для каждого типа металлокорда.

Для повышения равномерности распределения деформаций и снижения остаточных напряжений в проволоке возможно использование дополнительного растяжения в процессе волочения, использование роликов обратной деформации для изменения контактного взаимодействия между проволоками в процессе свивки за счет упругого изгиба металлокорда.

Способы увеличения прямолинейности металлокорда находят отражение в патентах [89]–[91].

Схема для повышения прямолинейности металлокорда с помощью дополнительного растяжения тонкой проволоки в потоке волочильного стана представлена на рис. 10.3 [89].

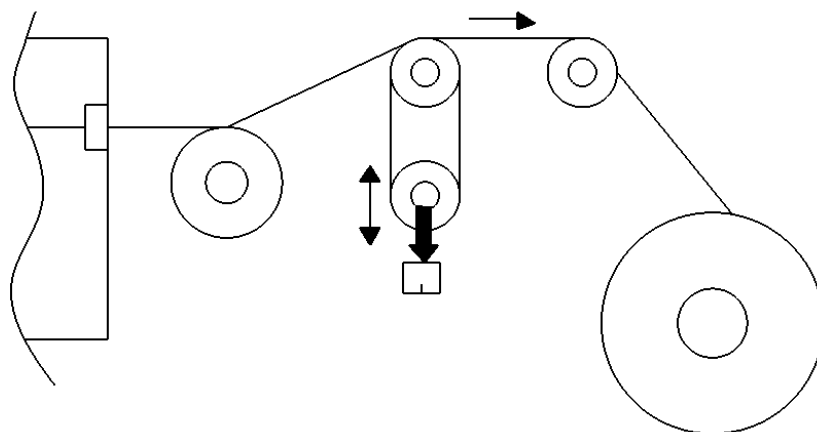


Рис. 10.3. Схема дополнительного растяжения в потоке волочильного стана

Особенностью данного способа производства стальных нитей с высокой прочностью на растяжение для металлокорда является то, что после финального волочения нить подвергают разрывной нагрузке в пределах от 70 до 90 % от предельной.

Схема растяжения тонкой проволоки с помощью рычажного механизма в потоке волочильного стана представлена на рис. 10.4 [92].

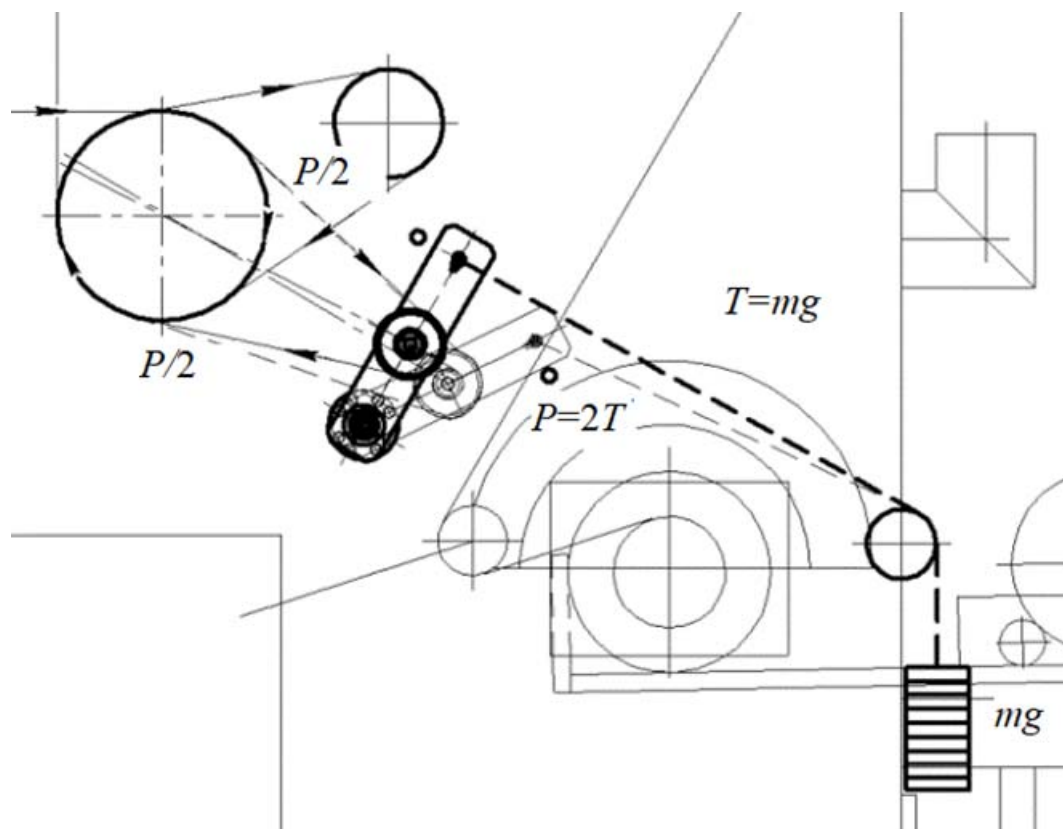


Рис. 10.4. Схема растяжения тонкой проволоки с помощью рычажного устройства

Одним из способов снижения остаточных напряжений проволоки является роликовая рихтовка с преформирующими роликами (рис. 10.5). Ролики являются неприводными и имеют индивидуальную регулировку. Принцип ее работы заключается в воздействии на проволоку знакопеременных изгибающих нагрузок. Дополнительная знакопеременная пластическая деформация снижает уровень остаточных напряжений и незначительно повышает предел прочности металла проволоки из-за холодной пластической деформации.

Основным преимуществом является простота конструкции и удобство размещения в потоке проволочного стана. Недостатком является частый выход из строя подшипников роликов в рихтовке из-за больших нагрузок и скоростей волочения, снижение сопротивления пластической деформации металла проволоки. Хотя рихтовочные устройства широко распространены на этапе волочения, их можно успешно использовать и на этапе свивки металлокорда в двух перпендикулярных плоскостях.





Рис. 10.5. Общий вид роликовой рихтовки

Отличие в использовании роликовых рихтовочных устройств на этапе волочения и на этапе свивки заключается в воздействии на деформируемое тело. При использовании на этапе свивки ролики изгибают металлокорд, вызывая осевые смещения проволок и немного ослабляя их контактное взаимодействие и снижая уровень остаточных свивочных напряжений.

Для оценки степени остаточных напряжений в тонкой проволоке и прогнозе отклонения от прямолинейности металлокорда возможно использование ультразвукового метода определения напряжений. Данный метод обладает высокой универсальностью и является неразрушающим, что дает возможность подвергать оценке данным методом готовый металлокорд.

Анализ параметров движения упругой волны дает информацию о состоянии и физических свойствах металла. Существует возможность связать характеристики колебаний со значениями остаточных напряжений. Для исследований необходимо использовать ультразвуковые излучатели, так как ультразвуковые колебания обладают высокой проникающей способностью, которая не зависит от агрегатного состояния металла.

Суть методики измерения остаточных напряжений в проволоке заключается в пропускании через готовый металлокорд или через тонкую проволоку продольных и поперечных ультразвуковых волн с оценкой степени поляризации и амплитуды колебаний. Внутренние остаточные напряжения влияют на скорость волны, а также на изменения угла плоскости поляризации волны. Эти изменения пропорциональны величине остаточных напряжений в металле [84]. На практике контролировать остаточные напряжения очень сложно. Возможно только перераспределение внутренних остаточных напряжений.

Остаточные напряжения влияют на пластичность проволоки. Пластичность характеризуется величиной относительного удлинения. Чем больше пластичность проволоки, тем больше отклонение от прямолинейности. Для снижения отклонения от прямолинейности металлокорда необходимо контролировать величину относительного удлинения тонкой проволоки  $\delta$ .

На сегодняшний день проблема повышенного отклонения от прямолинейности металлокорда требует дополнительного изучения.

Современные тенденции развития в производстве металлокорда заключаются в увеличении прочности проволок для производства высокопрочного и сверхвысокопрочного металлокорда. Такая тенденция развития привела к увеличению обрывов металлокорда на этапе свивки из-за недостаточной пластичности тонкой проволоки.

Проблема обрывности проволоки при свивке металлокорда заключается в низкой пластичности. Было показано, что на обрывность сильное влияние также оказывают технологические особенности свивки на машинах двойного кручения, механические свойства проволоки, формирующиеся на этапе тонкого волочения.

Проблема прямолинейности металлокорда и обрывности проволоки во время свивки металлокорда еще недостаточно изучена. Пока не найдено универсальное решение для повышения прямолинейности с одновременным снижением обрывности для всех типов металлокордов. Однако можно снизить вероятность обрыва проволоки, контролируя механические свойства тонкой проволоки: предел прочности и относительное удлинение. Для увеличения прямолинейности металлокорда после свивки возможно использование растяжения проволок в потоке волочильного стана. Это перераспределит остаточные напряжения, возникающие в процессе волочения, а также снизит величину относительного удлинения. На этапе свивки возможно использование ролика обратной деформации для исправления контактного взаимодействия между проволоками в свитом металлокорде.

На обрывность и прямолинейность металлокорда влияет величина относительного удлинения  $\delta$ . При высоком значении  $\delta$  пластичность проволоки высока, и обрывность существенно снижается, но повышается отклонение от прямолинейности. При низком значении  $\delta$  наоборот: возрастает обрывность и снижается отклонение от прямолинейности. Из этого следует вывод, что необходимо найти оптимальное значение величины относительного удлинения для каждого типа металлокорда. На сегодняшний день оптимальное значение  $\delta$  не определено. Поэтому данная тема является актуальной и требует более глубокого изучения.

# ГЛАВА 11

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ОБРЫВНОСТИ МЕТАЛЛОКОРДА ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЬНОЙ ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

### 11.1. Влияние механических свойств на обрывность металлокorda

На обрывность оказывают сильное влияние технологические особенности свивки на машинах двойного кручения, механические свойства проволоки, формирующиеся только на этапе тонкого волочения.

Имеется возможность снизить вероятность обрыва проволоки на этапе свивки, контролируя механические свойства тонкой проволоки: предел прочности и относительное удлинение.

На обрывность и прямолинейность металлокorda влияет величина относительного удлинения  $\delta$ . При высоком значении  $\delta$  пластичность проволоки высока и обрывность существенно снижается, но повышается отклонение от прямолинейности. При низком значении  $\delta$  наоборот: возрастает обрывность и снижается отклонение от прямолинейности.

Представим обрывность как функцию двух переменных  $\sigma_b$  и  $\delta$ . Для определения и оценки степени влияния механических свойств проволоки на обрывность металлокorda необходимо вычислить частную производную функции от каждой переменной.

Графическая интерпретация частной производной функции обрывности ( $B$ ) от относительного удлинения для металлокorda  $3+8\times 0,35HT$  представлена на рис. 11.1. В качестве исходных данных были приняты следующие значения:  $E = 195660$  ГПа;  $\sigma_b = 3139,7$  МПа;  $\varepsilon_{cb} = 2,14$  %.

По графику видно, что чем больше величина относительного удлинения, т. е. пластичности проволоки, тем медленнее возрастает величина обрывности ( $B$ ). Причиной этому является повышенный запас пластической деформации до разрушения проволоки.

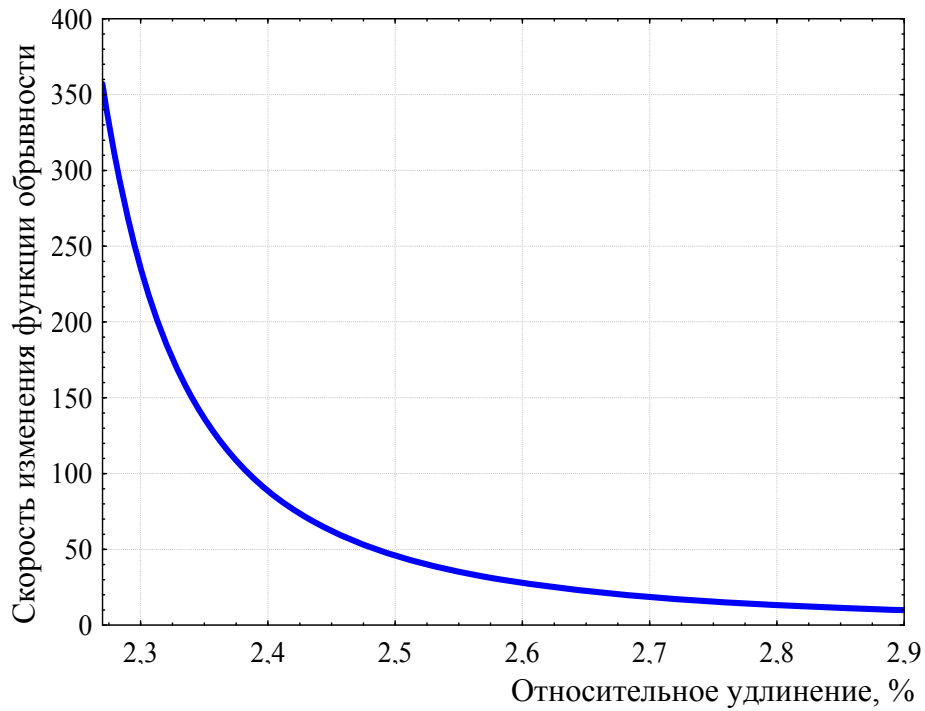


Рис. 11.1. График частной производной  $\frac{\partial B}{\partial \delta} = f(\delta)$

На рис. 11.2 представлен график зависимости частной производной функции обрывности от предела прочности проволоки.

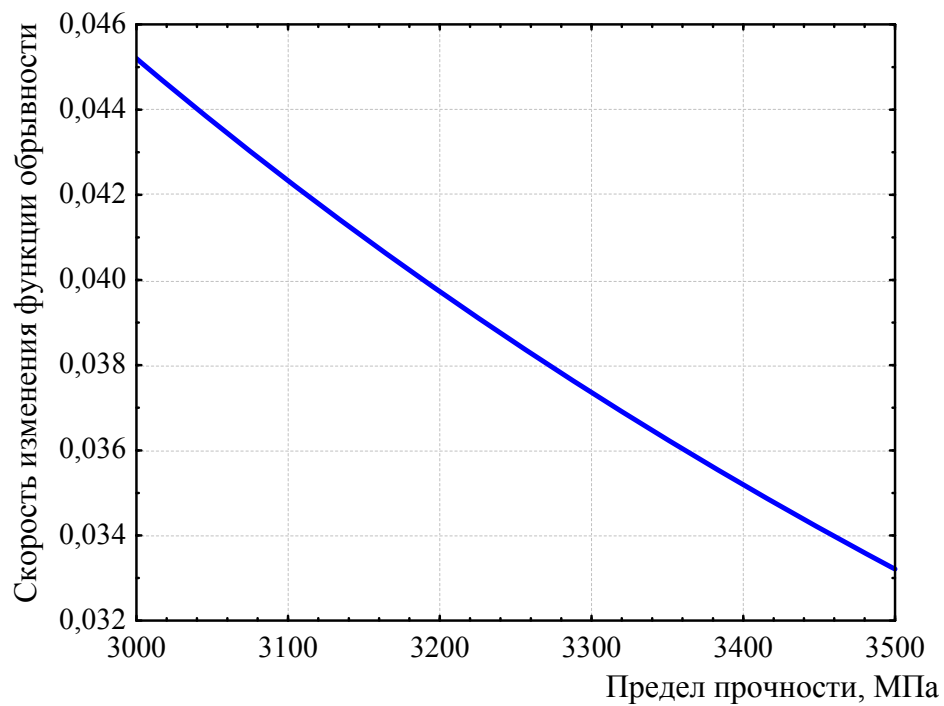


Рис. 11.2. График частной производной  $\frac{\partial B}{\partial \delta} = f(\delta)$

По графику видно, что в широком диапазоне прочностных характеристик проволоки скорость изменения функции обрывности изменяется очень незначительно. Отсюда следует вывод, что на обрывность проволоки при свивке металлокорда наибольшее влияние оказывает  $\delta$ .

Сама функция обрывности  $B$  от величины относительного удлинения  $\delta$  для металлокорда  $3+8 \times 0,35HT$  представлена на рис. 11.3.

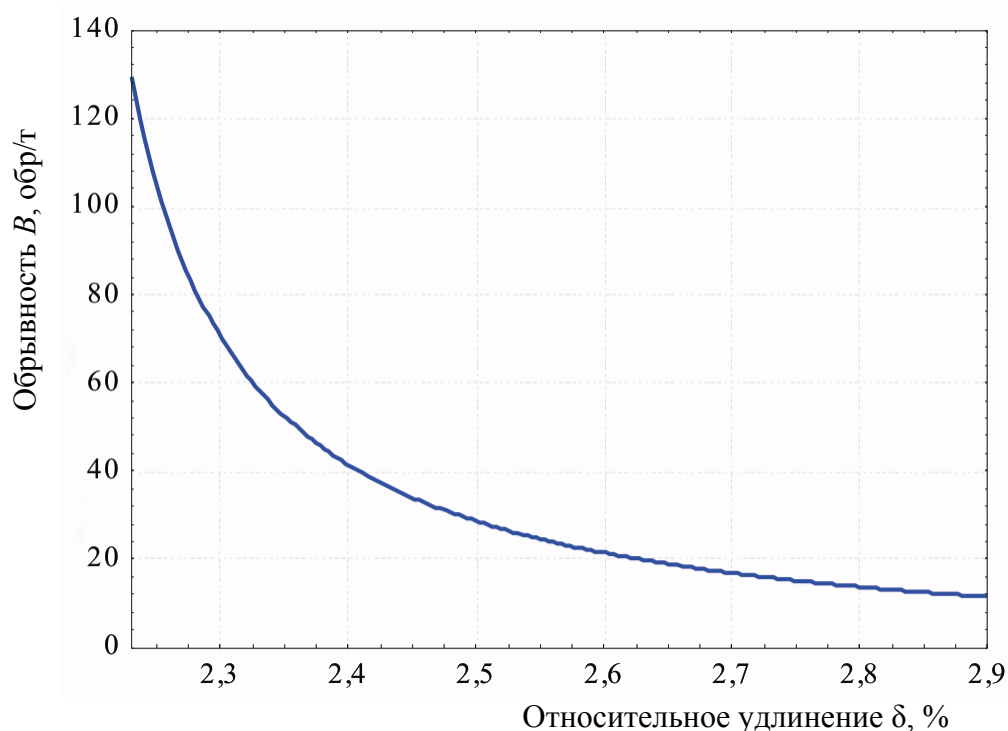


Рис. 11.3. Зависимость обрывности от пластичности проволоки

Чем выше пластичность проволоки, тем меньше обрывов на тонну готового металлокорда. Однако повышение пластичности оказывает отрицательное влияние на прямолинейность. Проволока с повышенной пластичностью релаксирует на катушке интенсивнее, что ведет к более быстрому переходу внутренних напряжений в пластическую деформацию. Соответственно, металлокорд, свитый из такой проволоки, будет иметь неудовлетворительные параметры прямолинейности.

В табл. 11.1 представлены механические свойства тонкой проволоки, используемой при производстве металлокорда. В табл. 11.2 представлена характеристика волочения тонкой проволоки.

Таблица 11.1

## Механические свойства тонкой проволоки

Диаметр проволоки, мм	Номер образца	$\sigma_y/\sigma_B$	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
0,30HT	1	0,941	3128,98	2945,25	191,63	2,55
	2	0,909	3133,98	2849,23	197,18	2,599
	3	0,891	3156,06	2815,07	198,16	2,463
Среднее	–	0,914	3139,67	2869,85	195,66	2,537
0,35HT	1	0,9	3313,3	2982	192,32	2,498
	2	0,9	3311,1	2980	192,34	2,336
	3	0,89	3314	2983,4	194,93	2,437
Среднее	–	0,897	3313	2981,8	193,03	2,424
0,30SHT	1	0,91	3414,9	3067,8	200,51	2,402
	2	0,91	3405,4	3061,4	199,88	2,457
	3	0,9	3394,3	3047,3	199,7	2,394
Среднее	–	0,907	3404,86	3058,83	200,03	2,418
0,25UT	1	0,93	3872	3600,96	196,51	2,78
	2	0,93	3884	3612,12	200,62	2,68
	3	0,95	3931	3734,45	200,05	2,42
Среднее	–	0,937	3895,67	3649,18	199,06	2,627
0,30UT	1	0,9	4106	3695,6	194,51	2,875
	2	0,9	4120	3708,9	197,28	2,955
	3	0,89	4116,2	3663,4	196,52	2,732
Среднее	–	0,897	4112,93	3689,3	196,1	2,854
0,35UT	1	0,882	3596,01	3085,6	197,03	2,548
	2	0,906	3559,26	3169,3	183,9	2,683
	3	0,881	3501,26	3030,9	187,59	2,904
Среднее	–	0,89	3552,18	3095,26	189,5	2,712

Таблица 11.2

## Характеристика волочения тонкой проволоки

Диаметр и группа прочности проволоки $d_1$ , мм	0,30HT	0,35HT	0,30SHT	0,25UT	0,30UT	0,35UT
Скорость волочения, м/с	16	14	10	4	3	5

<b>Максимальная температура поверхности проволоки, °С</b>	727	698	608	507	472	536
<b>Максимальная температура сечения проволоки, °С</b>	222	211	236	297	280	251
<b>Диаметр проволоочной заготовки <math>d_0</math>, мм</b>	1,80	1,94	1,98	1,71	1,92	2,15
<b>Суммарное обжатие <math>\Sigma\mu</math></b>	33,254	30,72	40,11	46,786	40,96	37,73
<b>Истинная деформация <math>\ln \frac{d_0^2}{d_1^2}</math></b>	3,504	3,429	3,692	3,846	3,713	3,63
<b>Количество углерода в металле, мас. %</b>	0,80–0,82	0,80–0,82	0,82–0,84	0,94–0,98	0,94–0,98	0,94–0,98
<b>Предел текучести, МПа</b>	2869,85	2981,8	3058,83	3649,18	3689,3	3095,26
<b>Относительное удлинение проволоки, %</b>	2,537	2,424	2,418	2,627	2,854	2,712

Отношение  $\sigma_y / \sigma_b$  характеризует запас пластической деформации до разрушения образца. Как только напряжения в проволоке достигают уровня  $\sigma_y / \sigma_b$  от предела прочности, металл переходит в пластическое состояние. Из табл. 11.1 видно, что зависимость предела прочности от пластичности металла проволоки неоднозначна. По логике при увеличении прочностных свойств проволоки для металлокорда должны уменьшаться пластические свойства, однако этого не происходит. Это связано с тем, что при производстве проволоки для металлокорда на этапе тонкого волочения формируется целый комплекс механических свойств, влияющих в дальнейшем на обрывность и прямолинейность металлокорда. Поэтому при производстве различных видов металлокорда, особенно высокопрочных, необходимо учитывать эту особенность.

График зависимости предела прочности проволоки по возрастанию диаметров и классов прочности представлен на рис. 11.4.

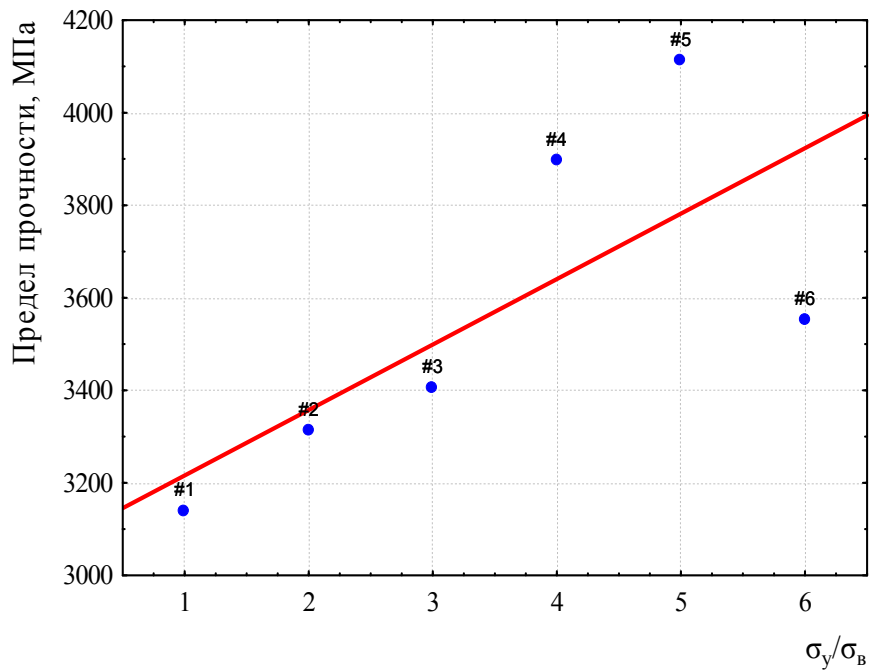


Рис. 11.4. График зависимости предела прочности проволоки по возрастанию диаметров и классов прочности:  
 #1 – 0,30HT; #2 – 0,35HT; #3 – 0,30SHT; #4 – 0,25UT;  
 #5 – 0,30UT; #6 – 0,35UT

График зависимости относительного удлинения проволоки по возрастанию диаметров и классов прочности представлен на рис. 11.5.

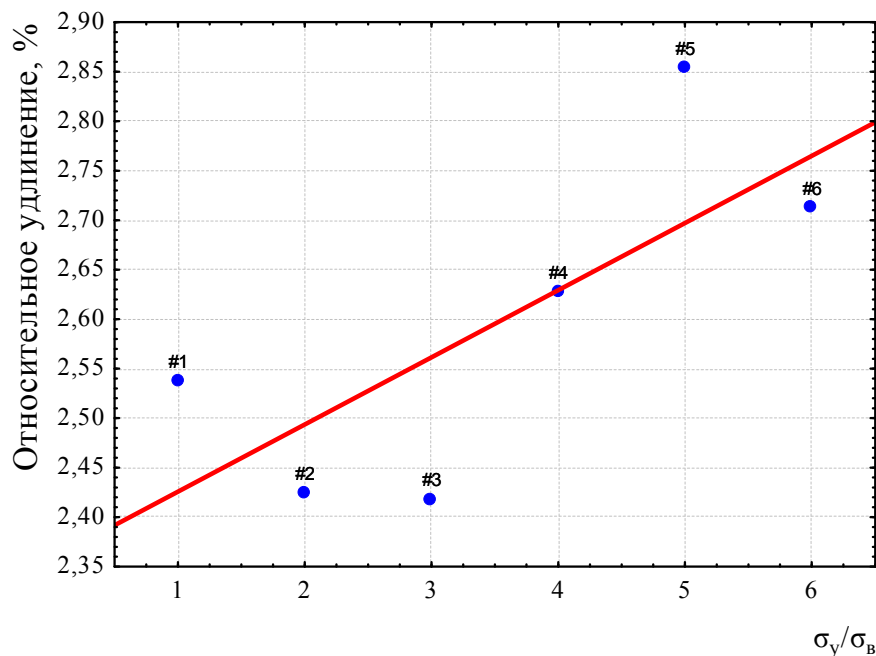


Рис. 11.5. График зависимости относительного удлинения проволоки по возрастанию диаметров и классов прочности:  
 #1 – 0,30HT; #2 – 0,35HT; #3 – 0,30SHT; #4 – 0,25UT;  
 #5 – 0,30UT; #6 – 0,35UT



Анализ рис. 11.4 показывает, что с увеличением диаметра проволоки возрастает предел прочности металла. Однако для проволоки класса прочности *UT* данная зависимость не работает. Это связано с особыми режимами деформации на этапе тонкого волочения и режимом термообработки.

По рис. 11.5 видно, что общая тенденция заключается в увеличении пластичности металла с увеличением диаметра проволоки и класса прочности проволоки. При рассмотрении каждого случая в частности видно, что увеличение диаметра не способствует увеличению пластичности проволоки, так как величина относительного удлинения  $\delta$  формируется за счет патентирования и режимов обжатий на этапе тонкого волочения.

## **11.2. Связь между обрывностью и прямолинейностью металлокорда**

В лабораторных условиях экспериментально была проверена релаксация высокопрочного металлокорда  $2 \times 0,30HT$  и сверхпрочного металлокорда  $2+2 \times 0,30SHT$ . Релаксация характеризовалась отклонением от прямолинейности при выдержке металлокорда на катушке диаметром 80 мм в течение 7 сут. Образец промышленного производства перематывался на катушку заданного диаметра без дополнительных приспособлений и особенностей намота. При замерах отрезался образец длиной более 600 мм и свободно опускался на линейку с базой 600 мм. Полученные результаты сведены в табл. 11.3.

*Таблица 11.3*

**Результаты определения прямолинейности**

Время выдержки и снятия данных, сут	Отклонение от прямолинейности, мм	
	$2 \times 0,30HT$	$2+2 \times 0,30SHT$
0	95	82
1	110	97
3	90	110
7	90	115

Результаты, сведенные в табл. 11.3, графически представлены на рис. 11.6.

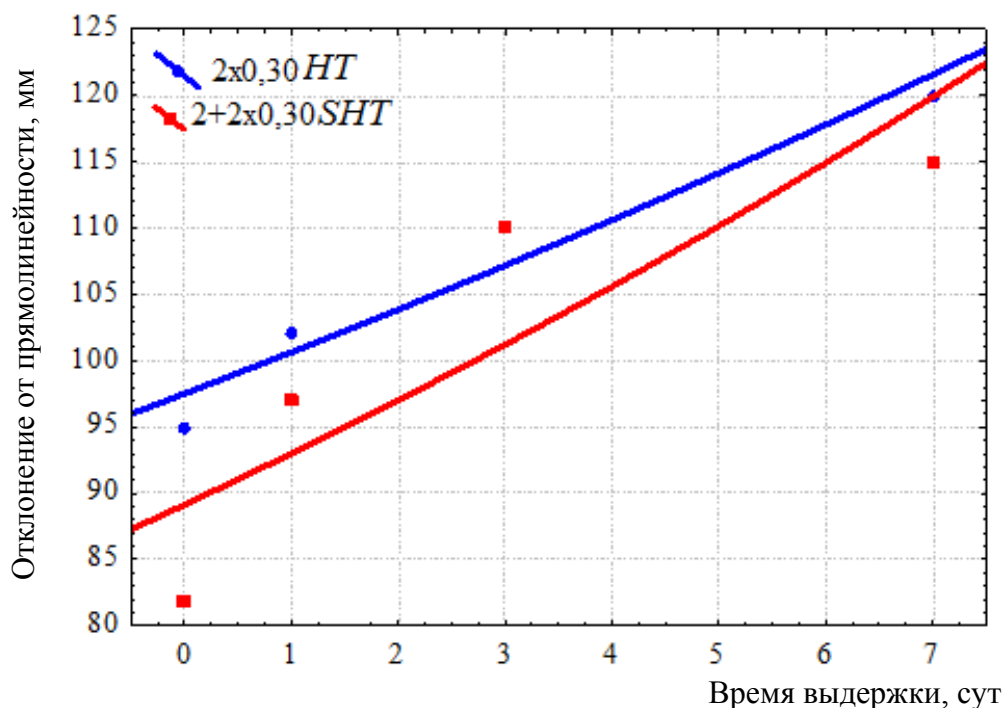


Рис. 11.6. Отклонение от прямолинейности различных по прочности металлокордов

По графикам видно, что отклонение от прямолинейности ниже у сверхвысокопрочного металлокорда. Чем меньше запас пластической деформации у металла, тем меньше в нем уровень остаточных напряжений, возникающих в процессе тонкого волочения и свивки проволоки в металлокорд. Из-за пониженного уровня остаточных напряжений в металле релаксация происходит не так интенсивно, как в высокопрочном металлокорде. После выдержки металлокорда на катушке в течение 7 сут видна небольшая разница ( $\approx 4\%$ ) в отклонении от прямолинейности между двумя видами металлокорда. Однако сверхпрочный металлокорд имеет лучшие показатели прямолинейности, несмотря на то, что значения отклонения от прямолинейности металлокорда носят неудовлетворительный характер. Из выявленной тенденции можно сделать вывод, что у ультрапрочного металлокорда должны быть наилучшие показатели по прямолинейности и высокая обрывность.

Согласно лабораторным испытаниям, а также статистическим данным по отбраковке металлокорда была построена зависимость, связывающая отбраковку металлокорда по прямолинейности количества обрывов проволоки при свивке металлокорда на тонну готовой продукции. Данная зависимость представлена на рис. 11.7.

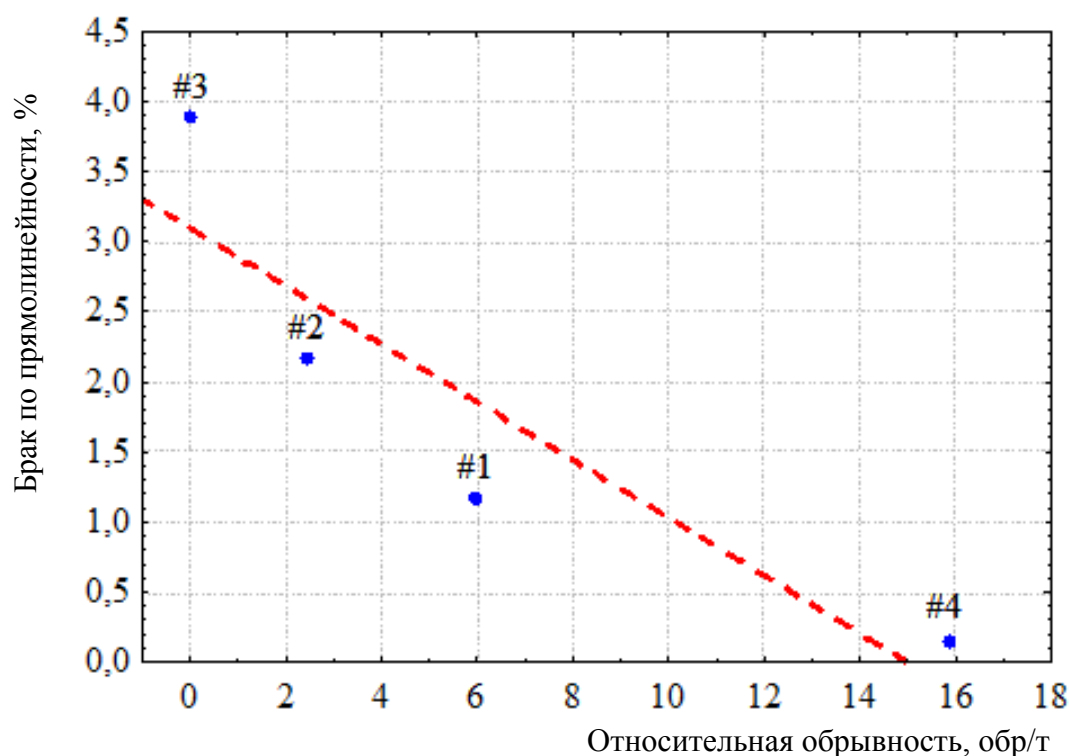


Рис. 11.7. Экспериментальная зависимость отбраковки по прямолинейности металлокорда от обрывности проволоки при свивке без ролика обратной деформации:  
 #1 – 4+3×0,35UT; #2 – 3+2×0,35UT;  
 #3 – 3+8×0,35HT; #4 – 2+2×0,30SHT

Точки на графике обозначают средние параметры по браку прямолинейности и обрывности для массовых типов металлокорда при их производстве. Данный график носит исключительно экспериментальный и справочный характер. Однако анализ графика дает понятие о зависимости брака по прямолинейности от обрывности. Чем больше обрывность проволоки при свивке металлокорда, тем меньше у данного металлокорда отклонение от прямолинейности и наоборот. Это говорит о том, что при производстве металлокорда нельзя полностью избавиться и от брака по прямолинейности, и от обрывности. Необходимо определить баланс между прямолинейностью металлокорда и обрывностью. На данный момент не существует универсального решения для обеспечения нулевой обрывности и отсутствия брака по прямолинейности.

### **11.3. Критерий комплексной оценки обрывности и прямолинейности металлокорда**

Каждый тип металлокорда имеет собственные характеристики: показатель технологичности – количество обрывов на тонну продукции при операции свивки металлокорда, показатель качества – прямолинейность металлокорда после свивки в развернутом состоянии. Для оценки этих показателей предлагается использовать критериальный метод оценки.

Критерий – это способ описания альтернативных вариантов решений, способ выражения различий между альтернативами. Количественные критерии, позволяющие оценивать результаты принимаемых решений, называются критериями эффективности. Каждое решение приводит к определенному результату, последствия которого оцениваются по оценочным критериям.

В данном случае имеется технологический процесс изготовления металлокорда с определенными механическими характеристиками. Задачей современного производства является повышение производительности производства при сохранении текущего уровня качества продукции. Это значит, что имеется набор параметров технологического процесса, которые можно изменять и, как следствие, влиять на характеристики готового изделия.

Качество металлокорда определяется набором характеристик. Среди них: механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) и технологические свойства (прямолинейность, обрывность, нераскручиваемость). Очевидно, что первичными являются механические свойства металлокорда. Предел прочности в большей степени влияет на обрывность металлокорда при свивке, а относительное удлинение выражает пластичность проволоки в металлокорде и влияет на прямолинейность. При этом неизвестна жесткая связь между прочностными и пластическими свойствами.

Возникает необходимость разработки единого параметра, отвечающего за комплекс получаемых механических свойств в процессе изготовления металлокорда.

Основной принцип критериального подхода – определенность.

Определенность понимается как такое состояние знания, когда заранее известен конкретный исход для каждой альтернативы. Таким образом, располагая необходимыми требованиями к изготовленному металлокорду, можно подобрать необходимые параметры технологического процесса, исходя из определенных значений критерия оценки.

Ранее был предложен первоначальный вариант критерия комплексной оценки. Он заключался в необходимости определения способов повышения производительности волочения и выявления взаимосвязи между деформационными, кинематическими параметрами волочения и содержанием углерода в проволоке. Эти три параметра, предположительно, находятся в обратно пропорциональной зависимости и определяют соотношение между качественными и количественными показателями всего процесса тонкого волочения.

Первоначальное предложение было переработано и модернизировано в сторону углубления изучения влияния механических свойств на качественные характеристики готового металлокорда.

Так как наибольшее влияние на свойства металлокорда оказывают механические свойства проволоки, из которой свит данный металлокорд, предлагается акцентировать внимание на формирование механических свойств в процессе деформации металла.

Были проведены испытания на растяжение проволоочной заготовки, тонкой проволоки и уже свитого металлокорда для определения места наиболее эффективного воздействия на готовый металлокорд.

В ходе опытов были получены механические свойства тонкой проволоки и металлокорда. На рис. 11.8 представлены полученные механические характеристики для исследуемых типов металлокорда.

Из анализа рис. 11.8 можно предположить, что изменение деформационных режимов тонкого волочения может существенно повлиять на характер упрочнения и механические свойства проволоки. На свойства проволоки влияют основные деформационные режимы: суммарная деформация, скорость волочения, температура проволоки при волочении. Суммарная деформация определяет степень деформационного упрочнения металла. Скорость волочения влияет на температуру проволоки при волочении. Температура проволоки при волочении зависит не только от скорости волочения, но и от контактных условий между проволокой и волокой. Повышенная температура высокоуглеродистой проволоки при волочении вызывает дополнительное упрочнение за счет деформационного старения и выделения марганца на поверхности проволоки. Характер упрочнения влияет на соотношение прочностных и пластических свойств проволоки. Чем выше пластичность проволоки, тем ниже показатель обрывности и тем хуже прямолинейность свитого металлокорда. Поэтому необходимо соблюдать баланс для сохранения текущего уровня качества металлокорда.

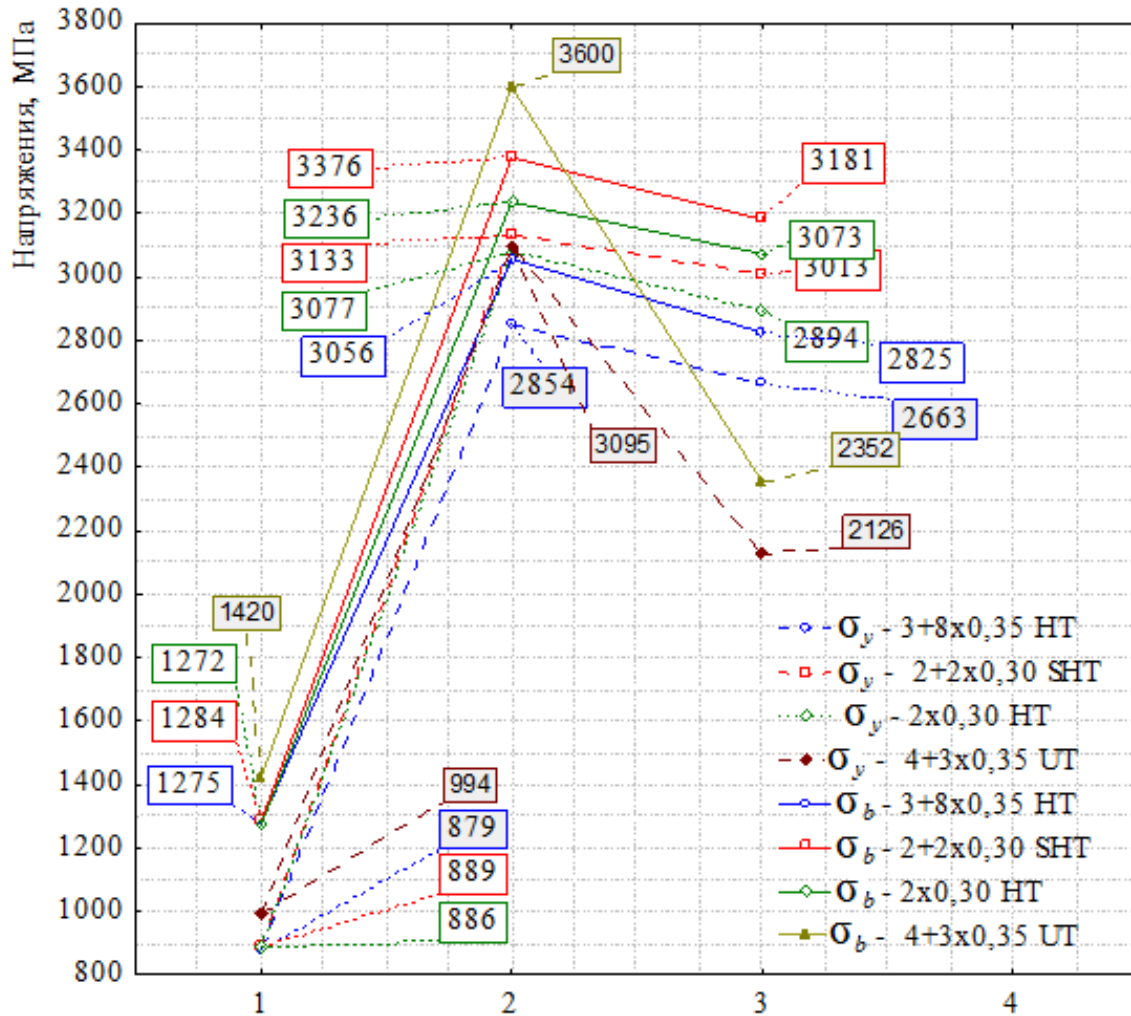


Рис. 11.8. Изменение условного предела текучести и предела прочности:

1 – в проволочной заготовке; 2 – тонкой проволоке после волочения; 3 – целом металлокорде

Для комплексной оценки обрывности и прямолинейности металлокорда предлагается использовать энергетический критерий, который характеризует сформированный комплекс механических свойств и накопленную энергию в процессе волочения и свивки.

Диаграммы, полученные при растяжении образцов проволочной заготовки и тонкой проволоки, можно перевести из системы координат  $\sigma(\delta)$  в систему координат  $F(\Delta l)$ . В данном случае  $\sigma$  – напряжения, МПа;  $\Delta l$  – удлинение образца. Площадь под кривой диаграммы растяжения в системе координат  $F(\Delta l)$  есть численное выражение энергии  $W$ .

Переход от системы координат  $\sigma(\delta)$  к  $F(\Delta)$  отражен в выражениях:

$$W = F(l_k - l_0) = \sigma \frac{(l_k - l_0)}{l_0} \left( \frac{\pi}{4} d^2 l_0 \right) = \sigma \delta \left( \frac{\pi}{4} d^2 l_0 \right); \quad (11.1)$$

$$\Delta W = \frac{W^T - W^3}{W^3} 100 \%; \quad (11.2)$$

$$W^T = 0,01\sigma_T^T + \sigma_T^T(\delta - 0,02) + 0,5(\delta - 0,02)(\sigma_B^T - \sigma_T^T); \quad (11.3)$$

$$W^3 = 0,01\sigma_T^3 + \sigma_T^3(\delta^3 - 0,02) + 0,5(\delta^3 - 0,02)(\sigma_B^3 - \sigma_T^3), \quad (11.4)$$

где  $F$  – удлинение образца;  $l_k$  – конечная длина образца, мм;  $l_0$  – начальная длина образца, мм;  $d$  – диаметр образца, мм;  $W^T$  – энергия тонкой проволоки после волочения;  $W^3$  – энергия проволочной заготовки;  $\sigma_B$  – предел прочности, МПа;  $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;  $\Delta W$  – относительное изменение энергетического критерия.

Каждому комплексу механических свойств проволочной заготовки соответствует свое значение  $W^3$ . Каждому комплексу механических свойств тонкой проволоки соответствует собственное значение  $W^T$ . Регулировать изменение  $\Delta W$  можно как с помощью изменения  $W^3$ , так и с помощью  $W^T$ .

Предполагается, что для сохранения качества продукции должно соблюдаться условие  $\Delta W = \text{const}$ . Условие постоянства  $\Delta W$  обеспечивает неизменное количество энергии, затраченное на упрочнение проволоки. Поэтому, если вводить изменения в режимы волочения с соблюдением условия  $\Delta W = \text{const}$ , то механические свойства тонкой проволоки не изменятся. Если ставить задачу повышения скорости волочения при условии сохранения механических свойств проволоки, то необходимо поддерживать неизменным значение  $\Delta W$ . Исходя из этого условия, предлагается использовать цветовые диаграммы, представленные на рис. 11.9 и 11.10.

На диаграммах (рис. 11.9 и 11.10) точками показаны различные виды тонкой проволоки. Цветом и косыми линиями на диаграмме отмечены области одинакового изменения энергетического критерия  $\Delta W$ . Для сохранения механических свойств необходимо, чтобы каждый вид проволоки находился в своей цветовой области при изменении режимов волочения. Например, для увеличения скорости можно уменьшить суммарную деформацию.

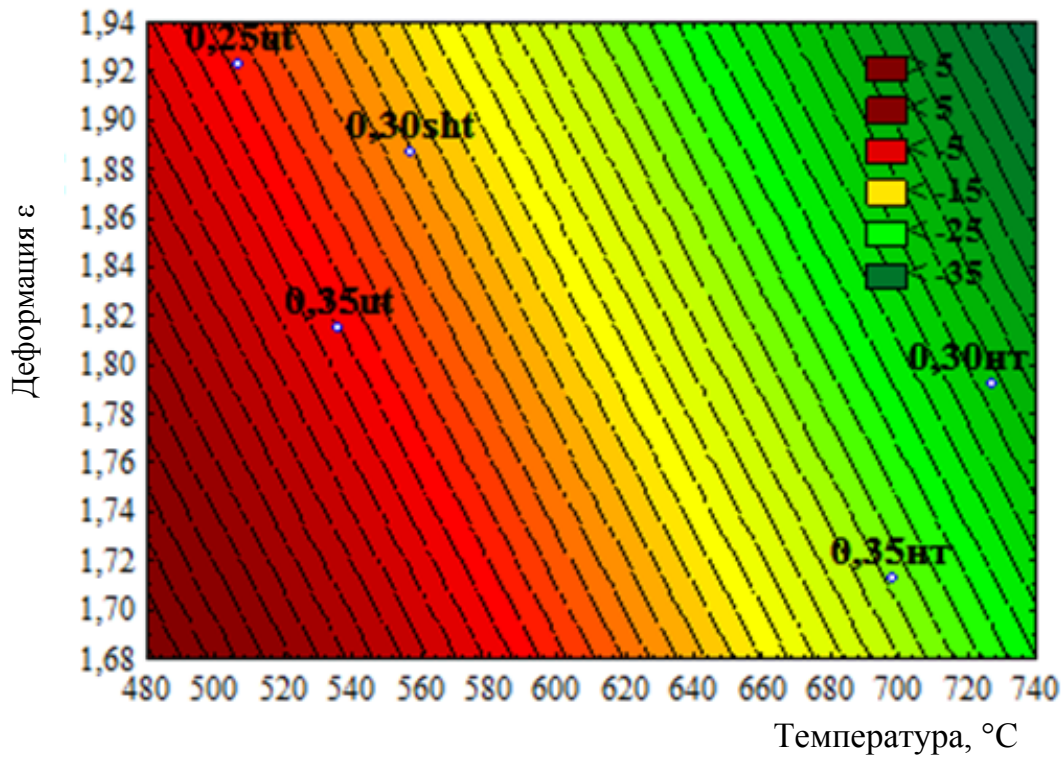


Рис. 11.9. Цветовая диаграмма деформации и температуры проволоки на этапе тонкого волочения

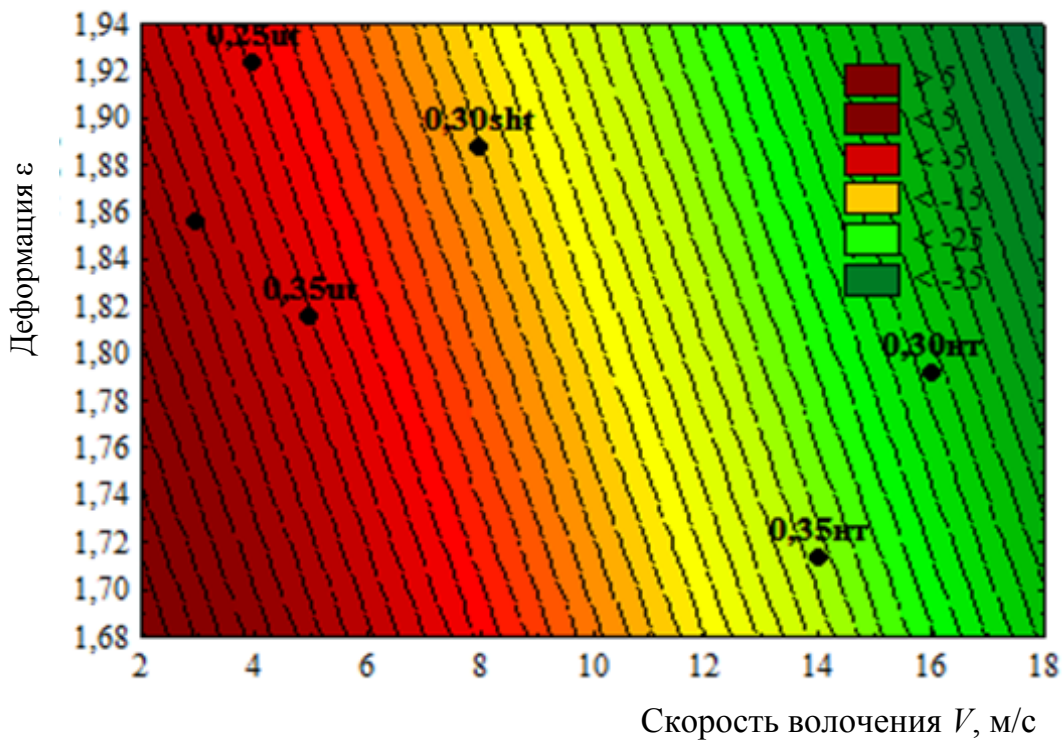


Рис. 11.10. Цветовая диаграмма деформации и скорости проволоки на этапе тонкого волочения



В отличие от первоначального варианта предложенный критерий оценки  $\Delta W$  не учитывает содержание углерода в стали и кривую упрочнения металла, а только учитывает формирование механических свойств тонкой проволоки в процессе волочения. Комплекс механических свойств проволоки измеряется путем испытаний на осевое растяжение.

Для связи  $\Delta W$  с уровнем обрывности проволоки в процессе свивки и прямолинейностью свитого металлокорда необходимо сопоставлять технологические свойства металлокорда с механическими свойствами тонкой проволоки, из которой свит данный металлокорд. При увеличении пластичности проволоки уменьшается количество обрывов и увеличивается отклонение от прямолинейности.

Так как относительное удлинение является одним из механических свойств, то оно учитывается при подсчете энергетического критерия  $\Delta W$ .

Для исследуемых типов тонкой проволоки было подсчитано в относительных единицах изменение энергетического критерия между проволочной заготовкой и тонкой проволокой. Данные представлены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

**Изменение энергетического критерия**

Тип тонкой проволоки	$\Delta W$ , %	Скорость волочения $V$ , м/с	Относительная деформация $\epsilon$	Температура $T$ , °C	Относительное удлинение $\delta$ , %
0,30HT	-27,95	16	1,792	727	2,496
0,35HT	-22,56	14	1,713	698	2,437
0,30SHT	-19,37	8	1,887	557	2,395
0,25UT	-3,96	4	1,923	507	2,68
0,35UT	-6,23	5	1,815	536	2,683

Зависимость относительного изменения энергетического критерия от относительного удлинения тонкой проволоки представлена на рис. 11.11.

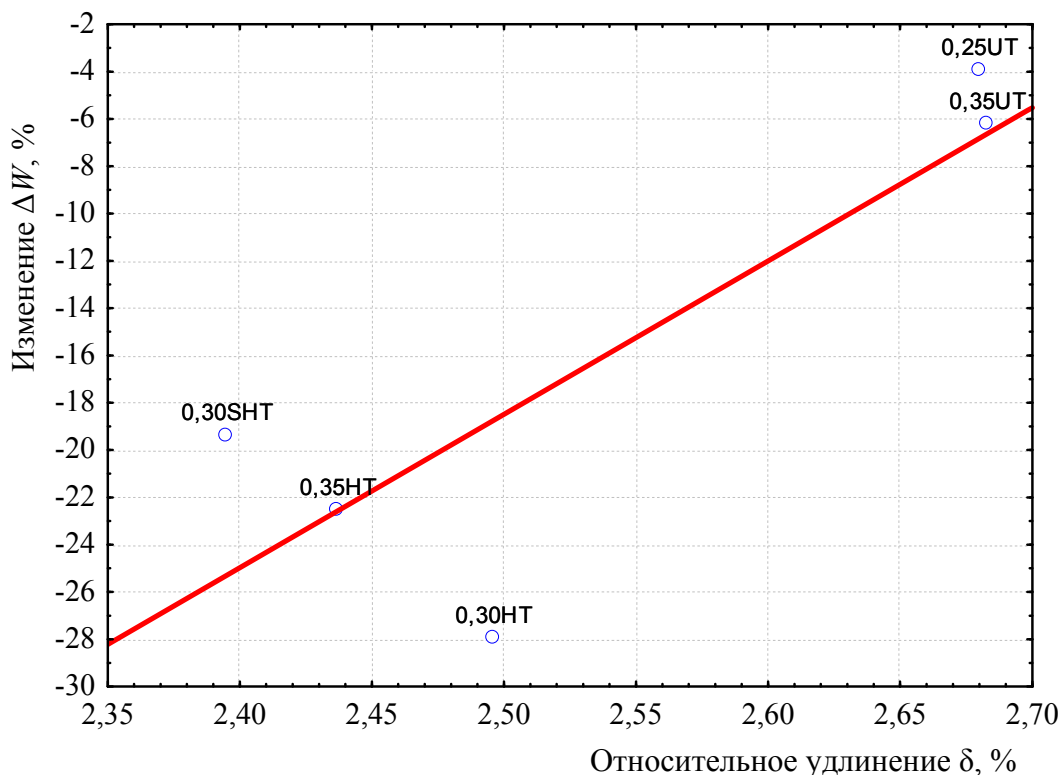


Рис. 11.11. Зависимость относительного изменения энергетического критерия от относительного удлинения тонкой проволоки

По графику видно, что при увеличении изменения  $\Delta W$  от исходного состояния проволоочной заготовки относительное удлинение тонкой проволоки уменьшается. При уменьшении воздействия на тонкую проволоку в процессе волочения  $\Delta W$  изменяется незначительно и, как следствие, относительное удлинение остается на высоком уровне.

Для оценки зависимости брака по обрывности от брака по прямолинейности предлагается использовать статистический график, который изображен на рис. 11.7.

Для использования энергетического критерия для оценки обрывности и прямолинейности предлагается пошаговый алгоритм использования:

- 1) по рис. 11.7 определяем требуемое соотношение прямолинейности и обрывности;
- 2) определяем необходимый уровень относительного удлинения для подходящих показателей обрывности по рис. 11.3;
- 3) на рис. 11.11 исходя из подсчитанного значения относительного удлинения находим соответствующее значение  $\Delta W$  на оси ординат;

4) определяем, за счет чего будет изменяться  $\Delta W$ : за счет изменения свойств тонкой проволоки  $W^T$  или за счет изменения свойств проволочной заготовки  $W^3$ ;

5) с помощью формул (9.10) и (9.11) выражаем предел прочности  $\sigma_b$  тонкой проволоки или проволочной заготовки;

6) полученное значение  $\sigma_b$  в МПа показывает необходимый уровень прочности тонкой проволоки или проволочной заготовки, обеспечивающий соблюдение выбранных параметров обрывности и прямолинейности.

Основным преимуществом критериальной оценки является возможность комплексного подхода к измерениям, оценке и принятию решения только на основании входных данных системы. На примере производства металлокорда это означает, что можно качественно оценивать показатели готовой продукции до ее производства и выпуска по количественным показателям технологического процесса.

Зная основные параметры технологического процесса и используя предварительно рассчитанный энергетический критерий, можно оценить изменения  $\Delta W$  и изменять параметры технологического процесса волочения, исходя из требования  $\Delta W = \text{const}$ .

Из недостатков критериального подхода можно отметить недостаточную точность в принятии решения, основанном на критерии, так как ошибки в расчетах, округления ведут к накоплениям погрешностей, что в конечном итоге может повлиять на значение критерия. Также критериальный подход не учитывает каких-либо особенностей технологического процесса. Например, при волочении различных марок сталей металл по-разному реагирует на температурный и скоростной фактор, а также имеет собственную кривую упрочнения. Это означает, что критерий не является абсолютно универсальным средством оценки качественных показателей.

В результате проведенных исследований выполнен анализ изменения величины основных механических параметров тонкой проволоки в зависимости от режимов волочения. Разработан новый принцип управления обрывностью и прямолинейностью металлокорда путем изменения механических свойств тонкой проволоки.

Управлять формированием комплекса механических свойств тонкой проволоки на этапе волочения предложено с помощью энергетического критерия. Для получения заданных механических свойств тонкой проволоки необходимо поддерживать изменение значения энергетического критерия постоянным.

Разработан алгоритм использования предложенного критерия в направлении формирования механических свойств тонкой проволоки в процессе волочения для регламентации обрывности и прямолинейности.

#### **11.4. Проверка адекватности и корректировка комплексного критерия оценки обрывности и прямолинейности металлокорда**

Выбор частных методик или специальных методов исследования является одним из наиболее сложных вопросов общей методики исследования. Отсутствие формализованных методов выбора частных методик нередко приводит к грубым методологическим ошибкам при получении и оценке новых научных результатов. Наиболее общим критерием выбора частных методик исследования является необходимая точность и надежность получаемых результатов. В свою очередь точность опытных данных зависит от чувствительности входных датчиков и регистрирующих приборов; точности изготовления, препарирования и измерения образцов; стабильности условий постановки и проведения эксперимента, а также ряда других контролируемых и неконтролируемых факторов.

Методы оценки адекватности регрессионных математических моделей или эмпирических уравнений основаны на анализе выполнения определенных условий. Эти условия позволяют с заданной вероятностью определять возможность адекватного описания физических свойств исследуемого объекта с помощью полученной модели. Суть выполнения условий состоит в сопоставлении функции, отражающей относительную разницу между экспериментальными значениями исследуемого параметра, полученными по плану эксперимента, и расчетными значениями, полученными из уравнения регрессии, с определенными коэффициентами – критериями адекватности или согласия. В практике оценки адекватности применяют различные статистические критерии согласия [93].

Для расширения границ применения предложенного энергетического критерия для предсказания и задания необходимого уровня брака по обрывности и прямолинейности металлокорда необходима проверка адекватности для различных условий волочения и свивки. Для повсеместного применения критерия необходима его корректировка с учетом условий применения.

По графику (см. рис. 11.11) видно, что с уменьшением относительной разницы энергетического критерия  $\Delta W$  увеличивается относительное удлинение. Однако следует заметить, что наибольшее относительное удлинение имеет металлокорд класса прочности  $UT$ . То есть при повышении прочности проволоки не всегда происходит снижение ее пластичности. Это связано с материалом изготавливаемой проволоки и свиваемого металлокорда. Металлокорд с классом прочности  $UT$  обычно производят из стали с содержанием углерода  $>0,9\%$ , а также с дополнительным легированием. Зависимость механических свойств металла от содержания углерода и легирующих элементов может быть нелинейная.

Для проверки адекватности критерия существует несколько известных способов оценки: критерий Пирсона, критерий Романовского, критерий Фишера.

Критерий Пирсона и критерий Романовского применяются только для больших выборок экспериментальных и статистических данных. Для данного случая подходит критерий Фишера, который применяется для небольших выборок. Согласно этому критерию рассчитывается экспериментальное значение критерия Фишера, которое затем сравнивается с его табличными значениями. Если рассчитанный критерий Фишера меньше табличного, то модель адекватна, т. е. уравнение регрессии удовлетворительно описывает реальный объект исследования. Если рассчитанный критерий больше табличного – модель неадекватна.

Если модель неадекватна, то необходимо повторно проверить отсутствие ошибок при обработке экспериментальных данных и при построении уравнения регрессии. Если для неадекватной модели расчетных ошибок нет, то рекомендуется проведение дополнительного эксперимента для уточнения модели с корректировкой количества и вида факторов эксперимента, уменьшением интервалов варьирования факторов, с усложнением регрессионной модели, например, повышением степени полинома регрессии.

Адекватная модель далее может проверяться на работоспособность. Работоспособная адекватная регрессионная модель порядка не ниже второго может использоваться для предсказаний отклика во многих практических задачах.

Так как энергетический критерий носит комплексный характер, то известные критерии оценки не подходят, потому что выборка небольшая, а переменных достаточно много. Это затрудняет расчеты адекватности по предложенным методикам.

Для имеющегося случая проверка адекватности комплексного критерия оценки  $\Delta W$  подразумевает расширенный расчет для множе-

ства типов конструкции металлокорда. Для совокупности типов конструкции металлокорда был рассчитан энергетический критерий. Особенностью расчета энергетического критерия для металлокорда являлся перевод усилия агрегатного разрыва металлокорда в значение предела прочности. Для этого использовалось выражение

$$P_{\text{агр}} = \sigma_{\text{в}} \cdot 0,785d^2n(1 - K), \quad (11.5)$$

где  $P_{\text{агр}}$  – усилие агрегатного разрыва, Н;  $d$  – диаметр проволоки, мм;  $n$  – количество проволоки в металлокорде;  $K$  – потери прочности проволоки от свивки.

Потери прочности проволоки при свивке рассчитываются по следующей формуле:

$$K = \frac{P_{\text{сум}} - P_{\text{агр}}}{P_{\text{сум}}}, \quad (11.6)$$

где  $P_{\text{сум}}$  – суммарное усилие разрыва для проволок в металлокорде, Н.

При расчетах поправка на коэффициент потерь составляет 1–5 %.

Результаты сравнения энергетического критерия для металлокорда и для тонкой проволоки представлены на графике (рис. 11.12).

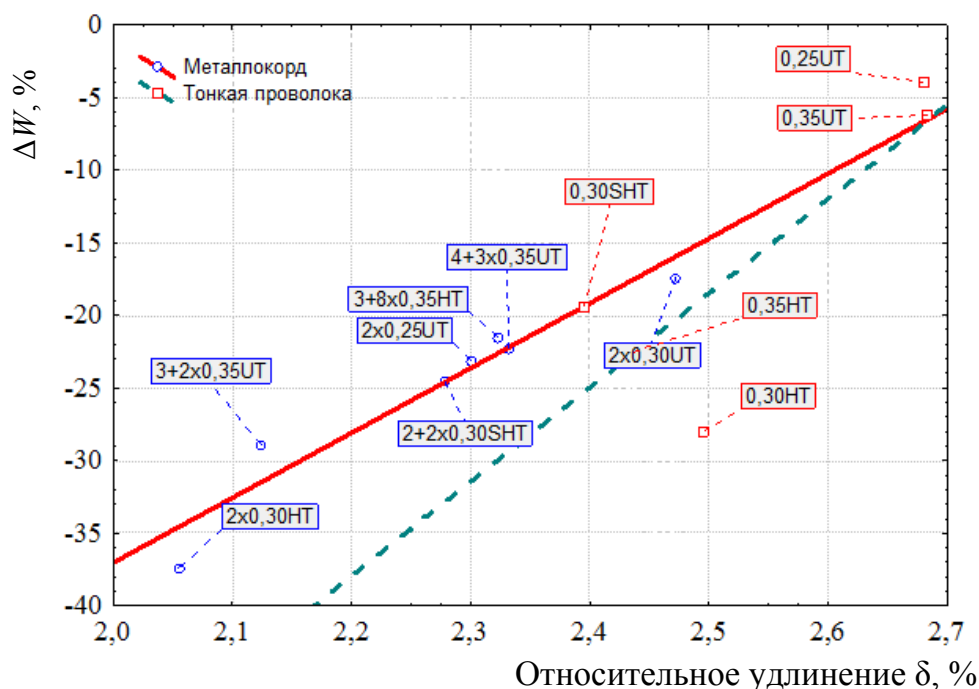


Рис. 11.12. Сравнение энергетического критерия для тонкой проволоки и для металлокорда

По графику видна разница значений энергетических критериев между тонкой проволокой и металлокордом. Разница энергетических критериев обусловлена снижением остаточных напряжений тонкой проволоки после волочения. Снижение напряжений осуществляется с помощью изменения схемы нагружения: использования рихтовочных устройств, а также дополнительных деформирующих устройств перед намотом на катушку на канатной машине в процессе свивки металлокорда.

Основываясь на полученных статистических данных, можно предположить, что использование рихтовочных устройств и деформаторов после свивки металлокорда выравнивает зависимость энергетического критерия от величины относительного удлинения. Зависимость при этом становится более линейной, что свидетельствует о равномерности распределения механических свойств металла.

Наблюдается различие по величине энергетического критерия для различных конструкций металлокорда. Для простых конструкций металлокорда наблюдается увеличение относительного удлинения при увеличении класса прочности металлокорда. Это объясняется тем, что при производстве ультрапрочных классов металлокорда (*UT*) применяют в качестве материала исходной заготовки сталь с повышенным содержанием углерода и дополнительным легированием. Для сложных конструкций металлокорда такая зависимость не прослеживается.

Результаты расчетов энергетического критерия для тонкой проволоки и металлокорда представлены в табл. 11.5.

Таблица 11.5

**Результаты расчетов энергетического критерия**

Тип тонкой проволоки	Тип металлокорда	Энергетический критерий		
		Для тонкой проволоки, %	Для металлокорда, %	Относительная разница, %
0,30HT	2×0,30HT	-27,95	-37,36	9,41
0,35HT	3+8×0,35HT	-22,56	-64,2	41,64
0,30SHT	2+2×0,35SHT	-19,37	-22,92	3,55
0,25UT	2×0,25UT	-3,96	-52,99	49,03
0,30UT	2×0,30UT	-6,23	-62,71	56,48
0,35UT	3+2×0,35UT	-27,95	-80,5	52,1
	4+3×0,35UT		-72	44,05

Анализируя данные таблицы, можно заметить, что все типы металлокордов класса  $UT$  в значительной степени подвергаются деформации при свивке и меняют комплекс механических свойств. Поэтому стороннее дополнительное воздействие следует ограничить.

Большая относительная разница наблюдается также для сложной конструкции металлокорда  $3+8 \times 0,35HT$ .

Таким образом, можно отметить, что изменение энергетического критерия в большей степени зависит не только от материала проволоки, но и от схемы свивки металлокорда. Чем сложнее схема свивки, тем больше корректировка энергетического критерия.

Для корректировки энергетического критерия можно использовать системный анализ.

В зависимости от особенностей процессов используют наиболее удобный математический инструмент. Вначале описываются отдельные элементы, а затем их взаимодействие. Наряду с аппаратом алгебры множеств при исследовании сложных систем используются вероятностные методы. Часто исследуют развитие процессов с некоторой вероятностью. При исследовании сложных динамических систем с большим количеством параметров различной природы с целью упрощения математического описания их расчленяют на подсистемы, выделяют типовые подсистемы, производят их иерархию.

Для уточняющей корректировки при анализе графиков используются линейные математические функции. Для этого кривую, построенную по экспериментальным точкам, представляют линейной функцией. Определяются коэффициенты наклона линии из эмпирических значений, полученное выражение описывает данную линейную зависимость. В случаях, если экспериментальная зависимость имеет вид кривой, нельзя применять линейную аппроксимирующую функцию. Кроме стандартного линейного вида уравнения аппроксимирующие функции могут иметь самое разнообразное математическое выражение.

Учитывая разницу значений энергетических критериев для тонкой проволоки после волочения и для готового металлокорда после свивки, можно говорить о том, что корректировка энергетического критерия и доводка его до оптимального значения может осуществляться с помощью дополнительных деформирующих устройств. В качестве таких устройств могут быть использованы рихтовочные устройства и деформаторы перед намоткой металлокорда на катушку.



По полученным числовым значениям невозможно определить, какой способ корректировки и доводки энергетического критерия является оптимальным.

Анализируя рис. 11.12 по положению точек на графике, видно, что значения для тонких проволок имеют некоторый разброс. Поэтому более корректно ориентироваться на значения энергетического критерия для металлокорда. Так как график построен в относительных координатах, то значением энергетического критерия для проволочной заготовки будет являться ось абсцисс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований получены новые знания о процессе волочения высокоуглеродистой проволоки. Исследования выполнялись с помощью разработанной компьютерной численной модели процесса волочения, полученных аналитических закономерностей, экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.

Основная цель проведенных исследований заключалась в поиске методов оптимизации процесса волочения, позволяющей повышать качество получаемой кордовой высокоуглеродистой проволоки при условии оптимальной производительности процесса волочения. Качество проволоки оценивалось удельной обрывностью металлокорда, свиваемого из данной проволоки. Производительность процесса волочения оценивалась скоростью волочения.

Основная научная гипотеза исследований заключалась в том, что потеря качества проволоки происходит вследствие влияния температуры проволоки во время волочения. Как известно, температура, выделяемая в проволоке вследствие внутреннего и контактного трения, способствует интенсификации развития процессов деформационного старения, снижающих пластические свойства углеродистой стали. Это явление особенно характерно для сталей с высоким содержанием углерода. Более того, из ранее доказанных фактов следует, что на поверхности углеродистой проволоки, где особенно высока температура от контактного трения, возможно появление мартенсита. Это явление особенно опасно с точки зрения значительного переупрочнения тонких поверхностных слоев проволоки. В этой связи ос-

новным критерием оптимизации режимов процесса волочения стало снижение температурного поля в проволоке при волочении.

В результате выполненных исследований определены критерии оценки оптимизируемых и разрабатываемых режимов волочения, математические зависимости для оценки НДС и ТП в проволоке. Произведен расчет НДС и ТП с помощью МКЭ для зон деформаций проволоки в волоках для действующей технологии волочения проволоки диаметром 0,35 и 0,41 мм с учетом действующих и повышенных скоростей волочения. Определено, что увеличение скорости волочения без дополнительных мероприятий не позволяет получить удовлетворительное качество стальной проволоки. Для увеличения скорости волочения без потери качества предложено снизить коэффициент контактного трения до 0,02. Анализ расчетных данных показал эффективность этого предложения для высокоскоростного волочения высокоуглеродистой проволоки. Определена значительная неравномерность распределения напряжений и деформаций в контактных и неконтактных зонах очага деформации в волоках. Снижение контактного трения обеспечивает повышение равномерности этих распределений.

В результате проведенного численного моделирования процесса волочения получены следующие основные выводы:

1. Если принять, что деформационное старение стали проволоки связано преимущественно с температурой нагрева проволоки, то оптимизация геометрии канала волоки, с точки зрения уменьшения деформационного старения, проводится поиском такой геометрии деформирующей и калибрующей зон волоки, называемой оптимальной геометрией волоки, которой соответствует минимум температуры в проволоке.

2. Оптимальную геометрию волоки можно определить для любой длины калибрующей зоны выбором оптимального угла конической деформирующей зоны волоки. Для каждой длины калибрующей зоны имеется собственное значение оптимального угла деформирующей зоны, учитывающее прочие условия волочения: диаметр проволоки на входе в волоку, диаметр калибрующей зоны волоки, скорость волочения, коэффициент контактного трения, механические и физические свойства проволоки, волоки, СОЖ.

3. Наиболее оптимальной геометрией калибрующей зоны волоки для коэффициента контактного трения  $f = 0,02$  является геометрия с минимально возможной длиной калибрующей зоны; при  $f = 0,05$  длина калибрующей зоны при оптимальном угле конической зоны

волокни мало влияет на температуру в проволоке. Рекомендуется принимать длину калибрующей зоны 0,2–0,3 от диаметра калибрующей зоны при  $f = 0,02$ .

4. Для действующих технологий волочения можно рекомендовать провести коррекцию углов деформирующих и длин калибрующих зон волокон по всему маршруту волочения путем использования разработанной методики.

5. Для исследуемой на примере критической волокни 23-го перехода в маршруте волочения проволоки диаметром 0,41 мм для проектной скорости волочения 8 м/с при коэффициенте контактного трения  $f = 0,05$  оптимальным углом является угол  $11^\circ$ , для  $f = 0,02$  – угол  $13$ – $14^\circ$ .

6. При условии наличия мероприятий по снижению коэффициента контактного трения до величины  $f = 0,02$  для увеличения конечной скорости волочения исследуемой проволоки до 8 м/с может быть использована волокни из имеющегося комплекта волокон на РУП БМЗ.

7. Для волочения исследуемой проволоки с конечной скоростью 8 м/с для 23-го перехода волочения определено: среди геометрий волокон с конической деформирующей зоной наиболее оптимальна геометрия, с точки зрения максимального снижения деформационного старения проволоки имеющая угол деформирующей зоны волокни  $\alpha_{\text{опт}} = 11^\circ$ , относительную длину калибрующей зоны  $k = 0,2$  или длину калибрующей зоны  $l_k = 0,2 \cdot 0,467 = 0,09$  мм. Коэффициент контактного трения должен быть уменьшен до  $f = 0,02$ .

8. Волочение проволоки в волокнах с радиальными элементами деформирующих зон не снижает температуру в проволоке, но значительно разгружает волокни, повышая их стойкость.

9. Рекомендуется провести мероприятия по снижению коэффициента контактного трения корректировкой состава и концентрации смазки на основании дополнительного исследования влияния состава и концентрации СОЖ на коэффициент контактного трения.

10. В действующем маршруте волочения проволоки диаметром 0,412 мм принимать среднюю оптимальную величину конуса рабочей зоны волокни  $11,5^\circ$ . В действующем маршруте волочения проволоки диаметром 0,349 мм принимать единую среднюю величину конуса рабочей зоны не рекомендуется, необходимо назначить углы конуса волокни в соответствии с их оптимальными значениями из диапазона  $6$ – $12,6^\circ$  и возможностями шлифовки и перешлифовки каналов волокон.

11. Предложен новый оптимизированный по основным параметрам маршрут волочения проволоки диаметром 0,412 мм из стали 90 при имеющемся в производственных условиях коэффициенте контактного трения (табл. 3.16), позволяющий повысить скорость волочения до 8 м/с с повышением качества проволоки над существующим уровнем. При условии проведения мероприятий по снижению коэффициента контактного трения до 0,02 предлагается маршрут волочения, представленный в табл. 3.17, который позволяет повысить скорость волочения до 8 м/с без потери качества проволоки. Для волочения со скоростью 5 м/с с имеющимся на производстве коэффициентом контактного трения предлагается оптимизированный маршрут волочения, представленный в табл. 3.15.

На основе анализа имеющихся закономерностей упрочнения металла при скоростях деформации более  $100 \text{ с}^{-1}$ , что характерно для высокоскоростного волочения, определено, что модель динамического упрочнения Симонда–Купера является универсальной для сталей 80, 90, 96.

Получена новая зависимость для расчета предела текучести высокоуглеродистой стали 90, учитывающая влияние температурных, деформационных и скоростных условий деформации проволоки. Она значительно повышает точность численных расчетов режимов высокосортного волочения высокоуглеродистой проволоки, распределений температур, деформаций и напряжений по сечению тонкой проволоки при волочении, что позволит прогнозировать и качество получаемой проволоки.

Разработано новое устройство «Инструмент для волочения проволоки», использующее напорные волокна и повышающее скорость волочения.

В результате исследований условий контактного трения в очаге деформации при волочении получена эмпирическая зависимость для расчета коэффициента контактного трения при волочении в зависимости от суммарной степени деформации обрабатываемой проволоки и скорости волочения. Суммарная степень деформации проволоки отражает характер влияния степени упрочнения на коэффициент контактного трения. Полученная зависимость отражает характер изменения коэффициента контактного трения от величины скорости волочения и суммарной степени деформации проволоки и может быть использована для расчета коэффициента контактного трения при разработке и совершенствовании маршрутов волочения.

Оптимизация геометрии волочильного инструмента по критерию минимальных скоростей деформации позволила сделать заключение о том, что оптимальными параметрами являются: единый угол конической зоны волокна  $\alpha_b = 6^\circ$  с допуском  $-2^\circ$  по всему маршруту волочения; коэффициент длины калибрующих зон волокон  $k = 0,4 \pm 0,05$  для 1–14-го переходов и  $k = 0,35 \pm 0,05$  для 16–22-го переходов

Разработана математическая модель волочения проволоки в сдвоенных волокнах. Она включает расчет напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации с учетом контактного трения проволоки с волоком. Проведение исследований позволило учесть эффект от введения дополнительных волокон на напряженно-деформированное состояние проволоки при волочении в сдвоенных волокнах и воздействии на свойства проволоки.

Определено, что зависимость температуры поверхности проволоки, рассчитанной с помощью метода конечных элементов и с использованием законов упрочнения для стали 80 и 96, в большей степени зависит от средней скорости деформации проволоки в очаге деформации.

Разработана методика построения маршрута волочения с учетом кинематики волочильного стана мокрого волочения тонкой высокопрочной проволоки из высокоуглеродистых сталей.

Получены новые эмпирические зависимости для расчета изменения механических характеристик (относительного удлинения, условного предела текучести и временного сопротивления разрыву) проволоки в процессе волочения в зависимости от режимов ее волочения.

Разработан температурно-деформационный критерий для анализа и совершенствования маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки, позволяющий увеличить пластические свойства проволоки при сохранении ее прочности в допустимых пределах.

На основании разработанного температурно-деформационного критерия произведен анализ маршрута волочения тонкой проволоки диаметром  $0,35\text{ мм}$  и предложены три варианта маршрута:

1) введение в базовый маршрут волочения дополнительной проволоки для уменьшения величины вытяжек в последних двух волокнах не привело к существенному увеличению пластических свойств тонкой проволоки;

2) уменьшение общего количества волокон до 20-ти за счет увеличенных вытяжек на первых 12 волокнах показало незначительные из-

менения пластических свойств тонкой проволоки в допустимых пределах. Базовый маршрут имеет  $K_{\sigma} = 1,5228$ , предложенный маршрут на 20 переходов имеет  $K_{\sigma} = 1,2137$ . Данный маршрут волочения может использоваться для снижения материальных и временных затрат по настройке и обслуживанию станов тонкого волочения;

3) маршрут волочения тонкой проволоки  $0,35HT$  с увеличенными вытяжками в первых 12-ти волокнах и уменьшенными вытяжками в конце маршрута волочения за счет использования трех дополнительных волокон показал снижение неравномерности деформации по сечению проволоки ( $K_{\sigma} = 0,9956$ ) и улучшение всех пластических характеристик тонкой проволоки в среднем на 5 %.

Проведенные теоретические исследования в области свивки металлокорда показали существование основных подходов в определении напряженно-деформированного состояния – аналитический, экспериментальный и подход с использованием МКЭ. Основными преимуществами численных методов являются: повышенная точность расчетов, возможность доступного представления результатов, относительно низкие временные затраты по сравнению с экспериментальными исследованиями.

Реализация численного моделирования основана на полученных кривых упрочнения стальной проволоки. Кривые упрочнения получены в результате преобразования значений механических свойств тонкой проволоки и определены опытным путем испытаниями образцов проволоки на растяжение.

В результате численного моделирования установлено, что в процессе свивки металлокорда на поверхности проволоки возникают максимальные поля деформаций, эквивалентные деформациям при кручении и изгибе. Это приводит к образованию микротрещин и концентраторов напряжений. В дальнейшем микротрещины сливаются в макротрещины, что приводит к разрушению проволоки.

Доказана адекватность разработанной математической модели свивки, которая позволила установить, что с увеличением дополнительных оборотов при свивке, выраженных через ( $R_{rev}$ ), происходит распространение критической деформации к центру проволоки, что приводит к возможному разрушению проволоки по всему сечению при свивке или ее дальнейшей обработке.

В результате проведенных исследований с помощью численного моделирования представляется возможным снижать обрывность металлокорда за счет повышения запаса пластических свойств проволоки.

В ходе работы были обработаны статистические данные по механическим свойствам тонкой проволоки и металлокорда. Определен энергетический критерий для имеющихся типов тонкой проволоки и конструкций металлокорда, свитых из этих проволок.

Выявлена особенность, согласно которой наблюдается разница в значениях энергетического критерия для тонкой проволоки и свитого из нее металлокорда. Энергетический критерий после свивки металлокорда из тонкой проволоки уменьшается.

Согласно полученным данным была проведена проверка адекватности энергетического критерия с помощью расширенных расчетов для дополнительных типов конструкций металлокорда. Полученные данные в дальнейшем корректировались графическим методом с построением линейных зависимостей. Установлено, что после свивки металлокорда свойства металла приобретают большую равномерность распределения деформаций, чем до свивки.

Показано, что методы критериальной оценки очень перспективны в современном производстве металлокорда и тонкой проволоки. Имеющиеся данные позволяют использовать оценочные критерии для определения оптимальных уровней технологических параметров и свойств тонкой проволоки и свитого металлокорда.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Metallurgy, 1987. – 352 с.
2. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgy, 1987. – 688 с.
3. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов [и др.] ; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
4. Иванов, К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : Изд-во ПИМаш, 2000. – 224 с.
5. Калачов, М. И. Деформационное упрочнение металлов / М. И. Калачов. – Минск : Наука и техника, 1980. – 256 с.
6. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
7. Фетисов, В. А. Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. А. Фетисов. – Минск : Белоргстанкинпромиздат, 1996. – 121 с.
8. Одинг, И. А. Процесс разрушения металлов как результат взаимодействия дислокаций / И. А. Одинг // Изв. АН СССР. Metallurgy и топливо. – 1960. – Вып. 3. – С. 3–16.
9. Филоненко-Бородич, М. М. Механические теории прочности / М. М. Филоненко-Бородич. – М. : Изд-во МГУ, 1961. – 94 с.
10. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчеты деталей машины на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Кочаев, Р. М. Шнейдерович. – М. : Mashgiz, 1963. – 451 с.
11. Качанов, Л. М. Теория ползучести / Л. М. Качанов. – М. : Физматгиз, 1960. – 455 с.
12. Фридман, Я. Б. Оценка опасности разрушения машиностроительных материалов / Я. Б. Фридман // Теоретические основы конструирования машин. – 1957. – № 1. – С. 257–281.
13. Бриджмен, П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. В. Бриджмен. – М., 1955. – 444 с.
14. Механические свойства материалов под высоким давлением / под ред. Х. Л. Пью. – М. : Мир, 1973. – 672 с.
15. Береснев, Б. И. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б. И. Береснев, Е. Д. Мартынов, К. П. Радионов. – М. : Наука, 1970. – 162 с.

16. Колмогоров, В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушения / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
17. Богатов, А. А. Напряжение. Деформация. Разрушение / А. А. Богатов, В. Л. Колмогоров, Г. А. Матвеев // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1970. – Вып. 8. – С. 76–80.
18. Мигачев, Б. А. Пластичность инструментальных сталей и сплавов : справочник / Б. А. Мигачев, А. И. Потапов. – М. : Металлургия, 1980. – 88 с.
19. Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – М. : Изд-во МГУ, 1978. – 288 с.
20. Сторожев, М. В. Теория обработки материалов давлением : учеб. для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
21. Smallman R. E., Bishop R. J. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering. 1999. T. Sixth edition. – 448 p.
22. Красильщиков, Р. Б. Деформационный нагрев и производительность волочильного оборудования / Р. Б. Красильщиков. – М. : Металлургия, 1970. – 168 с.
23. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М. : Оборонгаз, 1952. – 368 с.
24. Перлин, И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ермаков. – М. : Металлургия, 1971. – 448 с.
25. Hu Yu-gun, Zhao Ya-pu. Scale effect of plastic strain rate. 2001 г., Т. 14, № 1. – P. 37–43.
26. J. Chao, Yuh. A new material constitutive model for high strain rate behavior of metals. 2009. – 4 p.
27. Чумаченко, Е. Н. Реализация контактного взаимодействия / Е. Н. Чумаченко, С. А. Аксенов, С. А. Бобер // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – 2010. – № 11. – С. 299–304.
28. Грудев, А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – С. 312.
29. Фетисов, В. П. Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. – М. : Мир, 2005. – 200 с.
30. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение, Издание официальное. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1984. – 28 с.
31. Dynamic behavior of material / Marc A. Meyers, 1994. – P. 675.

32. Bayraktar E., Levailant C., Altintas S. Strain rate and temperature effect on the deformation behavior of the original hadfield steel // Journal de physique. – 1993.

33. Харитонов, В. А. Влияние скорости протяжки на условия волочения со скольжением и качество тонкой высокоуглеродистой проволоки / В. А. Харитонов, С. М. Головизин, А. Ю. Столяров // Производство проката. – 2007. – № 4. – С. 24–29.

34. Колмогоров, Г. Л. О скорости деформации при волочении / Г. Л. Колмогоров, В. Б. Филиппов, Е. В. Кузнецова // Изв. высш. учеб. заведений. Чер. металлургия. – 2005. – № 8. – С. 17–19.

35. Гурьянов, Г. Н. Составляющие полного осевого напряжения и оптимальные углы рабочего конуса волокни при волочении проволоки / Г. Н. Гурьянов // Чер. металлы. – 2007. – № 12. – С. 18–22.

36. Бобарикин, Ю. Л. Оптимизация тонкого волочения высокоуглеродистой стальной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 163 с. : ил.

37. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали / М. Н. Верещагин [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 1 (45). – С. 40–48.

38. Грудев, А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

39. Харитонов, В. А. Влияние температуры на толщину слоя смазки в условиях многократного мокрого волочения / В. А. Харитонов, С. М. Головизин, А. Ю. Столяров. – Магнитогорск : Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2006. – С. 197–204.

40. Коковихин, И. Ю. Технология сталепроволочного производства / И. Ю. Коковихин. – Киев : Рос. мова, 1995. – 608 с.

41. Бобарикин, Ю. Л. Определение коэффициента контактного трения в процессе волочения металлической проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин // Полимерные композиты и трибология (поликомтриб–2009) : материалы науч.-техн. конф., Минск, 2009. – С. 27–28.

42. Битков, В. В. Технология и машины для производства проволоки / В. В. Битков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 350 с.

43. Сачава, Д. Г. Использование напорных волок на РУП «БМЗ» для высокоскоростного волочения в режиме гидродинамического трения / Д. Г. Сачава, А. В. Демидов // Литье и металлургия. – 2008. – № 4. – С. 21–24.

44. Разработка режимов высокоскоростного волочения сверхвысокопрочной проволоки и доработка свивочной машины для получения требуемой технологичности при изготовлении металлокорда : отчет о НИР (заключ.) / ГГТУ им. П. О. Сухого ; рук. темы М. Н. Верещагин. – Гомель, 2011. – 181 с. – № ГР 20066022.

45. ASTM A 370–07a. Стандартные методы испытаний и определения для механического испытания стальной продукции.

46. Численное моделирование и исследование влияния контактного трения на распределение температурных полей и напряженно-деформированное в стальной проволоке при высокоскоростном волочении / М. Н. Верещагин [и др.] // Литье и металлургия. – 2009. – № 4. – С. 126–129.

47. Колмогоров, Г. Л. О скорости деформации при волочении / Г. Л. Колмогоров, В. Б. Филиппов, Е. В. Кузнецова // Изв. высш. учеб. заведений. Чер. металлургия. – 2005. – № 8. – С. 17–19.

48. Бобарикин, Ю. Л. Методика оценки качества проволоки / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, С. И. Прач // Сборник материалов ЗНТК молодых работников ОАО «БМЗ» «Металл–2012». – Жлобин, 2011. – С. 52–55.

49. Использование температурного критерия для оптимизации геометрии деформирующей и калибрующей зон канала волокна / А. Н. Савенок [и др.] // Чер. металлургия. – 2011. – № 3. – С. 3–9.

50. Бобарикин, Ю. Л. Математическое описание формирования пластических свойств проволоки из стали 90 при высокоскоростном волочении / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // Литье и металлургия. – 2011. – № 3. – С. 61–65.

51. Бобарикин, Ю. Л. Оптимизация тонкого волочения высокоуглеродистой стальной проволоки // Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 163 с. : ил.

52. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Металлургия, 1987. – 352 с.

53. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Введ. 01.07.1976. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 29 с.

54. Разработка технологических рекомендаций для волочения высокопрочной и сверхвысокопрочной латунированной проволоки на основе моделирования процесса свивки металлокорда конструкций  $2+2\times 0,30SHT$ ,  $3+8\times 0,35HT$  и  $2\times 0,30HT$ , с целью получения оптимальных свойств проволоки и технологичности при изготовлении металло-

корда : отчет о НИР (закл.) № 11013883/908 / ГГТУ им. П. О. Сухого ; рук. темы М. Н. Верещагин. – Гомель, 2017. – 23 с. – № ГР 20132636.

55. Мильман, Ю. В. К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования / Ю. В. Мильман, С. И. Чугунова, И. В. Гончарова // Сер. : Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. – 2008. – Вып. 15. – С. 3–10. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/empm\\_2008\\_15\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/empm_2008_15_3).

56. Температурно-деформационный критерий оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки / Ю. Л. Бобарикин [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (спец. вып.). – С. 205–208.

57. ГОСТ 10447–93. Проволока. Метод испытания на навивание. – М. : Изд-во стандартов, 1993.

58. Белый, В. Д. Исследование НДС канатов серийного изготовления после предварительной деформации / В. Д. Белый, Н. К. Гончаренко // Стальные канаты : сборник, 1971. – Вып. 8. – 310 с.

59. Веденеев, А. В. Анализ деформаций элементов витых структур и их влияние на потери прочности при производстве металлокорда / А. В. Веденеев, А. С. Желтков, В. Филиппов // Вести нац. акад. наук Беларуси. – 2000. – № 3. – С. 23–27.

60. Cengiz Erdonmez, C. Erdem Imrak, A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads, Istanbul Technical University, Institute of Informatics, Computational Science and Engineering Program, 34469 Maslak, Istanbul, Turkey. – 2011. – P. 995–1008.

61. Калентьев, Е. А. Численный анализ НДС каната с линейным касанием при растяжении и кручении / Е. А. Калентьев, В. В. Тарасов. – Ижевск : Ин-т приклад. механики УрО РАН, 2010. – С. 16–28.

62. Емельянов, И. Г. Конечно-элементная модель напряженного состояния стального каната / И. Г. Емельянов, Б. Р. Картак. – Ижевск : Ин-т машиноведения УрО РАН, 2001. – С. 50–52.

63. Кузнецов, В. Ю. Определение напряжений в проволоках спиральных канатов при упругопластическом изгибе / В. Ю. Кузнецов, В. Т. Козлов // Стальные канаты : сборник, 1967. – Вып. 4. – С. 83–88.

64. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением : учеб. для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1997. – 423 с.

65. ГОСТ 10446–85. Проволока стальная. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
66. ГОСТ 1545–80. Проволока. Метод испытания на скручивание (с изменениями № 1–3) ; Межгос. стандарт. – М. : Изд-во стандартов, 1980.
67. ГОСТ 3565–80. Металлы: Метод испытания на кручение. – М. : Изд-во стандартов, 1980.
68. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности : учеб. пособие для вузов / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Metallurgia, 1987. – 382 с.
69. Фесик, С. П. Справочник по сопротивлению материалов / С. П. Фесик. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Будівельник, 1982. – 280 с.
70. Стальная проволока : монография / Х. Н. Белахов [и др.]. – Магнитогорск : Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2011. – 689 с.
71. Емельянов, И. Г. Модель напряженного состояния стального каната / И. Г. Емельянов // Сталь. – 2001. – № 10. – С. 50–52.
72. Кукуджанов, В. Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций : учеб. пособие / В. Н. Кукуджанов. – М. : МФТИ, 2008. – 215 с.
73. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов : в 2 ч. / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – Ч. 1. – 472 с.
74. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние высокоуглеродистой проволоки / М. Н. Верещагин [и др.] ; ООО «Интермет Инжиниринг» // Сталь. – 2007. – № 12. – С. 53–58.
75. Численное моделирование процесса свивки металлокорда с использованием метода конечных элементов / Ю. Л. Бобарикин [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 40–44.
76. Бобарикин, Ю. Л. Оценка вероятности обрыва высокоуглеродистой латунированной проволоки при свивке в металлокорд / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Кн. 3. Обработка металлов давлением. – 277 с. : ил. – С. 14–24.
77. Кенько, В. М. Материаловедение : курс лекций по одномуим. дисциплине для студентов техн. специальностей днев. и заоч. форм обучения / В. М. Кенько. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 246 с.
78. Microstructure and Mechanical Properties of Cold Drawn Steel Wires / Edith Cowan university faculty of computing, health and science school of engineering, 2012. – 74 с.

79. Численное моделирование процесса свивки металлокорда с использованием метода конечных элементов / Ю. Л. Бобарикин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3. – С. 40–44.

80. Бобарикин, Ю. Л. Условие снижения обрывности проволоки при свивке металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // *Пластическая деформация металлов : сб. науч. тр. : в 2 т. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – Т. 1. – 264 с.*

81. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Т. Екобори ; пер. с англ. К. С. Чернявского ; под ред. В. С. Ивановой. – М. : Металлургия, 1971. – 265 с.

82. Способ отбора партий стальной высокоуглеродистой проволоки для свивки металлокорда с минимальной обрывностью : пат. 15384 Респ. Беларусь, МПК G 01N 3/08, G 01N/28 / В. В. Крылов-Олефиренко, А. И. Гордненко, А. В. Веденеев, О. И. Игнатенко, А. Н. Савенок ; заявитель РУП «БМЗ». – № а 20081133 ; заявл. 02.09.08 ; опубл. 07.10.11.

83. Бирюков, Б. А. Снижение обрывности высокопрочной проволоки при свивке из нее металлокорда на машинах двойного кручения / Б. А. Бирюков, Ю. В. Феоктистов, А. В. Веденеев // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 4. – С. 29.

84. Касаткин, Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справ. пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов. – К. : Наукова думка, 1981. – 581 с.

85. Зависимость для расчета обрывности металлокорда в процессе свивки на канатных машинах двойного кручения / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, А. В. Веденеев // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 3. – С. 66–69.

86. Шмурак, И. Л. Шинный корд и технология его обработки / И. Л. Шмурак. – М. : Металлургия, 2004. – 233 с.

87. Цыбулина, А. А. Производство металлокорда / А. А. Цыбулина, А. К. Стариков. – М. : Металлургия, 1979. – 64 с.

88. Стальная проволока : монография / Х. Н. Белахов [и др.]. – Магнитогорск : Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2011. – 689 с.

89. Способ производства нитей для изготовления стального корда и устройство для их производства : пат. № 2005–317120 (P2005–317120) Япония / Канаи Хироаки, Сасакура Нобухико ; опубл. 17.05.07 // Патент. бюро Японии. – 2007. – 8 с.

90. Способ производства стального корда и устройство для его производства : пат. № 1991–30982 Япония / Окамото Кэнъити,

Кисимото Акира, Нисимура Есифуми ; опубл. 25.09.92 // Патент. бюро Японии. – 1992. – 6 с.

91. Способ высокоскоростного волочения сверхтонкой стальной проволоки : пат. № 1993–13893 Япония / Ямадзаки Цуеси, Тасиро Хитоси ; опубл. 16.08.94 // Патент. бюро Японии. – 1994. – 7 с.

92. Механическое оборудование металлургических заводов : междунар. сб. науч. тр. / под ред. А. Г. Корчунова. – Вып. 3. – Магнитогорск : Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2014. – 218 с.

93. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных : пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф. Лион ; под ред. Э. К. Лецкого. – М. : Мир, 1980. – 305 с.



Научное издание

**Бобарикин Юрий Леонидович**  
**Верещагин Михаил Николаевич**  
**Мартьянов Юрий Вадимович**

**ТОНКОЕ ВОЛОЧЕНИЕ И СВИВКА  
В МЕТАЛЛОКОРД СТАЛЬНОЙ  
ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ**

**Монография**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 30.03.18.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 17,90. Уч.-изд. л. 18,83.

Тираж 100 экз. Заказ № 251/53.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель