

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ
МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Монография

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2012

УДК 621.77

ББК 539.3

К60

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *Л.Н. Ясницкий*
(Пермский государственный национальный
исследовательский университет);

канд. физ.-мат. наук, проф. *А.А. Лежнева*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

Колмогоров, Г.Л.

К60 Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: моногр. / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 226 с.

ISBN 975-5-398-00840-1

Представлены наиболее распространенные причины возникновения и механизмы формирования, методы определения остаточных напряжений в металлоизделиях. Приведены сведения из теорий упругости, пластичности, а также теоретические основы производства металлоизделий методами обработки давлением. К решению задачи определения остаточных напряжений применен энергетический подход. Представлены данные о влиянии остаточных напряжений на прочность, точность и долговечность прутков трубных и листовых изделий из сталей и сплавов. Решены задачи определения остаточных напряжений для случая анизотропных циркониевых сплавов, используемых при изготовлении оболочек твэлов для термоядерных реакторов.

Предназначено для научных, инженерно-технических работников и аспирантов, специализирующихся в области материаловедения металлов и сплавов, механики деформируемого твердого тела, сплошных сред, а также для студентов, обучающихся по направлениям «Прикладная механика», «Машиностроение», специальности «Динамика и прочность машин».

УДК 621.77

ББК 539.3

ISBN 975-5-398-00840-1

© ПНИПУ, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. Причины появления и методы определения остаточных напряжений.....	9
1.1. Механизм формирования остаточных напряжений.....	10
1.2. Теоретические основы расчета остаточных напряжений.....	14
1.3. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений.....	22
1.4. Влияние технологических параметров на возникновение остаточных напряжений.....	43
1.5. Степень пластической деформации при осесимметричном деформировании цилиндрических заготовок.....	48
Список литературы.....	54
ГЛАВА 2. Технологические остаточные напряжения в металлоизделиях после пластического деформирования.....	57
2.1. Напряженно-деформированное состояние в металлоизделиях после пластической деформации.....	58
2.1.1. Общие параметры напряженно-деформированного состояния.....	58
2.1.2. Механические характеристики материала.....	65
2.1.3. Определение напряженно-деформированного состояния в осесимметричных изделиях.....	69
2.2. Энергетический подход к определению остаточных напряжений.....	74
2.2.1. Технология производства осесимметричных металлоизделий.....	75
2.2.2. Остаточные напряжения в прутках.....	78
2.2.3. Остаточные напряжения в трубных заготовках.....	85
2.2.4. Определение параметра деформативности.....	90
2.3. Остаточные напряжения в листовых изделиях.....	93
2.3.1. Производство листовой продукции.....	93
2.3.2. Напряженное состояние в листах после пластической деформации.....	96
2.3.3. Влияние параметров прокатки на распределение остаточных напряжений.....	101
Список литературы.....	106

ГЛАВА 3. Влияние технологических остаточных напряжений на прочность, долговечность и надежность металлоизделий	110
3.1. Влияние остаточных напряжений на разрушение деталей	114
3.2. Предельные режимы деформирования прутков	119
3.3. Технологическая прочность при деформировании труб	122
3.4. Остаточные напряжения и технологическая прочность трубной заготовки при волочении	125
3.5. Остаточные напряжения и прочность металлоизделий при наличии трещин	128
3.5.1. Основные подходы механики разрушения	132
3.5.2. Оценка предельно допустимых дефектов в трубах при наличии остаточных напряжений	140
3.5.3. Влияние остаточных напряжений на прочность листового проката при наличии дефектов	142
3.6. Влияние технологических остаточных напряжений на прочность металлоизделий в эксплуатационных условиях	147
Список литературы	150
ГЛАВА 4. Формирование остаточных технологических напряжений и прочность анизотропных осесимметричных металлоизделий	154
4.1. Особенности напряженного состояния после изготовления цилиндрических деталей	155
4.1.1. Остаточные напряжения в анизотропных прутковых изделиях	156
4.1.2. Остаточные напряжения в трубах для общего случая цилиндрической анизотропии материала	162
4.2. Влияние остаточных напряжений на прямолинейность прутковых изделий	167
4.3. Асимметрия остаточных напряжений и криволинейность трубных изделий	170
4.4. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при производстве трубных изделий	174
Список литературы	177
ГЛАВА 5. Технологическая прочность и точность циркониевых изделий, используемых в атомной промышленности	179
5.1. Виды циркониевых изделий и области применения	180
5.1.1. Применение циркониевых изделий в атомной промышленности	180
5.1.2. Свойства циркония	182
5.1.3. Коррозионная стойкость	188
5.1.4. Принципы легирования циркония	189

5.1.5. Промышленные циркониевые сплавы.....	193
5.2. Остаточные напряжения в трубах из циркониевых сплавов после пластического деформирования.....	195
5.2.1. Производство оболочек твэлов	196
5.2.2. Деформационное поведение циркониевых сплавов.....	198
5.2.3. Распределения остаточных напряжений в оболочках твэлов	200
5.2.4. Влияние анизотропии на уровень остаточных напряжений в циркониевых оболочках	203
5.2.5. Влияние параметров технологии и ортотропии механических свойств на уровень остаточных напряжений в циркониевых оболочках.....	206
5.3. Влияние остаточных напряжений на точность цилиндрических изделий	209
5.3.1. Упругие деформации от действия остаточных напряжений в прутках	210
5.3.2. Точность трубных изделий	212
5.3.3. Влияние остаточных напряжений на точность заготовок из анизотропных материалов	217
5.3.4. Отклонения от номинальных размеров циркониевых прутков и труб под действием остаточных напряжений.....	219
Список литературы.....	224

ВВЕДЕНИЕ

Практически все технологические процессы изготовления металлопродукции методами пластического деформирования связаны с формированием в готовых изделиях самоуравновешенной системы остаточных напряжений [1]. При этом актуальной задачей является установление влияния технологии на уровень и характер распределения остаточных напряжений, которые могут достигать значительных величин, вплоть до предела текучести и прочности материала, что может привести к разрушению конструкций еще при хранении или в первые часы эксплуатации даже при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество изделий, полученных в результате пластического деформирования. Причины образования остаточных напряжений многообразны (неоднородность пластической деформации, температурного поля, фазовые превращения и т.д.) и по своей величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок.

В настоящее время к металлопродукции предъявляют дополнительные требования с целью создания машин и конструкций, работающих в условиях высоких нагрузок и скоростей, резких колебаний параметров внешней среды. Опыт эксплуатации конструкций в различных областях техники и результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения существенно влияют на надежность и долговечность машин и механизмов. Отсюда значительные припуски на полуфабрикатах волочильного, прокатного, прессового и других производств, что при последующей обработке, например резанием, приводит к нерациональному использованию металла [2].

Необходимо отметить, что остаточные напряжения могут играть как положительную, так и отрицательную роль в изменении прочности, жесткости, устойчивости и износостойкости изделий, определяя тем самым их работоспособность в эксплуатации при различных видах и условиях нагружения.

При благоприятном распределении остаточных напряжений возрастают прочность, работоспособность и долговечность металлопродукта или изготовленных из него изделий. Имеется ряд примеров благоприятного влияния остаточных напряжений на качество изделий и их дальнейшее поведение под нагрузкой. Обычно считают, что сжимающие остаточные напряжения на поверхности тела играют положительную роль, так как являются самозалечивающимися при наличии различных дефектов и несплошностей, а растягивающие, напротив, способствуют скорейшему разрушению. Широко известен метод получения многослойных контейнеров для прессования, позволяющий увеличивать рабочее давление внутри контейнера в результате создания остаточных сжимающих напряжений во внутренних слоях. Сюда же относится создание составных (соединенных с натягом) цилиндров, которые используются в артиллерии для упрочнения стволов. Поверхностный наклеп (обкатка роликами, обдувка тела стальной дробью и т.д.), создающий высокие сжимающие остаточные напряжения на поверхности, получил широкое распространение как средство, повышающее предел выносливости и усталостной прочности деталей [3]. Положительная роль остаточных напряжений является резервом прочности в машиностроении.

В большинстве же случаев остаточные напряжения отрицательно влияют на готовые металлоизделия. Остаточные напряжения в изделиях влияют на развитие замедленного разрушения, статическую, динамическую прочность и коррозионную стойкость изделий. Наличие растягивающих остаточных напряжений повышает склонность металла к коррозии в присутствии агрессивной окружающей среды. Релаксация остаточных напряжений может вызвать нежелательные изменения геометрических размеров. Этот процесс протекает в различных участках тела с различной интенсивностью в зависимости от величины напряжений, в связи с этим тело упруго деформируется из-за нарушения равновесия напряжений, изменяя первоначальные размеры и форму, что необходимо учитывать при изготовлении прецизионных изделий. При воздействии внешних нагрузок в процессе дальнейшей механической обработки или эксплуатации остаточные

напряжения, суммируясь с напряжениями от внешних сил, могут превысить предел упругости, что приводит к неравномерной пластической деформации, потере устойчивости, короблению, искривлению, скручиванию и т.д. Известны случаи, когда изготовленные с высокой точностью детали теряют точность из-за перераспределения остаточных напряжений в процессе эксплуатации, а иногда и разрушаются, что может привести к аварийным последствиям. При циклическом нагружении деталей сопротивление усталости в значительной мере зависит от знака, величины и характера распределения остаточных напряжений. Если циклические напряжения от внешних нагрузок изменяются по симметричному циклу, а в поверхностном слое действуют сжимающие остаточные напряжения, то результирующее суммарное напряжение может быть асимметричным. При этом если среднее напряжение будет сжимающим, то предел выносливости увеличивается. Соответственно при среднем растягивающем напряжении предел выносливости понижается.

Таким образом, остаточные напряжения в значительной степени определяют качество и эксплуатационные свойства металлоизделий, поэтому исследование закономерностей формирования остаточных напряжений является актуальной научно-технической задачей. Знание механизмов возникновения и формирования технологических остаточных напряжений позволяет управлять характером распределения и величиной остаточных напряжений в изделиях, обеспечивая их высокие эксплуатационные характеристики.

Глава 1

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Как известно, остаточные напряжения оказывают на материал изделия такое же воздействие, как напряжения, вызываемые эксплуатационной нагрузкой, поэтому причины появления остаточных напряжений и методы их минимизации требуют детального изучения.

Проблема остаточных напряжений включает решение комплекса научных и инженерных задач теоретического и экспериментального исследования процессов формирования остаточного напряженного состояния и управления ими, создание методов теоретического определения и экспериментального исследования, изучение влияния остаточных напряжений на прочность и эксплуатационные характеристики деталей машин и элементов конструкций.

В ряде случаев повышенные требования к качеству металлоизделий определяются не условиями эксплуатации изделий, а возможностью внедрения более современной технологии на машиностроительных заводах. Например, создание поточных автоматизированных линий требует применения высокоточных заготовок с малой кривизной и однородными свойствами по длине. Прямолинейность (равновесность) изделий, полученных пластическим деформированием, также определяется характером распределения остаточных напряжений. Наличие несимметрии распределения остаточных напряжений по сечению изделия может привести к появлению результирующего изгибающего момента, изгибу изделия и его криволинейности после пластического деформирования. Отмеченные показатели качества в значительной мере зависят от характера распределения и величины остаточных напряжений. Для определенных видов изделий (прутков, проволоки, листов и труб), получаемых методами обработки давлением, связь отдельных параметров технологии и показателей качества довольно стабильна. На основании созданных методик, можно достаточно точно прогнозировать некоторые свойства изделий по

известным исходным данным свойств заготовки и технологическим параметрам.

В последнее время выполнено много исследований остаточных напряжений в металлоизделиях после изготовления.

Теоретическое определение остаточных напряжений требует решения достаточно сложной связанной задачи термоупругопластичности. Снижение уровня остаточных напряжений приводит к необходимости решения оптимизационной задачи механики твердого деформируемого тела. Число таких задач, решенных применительно к технологическим процессам обработки металлов давлением, весьма невелико [3].

Экспериментальные подходы делятся на физические (где фиксируется изменение физических свойств материала под действием остаточных напряжений) и механические методы. Практически все механические методы являются разрушающими. Последовательное полное или частичное разрушение детали механическими способами приводит к нарушению равновесия имеющихся в ней остаточных напряжений. В результате возникают перемещения и деформации в остающейся части разрушаемой детали, по которым вычисляются остаточные напряжения.

Таким образом, чрезвычайная важность таких показателей качества металлоизделия, как наличие и уровень остаточных напряжений, требует изучения влияния и разработки новых подходов и методов к определению технологических остаточных напряжений.

1.1. Механизм формирования остаточных напряжений

Изучение причин, механизма образования и формирования остаточных напряжений в металлоизделиях при различных технологических процессах изготовления, восстановления и упрочнения, их влияния на прочность при последующих нагружениях является актуальным.

Начало изучения и первые попытки классификации и определения остаточных напряжений относится к середине XIX века. Счи-

тается, что изучение начали В.И. Родман в 1857 г. и И.А. Умов в 1871 г., а первые методики расчета появились у Н.В. Калакуцкого в 1887 г. Позже различными исследователями были предложены классификации остаточных напряжений в зависимости от их величины и факторов, вызывающих их появление, а также теоретические и экспериментальные методы определения остаточных напряжений [1].

Основная проблема, возникающая при изучении остаточных напряжений – это выбор наиболее точных методов определения. На сегодняшний день известно множество как теоретических, так и экспериментальных методов определения остаточных напряжений в элементах конструкций, но, к сожалению, почти все они имеют ряд недостатков либо трудны в реализации на практике. Поэтому для выбора и разработки оптимальных аппаратов исследования остаточных напряжений необходимо изучать и анализировать уже существующие теории и экспериментальные методики по этой тематике.

Остаточными напряжениями называются напряжения, существующие в деталях при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных). Обычно эти напряжения остаются в деталях после процесса их изготовления.

Остаточные напряжения можно классифицировать по признакам протяженности силового поля и по физической сущности. Общепринятой является классификация по протяженности силового поля. Остаточные напряжения можно условно разделить на макронапряжения и микронапряжения.

Величина макронапряжений определяется прежде всего плотностью однородных дислокаций. Знак макронапряжений зависит от характера расположения однородных дислокаций по отношению к поверхности детали. Сжимающие макронапряжения возникают в случае преобладающего расположения у поверхности множества положительных дислокаций на параллельных плоскостях скольжения. Преобладающее расположение у поверхности отрицательных дислокаций способствует возникновению макронапряжений растяжения. Наличие избытка дислокаций одного знака определяется

не только схемой деформации, но и температурой, при которой происходит деформация, а также составом сплава, определяющим склонность к поперечному скольжению.

К микронапряжениям относятся напряжения в микрizonaх. Они возникают в поликристаллических металлах в процессе деформации больших объемов в результате взаимодействия зерен между собой; зерна в металле произвольно ориентированы и отличаются строением. К микронапряжениям относят также и напряжения внутри отдельного зерна, обусловленные мозаичностью его структуры – результат взаимодействия отдельных блоков.

Микронапряжения являются следствием неоднородности физических свойств различных компонентов поликристалла, а также стесненных условий деформации отдельного зерна и анизотропии свойств внутри его. Основными причинами возникновения микронапряжений являются фазовые превращения, изменения температуры, анизотропия механических свойств отдельных зерен, границы зерен и распад зерна на фрагменты и блоки при пластической деформации.

Подобная классификация остаточных напряжений была предложена Е. Орованом и К.В. Мак-Греггором [4, 5]. Согласно этой классификации отличие макро- и микронапряжений состоит в скорости изменения напряжений по пространственной координате. Если в пределах размера зерна материала напряжения изменяются несущественно, то они могут быть отнесены к числу микронапряжений. Для таких напряжений вполне допустимо представление об изотропном материале. Обычные напряжения от внешних нагрузок относятся к микронапряжениям. Что касается микронапряжений, то они претерпевают резкие изменения в пределах зерна. Они связаны с анизотропией кристаллов, ориентацией кристаллографических плоскостей, наличием различных фаз и т.д. Макро- и микронапряжения делятся также на зависимые – возникающие под действием химических и структурных факторов, и остаточные напряжения – возникающие после неоднородного пластического течения и под действием внешних сил или термических градиентов.

В 30-е годы Н.Н. Давиденков предложил более точную классификацию остаточных напряжений. Согласно которой напряжения могут быть трех видов [6].

Остаточные напряжения первого рода. Уравновешиваются в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами детали. Их существование выявляется после разрезки деталей по деформации отдельных элементов и изменению параметра решетки (смещению линий на рентгенограммах).

Остаточные напряжения второго рода. Уравновешиваются в объемах одного порядка с размерами зерен и рентгенографически выявляются размытыми (уширенными) линиями на рентгенограммах. Поскольку кристаллики не являются совершенными, Б.М. Ровинский предложил разделить остаточные напряжения второго рода на агрегатные, присущие только поликристаллическим телам, и мозаичные, являющиеся собственно кристаллитными [7].

Остаточные напряжения третьего рода. Уравновешиваются в объемах одного порядка с элементарной кристаллической ячейкой и рентгенографически выявляются по ослаблению интенсивности линий высших порядков на рентгенограммах и усилению диффузного фона. Влияние напряжений второго и третьего рода на качество изделий, их эксплуатационные свойства изучено недостаточно. С напряжениями второго рода связаны явления упругого последействия, упругого гистерезиса, изменяемости упругих констант и т.п. Напряжения третьего рода обязательно сопровождают упрочнение. Введенная Н.Н. Давиденковым классификация широко используется и в настоящее время.

В соответствии с приведенными классификациями технологические остаточные напряжения, возникающие в процессе пластического деформирования и исследуемые в данной работе, относятся к остаточным напряжениям первого рода, или макронапряжениям. Влияние этих напряжений на качество, технологические и эксплуатационные свойства изделий наиболее значительно.

1.2. Теоретические основы расчета остаточных напряжений

Характерной особенностью решения практических технических задач является получение численных значений искомых величин. Это требует, во-первых, правильной и обоснованной постановки задачи, способной учесть основные особенности изучаемого явления или процесса, протекающего в реальной среде; во-вторых, выбора эффективного метода решения поставленной задачи и, в-третьих, анализа результатов исследования, приводящего к установлению определенных закономерностей, которыми описывается изучаемое явление или процесс, с выходом на непосредственное использование их в практике решения технологических задач расчета и проектирования новых конструкций [8].

Располагая уравнениями и соотношениями теории упругости, можно перейти к постановке задач, которая включает:

1) выбор модели изучаемого процесса, протекающего в реальной среде, и системы координат, в которой рассматривается изучаемый процесс;

2) запись замкнутой системы уравнений и соотношений для выбранной модели сплошной среды, называемой исходной и описывающей изучаемый процесс;

3) выбор основных неизвестных, характеризующих изучаемый процесс, и сведение системы исходных уравнений к системе разрешающих уравнений относительно указанных неизвестных;

4) задание или выявление системы внешних сил, температуры и других факторов, действующих на среду, формулировка соответствующих начальных и граничных условий, которыми учитывались бы основные специфические аспекты реального процесса.

Пусть исследуемое тело занимает область $\bar{V}$ трехмерного евклидова пространства E_3 . Внутренность области обозначим через V , границу – $S(\bar{V}=V+S)$. При постановке этой задачи учтем следующее:

1. Система остаточных напряжений $\sigma_{ij}(x)$ является самоуравновешенной, поэтому

$$\begin{aligned}\nabla \sigma &= 0, & x \in V; \\ n\sigma &= 0, & x \in S.\end{aligned}$$

Здесь σ – тензор остаточных напряжений; n – вектор единичной нормали к внешней поверхности S .

2. Допускаем, что тензор малой остаточной деформации ε представим в виде суммы тензоров упругой ε^ℓ , пластической ε^p и температурной ε^T деформации:

$$\varepsilon = \varepsilon^\ell + \varepsilon^p + \varepsilon^T, \quad x \in \overline{V}.$$

3. Остаточные напряжения связаны с упругими остаточными деформациями законом Гука

$$\sigma = c \cdot \varepsilon^\ell, \quad x \in \overline{V},$$

где c – четырехвалентный тензор модулей упругости; ε^ℓ – тензор упругой деформации.

4. Компоненты тензора полной деформации после разгрузки ε (остаточные деформации) удовлетворяют условиям совместности деформаций, которые эквивалентны обращению в нуль компонент тензора второго ранга $\text{Ink} \varepsilon$ [9]:

$$\text{Ink} \varepsilon = \text{rot}(\text{rot} \varepsilon)^* = 0, \quad x \in \overline{V},$$

где $*$ – символ транспонирования.

В декартовых ортогональных координатах условия совместности имеют вид

$$e_{ijl} e_{pmn} \frac{d^2 \varepsilon_{lm}}{dx_j dx_n} = 0, \quad x \in \overline{V},$$

где e_{ijl} – символы Леви-Чивита, образующие единичный антисимметричный псевдотензор.

В основе простейших постановок задачи об определении остаточных напряжений в теле, испытавшем неоднородную пластическую деформацию, лежит известная в теории пластичности теорема Г. Генки (1924). Согласно этой теореме остаточные напряжения равны разности между напряжениями нагрузки при пластической деформации металла и теми фиктивными напряжениями при той же системе внешних сил, если бы его напряженно-деформированное состояние соответствовало закону Гука. В изотермических условиях теорема о напряжениях, деформациях и перемещениях, возникающих при упругой разгрузке, доказана А.А. Ильюшиным [10].

Доказательство теоремы о разгрузке выглядит следующим образом. Пусть некоторое упругопластическое тело находится под действием заданной системы массовых сил F_i и поверхностных нагрузок P_i . Тогда при заданных пластических деформациях ε_{ij}^p напряжения σ_{ij} , деформации ε_{ij} и перемещения u_i точек тела можно найти из решения краевой задачи [3]:

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij}/dx_i + F_j &= 0, \quad x \in V, \\ \sigma_{ij} &= c_{ijkl} \left(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p \right), \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x \in \bar{V}, \\ \sigma_{ij} n_j &= P_i, \quad x \in S, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где V – внутренность области; $\bar{V}$ – область исследуемого тела; S – граница ($\bar{V} = V + S$); n – вектор единичной внешней к S нормали.

Допустим, что массовые силы изменились до значения F_i^* , а поверхностные нагрузки до значений P_i^* , причем во всех точках тела произошла упругая разгрузка. Тогда напряжения σ_{ij}^* , деформации ε_{ij}^* и перемещения u_i^* после разгрузки можно найти из решения системы уравнений, аналогичной (1.1), но для величин, отмеченных звездочкой.

Введем далее обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}^{(\ell)} &= \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*, \\ \varepsilon_{ij}^{(\ell)} &= \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^*, \\ u_i^{(\ell)} &= u_i - u_i^*. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Тогда, вычитая друг из друга соответствующие уравнения, относящиеся к моментам до и после разгрузки, получим

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij}^{(\ell)} / dx_i + (F_j - F_j^*) &= 0, \quad x \in V, \\ \sigma_{ij}^{(\ell)} &= c_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{(\ell)}, \quad x \in \bar{V}, \\ \varepsilon_{ij}^{(\ell)} &= \frac{1}{2} (u_{i,j}^{(\ell)} + u_{j,i}^{(\ell)}), \quad x \in \bar{V}, \\ \sigma_{ij}^{(\ell)} n_i &= P_j - P_j^*, \quad x \in S. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Напряжения, деформации и перемещения в теле после разгрузки равны разностям соответствующих величин до разгрузки и тех напряжений, деформаций и перемещений, которые были бы в теле, если бы в естественном (ненапряженном и недеформированном) состоянии оно упруго деформировалось под действием сил $F - F^*$ и $P - P^*$. При полном снятии нагрузки ($F^* = P^* = 0$) остаточные напряжения, деформации и перемещения находятся как разности решений упругопластической и упругой задач при тех же нагрузках F и P .

Приведенная теорема применима лишь для геометрически линейных задач. Использование теоремы усложняется, если упругая разгрузка происходит не во всем объеме тела, а в некоторых его зонах, тогда как в других зонах происходит пластическое активное нагружение. В этом случае необходимые для решения силовые граничные условия на границах зон и расположение самих зон можно найти из непрерывности полей перемещений, деформаций и напряжений.

Теорема о разгрузке была обобщена В.В. Москвитиним [11] с учетом того, что при разгрузке могут вновь произойти пластические деформации (вторичные пластические деформации).

Применение указанных теорем о разгрузке к прикладным задачам вызывает ряд трудностей [3]:

1) разгрузка начинается не одновременно в различных участках тела;

2) в случае появления вторичных пластических деформаций траектории нагружения в этих задачах лучше описываются различными вариантами теории пластического течения, чем теорией малых упругопластических деформаций, для которой доказаны теоремы о разгрузке;

3) необходимость решения задачи термоупругопластичности для определения напряженно-деформированного состояния в момент начала разгрузки;

4) для использования теорем необходимо найти решение при разгрузке, что в случае вторичных пластических деформаций связано с решением краевой задачи.

На основе применения приведенной теоремы решен ряд задач по определению остаточных напряжений в изделиях после изгиба и кручения, в трубах – после снятия внутреннего давления. Однако выявить зависимости остаточных напряжений от различных технологических параметров реального процесса весьма сложно, а иногда и невозможно [1].

В свете указанных соображений можно утверждать, что наиболее удобным для определения остаточных напряжений является решение связанной задачи термоупругопластичности в течение всего периода охлаждения тела от начальной температуры T_0 до температуры среды T_1 . Напряжения, получающиеся при полном остывании и снятии силовой нагрузки, и будут остаточными напряжениями.

Применительно к процессам пластического деформирования задача формулируется так: требуется найти напряжения $\sigma_{ij}(x, \tau)$, де-

формации $\varepsilon_{ij}(x, \tau)$, перемещения $u_i(x, \tau)$, температуру тела в процессе остывания $T(x, \tau)$ и остаточные напряжения $p_{ij}(x)$, перемещения $u_i(x, t_1)$, деформации $\eta_{ij}(x)$ в конце процесса.

Система разрешающих уравнений включает [12]:
уравнение нестационарной теплопроводности

$$c\gamma \left(\frac{dT}{d\tau} + v \nabla T \right) = \nabla (\lambda \nabla T) + W, \quad x \in V; \quad (1.4)$$

уравнение равновесия (для квазистатических процессов)

$$\nabla \sigma + F = 0, \quad x \in V; \quad (1.5)$$

определяющие уравнения в приращениях, конкретный вид которых зависит от принятой теории термоупругопластичности

$$d\sigma = D \cdot d\varepsilon + R dT, \quad x \in \bar{V}; \quad (1.6)$$

геометрические уравнения

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T = \frac{1}{2} (\nabla u + u \nabla), \quad x \in \bar{V}. \quad (1.7)$$

Здесь c – удельная теплоемкость; γ – удельный вес; W – тепловой источник пластической деформации; λ – коэффициент теплопроводности; ε^e , ε^p , ε^T – тензоры упругой, пластической и температурной деформаций соответственно.

Начальные условия для решения задачи

$$\tau = 0, \quad T(x) = T^0(x), \quad \sigma = \varepsilon = u = 0. \quad (1.8)$$

Граничные условия весьма разнообразны и зависят от характера решаемой задачи. Во многих случаях они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
n \sigma &= P, \quad x \in S_p; \quad u = \hat{u}, \quad x \in S_u, \\
T(x, \tau) &= \hat{T}(x), \quad x \in S_1, \\
\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) &= \hat{q}(x), \quad x \in S_2, \\
\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) &= -\alpha(T - T_\infty) + W_1, \quad x \in S_3,
\end{aligned} \tag{1.9}$$

где $S = S_p + S_u = S_1 + S_2 + S_3$; $\hat{q}$ – заданный тепловой поток; α – коэффициент теплоотдачи; T_∞ – температура окружающей среды; W_1 – тепловой источник сил трения на границе.

В некоторых случаях в уравнения (1.9) вместо T_∞ входит температура поверхности тела, контактирующего с рассматриваемым. В этом случае приходится решать температурную задачу для системы двух тел. При необходимости учета термоупругих деформаций инструмента, деформирующего рассматриваемое тело, в систему уравнений входят также уравнения термоупругости для инструмента.

Элементы общей теории взаимосвязанных процессов в механике сплошной среды описываются в работах [3, 13, 14]. При расчете технологических напряжений целесообразно использовать принцип аддитивности деформаций, который в расширенном виде записывается таким образом:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^c + d\epsilon_{ij}^T + d\epsilon_{ij}^0,$$

где $d\epsilon_{ij}$ – приращение деформации деформируемого тела; ϵ_{ij}^e , ϵ_{ij}^p , ϵ_{ij}^c – деформации упругости, пластичности и ползучести; ϵ_{ij}^T – термическая деформация; величина ϵ_{ij}^0 – отражает деформацию материала при структурно-фазовых и физико-химических изменениях, например изменения объема при превращении аустенита в мартенсит.

При решении задач определения остаточных напряжений важным является выбор соответствующей теории пластичности и термо-

упругопластичности, позволяющей в достаточной мере отразить механику пластического деформирования в данном технологическом процессе.

В общем случае процессов обработки металлов давлением в качестве внешних воздействий выступают не только внешние поверхностные и массовые силы, но и различного рода термомеханические эффекты, такие, например, как неоднородное температурное поле. Влияние температуры при формировании остаточных напряжений рассматривается в [3]. Поле остаточных напряжений находится из решения задачи термоупругопластичности при наличии неоднородного температурного поля, что более характерно для пластического деформирования металлов в горячем состоянии. Решение краевых задач можно проводить методом последовательных нагружений в пределах малых промежутков времени, которое эффективно при использовании численных методов конечных элементов. Необходимо отметить, что многократное решение связанной нелинейной задачи термоупругопластичности в областях сложной формы достаточно затруднительно даже на современных ЭВМ.

Приведенные выше подходы к теоретическому определению остаточных напряжений и известные решения относятся в основном к задачам упруго-пластического деформирования, в которых реализуются сравнительно небольшие деформации. Кроме того, реализация данных методик представляет собой довольно сложную задачу механики сплошной среды, чем и объясняется зачастую существенные различия в получаемых решениях.

Для процессов же пластического деформирования методами обработки металлов давлением характерны большие пластические деформации, описываемые теориями пластического течения. При этом характерным является многопереходный процесс изготовления металлоизделий, когда применение известных подходов определения остаточных напряжений еще более усложняется, поскольку проследить историю формирования остаточных напряжений практически невозможно.

1.3. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений

Экспериментальные методы получили широкое применение при определении напряжений в металлоизделиях после пластической деформации. Как отмечалось ранее, экспериментальные методы определения остаточных напряжений можно условно подразделить на две группы: физические и механические, в зависимости от того, какой измеряемый параметр или физическая характеристика принимаются за основу расчета напряжений.

В основу всех механических методов положено полное или частичное разрушение элементов конструкций с измерением возникающих при этом деформаций или перемещений, т.е. преднамеренное нарушение равновесия остаточных напряжений. Для измерения межплоскостных расстояний от действия остаточных напряжений используется рентгеновская и нейтронная тензометрия, основанные на закономерностях дифракции нейтронов. Хотя о рентгеновском методе говорят как о физическом измерении напряжений, в действительности имеется в виду способ измерения деформаций кристаллической решетки. При использовании механических методов остаточные напряжения экспериментально определяются через макроскопические упругие деформации, появляющиеся в детали при нарушении их равновесия путем механического удаления или наращивания части материала.

В случае применения расчетно-экспериментальных методов аналитически или численно вычисляются значения остаточных напряжений и строятся эпюры их распределения по сечению деталей. Такие методы основаны на данных физико-механических и теплофизических свойств материалов, термокинетических диаграмм структурных изменений и фазовых превращений, а также внешних силовых и тепловых воздействий.

При частичном разрушении поверхности разгрузка от напряжений выполняется путем высверливания отверстий, нарезки канавок и вырезки столбиков. Методами отверстий и канавок измеряют де-

формацию оставшейся части поверхности детали, методом столбиков – деформацию отделяемой части. Деформация регистрируется механическими тензометрами, тензорезисторами, по отпечаткам алмазной пирамиды, рентгеновской тензометрией и другими способами. Например, метод канавок предназначен для определения остаточных напряжений в поверхностном слое исследуемого объекта. Подобно методу отверстий этот метод основан на перераспределении напряжений из основных в новые вблизи концентратора (канавок) [15]. Этот метод считается малоразрушительным и простым в технологии и расчете, так как неглубокая канавка может быть нанесена в пределах припуска и в дальнейшем удалена или выровнена.

Механические методы, в отличие от других, позволяют получить распределение остаточных напряжений по всему сечению.

Профессор И.А. Биргер систематизировал и обосновал механические методы определения остаточных напряжений в деталях наиболее распространенных форм (прутках, проволоке, трубах) [16]. Основной принцип определения остаточных напряжений механическими способами, установленный И.А. Биргером, состоит в том, что разрез и обнажение поверхности эквивалентны (для оставшейся части тела) приложению к поверхности сечения остаточных напряжений обратного знака. В дальнейшем этот принцип был распространен на случай нахождения остаточных напряжений при наращивании тела.

Механические методы определения остаточных напряжений делятся на силовые и деформационные. Силовые методы основаны на том, что после последовательного удаления (нанесения) части материала деталь (образец) с помощью внешней нагрузки возвращается в исходное положение. Полагается, что возвращающаяся нагрузка равносильна действию остаточных напряжений, которые были в удаленной (наращенной) части детали. В деформационных методах при последовательном удалении (наращивании) материала измеряют перемещения или деформации оставшейся части детали.

С учетом размеров, геометрической формы и методов расчета на прочность выведены расчетные формулы для определения остаточных напряжений применительно к стержням, пластинам, дискам, ци-

линдрам, трубам, конусам, шарам и другим телам. В работе [1] кратко описаны некоторые экспериментальные методы определения остаточных напряжений. Рассмотрим некоторые из них.

Метод Гейна-Бауэра применяется для определения продольных напряжений в прутке или проволоке посредством послойного удаления металла и замера происходящих деформаций.

Продольные напряжения рассчитывают по формуле

$$\sigma_{\ell} = \frac{E \left[r_n^2 (\ell_n - \ell_0) - r_{n-1}^2 (\ell_{n-1} - \ell_0) \right]}{(r_{n-1}^2 - r_n^2) \ell_0}, \quad (1.10)$$

где r, ℓ_0 – радиус и начальная длина образца; $n, n-1$ – номера удаляемых слоев металла.

Этот метод используется для определения остаточных напряжений в проволоке, изучения влияния различных параметров процесса волочения проволоки на остаточные продольные напряжения, их релаксацию при отпуске, влияние остаточных напряжений на циклическую прочность и т.д.

Одним из упрощенных способов определения остаточных продольных напряжений является метод продольного распила, основанный на допущении о линейности эпюры напряжений по сечению прутка. Для определения напряжений требуется измерить величину раскрытия h разрезанной части бруска, из уравнения изгиба балки можно определить продольные напряжения:

$$\sigma_{\ell} = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{\ell}{\rho}, \quad (1.11)$$

где ℓ – расстояние от поверхности до нейтральной оси; ρ – радиус кривизны.

Сопоставление величин напряжений, определенных методом продольного распила и точными методами для прутков с прямолинейной эпюрой распределения напряжений, показало, что напряжения, полученные методом распила, оказываются завышенными примерно на 20 %.

Метод Андерсена-Фальмана считается удобным для приближенного определения остаточных продольных и тангенциальных напряжений в трубах. Разрезав по образующей отрезанное от трубки кольцо и измеряя изменения диаметра, можно рассчитать остаточные тангенциальные напряжения:

$$\sigma_t = \frac{ES\Delta D}{(1-\nu^2)D_{\text{ср}}^2}, \quad (1.12)$$

где ΔD – изменение наружного диаметра после разрезки кольца; $D_{\text{ср}}$ – диаметр средней окружности кольца; S – толщина стенки.

Для определения продольных остаточных напряжений из трубы вырезается полоска, параллельная оси, и замеряется возникший прогиб. Продольные остаточные напряжения выражаются как

$$\sigma_\ell = \frac{4ESf}{B^2}, \quad (1.13)$$

где B – длина хорды; f – прогиб полоски.

Рассмотренные механические методы можно отнести к приближенным методам определения напряжений, так как по ним определяют только одно напряжение либо задаются уже определенным характером распределения напряжений по сечению, либо получают лишь качественную оценку напряжений, что предполагает экспериментальную корректировку.

Метод колец и полосок считают разновидностью предыдущего метода, в соответствии с которым из тонкостенной трубы вырезаются узкие кольца и полоски (рис. 1.1). Далее проводится разрезка кольца в радиальном направлении и последовательное снятие слоев. В процессе разрезки и снятия слоев измеряется изменение диаметра кольца. В полоске проводится последовательное снятие слоев и измерение прогибов. Эти исследования с помощью специальных расчетных формул позволяют определить окружные и осевые напряжения в трубе.

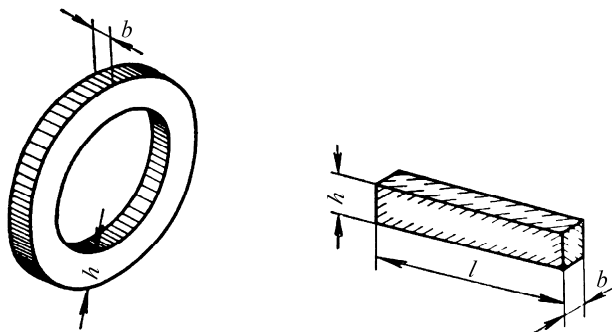


Рис. 1.1. Кольцо и полоска, вырезанные из тонкостенной трубы

Далее представлен метод, применяемый для тонкостенных цилиндров.

Метод Н.Н. Давиденкова используется в случае, когда исследуемая заготовка представляет собой тонкостенный цилиндр. Тонкостенными цилиндрами принято считать цилиндры, толщина стенки которых h мала по сравнению со средним радиусом R , т.е. $R/h > 3$.

В общем случае элемент цилиндра находится в трёхосном напряжённом состоянии, но величина радиального напряжения по сравнению с остальными мала, поэтому напряжённое состояние цилиндра считают плоским.

Согласно методу Н.Н. Давиденкова, который был предложен в 1931 г., для определения остаточных напряжений вырезается достаточно длинный участок тонкостенного цилиндра, а затем производится его разрезка по образующей и последовательное снятие цилиндрических слоёв. Снятие слоёв металла производится травлением [17].

Окружное напряжение, существующее в некотором слое a , после вырезки участка цилиндра, его разрезки и снятия предыдущих слоёв определяется по соотношению

$$\sigma_{\theta}^*(a) = \sigma_{\theta}(a) + \sigma_{\theta 1}(a) + \sigma_{\theta 2}(a) + \sigma_{\theta 3}(a), \quad (1.14)$$

где складываются остаточные окружные напряжения, соответственно: $\sigma_\theta(a)$ – первоначальные наружные; $\sigma_{\theta 1}(a)$ – снимаемые в рассматриваемом слое при вырезке участка тонкостенного цилиндра; $\sigma_{\theta 2}(a)$ – снимаемые в рассматриваемом слое при разрезке тонкостенного цилиндра по образующей; $\sigma_{\theta 3}(a)$ – снимаемые в рассматриваемом слое при удалении всех предыдущих слоёв; $\sigma_\theta^*(a)$ – в слое a , непосредственно перед его удалением.

Вырезка участка цилиндра эквивалентна приложению в торцевых сечениях распределённых моментов, создаваемых обратными осевыми напряжениями. Дополнительные напряжения (в том числе и окружные $\sigma_{\theta 1}(a)$), возникающие от этих распределённых моментов, затухают по мере удаления от торцов цилиндрической оболочки. Поэтому их величинами при определении остаточных напряжений пренебрегают (рис. 1.2).

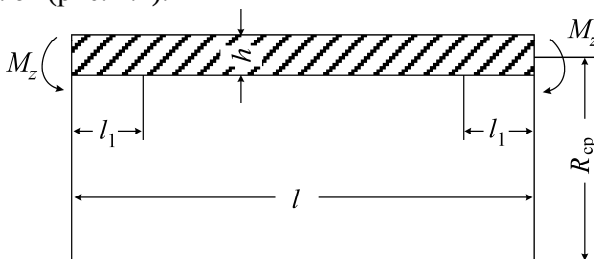


Рис. 1.2. Участок тонкостенной трубы, вырезанный для исследования по методу Н.Н. Давиденкова

При разрезке цилиндра вдоль образующей (рис. 1.3) величина момента M , создаваемого окружными остаточными напряжениями, связана с изменением диаметра на величину δ следующим соотношением:

$$M = \frac{2EJ}{(1-\mu^2)D_{cp}^2} \delta, \quad (1.15)$$

где δ – толщина стенки трубы.

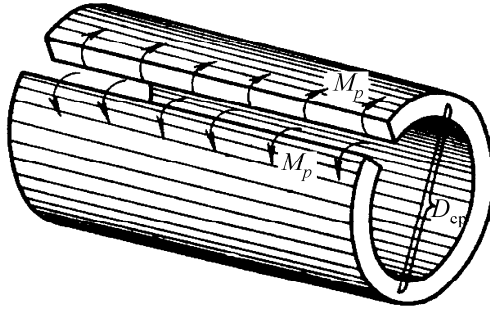


Рис. 1.3. Определение дополнительных напряжений при разрезке трубы вдоль образующей

При известном значении M можно записать соотношение для дополнительных окружных напряжений $\sigma_{\theta 2}$, возникающих на расстоянии a от наружной поверхности тонкостенного цилиндра (см. рис. 1.1):

$$\sigma_{\theta 2}(a) = Mc / J,$$

где $c = \frac{h}{2} - a$.

Тогда с учётом (1.15) имеем

$$\sigma_{\theta 2}(a) = \frac{-2E\delta}{(1-\mu^2)D_{cp}^2} \left(\frac{h}{2} - a \right). \quad (1.16)$$

Кроме напряжений $\sigma_{\theta 2}$, в тонкостенном цилиндре возникают дополнительные осевые напряжения (рис. 1.4), которые связаны с $\sigma_{\theta 2}$ следующим соотношением:

$$\sigma_{z 2}(a) = \mu \sigma_{\theta 2}(a). \quad (1.17)$$

После разрезки цилиндра производится последовательное снятие слоёв. При снятии слоя $d\xi$ к оставшейся части будут приложены обратные напряжения $\sigma_{\theta}^*(\xi)$ и $\sigma_z^*(\xi)$, действовавшие в слое после

разрезки цилиндра. Осевые напряжения $\sigma_z^*(\xi)$ вызывают растяжение тонкостенного цилиндра и при $\mu = 0$ его поперечную деформацию. Изменением диаметра вследствие указанной деформации можно пренебречь, так как они малы по сравнению с изгибными деформациями. Поэтому без учёта влияния осевых напряжений на изменение диаметра цилиндра дополнительное напряжение при снятии слоя толщиной a определяется соотношением

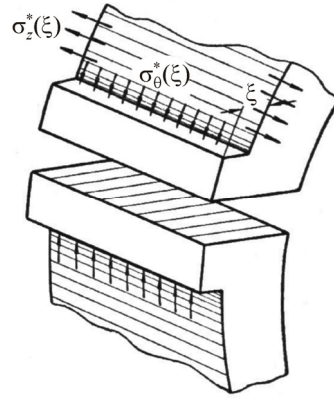


Рис. 1.4. Напряжения при снятии цилиндрических слоёв

$$\sigma_{\theta 3}(a) = -\frac{2E}{3(1-\mu^2)} \int_0^a \frac{2h-3a+\xi}{D^2(\xi)} \frac{d\delta}{d\xi} d\xi. \quad (1.18)$$

Напряжение в самом слое a после удаления всех предыдущих слоёв может быть определено равенством

$$\sigma_\theta^*(a) = -\frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{(1-\mu^2)D^2(a)} \frac{d\delta}{da}. \quad (1.19)$$

Напряжение, существующее в слое после вырезки участка тонкостенного цилиндра, его разрезки и снятия предыдущих слоёв, учитывая все вышеперечисленные напряжения, определяется следующим образом:

$$\sigma_\theta(a) = \pm \left\{ 2 \frac{E\delta_p}{(1-\mu^2)D_{cp}^2} \left(\frac{h}{2} - a \right) - \frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{(1-\mu^2)D^2(a)} \frac{d\delta}{da} + \right. \\ \left. + \frac{2e}{3(1-\mu^2)} \int_0^a \frac{2h-3a+\xi}{D^2(\xi)} \frac{d\delta}{d\xi} d\xi \right\}, \quad (1.20)$$

где знак плюс принимается при снятии наружных слоёв тонкостенного цилиндра, а знак минус – при снятии внутренних слоёв. Полу-

ченная формула позволяет определить величины окружных остаточных напряжений, не проводя измерений осевых напряжений.

Для определения осевых остаточных напряжений проводится вырезание полосок из тонкостенного цилиндра. Расчётная зависимость для осевых напряжений согласно рассматриваемому методу имеет вид

$$\sigma_z(a) = \mu \sigma_\theta(a) \pm \left\{ -\frac{8E}{l^2} f_b \left(\frac{h}{2} - a \right) + \frac{4E}{3l^2} \times \right. \\ \left. \times \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right] \right\}. \quad (1.21)$$

Эта зависимость учитывает долю осевых напряжений, вызванных действием окружных (первое слагаемое). Здесь f_b – прогиб полоски (наибольший) после вырезки из цилиндра; $f(a)$ – дополнительный прогиб полоски при снятии слоя толщиной a ; l – длина полоски или расстояние между двумя точками на оси полоски, относительно которых определяется прогиб.

Если предположить, что распределение остаточных напряжений по толщине трубы близко к линейному, то можно ограничиться в полученных соотношениях (1.20) и (1.21) лишь первыми членами. Если требуется определить остаточные напряжения только в поверхностных слоях, то в полученных расчётных зависимостях следует сохранить первых два члена.

Метод Закса наиболее широко применяется для определения остаточных напряжений в прутках и толстостенных трубах. Преимущества этого метода заключается в возможности определения объемной картины распределения остаточных продольных, тангенциальных и радиальных напряжений. При послойной обточке трубы каждый раз замеряются длина и диаметр образца. На основании опытных данных строятся графики зависимости поперечных и продольных деформаций от величины площади сечения удаляемого слоя. В случае толстостенной трубы из детали вырезается цилиндрический образец и проводится его сверление. После сверления, в соот-

ветствии с методом Закса, проводится последовательная расточка цилиндра с измерением окружной и осевой деформации на внешнем радиусе. Для этого делаются замеры изменения наружного диаметра и базовой длины. Чаще всего изменение деформаций проводится с использованием тензорезисторов.

При удалении внутренних слоев металла трубы напряжения определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[(F_b - F) \frac{d\Lambda}{dF} - \Lambda \right], \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[(F_b - F) \frac{d\theta}{dF} - \frac{1}{2} \left(\frac{F_b}{F} + 1 \right) \theta \right], \\ \sigma_r &= \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{F_b}{F} - 1 \right) \theta; \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

при удалении наружных слоев металла

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[(F - F_a) \frac{d\Lambda}{dF} - \Lambda \right], \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[(F - F_a) \frac{d\theta}{dF} - \frac{1}{2} \left(\frac{F_a}{F} + 1 \right) \theta \right], \\ \sigma_r &= \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[\frac{F_a}{F} - 1 \right] \theta. \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

В этих формулах F_b – площадь круга, ограниченного наружным диаметром; F_a – площадь круга, ограниченного внутренним диаметром; F – переменная площадь, соответствующая каждому этапу расточки; $\Lambda = \lambda + \nu\upsilon$ – функция изменения длины; $\theta = \upsilon + \nu\lambda$ – функция изменения диаметра; λ, υ – относительное изменение длины и диаметра соответственно.

Производные $\frac{d\Lambda}{dF}$ и $\frac{d\theta}{dF}$ определяются графически по кривым $\Lambda = \varphi(F)$ и $\theta = \psi(F)$, построенным на основании экспериментальных данных.

Основная особенность цилиндрических деталей заключается в том, что, кроме окружных и радиальных остаточных напряжений, в них могут существовать осевые остаточные напряжения, которые определяются при действии осевой силы N по формуле

$$\sigma_z = \frac{N}{\pi(R_1^2 - R_2^2)}. \quad (1.24)$$

Формулы (1.21), (1.22) служат для расчёта остаточных напряжений в полом цилиндре. Если же определяются остаточные напряжения в сплошном цилиндре ($R_2 = 0$), то измерения на внутреннем радиусе невозможны, поэтому проводится расточка цилиндрического образца.

Однако у предложенного Заксом метода есть существенные недостатки: невозможно определить напряжения по всей толщине сечения, так как начиная с некоторого момента стенка становится слишком тонкой, в связи с этим деформации в этой области определяются экстраполяцией, что вносит известные погрешности; необходима корректировка деформационной кривой, построенной по экспериментальным данным; необходимы высокоточные средства измерения весьма малых деформаций изделия при последовательном удалении слоев металла; возможны значительные погрешности при замерах на начальной стадии расточки, когда абсолютные значения измеряемых величин соизмеримы с точностью применяемых инструментов; необходимо применение длинных образцов для исключения влияния концов ($\ell_0 \geq 2D$), что требует специальных приспособлений для расточки и центровки изделия.

Наряду с развитием механических методов все больше применяются физические неразрушающие экспериментальные методы оп-

ределения остаточных напряжений, так как они достаточно просты и удобны и не нарушают целостности элемента конструкции.

Физические методы базируются на измерении физических и механических характеристик материала под влиянием остаточных напряжений, поскольку существуют общие связи между физическими полями и полями напряжений и деформаций. Остаточные напряжения при этом находятся по микроскопическим деформациям кристаллической решетки. К числу физических и механических параметров, используемых для определения остаточных напряжений, относятся скорость распространения звуковых и оптических волн, магнитная и электрическая проницаемость, электропроводность, твердость и др. Достоинством физических методов является то, что они относятся к неразрушающим, а их недостатки связаны с необходимостью проведения точных измерений, невозможностью установления распределения остаточных напряжений по сечению изделий, причем часто возникают затруднения в интерпретации полученных результатов.

В экспериментальных неразрушающих методах определение остаточных напряжений производится по перемещениям или деформациям, которые возникают в результате наведения в детали поля остаточных напряжений. Примером может служить метод нахождения остаточных напряжений в электролитических покрытиях по деформации катода, появляющейся при последовательном наращивании слоев материала [18].

В настоящее время широко используются рентгеновские методы. Эти методы применимы для материалов, имеющих кристаллическое строение (черные и цветные металлы и др.). Рентгеновская тензометрия позволяет измерять расстояние между кристаллографическими плоскостями решетки через величину угла отражения рентгеновского луча. Находятся смещения интерференционных линий, пропорциональные однородным деформациям кристаллической решетки для одинаковых кристаллографических направлений внутри кристаллитов, зерен, находящихся вблизи поверхности. При сканировании поверхности рентгеновский луч проникает на некоторую

глубину, которая при перпендикулярном к поверхности падении луча соответствует порядку величины $\frac{1}{\mu}$ (μ – линейный коэффициент ослабления). Для неорганических материалов, металлов и сплавов глубина проникновения рентгеновских волн составляет несколько десятков микрон и при наклонном падении луча может быть уменьшена до нескольких микрон. Следовательно, анализируется остаточное напряженное состояние приповерхностного слоя.

Общая теория рассеивания рентгеновских лучей в металлах, находящихся в линейно-напряженном состоянии, впервые разработана Г.И. Аксеновым [19]. Он показал, что нормальное напряжение в произвольном направлении σ_φ определяется выражением

$$\sigma_\varphi = \frac{E(d_\psi - d_1)}{(1 + \nu) d_1 \sin^2 \psi}, \quad (1.25)$$

где ψ – угол между прямыми направлениями съемки и нормалью к поверхности; d_ψ, d_1 – расстояние между кристаллографическими плоскостями при соответствующих направлениях рентгеновского луча к поверхности.

Несмотря на преимущества рентгеновского метода как неразрушающего, он имеет ряд недостатков, которые влияют на его точность. Применение этого метода во многих случаях становится нецелесообразным [1]. Формулы, связывающие напряжения с деформацией решетки, содержат упругие постоянные E, ν для поликристаллического материала. На самом же деле кристаллы являются анизотропными, и данные, полученные на основании измерений деформаций какой-либо решетки, не могут обрисовать полную картину напряженного состояния. Пластическая деформация сопровождается также появлением напряжений второго рода, ввиду чего линии на рентгенограммах расширяются, что затрудняет точное измерение расстояний между ними и увеличивает погрешность измерений.

Метод рентгеновской дифракции. Его суть состоит в том, что чем меньше плотность материала, а точнее, чем меньше материала встретится на пути рентгеновского луча, тем больше энергии рентгеновских лучей дойдет до их регистратора. Точно так же, как в медицине, в рентгеновской (технической) дефектоскопии наиболее распространенным регистратором является фотопленка.

Дифракцию рентгеновских лучей на семействе атомных плоскостей (hkl) удобно рассматривать как отражение от плоскости (hkl). Связь между межплоскостным расстоянием d , длиной волны рентгеновского излучения и углом дифракции (угол между падающим лучом и атомной плоскостью (hkl)) устанавливается уравнением дифракции (уравнением Вульфа-Брегга) [20]

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda. \quad (1.26)$$

Действие внешней силы приводит к деформации с кристаллической решетки. При этом межплоскостные расстояния d изменяются, что приводит к изменению угла дифракции θ . Поэтому о наличии напряжений в материале можно судить по смещению максимума дифракционной линии (пика) [21, 22]. Связь деформации с напряжением задается уравнениями теории упругости.

В реальных поликристаллических металлах и сплавах, исключая литое состояние, в формировании дифракционного пика участвует от 100 до 10 000 зерен. Для различных металлов и сплавов поверхностный слой, который формирует дифракционный пик, имеет глубину от 5 до 250 мкм.

Вышеописанный метод успешно реализован в продукте компании AST STRESSTECH GROUP Финляндия (рис. 1.5) – приборе для определения остаточных напряжений «XSTRESS 3000».

Рентгеновским способом измеряется упругая деформация только некоторых благоприятно ориентированных для отражения пучка лучей зерен. Участвующие в отражении лучей зерна могут изменяться не только от их ориентировки, но и от используемого излучения. Ввиду этого при определении напряжений первого рода наблюдаются большие расхождения для одинаковых материалов [23]. Недостаток

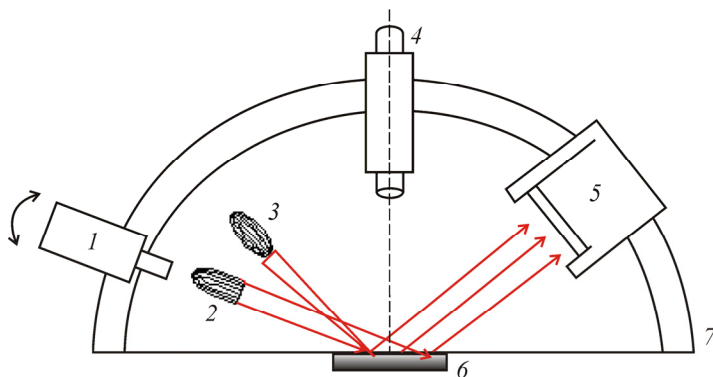


Рис. 1.5. Блок-схема прибора «XSTRESS 3000»: 1 – рентгеновская трубка; 2 – поликапиллярная полулинза; 3 – полная капиллярная линза; 4 – полупроводниковый детектор; 5 – позиционно-чувствительный детектор; 6 – исследуемый образец, 7 – полукруг фокусировки

рентгеновского метода заключается также в том, что в пластически деформированной углеродистой стали точность определения остаточных напряжений снижается в 4–5 раз по сравнению с точностью определения напряжений в недеформированной стали. Напряжения при измерении рентгеновским методом определяются только на поверхности изделия, то есть получить полную картину распределения остаточных напряжений по сечению невозможно. Механическая обработка поверхности перед измерением создает дополнительно остаточные напряжения первого рода на глубине до 0,6 мм, что также влияет на точность измерений [24].

Для определения остаточных напряжений на поверхности детали произвольной формы используют хрупкие лаковые покрытия. Хрупкие лаки наносят для обнаружения деформации на поверхности детали, об остаточных напряжениях судят по появлению трещин на покрытии. Трещины при этом располагаются по траектории главных напряжений, их количество пропорционально напряжению [25]. Этот метод применяется для определения качественной картины распределения напряжений, однако его точность недостаточна, поскольку при сжимающих напряжениях покрытие не трескается, а отслаивается.

Работы, посвященные выявлению зависимости между остаточными напряжениями и твердостью, появились еще в 1934–1936 гг. Метод твердости прост и достаточно легко осуществим. Л.А. Гликман [26] установил следующие закономерности изменения твердости: в упругорастянутой зоне – уменьшение на 14–17 %, в упругосжатой – увеличение на 20–25 %. Им предложена методика качественного анализа остаточных напряжений по результатам замера твердости до и после разгрузки участка. Разгрузка может производиться сверлением, пропиловкой надрезов и т.д. Количественное определение остаточных напряжений при измерении твердости по Герцу дал Дж. Помей (прибор Помея). Для установления связи между твердостью и напряжениями проводится опытное испытание образцов из того же материала и строится зависимость между твердостью и напряжениями.

Акустические и ультразвуковые методы определения остаточных напряжений распространены слабо, хотя есть перспектива применения их для исследования без разрушения деталей. В большинстве ультразвуковых методов остаточные напряжения определяются с помощью измерения скорости распространения звуковых волн в твердом теле. Для исследования используют поверхностные, поперечные и продольные волны с частотой 0,5–15 МГц, а возмущения создаются пьезопреобразователями на основе кварца или керамики [27]. К достоинствам метода следует отнести простоту его применения (переносная аппаратура) и широкую область использования (металлические, композиционные и керамические материалы). Недостатки метода связаны с невысокой точностью метода, наличием помех (влияние структуры материала, анизотропия и т.д.). Метод дает интегральную характеристику напряженного состояния (изменение остаточных напряжений в однородных, достаточно больших объемах). Отсутствуют эффективные способы определения компонентов сложного напряженного состояния.

На рис. 1.6. приведена схема экспериментального замера остаточных напряжений на трубопроводе.

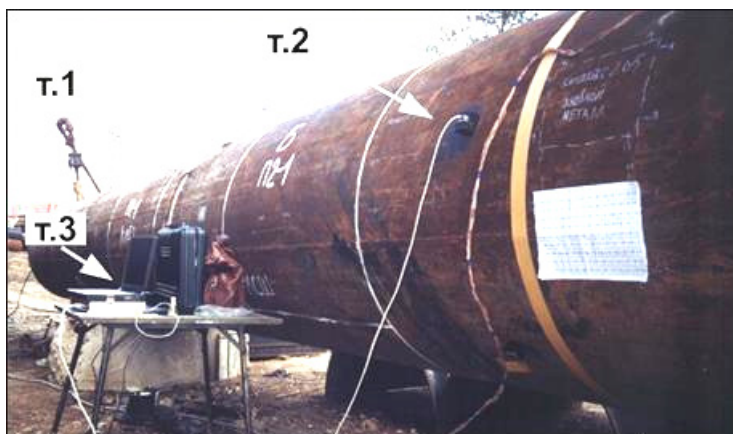


Рис. 1.6. Прибор для измерения остаточных напряжений (отмечено расположение его датчиков на трубной плети)

К неразрушающим методам определения остаточных напряжений в детали относят также оптический, электросопротивления, измерения твердости и др. Эти методы применяются для обнаружения остаточных напряжений, а также для качественного анализа распределения остаточных напряжений, когда применение точных методов связано с большими трудностями или невозможно. Так, М.М. Саверин и В.М. Заварцев [24] использовали оптический метод для изучения распределения поверхностных остаточных напряжений в зоне концентраторов, так как другими методами определить распределение напряжений, как правило, не удастся. Образцы были изготовлены из оптически активного материала и показали, что в зоне надреза наблюдается значительная концентрация остаточных напряжений.

Метод голографической интерферометрии. Интерференция наблюдается при сложении двух волн, когда при условии их когерентности, т.е. постоянной разности фаз этих волн, возникает характерное пространственное распределение интенсивности света – интерференционная картина. Фотопластинка-детектор регистрирует это в виде чередующихся светлых и темных полос, или интерферограммы.

Для определения остаточных напряжений применялась и обычная интерферометрия, но эту работу можно было провести только в хорошо оборудованной лаборатории: требовались специальная подготовка поверхности исследуемого объекта, придание ей правильной формы, специальное освещение и оборудование [28].

Когда создали лазер, т.е. источник излучения с высокой пространственной и временной когерентностью, стала развиваться оптическая голография – способ записи и восстановления световых волн, рассеянных объектом и несущих информацию о его форме (т.е. трехмерный образ объекта). Некоторые методики интерферометрии значительно упростились, так как снялись проблемы освещения и подготовки поверхности.

Принципиальная оптическая схема для записи голограммы по Лейту-Упатниексу [6] показана на рис. 1.7. Луч лазера 1 расширяется линзой 2 и делится полупрозрачным зеркалом 3 на две части. Одна часть – это опорный луч (ОЛ) – проходит через зеркало и сразу падает на фотопластинку-детектор 5. Вторая часть, отраженная от зеркала, освещает объект 4 и, диффузно рассеянная им, проходит через линзу 6 и тоже падает на детектор. Это предметный луч (ПЛ).

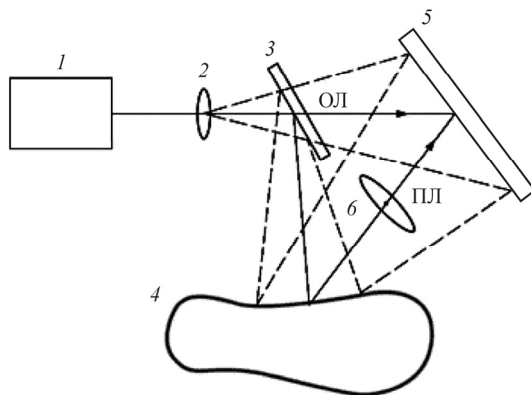


Рис. 1.7. Принципиальная схема записи голограммы Лейта-Упатниекса: 1 – лазер, 2 – линза, 3 – полупрозрачное зеркало, 4 – объект, 5 – фотопластинка-детектор, 6 – линза в режиме лупы; ОЛ – опорный луч, ПЛ – предметный луч

Наличие линзы – непринципиально для записи голограмм, однако необходимо для измерения остаточных напряжений. Линза находится на фокусном расстоянии от объекта и поэтому работает в режиме лупы: на фотопластинке записывается не весь образ объекта, а малая, но увеличенная в 2–5 раз его часть – область поверхности с отверстием. Это позволяет рассмотреть довольно плотно расположенные (особенно на кромке отверстия) полосы интерферограммы.

С развитием голографии возникла голографическая интерферометрия, выполняемая гораздо проще, чем обычная, с меньшими затратами и ограничениями. Ее сущность такова: если совместить две голограммы объекта, записанные в разное время при разных состояниях поверхности объекта (один из способов – записать на одну фотопластинку), то при освещении этой фотопластинки лазерным лучом возникает результирующая интерферограмма, отражающая разницу геометрических состояний объекта. Линии интерферограммы показывают как перемещения целого объекта, так и деформацию его поверхности. Общие и локальные перемещения обычно хорошо разделяются.

В сочетании с голографической интерферометрией используется **метод зондирующей лунки**. Сущность этого способа определения остаточных напряжений заключается в следующем: во время первой экспозиции записывается голограмма окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии. Потом создается возмущение поверхности тела (например, путем высверливания или травления малой лунки), что позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям. Далее записывается голограмма возмущенной таким образом поверхности тела. В результате наложения голограмм при их одновременном восстановлении упругие перемещения поверхности в окрестности лунки выявляются в виде интерферограммы. Она наглядна и проста для расшифровки.

Еще один неразрушающий метод определения остаточных напряжений – метод магнитоупругости, который основан на сущест-

венной зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от напряженного состояния. Этот метод широко используют для оперативного контроля изменения уровня остаточных напряжений в зависимости от изменений условий технологического процесса. Приборы, основанные на магнитоупругом эффекте ферромагнетиков просты, надежны и удобны. Их применение ограничено только магнитными материалами, но, как известно, подавляющее число материалов, применяемых в машиностроении, хорошие ферромагнетики.

Метод магнитоанизотропной диагностики является единственным из существующих на сегодня методов диагностики и контроля, позволяющим полностью исключить вероятность внезапного разрушения конструкций, трубопроводов, сосудов [29].

Он признан наиболее распространенным средством сбора информации для оценки остаточного ресурса нефте- и газопроводов. Это заявлено независимой организацией на международной конференции «Датчики и системы» в 2002 г.

Сканер-дефектоскоп «КОМПЛЕКС – 2.05» относится к новому классу дефектоскопов и предназначен для неразрушающего контроля сварных соединений и основного металла крупногабаритных стальных продуктопроводов (газопроводов, нефтепроводов и др.) и емкостей (резервуары, цистерны, сосуды высокого давления и др.). По результативности метод, на котором основан прибор, эквивалентен результативности одновременно примененных 7 видов дефектоскопии.

Такой эффект получен потому, что в отличие от известных дефектоскопов этот прибор выявляет параметры напряженно-деформированного состояния металла в исследуемой зоне, автоматически находит концентраторы механических напряжений и количественно оценивает их опасность, находит зоны с остаточными пластическими деформациями и сварочными напряжениями. Не только находит, но и наглядно представляет их на дисплее компьютера.

Следует отметить, что для анизотропных тел их использовать затруднительно и в большинстве случаев невозможно вследствие более сложной структуры строения и свойств материала. Совместное

действие разнообразных причин, вызывающих появление остаточных напряжений (тепловые напряжения, структурные превращения, ликвация, пластическая деформация и т.д.), создает чрезвычайно сложную картину распределения этих напряжений. Для большинства практических случаев связь устанавливается не теоретическим, а опытным путем, что вызывает ряд трудностей. Эти обстоятельства заставляют уделять особое внимание проблеме разработки достаточно простых, аналитических методов определения остаточных напряжений.

Таким образом, анализ известных методов определения остаточных напряжений показал, что определить экспериментальные остаточные напряжения в трубных изделиях с требуемой точностью невозможно. Среди известных методов экспериментальных исследований остаточных напряжений трудно выделить перспективный или непротиворечивый. Остаются теоретические методы, перспектива применения которых представляется более реальной [30].

Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов показывает их удовлетворительное соответствие [3, 7, 20]. Однако в ряде случаев в силу принятия недостаточно обоснованных допущений и ограничений банка исходных данных (отсутствие зависимостей физико-механических и теплофизических характеристик от температуры, термокинетических диаграмм фазовых превращений и т.д.) расчеты дают весьма приближенную картину распределения напряжений. Также многие задачи по нахождению полей остаточных напряжений пока не поддаются теоретическому решению.

В случаях когда экспериментально определены значения остаточных напряжений – это набор дискретных данных, при анализе которых невозможно выявить влияние технологических параметров обработки металлов давлением или механических свойств материала на уровень и распределение по объему остаточных напряжений.

1.4. Влияние технологических параметров на возникновение остаточных напряжений

Появление остаточных напряжений связано с условиями изготовления деталей, поэтому технологические процессы изготовления деталей должны проектироваться так, чтобы возникающие в поверхностных слоях остаточные напряжения гарантировали надежность работы деталей в заданных условиях эксплуатации. Основной причиной возникновения остаточных напряжений считается неоднородность пластической деформации материала, которая возникает вследствие неоднородного по сечению холодного деформирования, неравномерного распределения температур при нагреве или охлаждении, неравномерности фазовых превращений в изделии.

Технологические процессы обработки металлов давлением, как правило, сопровождаются неравномерной пластической деформацией по сечению. Образование остаточных напряжений в технологических процессах происходит по-разному. В основе их возникновения обычно лежат необратимые объемные изменения в материале. Одни слои металла растягиваются в большей степени, чем другие, и после разгрузки в них возникают остаточные напряжения сжатия, в других – менее деформируемых слоях – возникают растягивающие остаточные напряжения. Например, при волочении, прокатке, прессовании периферийные слои подвергаются повышенным деформациям сдвига в продольном направлении по сравнению с центральными. Поэтому после окончания процесса структура заготовки претерпевает значительные изменения, которые неоднородны по сечению и объему, вследствие чего в готовой детали формируются остаточное напряженное состояние. Например, при волочении периферийные слои вследствие упругого последействия укорачиваются больше, чем центральные, и испытывают большие сдвиговые деформации [31], как показано на рис. 1.8.

Рассмотрим влияние технологических параметров на неравномерность деформированного состояния в процессах осесимметричной деформации, которые наиболее широко применяются при производстве

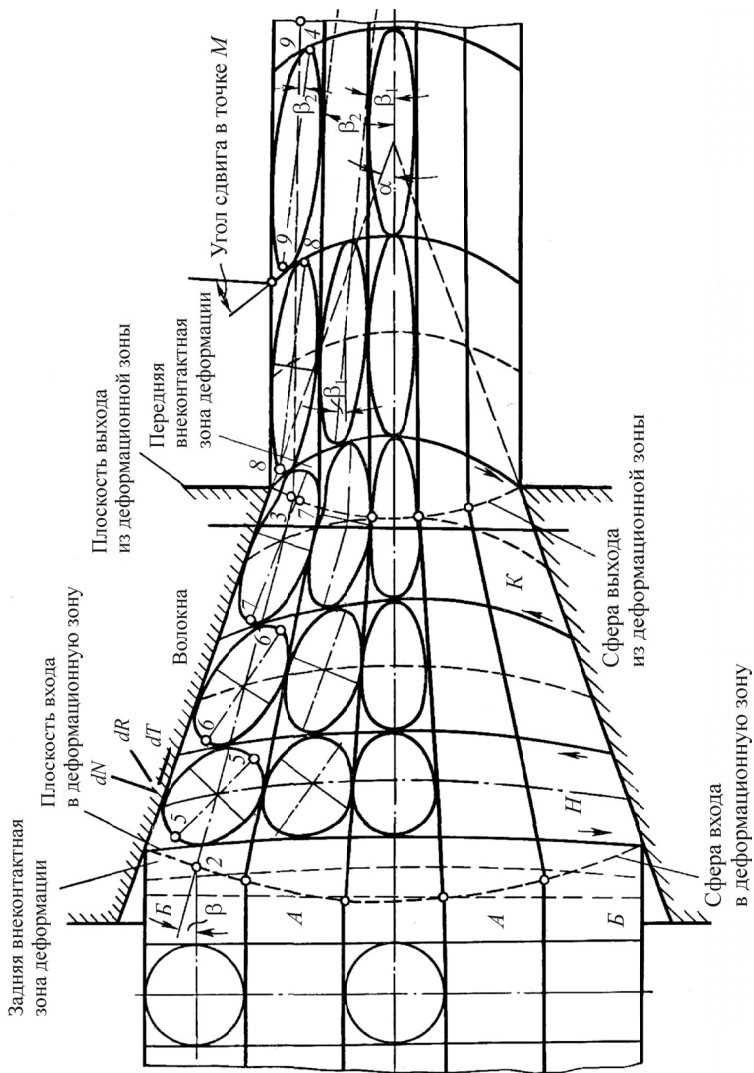


Рис. 1.8. Изменение координатной сетки при осесимметричном деформировании круглого профиля через коническую матрицу

холоднодеформированных прутков, профилей, проволоки, труб и других видов металлопродукции. Технологическими параметрами, влияющими на деформированное состояние и соответственно, свойства металла, в этих процессах являются форма рабочего канала инструмента, степень деформации, вид покрытия и смазки – коэффициент трения, скорость деформирования и ряд менее существенных факторов. Естественно, для различных процессов (волочение, холодная прокатка, выдавливание обычное, гидропрессование и др.) эти параметры могут действовать по-разному. При выдавливании и волочении, несмотря на различия в силовых условиях, деформированные состояния металла имеют много общего. В простейшем случае формообразования прутка круглого сечения из заготовки деформированное состояние каждого элементарного объема характеризуется уменьшением диаметра и удлинением. При истечении металла через формообразующий инструмент (матрицу, волоку) изменяются величины и направления главных деформаций, то есть процессы деформации осуществляются немонотонно. Без дополнительных сдвигов удлиняются только бесконечно малые объемы, расположенные на оси канала, удлинения всех остальных элементарных объемов сопровождаются дополнительными сдвиговыми деформациями. В результате периферийные слои получают большую сдвиговую деформацию, чем центральные, и изделие оказывается деформированным неравномерно. В результате неравномерности деформаций, неизбежной при волочении, протянутый металл обладает неравномерными структурой и механическими свойствами.

На рис. 1.9 показан микрошлиф продольного сечения никелевой проволоки диаметром 0,8 мм. По мнению авторов [31], эта неравномерность деформаций поперечного сечения всегда наблюдается при затекании металла в коническую матрицу (даже в идеализированных условиях при полном отсутствии трения).

Качественно деформацию металла можно исследовать с помощью экспериментальных методов – по искажению угловых и линейных элементов координатной сетки, различных вставок из разнородных материалов, изучением макроструктуры, моделированием и т.д.

Одной из основных количественных оценок деформированного состояния, принятой в практике, является величина вытяжки $\mu = F_0 / F_1$ или ее натуральный логарифм $i = \ln \mu$. Однако этих показателей недостаточно для описания деформированного состояния с немонотонными деформациями. Величина вытяжки не является даже усредненной по объему степенью деформации, а лишь равна деформации удлинения бесконечно тонкого осевого слоя.

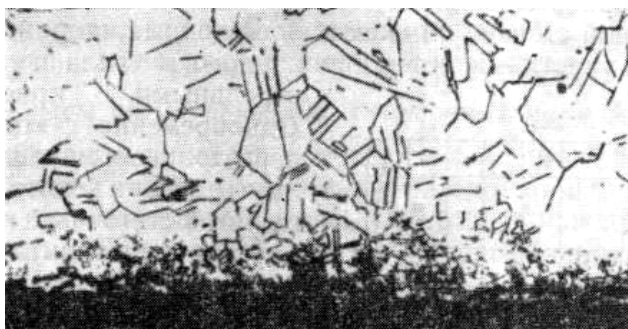


Рис. 1.9. Микршлиф продольного сечения никелевой проволоки

Например, процесс волочения в отдельных случаях принято характеризовать следующими основными геометрическими показателями: а) вытяжка; б) интегральная деформация удлинения; в) относительное обжатие; г) относительное удлинение.

По существу, все эти показатели в разных математических выражениях характеризуют главную деформацию удлинения осевого слоя, которая в процессе волочения является максимальной по отношению к поперечным и поэтому достаточно полно отражающей деформационную сторону процесса. Однако, как это следует из предыдущего, они отражают лишь осевое удлинение и не учитывают сдвигов в этом направлении, поэтому определяют главную максимальную деформацию только центрального элементарного слоя. Главные максимальные деформации остальных слоев во всех случа-

ях превышают величину, определяемую более выгодным из всех логарифмическим показателем, который считается минимальным по отношению к показателям степени деформации периферийных слоев. В связи с этим деформированное состояние оценивают деформациями удлинения и простого сдвига. Сочетание этих характеристик дает более правильное представление о распределении деформаций по объему изделий и позволяет оценить неравномерность деформированного состояния.

Анализ имеющихся данных показывает, что распределение деформаций в рассматриваемых процессах отличается неравномерностью как в объеме пластической зоны, так и во всем изделии. На степень неравномерности деформации определяющее влияние оказывают следующие факторы: механические свойства материала заготовок, величина обжатия, геометрические параметры и форма обжимающей части инструмента, условия трения на контактных поверхностях, сложность формы получаемого изделия. Влияние перечисленных параметров сводится к следующему. Чем выше уровень прочностных свойств обрабатываемого материала, тем более равномерно он деформируется. С ростом обжатий наблюдается увеличение абсолютных значений разности деформаций центральных и периферийных слоев металла. Многочисленные опыты по формообразованию сплошных профилей через коническую матрицу показывают, что с уменьшением угла конусности уменьшается искривление поперечных линий координатной сетки, а с ними и неравномерность деформации. Это объясняется снижением величины сдвиговых деформаций. С уменьшением угла неравномерность уменьшается до определенного предела в связи с возрастанием контактной поверхности и сил трения. Существует оптимальный угол, при котором неравномерность деформаций минимальна. Как и в других процессах обработки, неравномерность истечения металлов и сплавов через формообразующий инструмент существенно зависит от условий трения. При сухом трении, налипании металла на инструмент происходит значительное отставание поверхностных слоев от центральных и увеличение неравномерности деформации по длине и сечению из-

делий. Обильная смазка и жидкостное трение положительно влияют на характер истечения. При формообразовании профилей сложной формы поперечного сечения возникают дополнительные направленные течения металла, что ведет к возрастанию неравномерности деформации. Совокупность действующих в каждом процессе факторов и определяет возможности способов обеспечения минимальной неравномерности деформированного состояния.

Итак, при исследовании причин возникновения остаточных напряжений, необходимо знать характер деформированного состояния в изделии, который можно оценить степенью деформации. Рассмотрим методику определения степени пластической деформации при осесимметричном деформировании.

1.5. Степень пластической деформации при осесимметричном деформировании цилиндрических заготовок

Степень пластической деформации, имеет большое значение при выполнении технологических расчетов. Знание степени деформации необходимо для обоснованного выбора основных технологических параметров конкретных процессов обработки металлов давлением. Однако в литературе присутствуют нескольких величин, характеризующих степень деформации, что создает неоднозначность понятия степени деформации при обработке металлов давлением. Кроме того, существующие формулы степени деформации не содержат параметров, определяющих неравномерность деформации.

В работе предлагается методика определения степени деформации [32] как суммы интенсивностей последовательных малых деформаций сдвига $Hd\tau$, которые претерпела частица с момента возникновения в ней пластического течения до данного момента τ_1 . Она определяется, следуя А.А. Ильюшину [33], по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\tau_0}^{\tau_1} Hd\tau, \quad (1.27)$$

интеграл подсчитывается вдоль линии тока.

Здесь H – интенсивность скоростей деформации сдвига определяется следующим образом:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2 + \frac{3}{2} (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{xz}^2) \right]},$$

где $\xi_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$, v_i – компоненты вектора скорости.

На рис. 1.10 приведена схема осесимметричного деформирования прутка в конической матрице, согласно которому заготовка меняет свой радиус от R на входе в матрицу до R_0 на выходе, текущее изменение радиуса определяется из геометрических соображений:

$$r_x = R - x \operatorname{tg} \alpha.$$

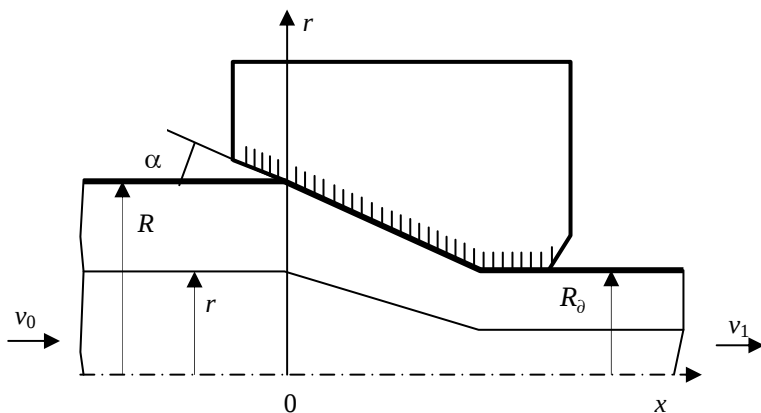


Рис. 1.10. Схема деформирования прутка в конической матрице

При этом составляющая v_x меняется следующим образом:

$$v_x = v_0 \frac{R^2}{(R - x \operatorname{tg} \alpha)^2}, \quad (1.28)$$

где v_0 – скорость на входе; α – угол наклона образующей матрицы.

Решение дифференциального уравнения несжимаемости с учетом соотношения (1.28) дает радиальную составляющую скорости

$$v_r = -\frac{v_0 R^2 r \operatorname{tg} \alpha}{(R - x \operatorname{tg} \alpha)^3}. \quad (1.29)$$

Для любой линии тока, учитывая (1.28) и (1.29), имеем уравнение

$$r'(x) = \frac{v_r}{v_x} = -\frac{r \operatorname{tg} \alpha}{R - x \operatorname{tg} \alpha},$$

решение которого после определения постоянной интегрирования из условия $r(x)|_{x=0} = \bar{r}$ позволяет найти уравнение линий тока

$$r = \frac{\bar{r}}{R} (R - x \operatorname{tg} \alpha). \quad (1.30)$$

Следует отметить, что между зоной деформации и недеформированной частью прутка во всех линиях тока, кроме $\bar{r} = 0$, имеется разрыв радиальной составляющей скорости. Действительно, согласно (1.29) при $x = 0$ и $r = R$

$$v_r = -v_0 \operatorname{tg} \alpha,$$

т.е. при пересечении поверхности разрыва v_r скачком меняется от 0 до $v_0 \operatorname{tg} \alpha$.

Степень деформации по каждой линии тока можно подсчитать так:

$$\varepsilon_i = \Delta \varepsilon_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^\tau H \, d\tau + \Delta \varepsilon_1, \quad (1.31)$$

где $\Delta \varepsilon_0$, $\Delta \varepsilon_1$ – приращение степени деформации на входе в матрицу и на выходе из нее соответственно.

Приращение степени деформации при переходе частицей поверхности разрыва скоростей имеет вид

$$\Delta \epsilon = \frac{|\Delta v_r|}{\sqrt{3} v_x}, \quad (1.32)$$

где Δv_r – скачок радиальной скорости на поверхности разрыва.

Величина же компоненты v_x одинакова по обеим сторонам разрыва скоростей, иначе нарушается условие сплошности металла.

Таким образом, согласно соотношению (1.32) для любой линии тока

$$\Delta \epsilon_0 = \Delta \epsilon_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}} \frac{\bar{r}}{R}. \quad (1.33)$$

После определения интенсивности скоростей деформации и подстановки в соотношение (1.31) получим выражение степени деформации в виде

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha \frac{\bar{r}}{R} + \sqrt{4 + 3 \frac{\bar{r}^2}{R^2} \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R}{R_0}}. \quad (1.34)$$

Как следует из выражения (1.34), степень деформации растет от центра к периферии, определяется обжатием и углом наклона образующей канала волокна. При этом первое слагаемое в выражении определяет неравномерность деформации по сечению, поскольку данное слагаемое меняется от 0 на оси заготовки до $\frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha$ на поверхности изделия. В ряде технологических расчетов удобнее пользоваться усредненным значением степени деформации, которое определяется так:

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{2\pi \int_0^R \epsilon_i \bar{r} d\bar{r}}{S_{\text{сеч}}}. \quad (1.35)$$

Подставляя выражение (1.34), найдем среднее значение степени пластической деформации в прутке:

$$\varepsilon_{\text{cp}} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha + \frac{16 \ln R / R_0}{9 \operatorname{tg}^2 \alpha} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{3}{4} \operatorname{tg}^2 \alpha\right)^3} - 1 \right]. \quad (1.36)$$

С высокой точностью (погрешность не более 0,5 %) эта формула в случае волочения может быть записана проще:

$$\varepsilon_{\text{cp}} = 2 \ln d / d_0 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.37)$$

где d , d_0 – диаметры заготовки (прутка, проволоки) до и после пластической деформации.

Как следует из выражения (1.37), степень деформации в отличие от интегральной деформации удлинения зависит также от угла наклона образующей матрицы, определяющего неравномерность деформации.

Полученное решение будет справедливо и для деформации труб в конической матрице (рис. 1.11) [34].

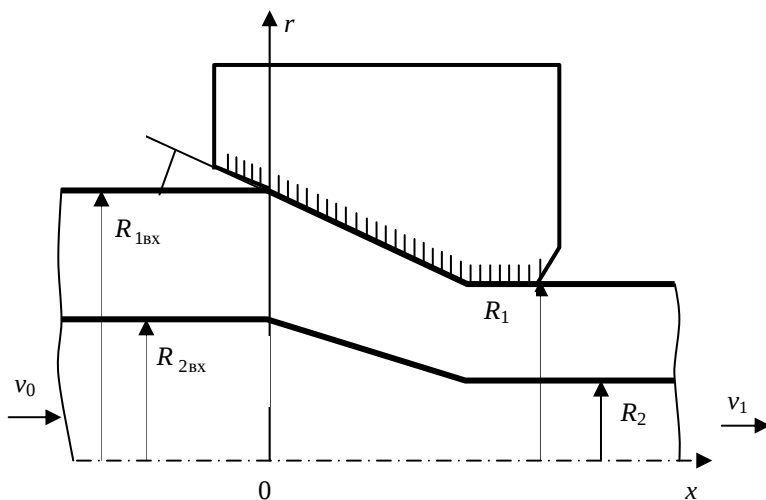


Рис. 1.11. Схема деформирования трубы в конической матрице

Решение будет отличаться на заключительном этапе при усреднении степени деформации:

$$\varepsilon_{\text{cp}} = \frac{2\pi \int_{R_2}^{R_1} \varepsilon_i \bar{r} d\bar{r}}{\pi(R_{1\text{BX}}^2 - R_{2\text{BX}}^2)}, \quad (1.38)$$

где $R_{1\text{BX}}$, $R_{2\text{BX}}$ – внешний и внутренний радиусы трубы на входе.

После подстановки (1.33) в (1.38), интегрирования в пределах трубной заготовки и упрощений получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{cp}} = & \frac{4 \operatorname{tg} \alpha (1 - a^3)}{3\sqrt{3}(1 - a^2)} + \frac{16 \ln R_{1\text{BX}} / R_1}{9 \operatorname{tg}^2 \alpha (1 - a^2)} \times \\ & \times \left[\sqrt{\left(1 + \frac{3}{4} \operatorname{tg}^2 \alpha\right)^3} - \sqrt{\left(1 + \frac{3}{4} a^2 \operatorname{tg}^2 \alpha\right)^3} \right], \end{aligned} \quad (1.39)$$

где $a = \frac{R_{2\text{BX}}}{R_{1\text{BX}}}$ – параметр, характеризующий начальную толщину

стенки трубы; R_1 – внешний радиус трубы после деформации.

При $a \rightarrow 0$ имеем случай деформации сплошного прутка и из выражения (1.39) получаем выражение (1.36).

Первое слагаемое выражения (1.39) также определяет неравномерность деформации по сечению трубы, а второе слагаемое с достаточно высокой точностью равняется $2 \ln d / d_o$, где d , d_o – средние диаметры трубы до и после деформации. Так, отношение значений второго слагаемого к значениям, соответствующим $2 \ln d / d_o$, для $\alpha = 5^\circ$ и $a = 0,5$ составит 1,005, для $a = 0,9$ – 1,008. Для $\alpha = 10^\circ$ соответственно 1,014 и 1,0208.

Тогда для осесимметричного деформирования труб можно определять среднюю степень деформации по формуле

$$\varepsilon_{\text{ср}} = 2 \ln d / d_0 + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha (1 - a^3)}{3 \sqrt{3} (1 - a^2)}. \quad (1.40)$$

Знание степени деформации необходимо для обоснованного выбора основных технологических параметров конкретных процессов обработки металлов давлением. Поэтому методика, учитывающая такие характеристики, как деформации удлинения, простой сдвиг, угол наклона образующей канала волокна, позволяет оценить неравномерность деформированного состояния.

Соотношение (1.37) и (1.40) рекомендуются для более точного с позиций механики сплошной среды определения степени деформации. Эти соотношения отличаются вторыми слагаемыми, которые определяют именно неравномерность деформации по сечению протягиваемого изделия. Из них также следует, что уменьшение угла конусности волокна приводит к более равномерной деформации и снижению уровня остаточных напряжений, что подтверждается опытом волочильного производства [31].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов И.А, Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.
2. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М., 1989. – 254 с.
3. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусков П.В. Остаточные напряжения: теория и приложение. – М., 1982. – 112 с.
4. Symposium on Internal Stresses in Metals and alloys. Institute of Metals. – London, 1948. – Р. 40.
5. Остаточные напряжения: сб. ст. / под ред. В.Р. Осгуда. – М.: Изд-во ИЛ, 1957. – 395 с.
6. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Наука; Физматлит, 1996. – 240 с.

7. Ровинский Б.М. // ЖТФ. – 1948. – Вып. 10. – С. 1273–1281.
8. Селиванов В.В., Зарубин В.С., Ионов В.Н. Аналитические методы механики сплошной среды. – М.: Изд-во МГТУ им. И.Э. Баумана, 1994. – 381 с.
9. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
10. Ильюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. – М.: Наука, 1948. – 376 с.
11. Москвитин В.В. О вторичных пластических деформациях // ПММ, 1952. – Т. 16, вып. 3. – С. 323–330.
12. Кийко И.А., Морозов Н.А. Методы теории упругости и пластичности в обработке металлов давлением // Пластическая деформация легких и специальных сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – № 1. – С. 55–69.
13. Ильюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. – М.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
14. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М., 1976. – Т. 1, 2. – 568 с.
15. Михайлов О.Н. Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / НИИТЯЖМАШ Уралмашзавод. – Свердловск, 1971. – 57 с.
16. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
17. Давиденков Н.Н., Шевандин Е.М. Исследование остаточных напряжений, создаваемых изгибом // ЖТФ. – 1939. – Т. IX, вып. 12. – С. 1112–1124.
18. Дехтярь Л.И. Определение остаточных напряжений в покрытиях и биметаллах. – Кишинев, 1968. – 176 с.
19. Аксенов Г.И. // ЖТФ. – 1939. – Т. 6, вып. 2. – С. 210–230.
20. Гинье А. Рентгенография кристаллов. – М., 1961. – 604 с.
21. Пай Дж. Физические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1967. – 385 с.
22. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.

23. Курилех Д.Г., Сиротенко Д.Л. // Заводская лаборатория. – 1952. – № 12. – С. 1497–1499.
24. Саверин М.М., Заварцева В.М. // Тр. ЦНИИТМаш.– М.: Машгиз, 1951. – Кн. 40. – С. 60–93.
25. Финк К., Рорбах Х. Измерение напряжений и деформаций. – М.: Машгиз, 1961. – 535 с.
26. Гликман Л.А. // Заводская лаборатория. – 1965. – № 7. – С. 811–814.
27. Остаточные технологические напряжения // Тр. II Всесоюз. симпозиума по остаточным напряжениям / под ред. А.А. Антонова. – М., 1985. – 390 с.
28. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. – 2002. – № 10. – С. 17–24.
29. Остаточные напряжения / Ж.А. Мрочек [и др.]. – Минск: Технопринт, 2003. – 352 с.
30. Трубы России – 2004. Достижения в теории и практике трубного производства: материалы 1-й Всерос. конф. по трубному производству. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. – 523 с.
31. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
32. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
33. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 287 с.
34. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О степени деформации при осесимметричном деформировании // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 31–33.

Глава 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЯХ ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Совместное действие причин, вызывающих появление остаточных напряжений (неравномерность пластической деформации, тепловые напряжения, структурные превращения, ликвация и т.д.), создает сложную картину распределения таких напряжений. Для большинства практических случаев их определение осуществляется не теоретическим, а опытным путем, что вызывает ряд трудностей при выявлении влияния свойств материала или технологических параметров на уровень и распределение остаточных напряжений. Эти обстоятельства заставляют уделять особое внимание проблеме разработки аналитических методов определения остаточных напряжений.

При пластическом деформировании реализуются большие степени деформации, остаточные напряжения при этом в некоторых случаях могут достигать больших величин вплоть до физического предела текучести или прочности материала. Для пластичных материалов превышение остаточных напряжений предела текучести приведет к появлению вторичных пластических деформаций и изменению размеров. Для хрупких материалов это превышение чревато разрушением.

Стандартные методы снятия технологических остаточных напряжений: термическая обработка (отжиг, отпуск, закалка); дробеструйная обработка; малые пластические деформации для снятия остаточных напряжений в поверхностных слоях и т.д., которые применяются на металлургических и машиностроительных предприятиях, частично снимают проблемы прочности и долговечности готовых металлоизделий. Однако необходимо отметить, что любая из перечисленных операций может приводить к перераспределению остаточных напряжений по объему и сечению, неполному снятию напряжений, а в некоторых случаях и наведению новых напряжений, что в итоге влечет за собой снижение качества металлопродукции, коробление деталей, изменение формы и размеров.

2.1. Напряженно-деформированное состояние в металлоизделиях после пластической деформации

Остаточное напряженное состояние, сохраняющееся неограниченное время в материале или конструкции после ряда технологических операций при изготовлении, является внутренним состоянием изделия, не проявляющим себя внешне и представляющим трудности при определении, несмотря на множество существующих теоретических и экспериментальных способов [1]. Поэтому разработка аналитических методов определения остаточных напряжений в металлоизделиях является актуальной задачей. Опыт производства металлоизделий и исследования технологических остаточных напряжений показывает, что их действие в большинстве случаев имеет упругий характер, то есть их уровень лежит ниже пределов текучести и упругости материала.

2.1.1. Общие параметры напряженно-деформированного состояния

В общем случае в любой точке тела напряженное состояние в выбранной системе координат (рис. 2.1) характеризуется шестью не-

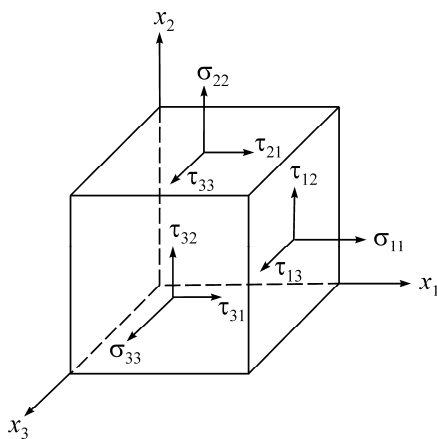


Рис. 2.1. Напряжения в точке тела
в выбранной системе координат

зависимыми компонентами тензора напряжений (σ_{ij} , $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, 3$).

Здесь σ_{ij} – нормальные, а τ_{ij} – касательные напряжения.

Первый индекс в записи напряжений обозначает направление вектора нормали к площадке, на которой действует рассматриваемое напряжение, второй индекс – направление данной составляющей напряжений. Касательные напряжения, дейст-

вующие на взаимно ортогональных площадках и лежащие в одной плоскости, равны по величине, в чем выражается закон парности касательных напряжений:

$$\tau_{12} = \tau_{21}, \tau_{13} = \tau_{31}, \tau_{23} = \tau_{32}. \quad (2.1)$$

При поворотах системы координат происходит изменение компонент напряжений по закону

$$\sigma'_{mn} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} l_{mi} l_{nj}, \quad (2.2)$$

где σ'_{mn} – напряжения в «новой» (x'_i) системе координат, σ_{ij} – напряжения в «старой» (x_i) системе координат, $l_{ij} = \cos(x'_i, x_j)$.

Таким образом, под напряженным состоянием в точке понимается совокупность напряжений, действующих по всевозможным площадкам, проведенным через эту точку. Для любого напряженного состояния существует единственное положение трех взаимно ортогональных площадок, при котором значения всех касательных напряжений обращаются в ноль. Такие площадки называются главными, а действующие на них нормальные напряжения – главными напряжениями, для которых приняты обозначения: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Главные напряжения определяются как корни кубического уравнения

$$\sigma^3 - \sigma^2 I_1 + \sigma I_2 - I_3 = 0, \quad (2.3)$$

где

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$I_2 = \sigma_{11} \sigma_{22} + \sigma_{22} \sigma_{33} + \sigma_{33} \sigma_{11} - \tau_{12}^2 - \tau_{23}^2 - \tau_{13}^2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1,$$

$$I_3 = \sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{33} + 2\tau_{12} \tau_{23} \tau_{13} - \sigma_{11} \tau_{23}^2 - \sigma_{22} \tau_{13}^2 - \sigma_{33} \tau_{12}^2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

– 1, 2 и 3-й инварианты напряжений соответственно.

Инварианты однозначно определяются напряжениями в рассматриваемой точке тела и не изменяются при поворотах системы координат [2].

На основе рассмотренных инвариантных величин вводят также следующие параметры напряженного состояния в точке:

среднее напряжение (определяется через первый инвариант)

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.4)$$

и интенсивность напряжений (определяется через второй инвариант напряжений)

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Максимальные касательные напряжения действуют на площадках, повернутых на угол $\pi/2$ по отношению к главным, и определяются следующим образом:

$$\tau_{12}^{\max} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \quad \tau_{23}^{\max} = \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \quad \tau_{13}^{\max} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}. \quad (2.6)$$

Если принять обозначения, при которых $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, то максимальные значения нормального и касательного напряжений будут равны соответственно:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 \text{ и } \tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3). \quad (2.7)$$

При рассмотрении напряженного состояния в точке часто выделяют шаровую и девиаторную части. Шаровая часть (характеризуется значением среднего напряжения σ) выделяет из напряженного состояния равномерное всестороннее растяжение или сжатие, при котором изменяется объем данного элемента тела без изменения формы.

Девииатор напряжений

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (2.8)$$

где символы Кронекера δ_{ij} определяются по следующему правилу:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

Девииатор напряжений (2.8) характеризует состояние сдвига, при котором изменяется форма элемента без изменения его объема. Следовательно, девиатор напряжений показывает отклонение рассматриваемого напряженного состояния от всестороннего растяжения (сжатия) или отклонение приобретенной формы от первоначальной. Как показывают опыты, материалы по-разному реагируют на всестороннее сжатие и сдвиг [3].

Представляет интерес рассмотрение частного случая – плоского напряженного состояния (ПНС), реализуемого в тонких пластинах и оболочках, например при определении напряженного состояния в листовых металлоизделиях после прокатки. В этом случае напряженное состояние характеризуется тремя значениями: σ_{11} , σ_{22} и τ_{12} , а формулы пересчета компонент напряжений при повороте системы координат (рис. 2.2) имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma'_{11} &= \sigma_{11} \cos^2 \alpha + \sigma_{22} \sin^2 \alpha + \tau_{12} \sin 2\alpha, \\ \sigma'_{22} &= \sigma_{11} \sin^2 \alpha + \sigma_{22} \cos^2 \alpha - \tau_{12} \sin 2\alpha, \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\tau'_{12} = -\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin 2\alpha + \tau_{12} \cos 2\alpha.$$

Из последней формулы следует, что главные напряжения будут действовать на площадках, полученных при повороте системы координат на угол α_0 , для которого справедливо выражение

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2\tau_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}}. \quad (2.10)$$

В этом случае главные напряжения могут быть найдены по формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\tau_{12}^2}, \quad (2.11)$$

здесь знак «+» соответствует напряжению σ_1 , а знак «-» – напряжению σ_2 .

Максимальное касательное напряжение при плоском напряженном состоянии определяется соотношением

$$\tau_{12}^{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\tau_{12}^2}. \quad (2.12)$$

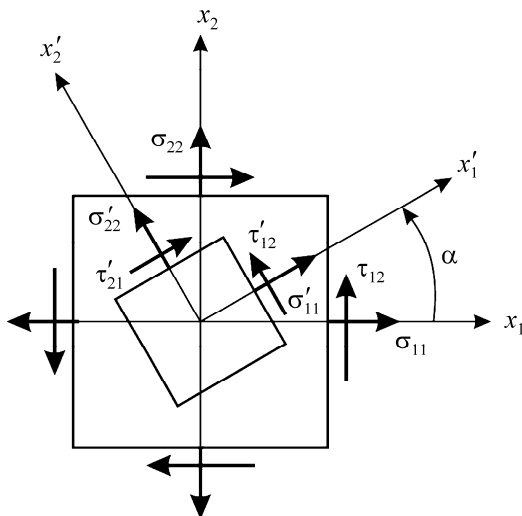


Рис. 2.2. Преобразование компонент напряжений при повороте системы координат (плоское напряженное состояние)

Плоскодеформированное состояние (ПДС) предполагает отсутствие одной из компонент тензора деформаций. Такое состояние

реализуется в длинных прутковых или трубных изделиях, где деформации в осевом z направлении относительно малы. Также существует возможность упрощения задач при определении напряженно-деформированного состояния в осесимметричных изделиях, где можно не учитывать некоторые компоненты касательных напряжений. Для круглых поперечных сечений удобно использовать цилиндрическую или сферическую систему координат.

В работе [4] рассмотрена деформация элементарного объема в виде куба с ребрами длиной l_0 и направлениями осей x_1 , x_2 и x_3 вдоль ребер. В случае упругих деформаций изменения длин его ребер (удлинения) малы по сравнению с начальной длиной ребер, а изменения углов между ребрами (сдвиги) малы в сравнении с начальными прямыми углами между ними. Такую деформацию куба можно представить как сумму (суперпозицию) шести элементарных деформаций (рис. 2.3).

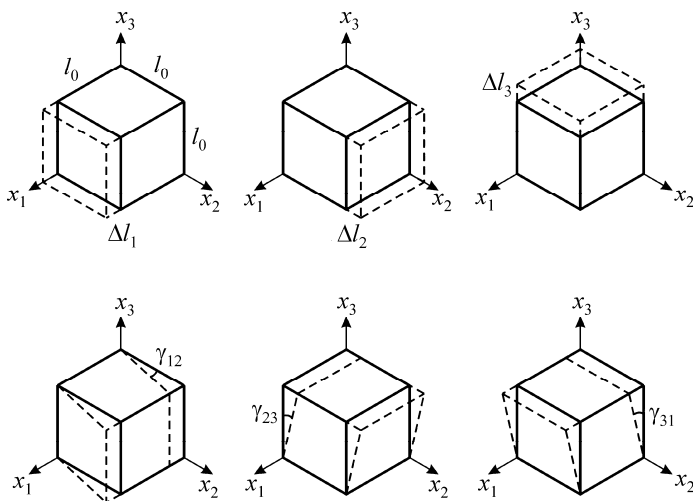


Рис. 2.3. Простые виды деформаций элементарного объема

В первых трех случаях углы остаются прямыми, а изменяются только длины ребер соответственно на малые величины Δl_1 , Δl_2 и Δl_3 . Деформации такого рода связаны с удлинениями и считаются положительными, если длина ребер увеличивается. В остальных трех деформациях длины ребер остаются неизменными, а меняются углы между ребрами в плоскостях x_1x_2 , x_2x_3 и x_3x_1 соответственно на величины γ_{12} , γ_{23} и γ_{31} . Такие деформации называют сдвиговыми и считают положительными, если прямой угол при деформации уменьшается.

Сдвиги γ_{12} , γ_{23} и γ_{31} , будучи угловыми величинами, являются безразмерными и равными при одинаковой сдвиговой деформации элементов различной величины. Удлинения Δl_1 , Δl_2 и Δl_3 таким свойством не обладают, поэтому линейные деформации вводятся как относительные удлинения в соответствующем направлении:

$$\epsilon_{11} = \frac{\Delta l_1}{l_0}, \quad \epsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l_0}, \quad \epsilon_{33} = \frac{\Delta l_3}{l_0}. \quad (2.13)$$

Таким образом, деформированное состояние в точке характеризуется шестью независимыми значениями компонент деформаций ϵ_{ij} :

$$\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{12} = \epsilon_{21} = \frac{1}{2}\gamma_{12}, \epsilon_{23} = \epsilon_{32} = \frac{1}{2}\gamma_{23}, \epsilon_{13} = \epsilon_{31} = \frac{1}{2}\gamma_{31}.$$

Как математический объект (тензор второго ранга) тензор деформаций с компонентами ϵ_{ij} не отличается от тензора напряжений с компонентами σ_{ij} и обладает всеми рассмотренными свойствами.

В качестве инвариантных характеристик деформированного состояния обычно используют величины относительного изменения объема (первый инвариант)

$$\theta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} \quad (2.14)$$

и интенсивности деформаций (второй инвариант)

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}.\end{aligned}\quad (2.15)$$

Девииатор деформаций задается соотношениями

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \theta \delta_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (2.16)$$

При определении напряженно-деформированного состояния в металлоизделии материал рассматривается как сплошная среда, при этом основным является механическое поведение металла в тех или иных деформационных условиях. К таким характеристикам материала относятся: модули упругости, сдвига; коэффициенты Пуассона, Ламе; пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности; характеристики сопротивления материала упругим и пластическим деформациям, упрочнения; предел усталости; коэффициенты ударной вязкости, интенсивности напряжений и вязкости разрушения.

Рассмотрим некоторые из перечисленных механических характеристик, а также степень их влияния на появление и уровень остаточных напряжений.

2.1.2. Механические характеристики материала

Механические характеристики материалов определяются экспериментально, при испытаниях цилиндрических образцов на одноосное растяжение. На рис. 2.4 показана начальная стадия диаграммы растяжения [5].

На начальном этапе растяжения абсолютные деформации пропорциональны нагрузке, а относительные деформации пропорциональны напряжению. На этом участке выполняется закон Гука – линейная зависимость между напряжениями и деформациями:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.17)$$

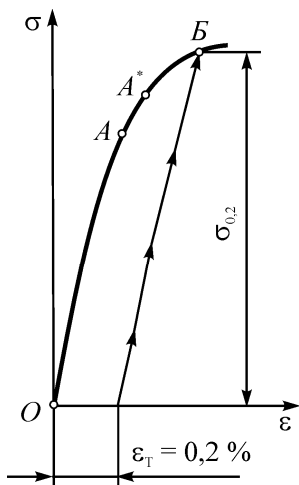


Рис. 2.4. Начальная стадия диаграммы растяжения

где E – модуль упругости (Юнга), равный тангенсу угла наклона начального участка диаграммы к оси абсцисс.

Другой характеристикой материала является оценка интенсивности деформации: относительная продольная ε и относительная поперечная ε' деформации, приходящиеся на единицу длины или площади сечения стержня:

$$\varepsilon = \Delta l / l,$$

$$\varepsilon' = \Delta s / s,$$

где Δl – изменение длины, Δs – изменение площади сечения образца.

Продольная и поперечная деформации связаны соотношением

$$\left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| = \mu, \quad (2.18)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Конструкционные металлы и сплавы принято считать квазиизотропными, что значительно упрощает задачу, так как число независимых упругих постоянных в изотропном теле равно двум: модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Полная диаграмма растяжения представлена на рис. 2.5, где при дальнейшем нагружении после точки A закон Гука нарушается, а зависимость $\sigma - \varepsilon$, становится нелинейной, далее имеют место пластические деформации. На диаграмме присутствует практически горизонтальный участок BB , называемый площадкой текучести. Затем следует участок $ВД$, называемый зоной упрочнения, при этом в точке $Д$ достигается максимальное напряжение, которое может выдержать образец. Последний участок разрушения $ДЕ$ – зона локальной деформации, когда появляется местное утонение образца и последующее разрушение.

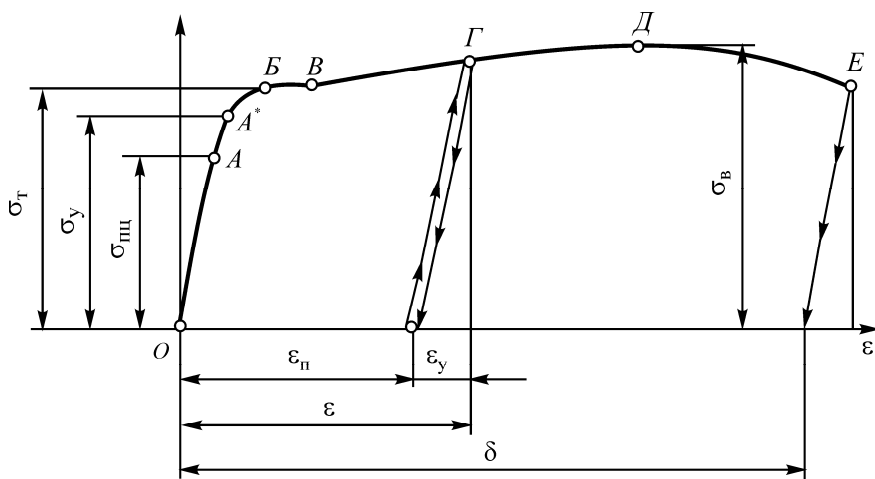


Рис. 2.5. Диаграмма растяжения

Из диаграммы растяжения также определяют такие механические характеристики материала, как: пределы пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ – максимальное напряжение, при котором выполняется закон Гука; предел упругости σ_y ; предел текучести материала σ_T (σ_s), а также предел прочности (временное сопротивление) – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, предшествующей разрушению образца.

Практически для всех материалов характерна стадия упрочнения. Согласно дислокационной теории эффект упрочнения является следствием микроструктурных изменений материала, где происходит разгрузка напряженных зон после пластической деформации, при этом сопротивление деформации материала повышается. В механике процесс повышения механических характеристик после пластической деформации называется наклепом.

При отсутствии площадки текучести (что характерно для диаграмм растяжения большинства материалов после предварительной пластической деформации) определяют условный предел текучести.

Условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ (см. рис. 2.4) называется напряжение, при котором остаточная (пластическая) деформация составляет 0,2 %. В качестве примера экспериментальных диаграмм после пластического деформирования на рис. 2.6 представлены характерные механические характеристики трубных изделий после волочения [6].

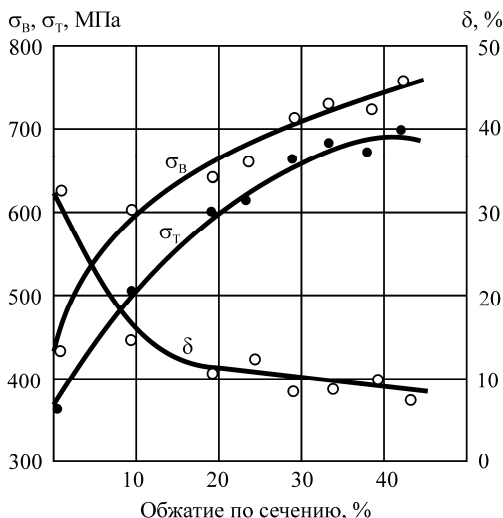


Рис. 2.6. Механические свойства стальных труб после волочения

Сопротивление деформации конструкционных материалов зависит от степени деформации и для большинства металлов и сплавов эта зависимость имеет вид [7]

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + m \varepsilon^n, \quad (2.19)$$

где σ_{s_0} — исходное сопротивление деформации металла или предел текучести материала; m , n — эмпирические коэффициенты, характеризующие деформационное упрочнение, определяемые экспериментально; ε — степень пластической деформации.

Механические характеристики материалов имеют существенное влияние на деформационное поведение деталей и конструкций, поэтому для создания прочных и надежных конструкций необходимо учитывать технологические остаточные напряжения в зависимости от механического поведения металлов и сплавов, как в условиях пластического деформирования при производстве, так и в условиях последующей эксплуатации.

2.1.3. Определение напряженно-деформированного состояния в осесимметричных изделиях

При холодном пластическом деформировании осесимметричных изделий реализуется схема плоского деформированного состояния. В процессе деформирования формируются остаточные напряжения, действующие в пределах упругости. Их распределение определяется уравнениями и соотношениями теории упругости. Для осесимметричных металлоизделий записываются уравнения равновесия в цилиндрических координатах

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

где σ_{ij} , τ_{ij} – компоненты тензора остаточных напряжений.

Упругие деформации ε_{ij} , возникающие от действия технологических остаточных напряжений, определяются обобщенным законом Гука:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{ij},$$

где C_{ijkl} – независимые упругие постоянные материала.

В случае анизотропного однородного тела число независимых упругих постоянных может достигать 21 в общем случае анизотропии. Для решения задач о распределении напряжений и деформаций в анизотропном теле необходимо исходить из уравнений теории упругости, учитывающих различие упругих свойств для разных направлений и содержащих в соответствии с этим более двух упругих постоянных [8].

В однородном анизотропном теле все параллельные направления, проведенные через разные точки, являются эквивалентными в отношении упругих свойств. Вследствие этого все одинаковые и одинаково направленные элементы в виде прямоугольных параллелепипедов, выделенные в разных местах тела, являются идентичными – обладают одинаковыми упругими свойствами [9].

Наряду с такой анизотропией, которую можно назвать прямолинейной, существует анизотропия другого вида – криволинейная. Криволинейная анизотропия однородного тела характеризуется тем, что для разных точек тела, обладающего ею, эквивалентными являются не параллельные направления, а подчиненные каким-то другим закономерностям. Если выбрать систему криволинейных ортогональных координат так, чтобы координатные направления ее в каждой точке совпадали с эквивалентными направлениями (в отношении упругих свойств), то бесконечно малые элементы тела, ограниченные тремя парами координатных поверхностей, будут идентичными. Наоборот, элементы в виде одинаковых и одинаково направленных параллелепипедов будут в разных местах иметь различные упругие свойства.

Предположим, что однородное тело является криволинейно-анизотропным и подчиняется обобщенному закону Гука, т.е. составляющие деформации являются линейными функциями составляющих напряжения, и наоборот. Обозначим через ξ , η , ζ координатные направления упомянутой криволинейной системы координат. Тогда можно записать уравнения обобщенного закона Гука для однородного криволинейно-анизотропного тела таким образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\xi} &= a_{11}\sigma_{\xi} + a_{12}\sigma_{\eta} + a_{13}\sigma_{\zeta} + a_{11}\tau_{\eta\zeta} + a_{15}\tau_{\xi\zeta} + a_{16}\tau_{\xi\eta}, \\ \varepsilon_{\eta} &= a_{12}\sigma_{\xi} + a_{22}\sigma_{\eta} + \dots + a_{26}\tau_{\xi\eta}, \\ \dots & \\ \gamma_{\xi\eta} &= a_{16}\sigma_{\xi} + a_{26}\sigma_{\eta} + \dots + a_{66}\tau_{\xi\eta}, \end{aligned} \right\}, \quad (2.21)$$

где a_{ij} – упругие постоянные.

Можно, конечно, записать и в этом случае уравнения обобщенного закона Гука в декартовой системе координат, но тогда в уравнениях обобщенного закона Гука коэффициенты a_{ij} уже не будут постоянными, а будут меняться от точки к точке в связи с изменением координатных направлений.

Уравнения (2.21) упростятся, если тело обладает упругой симметрией, и эти упрощения будут такими же, как и в случае прямолинейной анизотропии. Так, можно говорить о криволинейно-анизотропном ортотропном теле, о теле, трансверсально-изотропном относительно какого-нибудь из направлений ξ, η, ζ , и т.д. С другой стороны, понятие криволинейной анизотропии можно обобщить и рассматривать криволинейно-анизотропные неоднородные тела, у которых коэффициенты a_{ij} из уравнений (2.21) будут зависеть от координат точки.

Из различных видов криволинейной анизотропии наибольший интерес представляют два вида, рассмотренные еще Сен-Венаном: 1) цилиндрическая анизотропия и 2) сферическая анизотропия. Более подробно рассмотрим цилиндрическую анизотропию.

Пусть с телом неподвижно связана некоторая прямая g – ось анизотропии, которая может проходить как внутри тела, так и вне его. Все направления, параллельные g , проходящие через разные точки, между собой эквивалентны; все направления, пересекающие g под прямым углом (радиальные), также эквивалентны и все направления, ортогональные к первым двум (тангенциальные), эквивалентны. Эквивалентными, или идентичными, будут бесконечно малые элементы, ограниченные тремя парами поверхностей: двумя плоскостями, нормальными к g , двумя плоскостями, проходящими через g , и двумя поверхностями цилиндров с общей осью u .

Если в каждой точке имеется одна плоскость упругой симметрии, перпендикулярная к оси z (или g), то $a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{46}, a_{15}, a_{35}, a_{56}$ равны нулю, а $a_{22} = a_{11}, a_{23} = a_{13}, a_{26} = a_{16}, a_{55} = a_{44}$. Если существуют еще две плоскости упругой симметрии – радиальная и тангенциальная (ортотропное тело с цилиндрической анизотропией), то равны нулю также и коэффициенты $a_{16}, a_{26}, a_{36}, a_{45}$.

В случае ортотропного материала с цилиндрической анизотропией удобно ввести «технические постоянные» – модули Юнга и сдвига и коэффициенты Пуассона. Тогда уравнения (2.23) запишутся таким образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{\theta r}}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\mu_{zr}}{E_z} \sigma_z, & \gamma_{\theta z} &= \frac{1}{G_{\theta z}} \tau_{\theta z}, \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{\mu_{r\theta}}{E_r} \sigma_r - \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\mu_{z\theta}}{E_z} \sigma_z, & \gamma_{rz} &= \frac{1}{G_{rz}} \tau_{rz}, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\mu_{rz}}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{\theta z}}{E_\theta} \sigma_\theta + \frac{1}{E_z} \sigma_z, & \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{G_{r\theta}} \tau_{r\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Здесь E_r, E_θ, E_z – модули Юнга для растяжения-сжатия по радиальному, тангенциальному и осевому направлениям; $\mu_{r\theta}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении θ при растяжении в направлении r и т.д.; $G_{\theta z}, G_{rz}, G_{r\theta}$ – модули сдвига, характеризующие изменение углов между направлениями θ и z , r и z , r и θ .

Изменение механических свойств и цилиндрическая анизотропия могут появиться в металлических изделиях после соответствующих технологических процессов (волочении, прокатке, прессовании). При этом интересным будет влияние механических и технологических характеристик на возникновение остаточных напряжений после обработки металлов давлением.

2.2. Энергетический подход к определению остаточных напряжений

Энергетические подходы активно применяются во многих разделах механики сплошных сред, деформируемого твердого тела, разрушения и т.д. В работе [1] сделана попытка определения упругой потенциальной энергии остаточных напряжений для одноосного растяжения, показан механизм разделения всей потенциальной энергии на потенциальную энергию упругого деформирования и потенциальную энергию остаточных напряжений. Потенциальная энергия остаточных напряжений сохраняется в скрытом виде в течение длительного времени и подвергается диссипации лишь под воздействием специальной обработки, например отжигом или механической пластификацией, а также релаксацией.

При пластическом деформировании часть энергии пластического деформирования сохраняется в деформируемом теле в виде скрытой потенциальной энергии остаточных напряжений. Тогда согласно энергетическому подходу потенциальную энергию остаточных напряжений после пластического деформирования можно представить как часть энергии, пошедшей на пластическое деформирование [10]:

$$U = \psi U_d, \quad (2.26)$$

где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений; U_d – энергия пластического деформирования.

При этом потенциальная энергия упругих остаточных напряжений

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (2.27)$$

где V – объем металлоизделия.

Энергия, затраченная на пластическую деформацию заготовки, определяется интегралом

$$U_d = S \int_0^{\epsilon} \sigma_s d\epsilon, \quad (2.28)$$

где S – площадь сечения заготовки; ϵ – степень деформации; σ_s – сопротивление деформации материала заготовки. Сопротивление деформации конструкционных материалов в общем случае зависит от степени деформации.

Так, с учетом соотношения (2.19) энергия пластического деформирования

$$U_d = S \int_0^{\epsilon} (\sigma_{s_0} + m\epsilon^n) d\epsilon.$$

Согласно выражениям (2.27–2.29) можно определять потенциальную энергию технологических остаточных напряжений, формируемых в процессе пластического деформирования осесимметричных изделий с учетом степени пластической деформации и деформационного упрочнения материала заготовки.

Далее решаются задачи теории упругости полуобратным методом, определяются характер и уровень распределения остаточных напряжений σ_{ij} и возникающих от их действия упругих деформаций ϵ_{ij} . Из энергетического условия находятся расчетные значения и зависимость технологических остаточных напряжений от основных параметров пластического деформирования и механических свойств обрабатываемого материала.

2.2.1. Технология производства осесимметричных металлоизделий

Технологический процесс изготовления и обработки должен быть построен таким образом, чтобы обеспечить минимальный уровень и благоприятное распределение остаточных напряжений. Чтобы избежать нежелательных остаточных напряжений или уменьшить их до определенных допустимых значений, необходимо знать законо-

мерности формирования остаточных напряжений и зависимость их от технологических параметров процесса обработки материала.

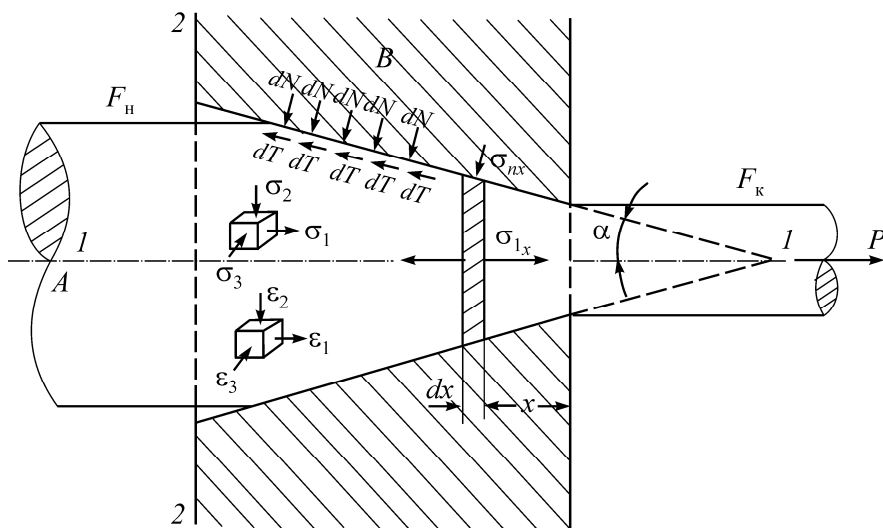
Производство цилиндрических сплошных и полых профилей в основном осуществляется методами волочения, при котором обрабатываемый металл в виде заготовки постоянного поперечного сечения вводится в канал волочильного инструмента и протягивается через него [11]. Форма поперечного сечения канала одинакова или близка к форме поперечного сечения протягиваемого металла. Сечение канала плавно уменьшается от места входа металла в инструмент к месту выхода из него. Выходное сечение канала всегда меньше поперечного сечения протягиваемой заготовки. Поэтому заготовка, проходя через волоку, деформируется, поперечное сечение ее изменяется, и она после выхода из волоки принимает форму и размеры наименьшего сечения канала.

Процесс деформации протягиваемого металла в круглом волочильном канале состоит в следующем. К заготовке A с начальным сечением F_n приложена сила волочения P , под воздействием которой заготовка протягивается через канал волоки B (рис. 2.7) с выходным сечением F_k . Стенки канала давят на протягиваемую полосу и обжимают ее по всей контактной поверхности в каждой ее точке. Элементарные силы давления волоки на протягиваемый металл dN вызывают со стороны металла элементарные реактивные силы, одинаковые по величине с активными, но направленные в противоположные стороны. Вследствие движения металла в канале на контактной поверхности возникают элементарные силы трения dT , направленные по касательным к поверхности канала в различных ее точках и действующие на металл в направлении, обратном его движению. Величина этих элементарных сил трения определяется по закону Кулона (точнее Кулона-Аммонтона)

$$dT = f_n dN,$$

где f_n – коэффициент трения по нормальному давлению, не зависящий от давления. Этот закон, учитывая силы от механического взаимодействия трущейся пары, не принимает во внимание силы меж-

Скорость скольжения на контактной поверхности возрастает от входа в канал к выходу из него, так как по закону постоянства объема скорость движения металла в канале увеличивается пропорционально уменьшению его поперечного сечения. Таким образом, скорость скольжения на выходе из канала равна скорости волочения v_b , а скорость скольжения у входа в канал равна $v_b \frac{F_k}{F_u}$.



77

Соответственно изменяются и скорости скольжения протягиваемого металла по контактной поверхности. Коэффициент трения скольжения зависит от скорости скольжения и ряда других факторов, также изменяющихся по длине канала (температура, качество поверхности, условия смазки и т.д.). Комплекс перечисленных сил, действующих на протягиваемый металл в деформационной зоне, вызывает в подавляющем большинстве элементарных объемов напряженно-деформированное состояние, характеризующееся двумя сжимающими напряжениями, из которых одно радиальное, а другое окружное (в отличие от тангенциального – касательного), и одним осевым, преимущественно растягивающим напряжением, а также двумя поперечными деформациями укорочения и одной деформацией удлинения, являющейся максимальной, так как эта деформация по своему знаку отличается от двух других.

2.2.2. Остаточные напряжения в прутках

Под действием остаточных напряжений, возникающих после пластического деформирования, в осесимметричных изделиях большой длины реализуется схема плоского деформированного состояния (отсутствие осевых деформаций $\varepsilon_z = 0$). Для плоского деформированного состояния система дифференциальных уравнений (2.20) примет вид [12]

$$\left. \begin{aligned} r \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rz}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial r}(r \sigma_r) - \sigma_\theta + r \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения соответственно.

При осевой симметрии напряженного состояния в условиях плоского деформированного состояния изделий большой длины имеем

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0.$$

В этом случае система (2.29) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_r) - \sigma_\theta &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Уравнения системы (2.30) не содержат осевого напряжения σ_z , которое определяется дополнительным соотношением из обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_r + \sigma_\theta)] = 0,$$

откуда следует

$$\sigma_z = \mu (\sigma_r + \sigma_\theta). \quad (2.31)$$

Здесь μ и E – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала соответственно.

Уравнения (2.30) и (2.31) определяют упругое напряженное состояние от остаточных напряжений в проволоке и прутках.

Разрешив первое из уравнений (2.34) относительно τ_{rz} , получим

$$\tau_{rz} = \frac{c_1}{r}.$$

Для центральных слоев ($r = 0$) касательное напряжение τ_{rz} становится бесконечно большим, из соображений физического смысла полагаем $c_1 = 0$, тогда и $\tau_{rz} = 0$. Дифференцируя по r выражение в круглых скобках второго из дифференциальных уравнений (2.30), имеем

$$\sigma_\theta = \sigma_r + r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r}. \quad (2.32)$$

При подстановке данного соотношения в первое из уравнений (2.29) получим уравнение равновесия в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2 \sigma_r}{r} - \frac{\sigma_z}{\mu r} = 0. \quad (2.33)$$

Соотношения (2.31) и (2.32) позволяют определить радиальные σ_r и окружные σ_θ напряжения при заданном распределении напряжений σ_z . Так, можно задать осевые напряжения σ_z в виде ряда [13], функция напряжений σ_z задавалась в виде ряда

$$\sigma_z = a_0 + a_1 r^2, \quad (2.34)$$

Из условия самоуравновешенности остаточных напряжений устанавливается связь между коэффициентами a_0 и a_1 .

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \sigma_z r dr d\theta = 0,$$

что после подстановки соотношения (2.34) и преобразований дает

$$a_0 = -\frac{a_1 R_0^2}{2},$$

тогда

$$\sigma_z = \frac{\bar{a}_1}{2} (2\bar{r}^2 - 1),$$

где $\bar{a}_1 = a_1 R_0^2$, $\bar{r} = \frac{r}{R_0}$ – безразмерная радиальная координата.

Зная выражение для σ_z , с учетом (2.33) можно получить дифференциальное уравнение для определения σ_r , а затем из соотношения (2.31) найти σ_θ . Ниже записана система уравнений для определения остаточных напряжений в прутковых изделиях [14]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu} (\bar{r}^2 - 1), \\ \sigma_\theta &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu} (3\bar{r}^2 - 1), \\ \sigma_z &= \frac{\bar{a}_1}{2} (2\bar{r}^2 - 1). \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

При известных компонентах тензора напряжений σ_{ij} с помощью обобщенного закона Гука находятся компоненты тензора относительных упругих деформаций:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_z + \sigma_\theta)], \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

и рассчитывается потенциальная энергия остаточных напряжений (2.27):

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^R (\sigma_r \varepsilon_r + \sigma_\theta \varepsilon_\theta) r dr d\theta. \quad (2.37)$$

После подстановки соотношений (2.35), (2.36) в выражение (2.37), интегрирования по объему единичной длины и преобразований получим

$$U = \frac{\pi R^2 \bar{a}_1^2}{24 E} \left(\frac{1}{\mu^2} - 1 \right). \quad (2.38)$$

Энергия, затраченная на пластическое деформирование (2.28), имеет вид

$$U_d = \pi R_\sigma^2 \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n+1} \right). \quad (2.39)$$

Как следует из соотношений (2.35), единственной неизвестной величиной является множитель $\bar{a}_1$, который определяется из равенства (2.26) после подстановки выражений (2.38) и (2.39) с учетом (2.19).

$$\bar{a}_1 = \sqrt{\frac{\psi \sigma_{s_0} E 24 \mu^2}{1 - \mu^2} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{(n+1)} \right)}. \quad (2.40)$$

Выражения (2.39 и 2.40) с учетом выражения (1.37) конкретизируются для жесткопластической среды:

$$U_d = \pi R_o^2 \sigma_s \left[2 \ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha \right] \quad (2.41)$$

и соответственно

$$\bar{a}_1 = \sqrt{\psi \sigma_s \frac{24 \mu^2 E}{1 - \mu^2} \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha \right)}, \quad (2.42)$$

где λ – вытяжка за проход $\left(\lambda = \frac{d^2}{d_o^2} \right)$.

Выражение для определения $\bar{a}_1$ можно также привести к следующему виду:

$$\frac{\bar{a}_1}{\sigma_s} = \sqrt{\frac{24 \mu^2}{1 - \mu^2} \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_b \right)} \psi^*,$$

где $\psi^* = \left(\psi \frac{E}{\sigma_s} \right)^{\frac{1}{2}}$ – параметр, характеризующий комплекс механических свойств обрабатываемого материала.

Выражения (2.35) с учетом (2.42) полностью определяют напряженное состояние от остаточных напряжений в прутковых и проволочных изделиях после волочения.

Использование данной методики предполагает знание параметра ψ , характеризующего потенциальную энергию остаточных напряжений как долю энергии пластического деформирования, определение которого выполнено в работах [15, 16], и также будет рассмотрено в следующих разделах.

Проверка эффективности данного способа выполнена для известных из литературы экспериментальных исследований остаточных напряжений [15], проведенных в Магнитогорском государственном техническом университете. По значениям осевых напряжений в поверхностных слоях канатной проволоки определялось значение $\bar{\alpha}_1$ и рассчитывались остаточные напряжения по всему сечению канатной проволоки.

Результаты расчета приведены на рис. 2.8, где показаны также экспериментальные результаты определения остаточных напряжений по сечению канатной проволоки диаметром 3,0 мм после многопроходного деформирования. Из рисунка видно, что рассчитанные по

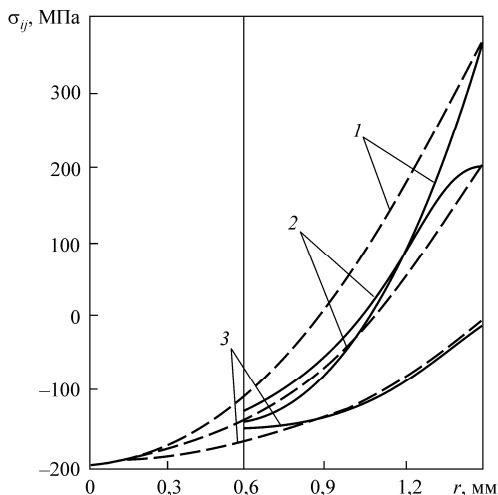


Рис. 2.8. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов исследования остаточных напряжений: 1 – окружных; 2 – осевых; 3 – радиальных; ——— — эксперимент [15]; - - - - - расчет

формулам (2.35) остаточные напряжения сравнительно хорошо согласуются с результатами эксперимента. Характерно, что экспериментальное определение остаточных напряжений при $r \leq 0,6$ мм стало невозможным, применение же предложенной методики позволяет определять остаточные напряжения по всему сечению, включая и центральные слои.

Данная методика использована также для оценки величины параметра ψ по результатам экспериментов работы [15]. Для углеродистой канатной проволоки получили $\psi = 0,475 \cdot 10^{-4}$, что подтвердило сложность чисто экспериментального определения данного параметра. Сочетание же эксперимента и расчетной методики определения остаточных напряжений позволяет оценить величину параметра ψ .

Предложенная методика применена также для оценки остаточных напряжений в цилиндрических телах из композиционных материалов [17], где были найдены расчетные значения разности главных остаточных напряжений в цилиндре из композиционного материала с эпоксидным связующим после полимеризации методом конечных элементов, экспериментальным методом разрезки колец и поляризационно-оптическим методом.

На рис. 2.9 приведено сопоставление известных из литературы результатов распределений остаточных напряжений с результатами, полученными по вышеизложенной методике.

Приведенная методика качественно подтверждает известные закономерности формирования остаточных напряжений. Остаточные напряжения возрастают с увеличением обжатия (вытяжки) и угла конусности инструмента.

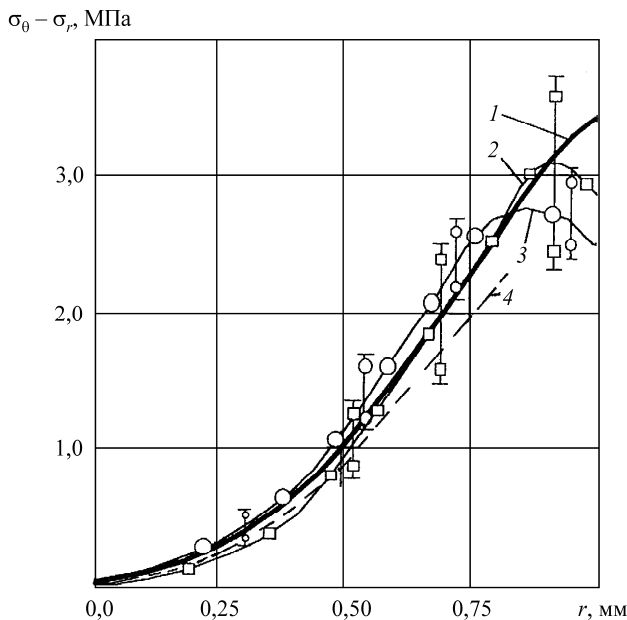


Рис. 2.9. Результаты расчета остаточных напряжений в цилиндрических телах из композиционных материалов: 1 – методом конечных элементов; 2 – экспериментальным методом разрезки колец; 3 – поляризационно-оптическим методом [17]; 4 – с применением энергетического подхода

2.2.3. Остаточные напряжения в трубных заготовках

При изготовлении труб технологические остаточные напряжения также играют большую роль, определяя качество и эксплуатационные характеристики металлопродукции [6]. Существующие методики определения технологических остаточных напряжений носят экспериментальный характер, не обладают универсальностью, использование их приводит к значительным трудностям реализации и погрешностям результатов. В работе предлагается методика определения технологических остаточных напряжений при волочении труб на основе энергетического подхода, изложенного выше.

Рассмотрим условия формирования остаточных напряжений при волочении трубной заготовки. В процессе изготовления в трубе возникают остаточные напряжения, которые имеют упругий характер после выхода трубной заготовки из зоны деформирования.

Под действием остаточных напряжений, возникающих после пластического деформирования, в осесимметричных изделиях большой длины реализуется схема плоского упругого деформированного состояния (отсутствие осевых деформаций $\varepsilon_z = 0$).

Система дифференциальных уравнений (2.20) будет справедливой и для данного случая.

При осевой симметрии напряжённого состояния в условиях плоского деформированного состояния изделий большой длины имеем

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} &= 0, \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} &= 0, \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0.\end{aligned}$$

Тогда система дифференциальных уравнений (2.29) примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) - \sigma_{\theta} = 0, \\ \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) = 0. \end{cases} \quad (2.43)$$

В работе [18] предложена методика определения остаточных напряжений для осесимметричных изделий после волочения, основанная на энергетическом подходе, где радиальные остаточные напряжения задаются из условия равенства нулю на свободных поверхностях:

$$\sigma_r = -a_0(R_1 - r)(r - R_2), \quad (2.44)$$

где a_0 – параметр, характеризующий распределение остаточных напряжений по объему трубы. Знак «–» показывает сжимающий характер радиальных остаточных напряжений после пластического деформирования.

Подставляя выражение (2.44) в (2.43) и интегрируя первое уравнение, получим соотношение для определения окружных остаточных напряжений

$$\sigma_\theta = a_0 \left[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right]. \quad (2.45)$$

Второе из дифференциальных уравнений равновесия (2.43) даст $\tau_{rz} = C_1 / r$. Для тонкостенных труб можно ожидать малых значений τ_{rz} , поэтому постоянную интегрирования C_1 полагаем равной 0.

Записав обобщенный закон Гука для осевой деформации и полагая $\varepsilon_z = 0$, получаем осевое остаточное напряжение в следующем виде:

$$\sigma_z = a_0 \mu \left[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right]. \quad (2.46)$$

Аналогично методике определения остаточных напряжений в прутках и проволоке в определяющие соотношения входит неизвестный параметр a_0 , который определяется из энергетического условия (2.26), и далее находятся компоненты тензора остаточных напряжений. Так, используя обобщенный закон Гука для относительных деформаций с учетом уравнений, можно записать компоненты тензора упругих деформаций от действия технологических остаточных напряжений в трубной заготовке:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{a_0}{E} \left[(r - R_1)(r - R_2)(1 - \mu - 2\mu^2) - r(2r - R_1 - R_2)(1 + \mu)\mu \right], \\ \varepsilon_\theta &= \frac{a_0}{E} \left[(r - R_1)(r - R_2)(1 - \mu - 2\mu^2) + r(2r - R_1 - R_2)(1 - \mu^2) \right]. \end{aligned} \quad (2.47)$$

После подстановки соотношений (2.44)–(2.47) в (2.26) и интегрирования по сечению трубы и преобразований получим для единичного элемента трубы

$$U = \frac{\pi a_0^2}{60E} (1 - \mu^2) (1 - \bar{R}^2) \bar{B} R_1^6, \quad (2.48)$$

где $\bar{R} = R_2/R_1$; $\bar{B} = 7(1 + \bar{R}^4) + 22\bar{R}^2 - 18\bar{R}(1 + \bar{R}^2)$.

Энергия, затраченная на пластическую деформацию трубной заготовки, согласно (2.28) определяется интегралом

$$U_d = \pi (R_1^2 - R_2^2) \int_0^{\varepsilon_{cp}} \sigma_s d\varepsilon, \quad (2.49)$$

После подстановки зависимостей (2.19) в выражение (2.28) и интегрирования получим

$$U_d = \pi (R_1^2 - R_2^2) \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n+1} \right). \quad (2.50)$$

Средняя по сечению трубы степень деформации определяется выражением (1.40). Приравнявая (2.48) и (2.50) согласно энергетическому условию, получим значение неизвестного параметра a_0 [19]:

$$a_0 = \frac{\sigma_{s_0}}{R_1^2} \sqrt{\frac{\psi^* 60 \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{(n+1)} \right)}{(1 - \mu^2) \bar{B}}}, \quad (2.51)$$

где $\psi^* = \frac{\psi E}{\sigma_{s_0}}$ – безразмерный параметр, характеризующий механические свойства обрабатываемого материала.

С помощью формулы (2.51) по известным параметрам технологического процесса изготовления труб определяются значения a_0 и рассчитываются последеформационные остаточные технологические

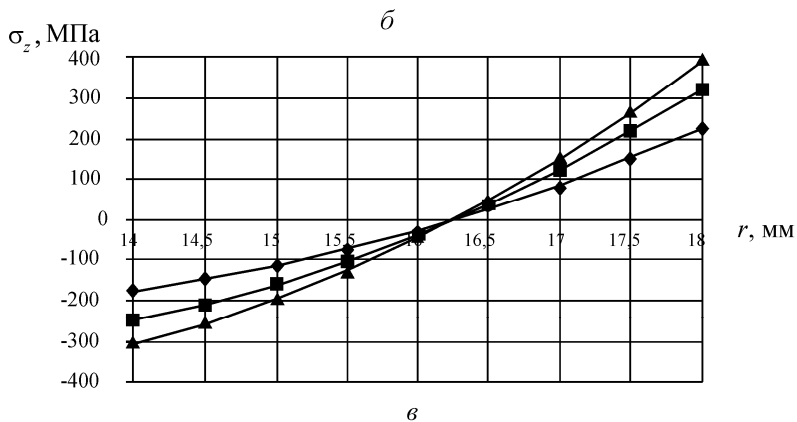
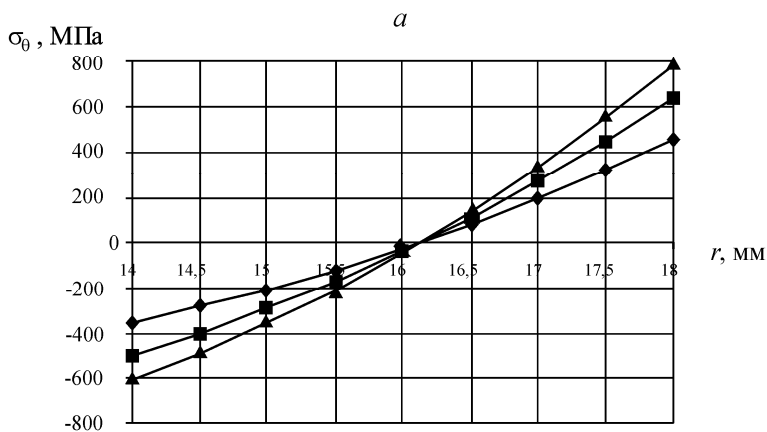
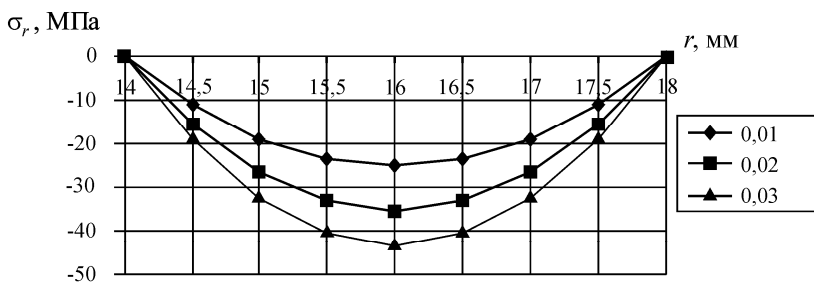


Рис. 2.10. Распределение расчетных значений: радиальных (а); окружных (б); осевых (в) остаточных технологических напряжений по толщине стенки трубы

напряжения в трубных металлоизделиях. В соответствии с выражением для определения a_0 остаточные напряжения возрастают с увеличением угла конусности инструмента и степени деформации, а также зависят от механических свойств деформируемого материала.

На рис. 2.10 представлено распределение расчетных значений технологических остаточных напряжений по толщине стенки трубы [20]. Расчет выполнен для трубы с $R_1 = 18$ мм и $R_2 = 14$ мм из стали 45 при $d/d_0 = 1,3$. Остаточные напряжения определены для значений $\mu = 0,5$; $\alpha = 15^\circ$; $\psi^* = 0,01; 0,02; 0,03$.

Из рис. 2.10 видно, что окружные и осевые остаточные напряжения уравновешены по сечению, радиальные уравниваются за счет осевой симметрии. Характер распределения соответствует известным результатам определения остаточных напряжений в осесимметричных трубных металлоизделиях, а уровень сопоставим с уровнем напряжений, найденных по методу Андерсена-Фальмана в трубах после безоправочного волочения [6].

2.2.4. Определение параметра деформативности

Методики определения последеформационных технологических остаточных напряжений предполагают знание доли энергии пластической деформации, пошедшей на формирование остаточных напряжений, характеристикой которой является параметр деформативности ψ . Например, значения коэффициента ψ определены в работе [10] как доля энергии пластического деформирования за вычетом энергии, превратившейся в тепло для ряда материалов (табл. 2.1).

Видно, что значения ψ для конкретных материалов меняются в довольно широком диапазоне. Кроме того, из параметра ψ невозможно выделить ту долю энергии, которая относится к формированию остаточных напряжений первого, второго или третьего рода, что приводит к необходимости проведения дополнительных эксперимен-

тальных исследований и делает практически невозможным использование коэффициента ψ в конкретных расчетах. Использование данных работы [10] является затруднительным из-за невозможности разделения энергии, пошедшей на формирование остаточных напряжений первого, второго и третьего рода. Поэтому авторами монографии предложен ряд методик по определению показателей деформативности.

Таблица 2.1

Значения коэффициента ψ

Материал	ψ при 20 °С
Дюралюминий	0,23
Технический алюминий	0,07
Медь	0,08
Цветные металлы	0,15–0,10
Сплавы из цветных металлов	0,25-0,15

Так в работе [21] предложен способ определения показателя деформативности для прутков из дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе порошковой меди, в соответствии с которым показатель ψ^* определяется по формуле

$$\psi^* = \left[\frac{6}{1-\mu^2} \left(2 \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_b \right) \right]^{-1/2}. \quad (2.52)$$

При выводе данной формулы изготавливался образец переменного сечения, при деформации которого фиксировалось появление трещины на определенной ступени образца и рассчитывалось значение показателя ψ^* . По формуле (2.52) получили показатель деформативности для данного материала $\psi^* = 0,3389$.

По методикам, представленным в работах [16, 22, 23], после определения a_0 через экспериментальные значения остаточных напря-

жений можно также находить и параметры деформативности для различных технологических условий. Поставленная цель достигается тем, что известным экспериментальным способом определяют тангенциальное (окружное) остаточное напряжение в поверхностном слое изделия. По найденному значению остаточного напряжения определяют распределение остаточных напряжений по всему сечению трубного изделия по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{\sigma_\theta^*(R_1 - r)(r - R_2)}{R_1^2(1 - \bar{R})}, \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_\theta^*[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2(1 - \bar{R})}, \\ \sigma_z &= \frac{\sigma_\theta^*\mu[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2(1 - \bar{R})},\end{aligned}\quad (2.53)$$

где σ_θ^* – экспериментально найденное значение тангенциального остаточного напряжения в поверхностном слое изделия; μ – коэффициент Пуассона материала изделия.

С другой стороны, значения на внешней поверхности окружных и осевых остаточных напряжений принимают максимальные значения (см. рис. 2.10), являются растягивающими и имеют вид

$$\begin{aligned}\sigma_\theta^{\max} &= a_0 R_1^2 (1 - \bar{R}), \\ \sigma_z^{\max} &= a_0 \mu R_1^2 (1 - \bar{R}).\end{aligned}\quad (2.54)$$

Параметр a_0 при этом зависит от технологических условий изготовления трубных изделий и может быть определен при подстановке (2.53) в (2.54) для экспериментально найденного осевого остаточного напряжения на внешней поверхности трубы ($r = R_1$):

$$a_0 = \frac{\sigma_\theta^*}{R_1^2(1 - \bar{R})}. \quad (2.55)$$

В случае когда экспериментально определены окружные остаточные напряжения на поверхности трубной заготовки

$$\sigma_{\theta}|_{r=R_1} = \sigma_{\theta}^*,$$

комплексный параметр деформативности можно определить следующим образом [24]:

$$\psi^*_{\left| \begin{smallmatrix} \sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^* \\ r = R_1 \end{smallmatrix} \right.} = \frac{\sigma_{\theta}^{*2} (1 - \mu^2) \bar{B}}{(1 - \bar{R})^2 60 \varepsilon_{\text{cp}} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{\text{cp}}^n}{(n+1)} \right) \sigma_{s0}^2}, \quad (2.56)$$

а коэффициент ψ как

$$\psi_{\left| \begin{smallmatrix} \sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^* \\ r = R_1 \end{smallmatrix} \right.} = \frac{\sigma_{\theta}^{*2} (1 - \mu^2) \bar{B}}{(1 - \bar{R})^2 60 \varepsilon_{\text{cp}} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{\text{cp}}^n}{(n+1)} \right) \sigma_{s0} E}. \quad (2.57)$$

Таким образом, для уточнения значений параметров деформативности необходимы дополнительные расчетно-экспериментальные исследования, так как его величина существенно зависит от схемы напряженного состояния и механических свойств материала.

2.3. Остаточные напряжения в листовых изделиях

2.3.1. Производство листовой продукции

Листовые и полосовые металлоизделия являются наиболее универсальным и экономичным видом проката, так как их используют в качестве исходного материала для штамповки и сварки разнообразных изделий. Доля листового проката во многих странах превышает 50 %, что вызвано потребностью листа в автомобильной, судостроительной, авиационной, строительной, консервной и других отраслях промышленности [25].

Современные широкополосные листовые станы являются непрерывными или полунепрерывными станами с высокой степенью механизации и автоматизации технологического процесса (нагрев, прокатка, отделка и пр.). Широкополосные станы горячей прокатки имеют рабочие клетки quarto чаще всего с длиной бочки рабочих валков 2000–2300 мм, с тенденцией к увеличению длины бочки валков. Такие станы в зависимости от скорости прокатки и массы исходного продукта обеспечивают производительность 3–6 млн т в год. При этом стальные листы сматывают в рулоны массой до 45 т, алюминиевые массой до 20 т, имеется тенденция к увеличению массы стальных рулонов до 50–70 т.

Процесс холодной прокатки является основным в технологии производства холоднокатаной листовой стали как с точки зрения получения проката заданных геометрических размеров с определенными допусками и качеством поверхности, так и обеспечения необходимого уровня различных физико-механических свойств листового металла. Определяющими факторами для достижения вышеуказанных целей являются режим обжатий, суммарная и единичная степень деформации и целый ряд характеристик оборудования: тип стана, жесткость прокатных клетей, характеристики валковой системы, имеющиеся системы автоматизированного регулирования и др.

Холодная пластическая деформация сопровождается значительным изменением физико-механических и структурных свойств металла, вызываемым наклепом. Характер этих изменений зависит от химического состава и структуры металла, степени деформации, интенсивности деформации и ряда других факторов. В результате наклепа повышается сопротивление металлов деформации и снижаются их пластические свойства. Это обстоятельство является одним из основных факторов, ограничивающих суммарные и единичные обжатия при холодной прокатке, учитывая, что необходимо соблюдать определенный уровень усилий прокатки, исходя из прочности и деформации основных деталей прокатного оборудования.

Современным способом прокатки листовой стали, является рулонный, при котором металл в горячем и холодном состоянии прока-

тывают в виде длинных полос, сматываемых в рулоны. Прокатка в рулонах позволяет максимально автоматизировать производственные операции, сократить число обслуживающего персонала и увеличить производительность стана. Для холодной прокатки углеродистой листовой стали в рулонах применяют различные станы в зависимости от объема производства, программы прокатки и назначения листовой стали.

На станах холодной прокатки получают листовую продукцию толщиной 0,2–5 мм и шириной от 200 до 2300 мм из рядовых и качественных углеродистых, низколегированных и легированных сталей. Заготовкой служат горячекатаные полосы в рулонах.

Технологический процесс производства холоднокатаных полос и листов включает следующие основные технологические операции:

- 1) травление с последующим промасливанием;
- 2) холодная прокатка;
- 3) светлый отжиг;
- 4) дрессировка;
- 5) порезка, промасливание, сортировка;
- 6) упаковка, маркировка и отгрузка пачек листов и рулонов.

Холодная прокатка осуществляется на непрерывных и реверсивных одноклетевых станах.

Станы холодной прокатки относятся к числу прокатных агрегатов с наиболее высокой степенью автоматизации. Практически все непрерывные станы холодной прокатки оснащены комплексными системами автоматического регулирования толщины и натяжения полосы.

Качество и эксплуатационные свойства металлоизделий, получаемых методами холодного пластического деформирования, в значительной степени зависят от влияния технологии на уровень формируемых при этом остаточных напряжений [26]. В отдельных объемах металла действуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Сжимающие остаточные напряжения могут вызвать местную потерю устойчивости и коробление прокатанных полос и листов, а растягивающие остаточные напряжения могут привести к не-

посредственному разрушению изделий из хрупких малопластичных материалов.

Остаточные напряжения, возникающие в достаточно тонких и широких металлических полосах, играют существенную роль в изменении геометрии полос. Неблагоприятное их распределение приводит к нарушению планшетности и, следовательно, к негодности готовой продукции. Для того чтобы правильно организовать технологический процесс прокатки, необходимо знание распределения остаточных напряжений при различных параметрах технологии [27].

Поэтому задача определения остаточных напряжений и исследование их влияния на эксплуатационные качества металлоизделий представляется актуальной.

2.3.2. Напряженное состояние в листах после пластической деформации

Всякая техническая наука использует законы, известные из общенаучных дисциплин: физики, механики, физической химии и других. Механика деформируемого тела располагает фундаментальной системой уравнений, решение которой создает принципиальную возможность теоретического анализа напряженного и деформированного состояния при любом технологическом процессе обработки металлов давлением, в том числе и при прокатке. Однако прецеденты решения этой полной системы уравнений без дополнительных допущений и упрощений неизвестны. Это является следствием больших математических трудностей, а также недостаточности обобщенных опытных данных о физико-механических свойствах деформируемых материалов, лежащих в основе уравнений состояния среды, и ограниченности наших возможностей в формировании граничных условий.

Т.М. Голубев [28] одним из первых показал, что в процессе продольной прокатки пластическая деформация не всегда достигает осевой зоны деформируемой заготовки. По его мнению, она часто проникает лишь на глубину, меньшую чем $\frac{h}{2}$. В этом случае осевая зона

оказывается вне сжимающего действия внешней силы. Он экспериментально установил, что при постоянном значении суммарной деформации глубина проникновения деформации уменьшается по мере уменьшения деформации за данный проход (т.е. величины единичного обжатия), а также по мере увеличения скорости прокатки. Он показал, что глубина проникновения пластической деформации при продольной прокатке находится в прямой зависимости от диаметра

D рабочих валков, точнее от отношения $\frac{D}{h}$, где h – высота деформируемой заготовки на выходе из валков.

С.И. Губкин [29] указывал также на возможность образования в осевой зоне прокатываемой заготовки остаточных продольных растягивающих напряжений, если диаметр валков по отношению к диаметру заготовки мал. Закон остаточных напряжений С.И. Губкина сформулировал так: «При любом пластическом изменении формы в деформируемом теле возникают дополнительные (остаточные) взаимно уравновешивающиеся напряжения».

На возникновение внутренних продольных растягивающих напряжений при определенных условиях продольной прокатки указывал также И.М. Павлов в своих первых работах. Величины остаточных продольных растягивающих напряжений, возникающих в осевой зоне, могут быть самыми различными [25]. Пока величина этих напряжений не превысит предела упругости прокатываемого материала, действие их практически не обнаруживается, так как они не вызывают ни пластической деформации сечения прокатываемой заготовки, ни внутренних разрывов. Как только величина остаточных напряжений достигнет сопротивления материала деформированию или сопротивления металла отрыву, начнется истечение, а затем нарушение сплошности металла, расположенного в осевой зоне.

В данной главе на основе энергетического подхода определяют остаточные напряжения в полосе, к которой можно отнести и листовые материалы, после пластического деформирования прокаткой или каландрованием.

Предлагается экспериментально-теоретический подход к определению остаточных напряжений в полосе после холодной прокатки на основе баланса энергии.

Считаем, что последеформационному состоянию полосы соответствует упругое напряженное состояние от остаточных напряжений (рис. 2.11).

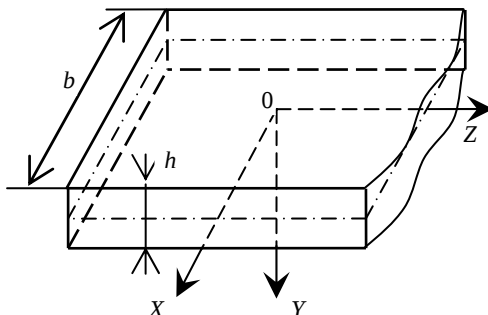


Рис. 2.11. Расчетная схема полосы

Полагая остаточные напряжения постоянными по длине полосы, можно записать с учетом допущений плоско-деформированного состояния и осевой симметрии уравнения равновесия в следующем виде [30]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ – компоненты тензора остаточных напряжений.

Осевое напряжение σ_z определяется из допущения о плоском деформированном состоянии ($\epsilon_z = 0$):

$$\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y). \quad (2.59)$$

Таким образом, система (2.58) и соотношение (2.59) определяют упругое напряженное состояние в изделии.

Для решения задачи об остаточных напряжениях в полосе после прокатки задается выражение для напряжения σ_x в следующем виде [31]:

$$\sigma_x = a_0 \left(y^2 - \frac{h^2}{12} \right) \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right)^2. \quad (2.60)$$

Выражение (2.60) удовлетворяет условиям самоуравновешенности по толщине полосы как по усилию N_x , так и по изгибающему моменту M_x :

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dy = 0; \quad M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x y dy = 0,$$

а также удовлетворяет граничному условию на свободной от нагрузки кромке полосы $\sigma_x|_{x=\pm\frac{b}{2}} = 0$.

Неизвестный параметр a_0 определяется из энергетического условия (2.26).

После решения уравнений (2.58) с учетом (2.60) выражение для τ_{xy} определяется в виде

$$\tau_{xy} = \frac{4a_0xy}{3} \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right) \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right) + c_1(x), \quad (2.61)$$

где $c_1(x)$ – функция интегрирования, которая определяется с учетом граничного условия $\tau_{xy}|_{x=\pm\frac{b}{2}} = 0$. Таким образом, получаем, что $c_1(x) = 0$.

Зная касательное напряжение τ_{xy} , используя систему (2.58), можно определить напряжение σ_y .

$$\sigma_y = \frac{a_0}{3} \left(\frac{b^2}{4} - 3x \right) \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right)^2 + c_2(x), \quad (2.62)$$

где $c_2(x)$ – функция интегрирования, которую определим из следующего граничного условия: $\sigma_y \Big|_{y = \pm \frac{h}{2}} = 0$. В результате вычислений получаем, что $c_2(x) = 0$.

Зная выражения для напряжений σ_x и σ_y и используя соотношение (2.59), определяем σ_z . Таким образом, компоненты тензора остаточных напряжений в полосе записываются в виде

$$\begin{aligned} \sigma_x &= a_0 \left(y^2 - \frac{h^2}{12} \right) \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right)^2, \\ \sigma_y &= \frac{a_0}{3} \left(\frac{b^2}{4} - 3x^2 \right) \left(4y^2 - \frac{h^2}{4} \right)^2, \\ \sigma_z &= \mu a_0 \left[\left(y^2 - \frac{h^2}{12} \right) \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{b^2}{4} - 3x^2 \right) \left(4y^2 - \frac{h^2}{4} \right)^2 \right], \\ \tau_{xy} &= \frac{4a_0 xy}{3} \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right) \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right). \end{aligned} \quad (2.63)$$

Данные уравнения определяют последеформационное напряженное состояние полосы от остаточных напряжений, зная которое можно определить компоненты упругих деформаций от действия остаточных напряжений, а также установить взаимосвязь между распределением и уровнем остаточных напряжений, параметрами процесса деформирования и механическими константами материала листовой заготовки.

2.3.3. Влияние параметров прокатки на распределение остаточных напряжений

Скрытая энергия в материале, обусловленная остаточными напряжениями, или энергия, вызванная совместным действием остаточных напряжений и напряжений от приложенной нагрузки, имеет большое значение. Это значение обнаруживается в процессе разрушения или разделения материала и является решающим фактором для условий, предшествующих или сопровождающих возникновение разрушения [32]. Если в области образования трещины значение энергии превышает значение энергии, которое может быть поглощено, то следует ожидать образования или распространения трещины (или того и другого). Самопроизвольные разрушения, которые происходят при полном отсутствии приложенных нагрузок, свидетельствуют о значительных величинах энергии, которая может быть накоплена в конструкциях или в деталях конструкций.

Кампью показал [1], что локализованная скрытая энергия (например, связанная с местными сварочными напряжениями) может освободиться при местном деформировании или при образовании ограниченно развитых трещин, соответствующих значительной величине освобождающейся энергии, сконцентрированной в малом объеме. Очевидно, что накопленная потенциальная энергия остаточных напряжений может привести как к потере устойчивости полос, так и образованию трещин в полосовых изделиях. Величина потенциальной энергии может оказаться достаточной также для роста микротрещин, присутствующих в полосе, что приведет к их росту и последующему разрушению металлоизделий. Знание величины потенциальной энергии остаточных напряжений позволит выполнить подобную оценку возможного разрушения с привлечением соответствующего математического аппарата механики разрушения.

Выше были записаны компоненты тензора остаточных напряжений в полосе, с помощью которых при использовании обобщенного закона Гука в декартовой системе координат можно найти компоненты тензора деформаций ϵ_{ij} .

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x - 2\mu(\sigma_y + \sigma_z)}{E}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y - 2\mu(\sigma_x + \sigma_z)}{E}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z - 2\mu(\sigma_x + \sigma_y)}{E}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (2.64)$$

Для определения потенциальной энергии упругих деформаций в листах в соответствии с энергетическим подходом используем выражение

$$U = \frac{1}{2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) h dx dy. \quad (2.65)$$

После подстановки (2.63) и (2.64) в (2.65) и интегрирования для единичной длины полосы получим

$$U = \frac{a_0^2 b^{14} (1 + \mu) \bar{h}^{-5}}{6,3504 \cdot 10^6 E} \left[4\bar{h}^2 (2 + \mu) + 7(1 - \mu) (1 - \bar{h}^4) \right], \quad (2.66)$$

где $\bar{h} = \frac{h}{b}$ – относительная толщина полосы.

Энергия пластической деформации U_d в соответствии с выражением (2.28) определим в виде

$$U_d = b \cdot h \cdot \int_0^\varepsilon (\sigma_{s0} + m \cdot \varepsilon^n) d\varepsilon. \quad (2.67)$$

Степень пластической деформации ε при прокатке распределена по сечению неравномерно, она возрастает от срединной поверхности полосы к периферии и максимальна на поверхности полосы за

счет деформаций сдвига на входе в зону деформации и выходе из нее. Среднюю степень деформации можно определить следующим образом [33]:

$$\varepsilon_{cp} = 1,15 \ln \frac{H_0}{H_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_{\mu}}{\sqrt{3}}, \quad (2.68)$$

где α_{μ} – угол наклона образующей валка к оси деформирования при прокатке; H_0 – высота полосы на входе; H_1 – высота полосы на выходе.

Тогда с учетом (2.67) получим

$$U_d = \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m(\varepsilon_{cp})^n}{n+1} \right) hb. \quad (2.69)$$

Значение $\operatorname{tg} \alpha_{\mu}$ выражается через относительное обжатие полосы:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\mu} = \sqrt{\frac{\Delta \bar{H}}{2 - \Delta \bar{H}}}, \quad (2.70)$$

где $\Delta \bar{H} = \frac{\Delta H}{R}$ – относительное обжатие полосы; $\Delta H = H_0 - H_1$ – обжатие полосы; R – радиус валка.

С учетом параметров пластической деформации из энергетического условия (2.26) с учетом (2.66) и (2.69) определим параметр a_0 , характеризующий распределение и уровень остаточных напряжений в листовых металлоизделиях после прокатки.

$$a_0 = \frac{2,52 \cdot 10^3}{b^7} \sqrt{\frac{E \psi U_d}{\bar{h}^5 (1 + \mu) \left[4 \bar{h}^2 (2 + \mu) + 7 (1 - \mu) (1 - \bar{h}^4) \right]}}. \quad (2.71)$$

Анализируя выражение (2.71) с учётом (2.63), можно сделать вывод, что в сечении полосы имеют место как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения. Максимальные остаточные напряжения σ_x действуют в центре полосы на ее поверхности,

а максимальные остаточные напряжения σ_y – на боковой поверхности в центре.

Характер распределения качественно согласуется с известными закономерностями изменения остаточных напряжений при прокатке [26, 27].

Уравнения (2.64) определяют упругое последеформационное напряженное состояние полосы после прокатки. Максимальные напряжения при $x = 0$, $y = \pm \frac{h}{2}$ будут определяться как

$$\sigma_x^{\max} = a_0 \frac{h^2 b^4}{96}; \quad \sigma_z^{\max} = \frac{\mu a_0 h^2 b^2}{32} \left(\frac{b^2}{3} + \frac{3h^2}{2} \right), \quad (2.72)$$

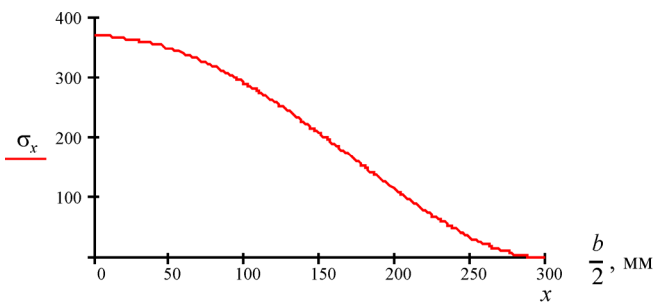
при этом

$$a_0 = \frac{2,52 \cdot 10^3 \cdot \psi^* \cdot \sigma_{s_0}}{b^7} \times \sqrt[5]{\frac{\varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m(\varepsilon_{cp})^n}{n+1} \right) b h}{\bar{h}^5 (1 + \mu) \left[4 \bar{h}^2 (2 + \mu) + 7(1 - \mu) (1 - \bar{h}^4) \right]}}, \quad (2.73)$$

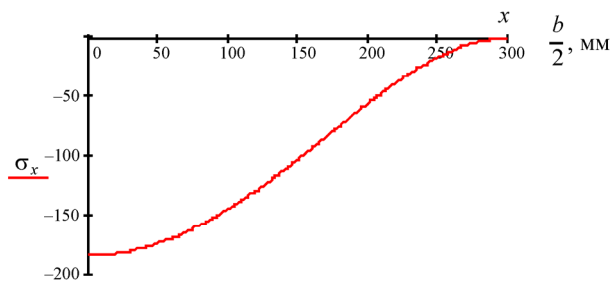
где $\psi^* = \left(\frac{\psi \cdot E}{\sigma_s} \right)^{1/2}$ – безразмерный параметр, характеризующий ме-

ханические свойства обрабатываемого материала; $\bar{h} = \frac{h}{b}$ – относительная толщина полосы.

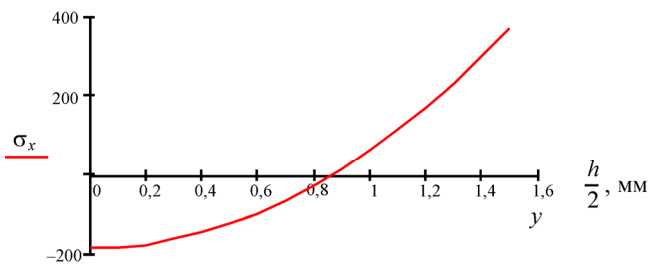
В соответствии с представленным решением в работе [34] определены остаточные напряжения после прокатки полосы для различных металлов и сплавов. На рис. 2.12 представлено распределение напряжения σ_x по ширине и толщине листа из стали 30ХГСА ($b = 600$ мм; $h = 3$ мм) при $\psi = 0,02$.



a



б



в

Рис. 2.12. Распределение поперечных остаточных напряжений при $y = \frac{h}{2}$ (на поверхности листа) (а); $y = 0$ (срединная поверхность) (б); распределение по толщине (в)

Таким образом, с использованием энергетического подхода можно определить остаточные напряжения, формируемые в процессе холодного деформирования полосы. Знание закономерностей формирования остаточных напряжений позволяет управлять процессом прокатки с целью предотвращения последеформационного разрушения изделий и получения необходимых эксплуатационных свойств.

Различные особенности процессов изготовления листовых металлоизделий могут приводить к появлению на поверхности деталей микродефектов, несплошностей, семейств однонаправленных микротрещин, которые могут раскрыться от действия растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях. В связи с этим интересным является исследование влияния величины и уровня остаточных напряжений на качество деталей при наличии поверхностных микродефектов с учетом коэффициента вязкости материала.

Таким образом, представленные методики определения технологических остаточных напряжений после пластической деформации в прутках, трубах и листах включают в себя зависимости и соотношения в аналитическом виде с учетом основных параметров технологических процессов, геометрии детали и механических характеристик материала. Это позволяет выявить влияние входящих параметров на уровень и распределение остаточных напряжений по объему заготовки, что, в свою очередь, дает возможность оптимизации процесса изготовления с целью повышения качества металлопродукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кампью Ф. Влияние остаточных напряжений на работу конструкций // Остаточные напряжения: сб. ст. / под ред. В.Р. Осгуда. – М.: Изд-во ИЛ, 1957. – С. 9–33.

2. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований / В.Э. Вильдеман [и др.]. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 165 с.

3. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности: учебник для вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.

4. Горшков А. Г., Трошин В. Н., Шалашилин В. И. Сопротивление материалов: учеб. пособие. – 2-е изд. испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.

5. Экспериментальная механика / Б.В. Букетин [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 136 с.

6. Соколов И.А, Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Metallurgy, 1981. – 96 с.

7. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Metallurgy, 1973. – 224 с.

8. Амензаде Ю.А. Теория упругости: учебник для университетов. – 3-е изд., доп. – М.: Высшая школа, 1976. – 272 с.

9. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

10. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением // Н.И. Ялова [и др.]. – М.: Высшая школа, 1973. – 631 с.

11. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Metallurgy, 1971. – 448 с.

12. Колмогоров Г.Л., Никитина Н.В. Остаточные напряжения при волочении труб // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 2. – С. 26–28.

13. Колмогоров Г.Л., Курапова Н.А., Каменев С.А. Остаточные напряжения и предельная деформируемость при волочении осесимметричных изделий // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 5. – С. 31–34.

14. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О потенциальной энергии остаточных напряжений при осесимметричном деформировании // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2000. – С. 92–98.

15. Фогель Л.М. Повышение свойств арматурной проволоки с четырехсторонним профилем на основе совершенствования режи-

мов волочения и профилирования: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 1991.

16. Пат. 2276779 РФ. Способ определения показателя деформативности материала // Г.Л. Колмогоров, Т.Е. Мельникова, Е.В. Кузнецова; заявитель и патентообладатель Перм. гос. техн. ун-т. – № 2004128707: заявл. 27.09.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14.

17. Экспериментально-теоретическое исследование остаточных технологических напряжений в эпоксидных цилиндрах / В.П. Бегишев [и др.] // Вестник ПГТУ. Технологическая механика / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1996. – № 2. – С. 52–60.

18. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и потенциальная энергия при изготовлении трубных заготовок / Изв. вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 19–21.

19. Кузнецова Е.В. Учет технологических остаточных напряжений при оценке прочности труб // Молодежная наука Прикамья; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – № 3.

20. Кузнецова Е.В., Технологическая прочность и остаточные напряжения осесимметричных изделий, полученные пластическим деформированием: дис. ... канд. техн. наук; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – 152 с.

21. Пат. № 2128329 РФ. Способ определения показателя деформированности материала / Г.Л. Колмогоров, Т.Е. Мельникова, Н.А. Курапова; заявитель и патентообладатель Перм. гос. техн. ун-т. – Бюл. № 9 от 27.03.1999.

22. Пат. 2366912 РФ. Способ определения остаточных напряжений / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова; заявитель и патентообладатель Перм. гос. техн. ун-т. – № 2008111436/28, заявл. 23.03.2008, опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

23. Пат. 2415390 РФ. Способ определения остаточных напряжений в прутковых и проволочных изделиях / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова; заявитель и патентообладатель Перм. гос. техн. ун-т. – № 2009143860, заявл. 26.11.2009, опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9.

24. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Полетаева А.Ю. Деформативность металлов при определении технологических остаточных

напряжений в трубах // Вестник ПНИПУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – № 1. – С. 43–51.

25. Павлов И.М. Теория прокатки. – М.: Наука, 1950. – 610 с.

26. Стружанов В.В. Определение остаточных напряжений в тонкой полосе после прокатки // Вестник ПГТУ. Технологическая механика / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1996. – № 2. – С. 25–30.

27. Остаточные напряжения // сб. ст. под ред. В.Р. Осгуда. – М.: Изд-во ИЛ, 1957. – 395 с.

28. Голубев Т.М. Теория и практика металлургии. – М., 1937. – 183 с.

29. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 1948. – 532 с.

30. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

31. Курапова Н.А. Остаточные напряжения и технологическая прочность изделий из дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе порошковой меди: дис. ... канд. техн. наук; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1999.

32. Большанина М.А., Панин В.Е. Скрытая энергия деформации // Исследования по физике твердого тела. – М.: Изд-во АН СССР, 1965. – 214 с.

33. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.

34. Кузнецова Е.В., Токарев А.Н. Остаточные напряжения и прочность листовых металлоизделий при наличии микродефектов / Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2005. – № 5. – С. 37–41.

Глава 3

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Использование металлоизделий в реальных условиях показывает, что разрушение некоторых конструкций может происходить при небольших эксплуатационных нагрузках, а иногда при хранении. Причиной таких разрушений является высокий уровень технологических остаточных напряжений, а также их перераспределение во времени или при изменении температуры окружающей среды.

О существовании остаточных напряжений в металле после различных процессов пластической обработки известно давно, но, к сожалению, в показателях качества остаточные напряжения не отражены. В некоторых описаниях на прецизионные детали содержатся указания о наличии гарантированного уровня сжимающих или растягивающих остаточных напряжений или общие указания об их благоприятном или неблагоприятном распределении. Несмотря на существование множества методов определения остаточных напряжений, в металлургии очень мало данных о влиянии различных технологических параметров на величину остаточных напряжений. Соответственно, из-за отсутствия количественной оценки уровня остаточных напряжений в готовых изделиях до настоящего времени нет конкретных показателей качества по остаточным напряжениям.

Как отмечалось ранее, разрушение при низком уровне действующих напряжений при эксплуатации зачастую связано с неблагоприятным распределением остаточных напряжений. Согласно современным представлениям теории разрушения тело после пластической деформации оказывается пораженным микротрещинами. Остаточные растягивающие напряжения в результате длительного воздействия на микротрещины могут вызвать их увеличение до критических размеров и привести к макроразрушению изделий. Остаточные напряжения снижают прочность изделий при переменных

и циклических нагрузках, влияют на износ при трении скольжения или качения.

Постепенное коррозионное разрушение поверхности зависит от уровня остаточных напряжений на поверхности независимо от их знака и ускоряется при повышении уровня остаточных напряжений. Хрупкое коррозионное растрескивание металлических изделий при одновременном действии коррозионной среды и остаточных напряжений связано с наличием растягивающих остаточных напряжений. При высоком уровне напряжений и развитых микротрещинах иногда достаточно легкого удара, чтобы равновесие было нарушено и наступил хрупкий излом.

В государственных стандартах качество продукции определено как совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять потребности в соответствии с назначением. Из принципиального положения о зависимости качества продукции черной и цветной металлургии от уровня и стабильности технологии следует необходимость установления влияния отдельных параметров технологии на различные показатели качества. При этом во многих случаях, помимо управления процессом, может быть частично или полностью исключен контроль технологии производства и качества готовой продукции. В настоящее время накоплен определенный опыт прогнозирования ряда свойств в зависимости от исходной заготовки и параметров технологии с последующим исключением трудоемких, связанных с увеличением расходных коэффициентов заключительных испытаний.

Для определенных видов изделий (прутков, проволоки, профилей, труб, листов и полос), получаемых методами холодной деформации, связь отдельных параметров технологии и показателей качества довольно стабильна.

Но достаточно точно можно прогнозировать только отдельные свойства: регулируя настройку стана, можно получить требуемые отклонения по кривизне, но одновременно правка вызывает появление дополнительных внутренних напряжений и наклеп металла; дополнительной калибровкой можно повысить точность сечения и чистоту

поверхности проката, но на наружных слоях появятся значительные остаточные напряжения.

В последнее время в ряде зарубежных рекламных описаний и проспектов на фасонные профили высокой точности и другие изделия, получаемые методами холодной пластической деформации, содержатся указания о наличии «гарантированного уровня остаточных напряжений». Но в большинстве случаев при общей оценке качества отдельных видов металлопродукции или особенностей нового процесса ограничиваются общим указанием о «благоприятном» или «неблагоприятном» распределении или о наличии сжимающих или растягивающих остаточных напряжений. Причины кроются в отсутствии оперативных методов точного замера остаточных напряжений, количественной оценке их влияния на эксплуатационные свойства. Соответственно в металлургии практически отсутствуют данные о влиянии технологических параметров на величину остаточных напряжений. Из-за отсутствия четкой количественной оценки такого свойства металлопродукции, как наличие в ней определенных остаточных напряжений, до настоящего времени нет показателей качества по остаточным напряжениям. Эти напряжения нельзя отнести к таким простым единичным показателям качества, как пределы прочности и текучести, относительные удлинения и сужение, твердость, коррозионная стойкость и др. Под действием растягивающих напряжений микродефекты могут развиваться в макротрещины.

К сожалению, отрицательную роль остаточные напряжения играют чаще, чем хотелось бы. В технике достаточно примеров разрушений, вызванных большими технологическими напряжениями. Одни из наиболее частых, со значительными экологическими последствиями – это разрушения трубопроводов, в которых образуются трещины длиной иногда до нескольких десятков километров. Например, на нефтепроводе Холмогоры-Клин в районе р. Чусовой была зафиксирована авария – утечка нефти через трещину в корпусе нефтеотсечки. Вырезанная из нефтепровода отсечка была доставлена на испытательный полигон ВНИИГАЗ. Сквозная трещина в угловом сварном соединении корпуса проходила по околосварной зоне вблизи

линии сплавления. В предположении, что трещина инициирована сварочными остаточными напряжениями, было решено провести измерения в шве и околошовной зоне. Было установлено наличие растягивающих остаточных напряжений, направленных вдоль шва, порядка 200 МПа (что близко к пределу текучести материала – 250 МПа) на линии сплавления и спадающих при удалении от неё. Эти напряжения в совокупности с активными напряжениями, возникшими по условиям эксплуатации, явились причиной разрушения. Оказалось, что заводская термообработка если и проводилась, то не уменьшала уровень исходных сварочных напряжений [1].

По мнению авторов [2], одной из возможных причин аварии на Чернобыльской АЭС были остаточные напряжения в твэльных трубках.

Кроме того, в настоящее время реализуются два крупнейших проекта по строительству трубопроводов для транзита нефти и газа в Европу – «Северный поток» и «Южный поток».

«Северный поток» (англ. Nord Stream, ранее Северо-Европейский газопровод (СЕГ)) – газопровод между Россией и Германией по дну Балтийского моря, соглашение о строительстве которого было подписано в начале сентября 2005 г. в ходе визита российского президента Владимира Путина в Германию. Трасса Nord Stream протяжённостью 1200 км идет от Выборга (Ленинградская область) до Грайфсвальда (Германия).

«Южный поток» (англ. South Stream) – российско-итальянский проект газопровода, который пройдёт по дну Чёрного моря из Новороссийска в болгарский порт Варну. Далее две его ветви пройдут через Балканский полуостров в Италию и Австрию, хотя их точные маршруты пока не утверждены. Согласно планам проект должен вступить в строй к 2015 г.

Внезапные разрушения строительных конструкций, появление и развитие трещин на лобовых стеклах автомобилей, дорогостоящих заготовках крупногабаритных зеркал телескопов, хрустальной посуде, саморазрушение огнеупорных блоков для стенок стекловаренных печей, лежащих в спокойном состоянии на складе, связано с прояв-

лением остаточных напряжений. В сущности, такие дорогостоящие разрушения и породили научное направление по изучению остаточных технологических напряжений и способов их регулирования.

Остаточные напряжения всегда взаимно уравновешены: в одних частях тела возникают растягивающие напряжения, в других – сжимающие.

Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность зависит от размеров детали. С увеличением размеров деталей характер разрушения при всех видах нагружения переходит от вязкого к хрупкому. В связи с этим увеличивается и влияние остаточных напряжений.

Хрупкое разрушение металлов при взаимодействии коррозионной среды связывают с растягивающими остаточными напряжениями. Известны примеры коррозионного растрескивания латунных деталей под действием коррозии и растягивающих остаточных напряжений.

Совокупность действия остаточных макро- и микронапряжений и вызывает совершенно неожиданные самопроизвольные разрушения деталей и конструкций.

3.1. Влияние остаточных напряжений на разрушение деталей

Значительное влияние остаточных напряжений на надежность и долговечность конструкций выявлено в различных областях техники.

Коррозионная усталость также зависит от уровня остаточных напряжений. На рис. 3.1 приведены шестигранные латунные образцы с продольными и поперечными трещинами, появившимися в результате остаточных напряжений и газовой коррозии [3].

Релаксация остаточных напряжений может вызвать искажение размеров, выполненных в пределах допуска: изменение соотношений размеров профиля, увеличение кривизны. Известны случаи разрушения прутков, проволоки, профилей и труб, изготовленных из легиро-

ванных марок сталей без последующей термической обработки. Причиной разрушения является то, что первоначально высокий уровень остаточных напряжений при перераспределении их во времени может вызвать в отдельных элементах изделия напряжения, которые превысят предел прочности.

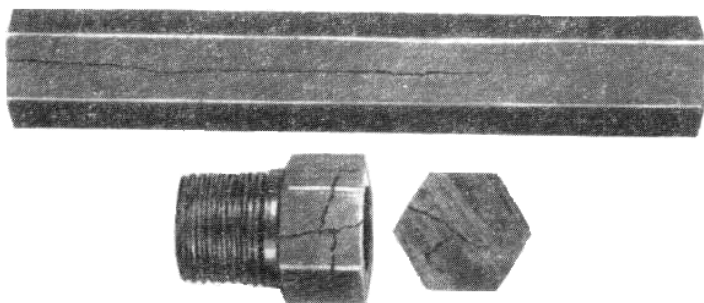


Рис. 3.1. Продольные и поперечные трещины на шестигранном латунном прутке от действия остаточных напряжений и газовой коррозии

Неконтролируемые поля остаточных напряжений в элементах конструкций могут доставлять большие неприятности при изготовлении и эксплуатации конструкций из таких элементов. В работе [4] отмечается, что уровень остаточных напряжений существенно влияет на размер критических нагрузок при работе профилей в качестве колонных конструкций. Для работы балки-колонны особенно опасны сжимающие остаточные напряжения, развивающиеся в стенке и кромках фланцев. Суммируясь с нагрузочными, они резко уменьшают механический ресурс колонны, увеличивают опасность потери устойчивости.

Неблагоприятным проявлением остаточных напряжений в прокатных профилях является их коробление, в частности появление волнистости листов и стенок балок. Балки с остаточными напряжениями при огневой рубке могут внезапно разрушаться вследствие высокого уровня потенциальной энергии остаточных напряжений [5].

Большое значение при анализе работоспособности конструкции придается возникновению и развитию трещин. То, что остаточные напряжения способствуют их распространению, объясняется тем, что трещины с острыми кромками создают высокую концентрацию напряжений и тем предотвращают развитие пластических деформаций, а следовательно, понижают энергию разрушения. Иногда упрочнение, связанное с пластической деформацией, вызванной остаточными напряжениями и сопровождающееся повышением предела упругости и временного сопротивления, может способствовать распространению трещин. Многочисленные исследования свидетельствуют, что при циклическом режиме, т.е. реализации процесса усталости материала, сложение переменных напряжений, циклов с постоянными остаточными напряжениями ухудшает служебные характеристики деталей конструкции и способствует распространению разрушений. Наиболее исследовано влияние остаточных напряжений на усталостную прочность в работах [6–8]. Образование микротрещин, не залечивающихся при последующей термообработке, может вызвать высокие растягивающие остаточные напряжения. На рис. 3.2 показаны бурильные трубы, разрушившиеся при эксплуатации. Трубы из стали 36Г2С после изготовления безоправочным волочением подвергались термической обработке. Характер разрушения говорит о возникновении микротрещин от остаточных напряжений уже после пластической деформации [9].

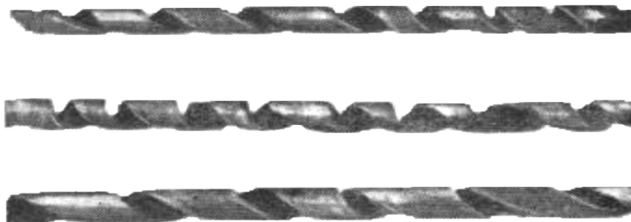


Рис. 3.2. Бурильные трубы, разрушившиеся от действия остаточных напряжений

Технологические остаточные напряжения в проволоке, полученной волочением, влияют на развитие микродефектов в металле и определяют ее работоспособность. По данным работы [10] снижение остаточных напряжений на 50 % увеличивает циклическую прочность на 28–35 %. Это особенно важно при производстве высокопрочной пружинной проволоки, когда напряжения, вызываемые нагрузкой или старением, могут суммироваться с остаточными напряжениями.

Большие растягивающие продольные и окружные напряжения могут служить причиной продольных расщеплений, наблюдаемых иногда на концах протянутого прутка. На рис. 3.3 представлена арматурная проволока, разрушенная расслоением от остаточных напряжений после ее изготовления. Можно полагать по характеру разрушения, что решающую роль в разрушении проволоки сыграли тангенциальные растягивающие напряжения.

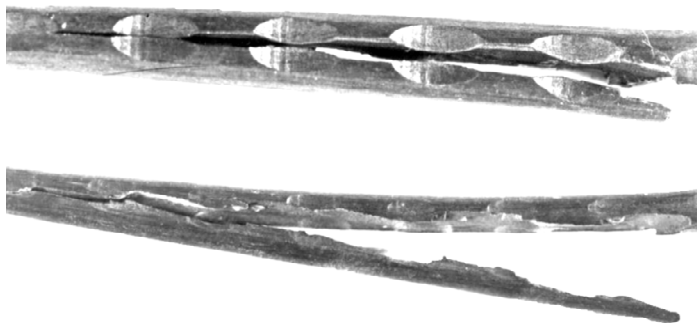


Рис. 3.3. Разрушение арматурной проволоки расслоением от остаточных напряжений после ее изготовления волочением

При производстве трубных изделий остаточные технологические напряжения существенно влияют на качество и эксплуатационные свойства деталей. Действуя длительное время, остаточные растягивающие напряжения способны вызвать хрупкое разрушение изделия, что подтверждается в опытах С.Н. Туркова, Б.Н. Нарзулл-

наева, Я.М. Потака, С.С. Шуракова [11, 12]. На рис. 3.4 представлены образцы труб, разрушившихся под действием остаточных напряжений. Для легированных сталей характер разрушения разнообразен: винтовые трещины, трещины синусоидальной формы, что говорит о совместном разрушающем действии и тангенциальных, и осевых напряжений [9].

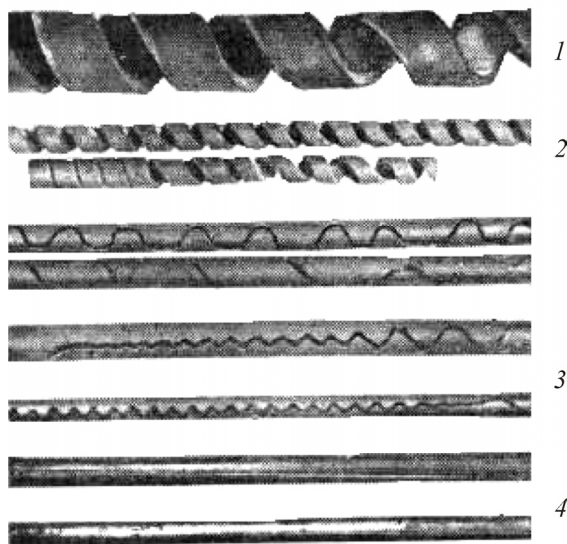


Рис. 3.4. Образцы, разрушившиеся после безоправочного волочения труб: 1 – из стали 30ХГСНА; 2 – из стали 30ХГСА; 3 – из стали 35; 4 – из стали 20А

С целью возможного предотвращения последеформационного разрушения металлоизделий от действия остаточных напряжений необходим расчет остаточного напряженного состояния, включающий основные параметры технологического процесса. При этом параметры процесса должны обеспечивать уровень остаточных напряжений, гарантирующий сохранение прочности металлоизделий.

Методики определения остаточных напряжений, приведенные в гл. 2, применены для наиболее характерных процессов пластиче-

ского деформирования при производстве изделий в форме проволоки, прутков и труб. В соответствии с разработанными методиками из условий прочности получаемых изделий в зависимости от действия остаточных напряжений определяются предельные режимы пластического деформирования. Следует отметить, что результаты расчетов могут быть использованы для оценки предельных режимов деформирования любых конструкционных материалов.

3.2. Предельные режимы деформирования прутков

Методику определения остаточных напряжений можно использовать для оценки предельных режимов при изготовлении осесимметричных изделий. Одним из наиболее распространенных способов получения прутковых и проволочных заготовок является волочение и калибровка. Для определения предельных режимов деформирования можно использовать различные критерии разрушения конструкционных материалов. Наиболее применимым для сталей и сплавов является критерий прочности по удельной энергии формоизменения [13]:

$$\sigma_i \leq \sigma_b, \quad (3.1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_b – предел прочности.

Интенсивность напряжений определяется по формуле

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2}. \quad (3.2)$$

Рассмотрим интенсивность остаточных напряжений в центре ($\bar{r} = 0$) и на поверхности ($\bar{r} = 1$) прутка.

В случае $\bar{r} = 0$ система уравнений (2.35) для определения остаточных напряжений в прутке принимает вид

$$\sigma_r = -\frac{\bar{a}_1}{4\mu}, \quad \sigma_\theta = -\frac{\bar{a}_1}{4\mu}, \quad \sigma_z = -\frac{\bar{a}_1}{2}. \quad (3.3)$$

Тогда интенсивность напряжений после подстановки соотношений (3.3) в (3.2) определяется в виде

$$\sigma_i = \frac{\bar{a}_1}{4\mu}(1 - 2\mu). \quad (3.4)$$

Как следует из выражения (3.4), при $\mu = 0,5$ интенсивность напряжений в центре прутка равняется нулю, а при $\mu = 0,3$ $\sigma_i = \frac{\bar{a}_1}{10}$.

Максимальная интенсивность напряжений соответствует поверхностному слою при $\bar{r} = 1$, где компоненты тензора остаточных напряжений согласно (2.35) принимают вид

$$\sigma_r = 0, \quad \sigma_\theta = \frac{\bar{a}_1}{2\mu}, \quad \sigma_z = \frac{\bar{a}_1}{2}. \quad (3.5)$$

Интенсивность напряжений в этом случае определяется как

$$\sigma_i = \frac{\bar{a}_1}{\sqrt{2\mu}} \sqrt{1 - \mu + \mu^2}. \quad (3.6)$$

В ряде случаев установлено, что предел прочности при растяжении близок к пределу текучести материала ($\sigma_s = \sigma_b$). Тогда условие прочности (3.1) примет следующий вид:

$$\frac{\bar{a}_1}{2\mu} \sqrt{1 - \mu + \mu^2} \leq \sigma_s. \quad (3.7)$$

Условие (3.7) является более обоснованным, чем условие (3.1), поскольку появление пластических деформаций от остаточных напряжений также нежелательно.

С учетом значения $\bar{a}_1$ в соответствии с соотношением (2.42) и условия прочности (3.7) получим

$$\sqrt{\psi^* \frac{6(1 - \mu - \mu^2)}{1 - \mu^2} \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha \right)} \leq 1. \quad (3.8)$$

При деформации в несколько переходов степень деформации суммируется по переходам, тогда для многопереходного деформирования после преобразований находим предельную вытяжку из условий опасности последеформационного разрушения прутка от остаточных напряжений.

$$\lambda = \exp \left[\frac{1}{6\psi^* \mu^*} - n \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha \right], \quad (3.9)$$

где n – количество переходов; $\mu^* = \frac{(1-\mu-\mu^2)}{1-\mu^2}$ – параметр, определяющий влияние коэффициента Пуассона.

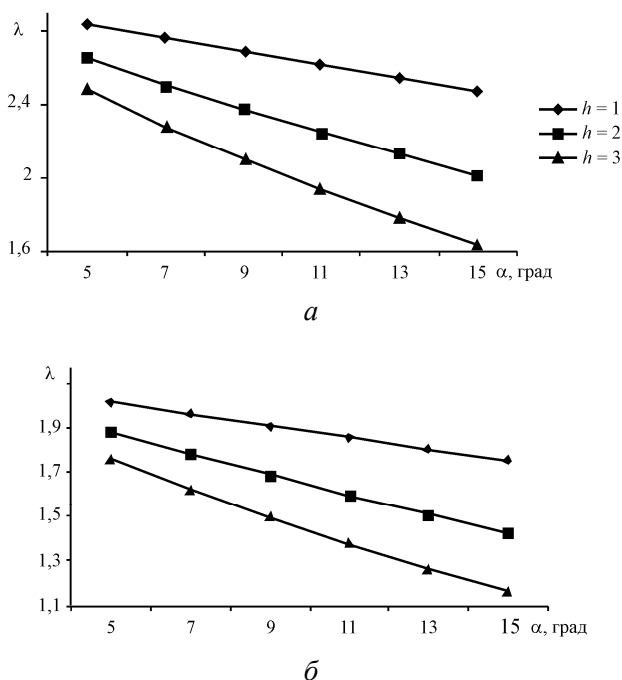


Рис. 3.5. Расчетные зависимости суммарной вытяжки:

$\mu = 0.5, \psi^* = 0.15$ (a); $\mu = 0.3, \psi^* = 0.25$ (б)

Таким образом, соотношение (3.9) позволяет найти в зависимости от геометрии инструмента и физико-механических свойств материала предельно допустимую вытяжку из условия сохранения прочности от остаточных напряжений. На рис. 3.5 приведены расчетные зависимости допустимой вытяжки от угла α технологического волочильного инструмента для различных ψ^* и n [14, 15].

Из рис. 3.5 следует, что с увеличением α суммарная допустимая вытяжка уменьшается. Увеличение ψ^* также приводит к снижению λ , что объясняется зависимостью комплексного параметра от механических свойств материала.

Предложенная методика позволяет подбирать технологические параметры с целью минимизации остаточных напряжений и недопущении разрушения прутковых заготовок при деформировании.

3.3. Технологическая прочность при деформировании труб

Определение предельных режимов деформирования труб из условий предотвращения последеформационного разрушения от остаточных напряжений также представляет интерес. При этом опасными с точки зрения разрушения принимаются остаточные напряжения, действующие в поверхностных – наружном ($r = R_1$) и внутреннем ($r = R_2$) – слоях трубы, где радиальные напряжения – нулевые, а окружные и осевые остаточные напряжения являются растягивающими и принимают максимальные значения.

Согласно выражениям (2.44)–(2.46) соотношения для определения остаточных напряжений принимают вид:

для внешней поверхности при $r = R_1$

$$\begin{cases} \sigma_r = 0, \\ \sigma_\theta = a_0 R_1 (R_1 - R_2), \\ \sigma_z = a_0 \mu R_1 (R_1 - R_2) \end{cases} \quad (3.10)$$

и внутренней поверхности трубы при $r = R_2$

$$\begin{cases} \sigma_r = 0, \\ \sigma_\theta = a_0 R_2 (R_2 - R_1), \\ \sigma_z = a_0 \mu R_2 (R_2 - R_1). \end{cases} \quad (3.11)$$

Используя выражения (3.10) и (3.11) с учетом формулы (3.2), определяем интенсивность напряжений в поверхностных слоях трубы [16]:

для наружной поверхности

$$\sigma_i = a_0 R_1 (R_1 - R_2) \sqrt{1 - \mu + \mu^2} \quad (3.12)$$

и внутренней поверхности

$$\sigma_i = a_0 R_2 (R_1 - R_2) \sqrt{1 - \mu + \mu^2}. \quad (3.13)$$

Из соотношений (3.12) и (3.13) следует, что интенсивность остаточных напряжений растет с увеличением толщины стенки трубы, определяемой разностью $R_1 - R_2$, т.е. для толстостенных труб вероятность разрушения от остаточных напряжений более высокая. При этом максимальная интенсивность напряжений соответствует наружной поверхности.

Для оценки опасности разрушения трубной заготовки от остаточных напряжений используем условие прочности по удельной энергии формоизменения (3.1) с учетом равенства $\sigma_s = \sigma_b$.

$$a_0 R_1^2 (1 - \bar{R}) \sqrt{1 - \mu + \mu^2} \leq \sigma_s. \quad (3.14)$$

Подставляя значение параметра a_0 в соответствии с соотношением (2.51) в неравенство (3.14), получим

$$(1 - \bar{R}) \sqrt{\psi^* \cdot \mu^* \frac{60 \epsilon_{\text{cp}} \left(1 + \frac{m \epsilon_{\text{cp}}^n}{(n+1)} \right)}{\bar{B}}} \leq 1. \quad (3.15)$$

После преобразований с учетом выражения (1.39) определяем соотношения d/d_θ для случаев жесткопластической среды без упрочнения ($m = 0$) и с линейным упрочнением ($n = 1$), соответственно:

$$d/d_\theta = \exp \left[\frac{B}{120 \psi^* (1 - \bar{R})^2 \mu^*} - \frac{2(1 - \bar{R}^3) \operatorname{tg} \alpha}{3\sqrt{3}(1 - \bar{R}^2)} \right], \quad (3.16)$$

$$d/d_\theta = \exp \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{mB}{30 \psi^* (1 - \bar{R})^2 \mu^*}}}{2m} - \frac{2(1 - \bar{R}^3) \operatorname{tg} \alpha}{3\sqrt{3}(1 - \bar{R}^2)} \right]. \quad (3.17)$$

На рис. 3.6 представлены расчетные значения предельных обжатий в зависимости от энергетического безразмерного параметра ψ^* , относительно толщины стенки трубы $\bar{R} = R_2 / R_1$ и угла наклона образующей канала волокна с учетом деформационного упрочнения материала при $\mu = 0,5$ для случая среды с линейным упрочнением.

Согласно рис. 3.6 для реальных величин и заданных значений относительной толщины стенки трубы можно определять предельные из условий прочности трубы от остаточных напряжений отношения d/d_θ , характеризующих деформацию.

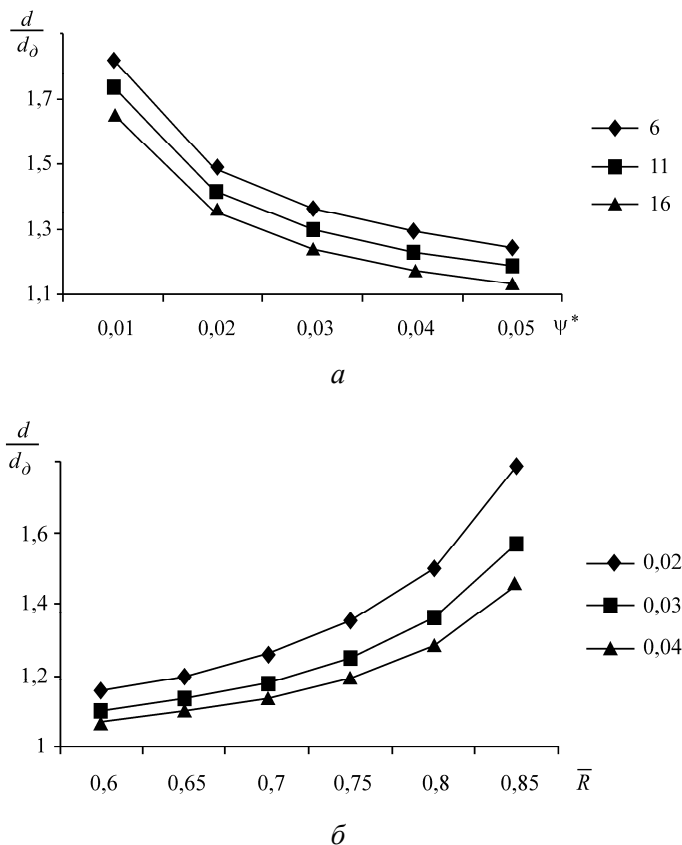


Рис. 3.6. Расчетные зависимости отношения d/d_0 : a – от параметра ψ^* при $\alpha = 6; 11; 16^\circ$; b – от относительной толщины стенки трубы $\bar{R}$ при $\psi^* = 0,02; 0,03; 0,04$

3.4. Остаточные напряжения и технологическая прочность трубной заготовки при волочении

Опыт применения волочильного производства показывает, что для качественной продукции необходим оптимальный выбор технологических параметров для исключения брака и разрушения заготовок в процессе изготовления. Анализ полученных распределений остаточных напряжений в прутках и трубах показывает, что значения

растягивающих напряжений в заготовках после выхода из матрицы могут быть значительными из-за неравномерности распределения пластических деформаций. Складываясь по принципу суперпозиции с напряжениями волочения, остаточные напряжения могут превысить предел прочности материала, что приведет преждевременному разрушению переднего конца заготовки на стадии производства.

При деформации трубной заготовки в конической волоке напряжение волочения определяется по формуле И.Л. Перлина [3]

$$\sigma_{\text{вол}} = \ln \frac{D_{\text{чн}}}{D_{\text{ск}}} \left[1,15\sigma_s + f \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s - \sigma_{\text{пр}}) \right] + \sigma_{\text{пр}}, \quad (3.18)$$

где $\sigma_{\text{вол}}$ – напряжение волочения; $D_{\text{чн}}$, $D_{\text{ск}}$ – диаметры на входе и на выходе из матрицы соответственно; f – коэффициент трения в зоне деформации; $\sigma_{\text{пр}}$ – напряжение противонапряжения; α_n – приведенный угол волоки, $\operatorname{tg} \alpha_n = 0,65 \operatorname{tg} \alpha$.

Полное напряжение в направлении оси складывается из напряжения нагрузки (волочения) и осевых остаточных напряжений. С учетом этого положения запишем соотношение (3.18) в следующем виде:

$$\sigma_{\text{вол}} = \ln \frac{D_{\text{чн}}}{D_{\text{ск}}} \left[1,15\sigma_s + f \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s - \sigma_{\text{пр}}) \right] + \sigma_{\text{пр}} + \sigma_z^0, \quad (3.19)$$

где σ_z^0 – осевые остаточные напряжения в поверхностных слоях. Осевые остаточные напряжения достигают максимальных значений во внешних поверхностных слоях заготовки.

Исходя из условия прочности $\sigma_{\text{вол}} \leq \sigma_s$, с учетом некоторых преобразований получим следующее соотношение:

$$\ln \frac{D_{\text{чн}}}{D_{\text{ск}}} \left[1,15 + f \operatorname{ctg} \alpha_n (1 - \bar{\sigma}_{\text{пр}}) \right] \leq 1 - (\bar{\sigma}_{\text{пр}} + \bar{\sigma}_z^0), \quad (3.20)$$

где $\bar{\sigma}_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_s}$; $\bar{\sigma}_z^0 = \frac{\sigma_z^0}{\sigma_s}$.

Из соотношения (3.20) следуют соотношения технологических параметров и свойств материала, соответствующие предельному случаю волочения из условия сохранения прочности переднего конца

$$\frac{D_{\text{сн}}}{D_{\text{ск}}} = \exp \left\{ \frac{1 - (\bar{\sigma}_{\text{пр}} + \bar{\sigma}_z^0)}{1,15 + f \operatorname{ctg} \alpha_n (1 - \bar{\sigma}_{\text{пр}})} \right\}. \quad (3.21)$$

Формула (3.21) использована для расчета предельных соотношений диаметров заготовок из стали 45 (рис. 3.7, *а*) и сплава ВТ1-1 (рис. 3.7, *б*) при калибровке из условий сохранения прочности переднего конца заготовки с учетом тех остаточных напряжений, которые

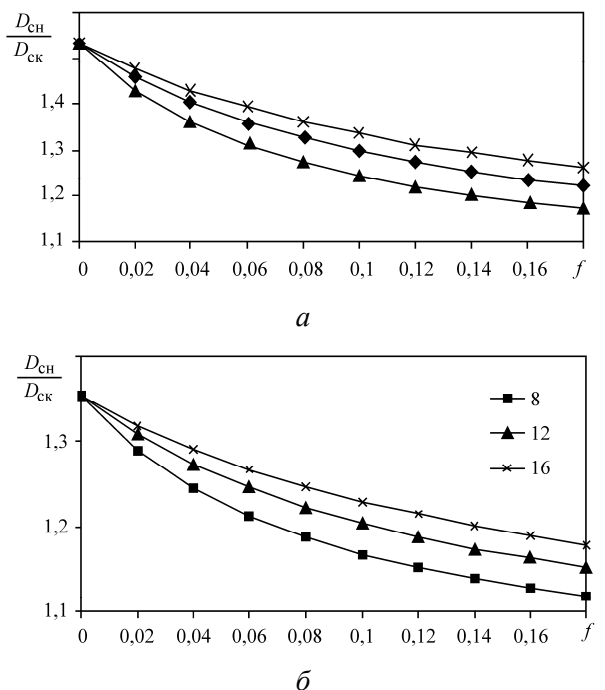


Рис. 3.7. Предельные отношения диаметров заготовок в зависимости от коэффициента трения и $\alpha = 8; 12; 16^\circ$: *а* – сталь 45, $\psi^* = 0,02$; *б* – сплав ВТ1-1, $\psi^* = 0,03$; ■ 8, ▲ 12, –x– 16

формируются при деформации в данном проходе или в предыдущих проходах. На рис. 3.7 приведены результаты расчета предельных обжатий в зависимости от угла раствора образующей канала волокна, для различных значений коэффициента трения f и ψ^* при $\sigma_{пр} = 0$; $\mu = 0,5$.

3.5. Остаточные напряжения и прочность металлоизделий при наличии трещин

Согласно современным представлениям теории разрушения тело после пластической деформации оказывается пораженным микротрещинами. Остаточные растягивающие напряжения в результате длительного воздействия на микротрещины могут вызвать их увеличение до критических размеров и привести к макроразрушению металла. Кроме того, растягивающие остаточные напряжения способствуют раскрытию микротрещин и проникновению в них агрессивной среды, что приводит к снижению коррозионной стойкости поверхностных слоев металла. В свою очередь, сжимающие напряжения препятствуют коррозионному воздействию агрессивной среды на поверхности микротрещин. При высоком уровне напряжений и развитых микротрещинах иногда достаточно легких ударных нагрузок для наступления хрупкого излома. Понижение предела усталости – также результат воздействия растягивающих остаточных напряжений в сочетании с напряжениями от внешних нагрузок, особенно растягивающих.

Проблема установления закономерностей развития трещин приобретает особую актуальность в связи с применением высокопрочных материалов, тенденций к уменьшению массы машин, изысканию резервов прочности материалов, выбору оптимальных технологических процессов изготовления и упрочнения материалов, а также назначению оптимальных сроков службы и повышению надежности работы деталей.

Практически все материалы имеют плоские дефекты типа трещиноподобных разрывов или полостей. В работе [17] перечислены некоторые дефекты и их характерные размеры:

- трещины сдвига – дислокации в металлах (10^{-8} – 10 см);
- технологические трещины в металлах (10^{-3} – 10 см). К ним относят: сварочные трещины; трещины, возникающие при термообработке, запрессовке, ковке и других процессах; зоны окисленного металла;
- эксплуатационные трещины (10^{-3} – 10 см). К ним относят: усталостные трещины, коррозионные трещины, диффузионно-водородные трещины;
- трещины в металлах, возникающие в металлургическом процессе (10^{-5} – 1 см). К ним относят раковины и пустоты, возникающие при остывании металла в слитках; зоны окисленного металла; зоны охрупченного металла; инородные включения, прочность которых меньше прочности основного металла.

Опыт показывает, что практически во всех готовых металлоизделиях, даже в ненагруженном состоянии, имеются мелкие микротрещины – несплошности и нарушения структуры. Поэтому при расчетах на прочность и долговечность конструкций необходимо учитывать возможность образования в исходном материале и в готовых изделиях от субмикро- до макроскопических дефектов типа трещин, возникающих в процессе изготовления и обработки.

В деталях, уже проработавших в течение определенного времени, вероятность наличия трещин резко возрастает. Усталостные трещины, возникающие при циклических нагрузках, постоянно разрастаясь, подготавливают условия для хрупкого разрушения. В связи с этим особое значение приобретает способность материала или конструкции воспринимать нагрузки при наличии трещины.

На рис. 3.8 приведены различные дефекты, которые возникают при прокате металлоизделий [18]. Пустоты различной величины и формы, чаще одиночные, образуются вследствие раскрытия и неполной заварки термических трещин и называются в литературе «скворечниками» (рис. 3.8, *а*). Они могут не обнаруживаться при внешнем осмотре поверхности заготовки. Данный тип дефекта следует отличать от внутренних разрывов, образующихся при непра-

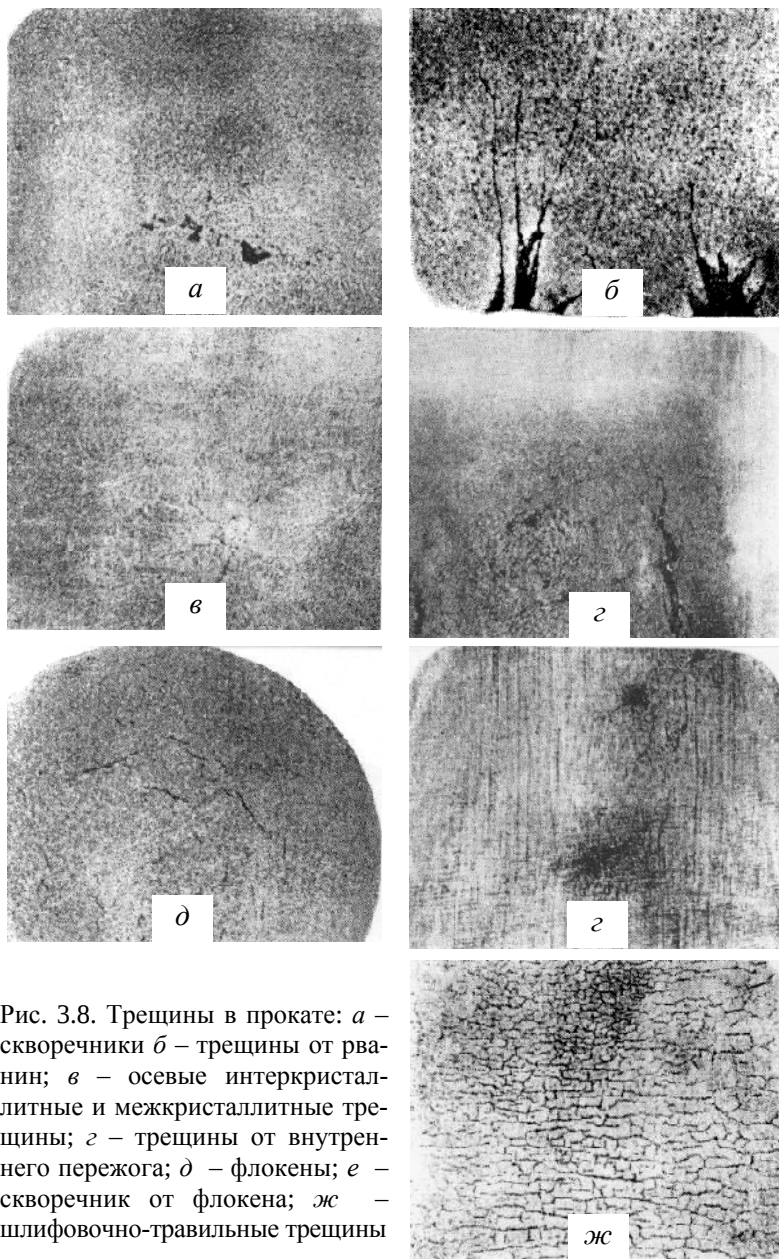


Рис. 3.8. Трещины в прокате: *а* – скворечники *б* – трещины от рванин; *в* – осевые интеркристаллитные и межкристаллитные трещины; *г* – трещины от внутреннего пережога; *д* – флокены; *е* – скворечник от флокена; *ж* – шлифовочно-термические трещины

вильном режиме горячей пластической деформации. Такие разрывы не одиночны и имеют меньшие размеры.

Неправильный режимковки может вызвать появление ковочных трещин, которые появляются внутри заготовки около осевой зоны в виде трещин по диагоналям (ковочного креста) либо нескольких трещин, направленных от оси заготовки в стороны.

Трещины от рванин (рис. 3.8, б) представляют собой нерегулярно расположенные надрывы (расслоения) преимущественно у ребер проката, но могут встречаться и по всей поверхности. Имеют различную глубину. Тонкие сетки трещин часто являются началом общего растрескивания.

Осевые интеркристаллитные и межкуристаллитные трещины (рис. 3.8, в) в отличие от ковочных более прямолинейные и широкие. Они располагаются произвольно по оси заготовки.

Вследствие чрезмерного локального повышения температуры, вызывающего диффузию кислорода вдоль границ зерен, возникают явления внутреннего пережога (рис. 3.8, г). На макротемплете пережог выглядит в виде разветвленных трещин, часто расположенных в виде сетки. При пережоге может произойти разрушение внутренней зоны под действием горячей пластической деформации. Такой вид дефекта называется черновиной, которая на макрошлифе выявляется в виде рыхлой, сильно травящейся зоны или пятен и участков. В продольном изломе пережог проявляется в виде нарушения сплошности металла, а при малой степени развития – в виде крупнозернистых полос с надрывами.

Флокены (рис. 3.8, д) – тонкие извилистые трещины длиной до 30 мм и более. В поперечном сечении на травленных темплетах флокены ориентированы беспорядочно. Если при последующей горячей деформации заготовки, имеющих флокены, последние не завариваются, образуется скворечник от флокена (рис. 3.8, е). Эти дефекты произвольно расположены по длине и сечению заготовки.

Шлифовочно-травильные трещины (рис. 3.8, ж) являются результатом слишком сильного прижима металла твердым абразивным кругом и недостаточного охлаждения металла при шлифовании. Они

имеют вид тонкой сетки, расположенной перпендикулярно к направлению шлифовки. Шлифовально-травильные трещины не принимаются во внимание при оценке макроструктуры.

В прокате могут наблюдаться также свищи, представляющие собой крупные газовые включения, располагающиеся отдельно или группами по сечению заготовки, в том числе и в краевой зоне. Выявляются в виде отдельных крупных пустот и пор круглой, овальной или вытянутой формы. Свищи часто расположены несимметрично по сечению заготовки.

Следует отметить, что наличие микротрещин не препятствует надежной работе машин и конструкций до тех пор, пока связанная с ним повреждаемость не приводит к снижению прочности ниже предельно допустимого уровня.

С учетом величины и знака остаточных напряжений можно оценить предельные размеры и скорость роста трещины, а следовательно, и долговечность деталей. Например, за счет остаточных напряжений сжатия в области локальной деформации у вершины трещины возникает интенсивное упрочнение, т.е. сжимающие остаточные напряжения будут замедлять процесс разрушения [20]. И наоборот, растягивающие остаточные напряжения оказывают значительное влияние на быстрое раскрытие трещин и, как следствие, приводят к макроразрушению металла.

3.5.1. Основные подходы механики разрушения

При постоянной нагрузке трещина в некоторых условиях может стабилизироваться, при переменных нагрузках выше определенного уровня длина трещины l постоянно растет. Скорость развития трещины и ее критическая длина $l_{кр}$, при достижении которой возникает опасность быстрого разрушения конструкции, зависят от коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины $K_I = \sigma\sqrt{\pi l}$, измеряемого в МПа $\cdot$ мм^{1/2} [19].

При медленно возрастающей нагрузке условием начала разрушения является равенство

$$K_1 = K_{1c} ,$$

где K_{1c} – характеристика сопротивления материала развитию трещины (трещиностойкость), называемая вязкостью разрушения.

Отсюда следует

$$l_{кр} = \left(\frac{K_{1c}}{\sigma} \right)^2 \frac{1}{\pi}. \quad (3.22)$$

Начало исследований развития трещин относится к первой половине XX века. Появление работ Гриффитса положило начало новому этапу механики разрушения – детальному изучению процесса разрушения. При таком подходе при оценке прочности учитываются уже имеющиеся в теле трещины или подобные им дефекты. Развитие таких реальных дефектов и обуславливает весь процесс разрушения. Условие развития трещины А. Гриффитс сформулировал в виде уравнения энергетического баланса [21]

$$\frac{\partial}{\partial l}(W - \Gamma) = 0 ,$$

где W – потенциальная энергия деформации пластины; Γ – поверхностная энергия трещины; l – полудлина трещины (рис. 3.9).

Условие разрушения можно записать в виде

$$\left| \frac{\partial W}{\partial l} \right| \geq \frac{\partial \Gamma}{\partial l} . \quad (3.23)$$

Суть подхода А. Гриффитса: трещина в твердом теле будет развиваться во время его деформации, если скорость освобождения потенциальной энергии деформации будет больше прироста поверхностной энергии тела в результате образования новых поверхностей. Поверхностная энергия трещины для пластины единичной толщины имеет вид

$$\Gamma = 4l \cdot \gamma ,$$

где γ – удельная поверхностная энергия разрушения.

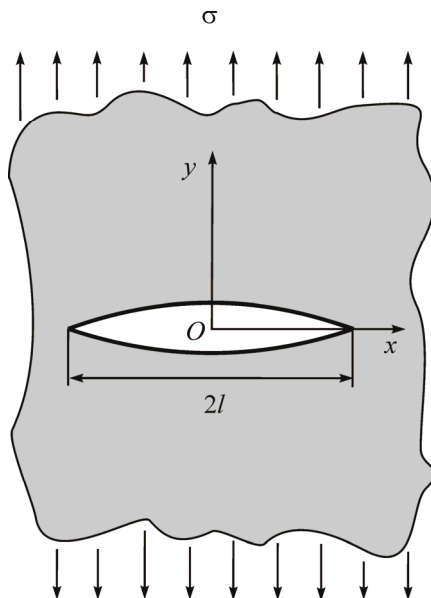


Рис. 3.9. Растяжение плоскости с одиночной трещиной (задача Гриффитса)

Гриффите учел внутренние силы – силы поверхностного натяжения – и получил для бесконечно хрупкого тела с прямолинейной трещиной полудлиной l (при условии что напряжения приложены на бесконечности от трещины) критическое напряжение, по достижении которого трещина будет распространяться самопроизвольно без подвода энергии извне.

Для условий плосконапряженного состояния

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}} . \quad (3.24)$$

для условий плоской деформации

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\mu^2)l}} , \quad (3.25)$$

где σ – разрушающее напряжение; γ – поверхностная энергия; l – критическая полудлина большей оси эллиптической трещины.

Критерий (3.25) логически верно отражает физическую картину разрушения (с ростом длины начальной трещины необходимое напряжение снижается) и дает правдоподобные оценки размеров трещины при разрушении хрупких материалов, например стекла. Однако существует ряд ограничений использования энергетического критерия Гриффитса, а именно: критерий неприемлем для пластичных материалов; отсутствует взаимодействие поля напряжений у трещины со свободными поверхностями, так как уравнения выведены для единичной толщины, содержащей маленькую плоскую трещину; уравнения (3.24) и (3.25) дают только пороговое значение напряжения начала нестабильного разрушения; разрушение трактуется с чисто геометрических позиций в упругой области, единственным используемым свойством материала является поверхностная энергия.

Важным этапом в теории распространения трещин явились работы Ирвина [22] и Орована [23], в которых была развита концепция квазихрупкого разрушения: пластичные материалы при стандартных испытаниях на растяжение разрушаются по квазихрупкому механизму, где пластическая деформация сосредоточивается в очень узком слое вблизи поверхности трещины. Ими показано, что для пластичных материалов можно воспользоваться уравнением Гриффитса, вводя вместо поверхностной энергии работу пластической деформации у поверхности трещины, которая может быть на несколько порядков больше поверхностной энергии материала.

Распространение теории трещин на квазихрупкие материалы и развитие линейной механики разрушения позволило добиться значительных успехов в оценке сопротивления разрушению тел с трещинами или вязкости разрушения. Сопротивление развитию трещины можно уподобить растущему сопротивлению пластической деформации в результате деформационного упрочнения.

За последние годы опубликовано много работ по математической трактовке и практическому определению вязкости разрушения [24, 25]. Многочисленные исследователи показали связь критерия

вязкости разрушения с различными механическими свойствами материалов. Например, Крафт [26] при анализе влияния энергии дефекта упаковки на вязкость разрушения использовал критерий в виде

$$K_{1c} = E \left[(\sigma_{0,2} + \sigma_b) / E + n/2 \right] \sqrt{2\pi d}, \quad (3.26)$$

где d – размер зоны пластической деформации; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести.

Для оценки влияния карбидной фазы на вязкость разрушения сталей наибольшее распространение получила модель Райса и Джонсона [27]:

$$K_{1c} = \left[2\sigma_{0,2} E \left(\frac{\pi}{6} \right)^{1/3} d_c \right]^{1/2} V_f^{1/6}, \quad (3.27)$$

где V_f – объемная доля твердых частиц; d_c – их средний диаметр.

Хан и Розенфилд [28], предположив наличие линейной связи между максимальной деформацией $\varepsilon_{\max}$ на границе пластической области длиной r_y и раскрытием трещины (приняв для плоской деформации $\varepsilon_{\max} = \frac{1}{3}\varepsilon_d$, где ε_d – полная деформация при растяжении гладкого образца), получили

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{2}{3} E \sigma_{0,2} \varepsilon_d r_y}. \quad (3.28)$$

При сопоставлении расчетного значения r_y с коэффициентом деформационного упрочнения n для 11 марок сталей, алюминиевых и титановых сплавов было установлено, что $r_y = n^2$ и тогда выражение (3.28) примет вид

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{2}{3} E \sigma_{0,2} \varepsilon_d n^2}. \quad (3.29)$$

Сравнение значений K_{1c} , вычисленных по формуле (3.29), с реальными значениями, полученными методами линейной механики разрушения, для высокопрочных сталей, подвергнутых различным термическим обработкам, показало хорошее соответствие между теорией и экспериментом.

Несмотря на многообразие критериев оценки вязкости разрушения, попытки построения универсальных корреляционных соотношений между K_{1c} и механическими свойствами не увенчались успехом. Хотя в ряде случаев были найдены тесные корреляции. Например, критерий оценки вязкости разрушения Ю.И. Рагозина и Ю.Я. Антонова [29], имеющий вид

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{0,8LW_iE}{1-\mu^2}}, \quad (3.30)$$

где W_i – энергия однородной пластической деформации, определяемая площадью под диаграммой растяжения; L – постоянный множитель, имеющий размерность 10^{-3} м.

Энергия однородной пластической деформации определяется по формуле

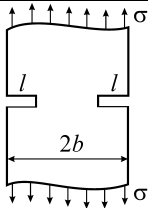
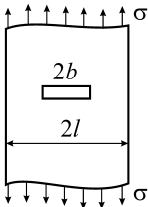
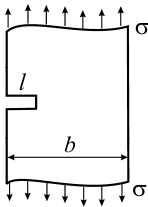
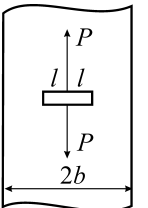
$$W = \frac{(\delta - \sigma_s/E)(\sigma_s + 2\sigma_b)}{3} + \frac{\sigma_s^2}{2E},$$

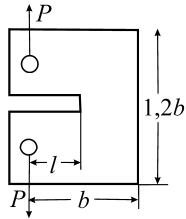
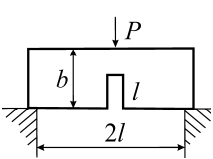
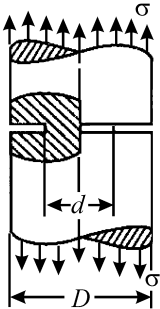
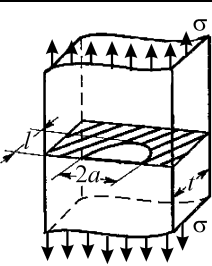
где δ – равномерное удлинение образца при растяжении.

В табл. 3.1 приведены основные формулы расчета для различных напряженных состояний и видов трещин [30].

Таблица 3.1

Соотношения для расчёта коэффициента интенсивности напряжений
в зависимости от вида трещин

Но- мер	Формула образца и схема нагружения	Формула для расчета K	Поправочный показатель
1		$K = \sigma \sqrt{\pi e} \cdot Y$	$Y = \left[\frac{2b}{\pi l} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi l}{2b} + 0,1 \sin \frac{\pi l}{b} \right) \right]^{1/2}$ (Ирвинг, 1958 г.)
2		$K = \sigma \sqrt{\pi e} \cdot Y$	$Y = \left[\frac{2b}{\pi l} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{2b} \right]^{1/2}$ (Ирвинг, 1958 г.) $Y = \sqrt{\pi} \left[1 + 0,595\lambda^2 + 0,481\lambda^4 + \dots \right]$ $(\lambda = l/b)$ (Исида, 1965 г.) $Y = \sqrt{\sec \frac{\pi l}{2b}}$ (Федерсен, 1966 г.)
3		$K = \sigma \sqrt{\pi e} \cdot Y$	$Y = 1,12 - 0,23\lambda + 10,55\lambda^2 - 21,72\lambda^3 + 30\lambda^4$ $\lambda = l/b < 0,7$ (Гросс, 1965 г.)
4		$K = \frac{P}{\pi t} \sqrt{l} \cdot Y$	$Y = \left[\frac{b}{\pi l} \sin \frac{\pi l}{b} \right]^{1/2}$ t – толщина плоского образца

Но- мер	Формула образца и схема нагружения	Формула для расчета K	Поправочный показатель
5		$K = \frac{P}{t\sqrt{b}} Y$	$Y = \sqrt{\lambda} (2,96 - 185,5\lambda + 655,5\lambda^2 - 1017\lambda^3 + 628,9\lambda^4)$ (Гросс, Сроули, 1966 г.)
6		$K = \frac{3Pl}{tb^{3/2}} Y$	$Y = \sqrt{\lambda} (1,93 - 3,7\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4)$ (Гросс, Сроули, 1965 г.)
7		$K = \frac{P}{D^{3/2}} Y$	$Y = 1,72 \frac{D}{d} - 1,27$ $0,5 \leq d/D \leq 0,8$ (Брюкнер, 1964 г.)
8		$K = \sigma\sqrt{\pi l} \cdot Y$	$Y = \frac{1,12 - 0,48(l/a)}{1 - \frac{l}{t} \left(1 - 0,75 \frac{l}{t}\right)}$ $0 < \frac{l}{a} < 1, 0 < \frac{l}{t} \leq 0,4$ (Черепанов, 1969 г.)

Таким образом, в зависимости от вида дефекта и напряженного состояния можно в соответствии с табл. 3.1 подобрать расчетные выражения и поправочные коэффициенты для определения вязкости разрушения.

3.5.2. Оценка предельно допустимых дефектов в трубах при наличии остаточных напряжений

Критерии разрушения можно использовать для определения критических значений трещин, существующих в осесимметричных металлоизделиях. Результаты исследования остаточных напряжений, изложенные в гл. 2 показывают, что для конструкционных сталей и титановых сплавов значения растягивающих окружных остаточных напряжений значительно выше, чем значения радиальных и осевых напряжений. Опасным при этом с позиций механики разрушения являются продольные трещины [31]. Поэтому целесообразней показать зависимость изменения $l_{кр}$ от σ_θ согласно (3.22).

Найдем выражения для определения критической длины продольной трещины при действии максимальных окружных остаточных напряжений (3.10) на наружной поверхности трубы: при $r = R_1$ с использованием критериев вязкости разрушения:

Хана и Розенфильда

$$l_{кр} = \frac{n^2 \varepsilon_d (1 - \mu^2) B}{90 \pi \psi \varepsilon_{cp} (1 - a)^2 \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n + 1} \right)}, \quad (3.31)$$

Рагозина и Антонова

$$l_{кр} = \frac{L W_l B}{75 \pi \psi \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n + 1} \right)}. \quad (3.32)$$

Аналогично определим допустимые размеры продольных дефектов при действии остаточных напряжений в соответствии с выражениями (3.5) на поверхности прутка ($\bar{r} = 1$), с использованием критериев разрушения:

Хана и Розенфильда

$$l_{кр} = \frac{n^2 \epsilon_d (1 - \mu^2)}{9\pi\psi\epsilon_{cp} \left(1 + \frac{m\epsilon_{cp}^n}{n+1} \right)}, \quad (3.33)$$

Рагозина и Антонова

$$l_{кр} = \frac{2LW_i}{15\pi\psi\sigma_{s_0}\epsilon_{cp} \left(1 + \frac{m\epsilon_{cp}^n}{n+1} \right)}. \quad (3.34)$$

Для конструкционных сталей и титановых сплавов коэффициент интенсивности напряжений находится в интервале $K_{Ic} = (1-3) \times 10^3 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}$ [19], следовательно, при остаточном напряжении $\sigma = 500 \text{ МПа}$ опасными становятся трещины длиной $l_{кр} = 1,3-11 \text{ мм}$, а при $\sigma = 1000 \text{ МПа}$ $l_{кр} = 0,3-3,0 \text{ мм}$.

На рис. 3.10 представлены зависимости критической длины трещины от предельно допустимых напряжений, с использованием критерия (3.30) для оценки вязкости разрушения.

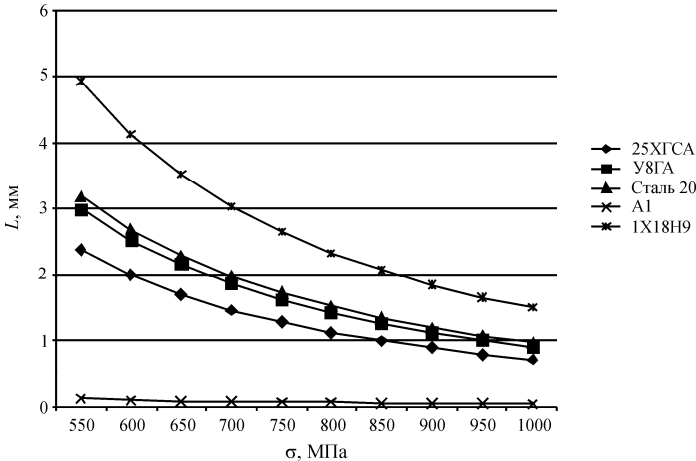


Рис. 3.10. Зависимость длин трещин от величины предельных напряжений для различных материалов

Как следует из рис. 3.10, критическая длина трещины уменьшается с увеличением величины напряжений. Для металлов, у которых коэффициент трещиностойкости K_{Ic} выше, допускаются дефекты большей длины.

Таким образом, зная значения технологических остаточных напряжений и контролируя поверхностные микродефекты, можно прогнозировать прочность и долговечность трубных изделий с учетом характеристик вязкости разрушения материалов. Представленная методика позволяет учитывать также коэффициенты трещиностойкости, величину и характер поверхностных микродефектов для оптимального подбора технологических параметров производства с учетом остаточных напряжений.

3.5.3. Влияние остаточных напряжений на прочность листового проката при наличии дефектов

Одним из основных требований, предъявляемых к качеству прокатанного металла, является отсутствие на поверхности трещин, раскатанных пузырей, плен, закатов, шлаковых включений, глубоких задигов и т.д. Поверхностные дефекты не являются неизбежным спутником металлургического производства. Современный уровень технологии в сталеплавильном и прокатном производствах позволяет значительно уменьшить количество поверхностных дефектов на слитках, заготовках и готовом прокате, однако полностью их избежать не представляется возможным.

В заводской практике все дефекты подразделяют на две группы: 1) сталеплавильного и 2) прокатного происхождения.

Дефекты, связанные с нарушением технологии выплавки стали, поражают большую часть раскатанного металла. При этом они располагаются беспорядочно по длине и периметру. Дефекты разливки, как правило, носят локальный характер.

Возникновение дефектов прокатного передела непосредственно связано с деформацией и температурными условиями обработки металла.

Рассмотрим некоторые виды поверхностных дефектов плоских заготовок для производства листового проката [18]. На рис. 3.11 изображены рванины (прокатного происхождения). Эти дефекты поверхности имеют вид надрывов по широким и узким граням. Трещины, идущие от рванины в глубь металла, заполнены окислами, часто

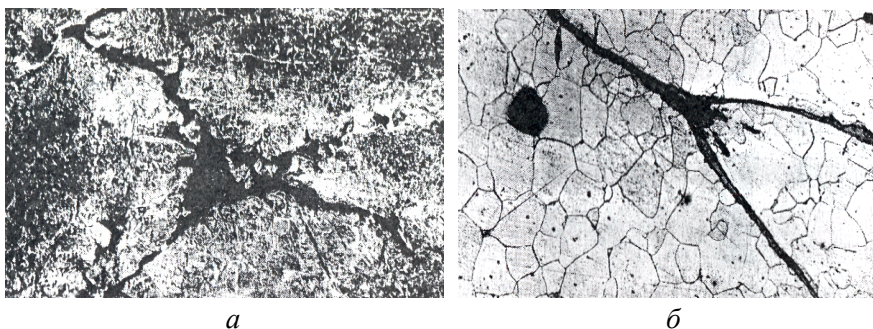


Рис. 3.11. Рванины прокатного происхождения: *а* – внешний вид; *б* – микроструктура металла в зоне дефекта, X100

имеют разветвленный характер. Металл вдоль трещины незначительно обезуглерожен. Причиной образования является прокатка «подстуженных» слитков. Для предупреждения необходимо выдерживать заданную температуру нагрева слитков перед прокаткой, не задерживать слитки на приемном рольганге обжимного стана.

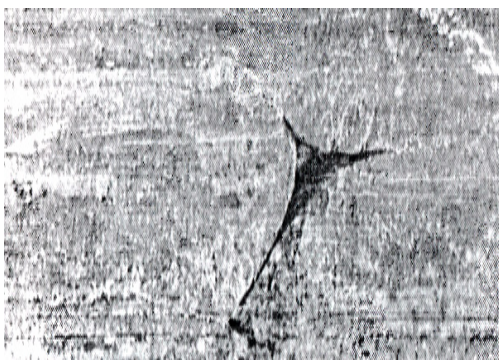
На рис. 3.12 изображена раскатанная трещина. Дефект поверхности слябов представляет собой разрыв металла, образовавшийся при прокатке слитков с продольными или поперечными трещинами. Глубина залегания продольных трещин достигает 15 мм, поперечных – 30 мм. Причиной образования являются продольные и поперечные трещины на поверхности слитков.

Таким образом, при изготовлении металлоизделий могут образовываться различные дефекты. Трещины от рванин представляют собой нерегулярно расположенные надрывы (расслоения) преимущественно у ребер проката, но могут встречаться и по всей поверхности. Имеют различную глубину. Следует отметить, что наличие мик-

ротрещин не препятствует надежной длительной работе машин и конструкций до тех пор, пока связанная с ним повреждаемость не приводит к снижению прочности ниже предельно допустимого уровня. При этом допустимую степень повреждаемости можно установить на основании расчетно-экспериментальных исследований и опыта эксплуатации.



a



б

Рис. 3.12. Раскатанная трещина на широкой (*a*) и узкой (*б*) гранях сляба

Ниже предлагается методика определения предельных соотношений технологических параметров прокатки при наличии остаточных напряжений с учетом коэффициента вязкости разрушения материала. При этом опасными с точки зрения разрушения принимаются

остаточные напряжения, действующие на поверхности листа. Уравнения (2.63) определяют упругое последеформационное напряженное состояние полосы после прокатки и при $x=0$, $y=\pm\frac{h}{2}$ принимают вид

$$\sigma_x^{\max} = a_0 \frac{h^2 b^4}{96}; \quad \sigma_z^{\max} = \frac{\mu a_0 h^2 b^2}{32} \left(\frac{b^2}{3} \right), \quad (3.35)$$

где $\sigma_x^{\max}$, $\sigma_z^{\max}$ – поперечное и продольное максимальные растягивающие остаточные напряжения соответственно, а a_0 находится следующим образом [32]:

$$a_0 = \frac{1260 \psi^*}{b^7} \times \sqrt{\frac{\left(1,15 \ln \frac{H_0}{H_1} + \sqrt{\frac{H_R}{3(2-H_R)}} \right) \left(1 + \frac{m \left[1,15 \ln \frac{H_0}{H_1} + \sqrt{\frac{H_R}{3(2-H_R)}} \right]^n}{n+1} \right) b h}{\bar{h}^5 (1+\mu) \left[4 \bar{h}^2 (2-\mu) + 7(1-\mu) (1+\bar{h}^4) \right]}},$$

где $\bar{h} = \frac{h}{b}$ – относительная толщина полосы; $H_R = \frac{H_0 - H_1}{R}$.

Поперечные и продольные растягивающие остаточные напряжения на поверхности листа фиксируются в поверхностных слоях детали, что может существенно влиять на разрушение детали после изготовления, при транспортировке или хранении, а также при эксплуатации, когда технологические остаточные напряжения могут суммироваться с напряжениями, возникающими при рабочих нагрузках.

Предполагая, что разрушающим напряжением при наличии поверхностных продольных дефектов будет поперечное растягивающее

напряжение, а раскрытию поперечных трещин будут способствовать осевые (продольные) остаточные напряжения, согласно выражению (3.22) с учетом (3.35) определяются значения критической длины продольных и поперечных дефектов (рис. 3.13) для различных сталей и сплавов.

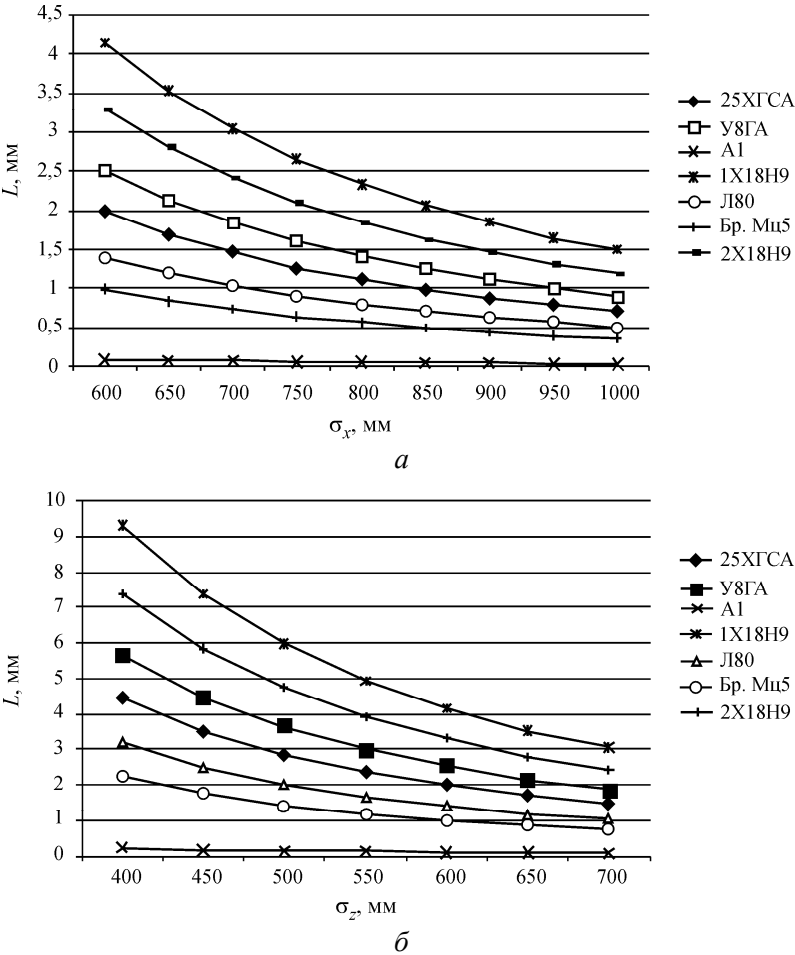


Рис. 3.13. Зависимость предельных значений длин продольных (а) и поперечных (б) дефектов от $\sigma_x^{\max}$ и $\sigma_z^{\max}$ соответственно

Таким образом, предложенная методика позволяет организовать технологический процесс прокатки так, чтобы уменьшить величину остаточных напряжений. Если есть возможность производить дефектоскопию готовых изделий, то с помощью данной методики можно предсказать вероятное разрушение изделия от действия остаточных напряжений при наличии трещин.

3.6. Влияние технологических остаточных напряжений на прочность металлоизделий в эксплуатационных условиях

Остаточные напряжения, суммируясь с рабочими напряжениями в процессе эксплуатации, могут существенным образом повлиять на несущую способность конструкции. При этом большую роль должны играть неразрушающие методы контроля дефектности и точности металлоизделий. Сопоставив значение $l_{кр}$ с результатами неразрушающего контроля дефектов в металлоизделии, можно прогнозировать опасность разрушения металлоизделий от остаточных напряжений.

Эксплуатационные нагрузки при этом могут быть учтены суммированием (суперпозицией) эксплуатационных и остаточных напряжений:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^o + \sigma_{ij}^н, \quad (3.36)$$

σ_{ij}^o – остаточные напряжения; $\sigma_{ij}^н$ – напряжения от рабочих нагрузок.

Одной из актуальных задач современной техники является прочность цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления (газопроводы, нефтепроводы и т.п.). При этом пропускная способность трубопроводов определяется давлением транспортируемой среды. Для цилиндрических оболочек, нагруженных внутренним давлением, окружное напряжение [33]

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{h_1}, \quad (3.37)$$

здесь $R = (R_1 + R_2)/2$ – средний радиус трубы; p – внутреннее давление; $h_1 = R_1 - R_2$ – толщина стенки трубы. Тогда согласно (3.36)

$$\sigma_0 = \sigma_0^o + \frac{(R_1 + R_2)}{2(R_1 - R_2)} p. \quad (3.38)$$

С учетом выражений (3.22) и (3.38) можно получить различные варианты расчета трубопроводов под внутренним давлением при возможном наличии трещин.

1) Задача определения предельного внутреннего давления с учетом остаточных напряжений и наличия дефектов в трубе [34]:

$$\sigma_0^o + \frac{pR}{h_1} = \frac{K_{1c}}{\sqrt{l_{кр}}}; \quad p = \left(\frac{K_{1c}}{\sqrt{l_0}} - \sigma_0^o \right) \frac{h_1}{R}, \quad (3.39)$$

где l_0 – длина существующей трещины.

2) Расчет допустимых предельных величин остаточных окружных напряжений в трубе с дефектами:

$$\sigma_0^o = \frac{K_{1c}}{\sqrt{l_0}} - \frac{pR}{h_1}. \quad (3.40)$$

3) Определение максимальной допустимой величины продольных дефектов в трубах

$$\sigma_0^o = \frac{K_{1c}}{\sqrt{l_0}} - \frac{pR}{h_1}, \quad l_{\max} = K_{1c} / \left(\sigma_0^o + \frac{pR}{h_1} \right)^2. \quad (3.41)$$

Одной из актуальных задач строительной механики и современной техники является обеспечение прочности пластин под действием распределенной нагрузки (собственный вес для массивных пластин, действие других деталей). Например, максимальные напряжения от распределенной нагрузки по площади пластины можно определить следующим образом [35]:

для жестко-закрепленной

$$\sigma_{\max} = \frac{qb^2}{2h^2} \quad (3.42)$$

и свободно-опертой пластины

$$\sigma_{\max} = \frac{3q \cdot b^2}{4h^2}, \quad (3.43)$$

где q – распределенная нагрузка; h – толщина пластины.

Сопоставив значения $l_{\text{кр}}$, определенные в листовых изделиях, с результатами неразрушающего контроля дефектов в металлоизделии, можно прогнозировать опасность разрушения металлоизделий от остаточных напряжений. С учетом эксплуатационных нагрузок и остаточных напряжений в соответствии с выражениями (3.36), (3.22), (3.42) и (3.43) рассмотрим различные варианты расчета листовых изделий при наличии трещин.

1) Задача определения предельной нагрузки с учетом остаточных напряжений и наличия дефектов в пластине:

$$\sigma^0 + \frac{1}{2} \frac{q \cdot a^2}{h^2} = \frac{K_{1c}}{\sqrt{l_{\text{кр}}}}; \quad q = 2 \left(\frac{K_{1c}}{\sqrt{l_0}} - \sigma^0 \right) \frac{h^2}{a^2}, \quad (3.44)$$

где l_0 – длина микротрещины, выявленной при дефектоскопии, σ^0 – остаточные напряжения в листовых металлоизделиях после изготовления.

2) Расчет допустимых предельных величин остаточных напряжений в пластине с дефектами:

$$\sigma^0 = \frac{K_{1c}}{\sqrt{l_0}} - \frac{1}{2} \frac{q \cdot a^2}{h^2}. \quad (3.45)$$

3) Определение максимальной допустимой величины продольных дефектов в пластинах:

$$l_{\max} = K_{1c} \left/ \left(\sigma^0 + \frac{1}{2} \frac{q \cdot a^2}{h^2} \right)^2 \right. \quad (3.46)$$

В зависимости от ряда частных случаев аналогичные расчеты возможны и для других известных видов нагрузок. Зная условия формирования остаточных технологических напряжений при пластическом деформировании и закономерности механики хрупкого разрушения можно обеспечить надежность и долговечность деталей конструкций, полученных методами обработки металлов давлением.

Методики расчета технологических остаточных напряжений позволяют учитывать наличие остаточных напряжений при последующем прочностном расчете от эксплуатационных нагрузок с использованием принципа суперпозиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев [и др.]. – М.: Наука; Физматлит, 1996. – 240 с.
2. Трубы России – 2004. Достижения в теории и практике трубного производства: Материалы 1-й Всерос. конф. по трубному производству. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. – 523 с.
3. Перлин И.Л. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
4. Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения / А.Н. Скороходов [и др.]. – М., 1985. – 185 с.
5. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложение. – М., 1982. – 112 с.
6. Архипов А.Н., Володенко Б.Ф. Влияние состояния поверхностного слоя на сопротивление усталости образцов и рабочих лопаток турбин из жаропрочных материалов // Проблемы прочности. – 1974. – № 6. – С. 106–110.
7. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Архипов А.Н. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости сплава ВТ-9 // Проблемы прочности. – 1981. – № 7. – С. 33–37.
8. Вишняков Н.А., Грингауз Г.Д., Рудзей Г.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов при программном нагружении // Проблемы прочности. – 1981. – № 6. – С. 34–37.

9. Соколов И.А, Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Metallurgy, 1981. – 96 с.
10. Влияние протяжки в роликовых волокнах на распределение остаточных напряжений в проволоке / А.И. Семавина [и др.] // Сталь. – 1976. – № 5. – С. 447–448.
11. Потак Я.М. Хрупкие разрушения стали и стальных деталей. – М.: Оборонгиз, 1955. – 390 с.
12. Шураков С.С. Металловедение. – М.: Судпромгиз, 1957. – С. 100–126.
13. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 190 с.
14. Теория разрушения и предельная деформируемость при производстве прутков и труб из дисперсно-упрочненных композиционных материалов / Г.Л. Колмогоров [и др.] // Фундаментальные проблемы металлургии: сб. докл. второй межвуз. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2000. – С. 179–181.
15. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Kovalev A.E. Residual stresses and problems of strength of the axially symmetric metal articles. Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges: Proceedings of International Conference. – Kiev, Ukraine, Nov., 2002. – P. 89–90.
16. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технологическая прочность и остаточные напряжения осесимметричных полых изделий // Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2001. – № 3. – С. 9–14.
17. Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.
18. Справочник по практическому материаловедению / В.Л. Пилюшенко [и др.]. – Киев: Техника, 1984. – 135 с.
19. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
20. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла. – М.: Metallurgy, 1973. – 215 с.

21. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc., 1920, A221. – P. 163–198.
22. Irwin C.R. Fracture // Handbuch der Physik, Bd. 6. – Berlin, Springer, 1958. – S. 551–590.
23. Orowan E.O. Fundamentals of brittle behavior of metals // Fatigue and Fracture of Metals/Ed. by W.M. Murray. – New York: Wiley, 1950. – P. 139–167.
24. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т.: пер. с англ. / под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 2. – 1016 с.
25. Кузнецова Е.В., Арташева А.А. Влияние эксплуатационных режимов и технологических остаточных напряжений на коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, используемых в атомной энергетике / Вестник ПНИПУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – № 1. – С. 51–62.
26. Krafft J.M. Role of local dissolution in corrosion – assisted cracking of titanium alloys // National Symposium on Fracture Mechanics at Lehigh University, Bethlehem, Po, Lune, 1967.
27. Rice J.R. Johnston M.A. On the Large geometric change at the crack tip. In: Inelastic behavior of solids / Eds M.P. Kanninen [et al.]. – New York: McCraw-Hill, 1970. – P. 641–655.
28. Hahn G.T., Rosenfield A.R. Sources of fracture toughness // Appl. relat. phenomena in titanium alloys, 1968. – P. 5-32 (ASTMSTP; № 432).
29. Рагозин Ю.И., Антонов Ю.Я. // Металлы. – 1984. – № 2. – С. 28–34.
30. Пестриков В.М., Морозов Е.В. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 302 с.
31. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Прочность осесимметричных полых металлоизделий при наличии трещин с учетом технологических остаточных напряжений / Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – № 4. – С. 10–17.
32. Кузнецова Е.В., Токарев А.Н. Остаточные напряжения и прочность листовых металлоизделий при наличии микродефектов //

Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2005. – № 5. – С. 50-56.

33. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

34. Колмогоров Г.Л. Кузнецова Е.В. Технологические остаточные напряжения и прочность осесимметричных полых изделий // Научные исследования и инновации. Научный журнал. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – № 4. – С. 43–51.

35. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 635 с.

Глава 4

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПРОЧНОСТЬ АНИЗОТРОПНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

В современных конструкциях наряду с материалами, обычно при расчётах принимаемыми за однородные и изотропные, используются для изготовления деталей и анизотропные материалы, у которых наблюдается различие в упругих свойствах для различных направлений.

Кроме деталей, изготовленных из материалов, обладающих анизотропией, зависящей от внутреннего строения («естественной» анизотропии), в современных конструкциях используются элементы с так называемой конструктивной или искусственной анизотропией. К последним относятся пластинки и оболочки из изотропного материала, которым придана волнистость путем гофрирования, или усиленные часто поставленными ребрами.

Из различных видов криволинейной анизотропии наибольший практический интерес представляют два вида, рассмотренные еще Сен-Венаном: 1) цилиндрическая анизотропия и 2) сферическая анизотропия.

Цилиндрическая анизотропия может появиться в металлических изделиях в результате соответствующих технологических процессов (например, при изготовлении труб, протяжке проволоки и др.). Моделью тела, обладающего в первом приближении цилиндрической анизотропией, может служить свод, построенный из достаточно большого числа однородных элементов, без зазоров. Каждый элемент обладает прямолинейной анизотропией, но главные оси упругости элементов образуют углы, так что свод в целом будет вести себя как цилиндрически-анизотропное тело.

В ходе обработки металлов пластическим деформированием слои в радиальном направлении находятся под напряжениями сжатия. По этой причине в процессе вытяжки изменяется структура материала в радиальном направлении, в то время как в осевом направ-

лении не происходит внешних воздействий на структуру материала. Вероятность изменения свойств и моделирования ситуации искусственной анизотропии наиболее велика в радиальном и окружном направлениях. При этом однородность свойств в окружном и радиальном направлении остаётся постоянной и отличается от свойств в осевом направлении, возникает искусственная анизотропия. Кроме того, ось изделия совпадает с осью плоскостей изотропии. Такие тела называются трансверсально-изотропными телами.

4.1. Особенности напряженного состояния после изготовления цилиндрических деталей

В однородном анизотропном теле все параллельные направления, проведенные через разные точки, являются эквивалентными в отношении упругих свойств. Вследствие этого все одинаковые и одинаково направленные элементы в виде прямоугольных параллелепипедов, выделенные в разных местах тела, являются идентичными – обладают одинаковыми упругими свойствами [1].

Наряду с такой анизотропией, которую можно назвать прямолинейной, существует анизотропия другого вида – криволинейная. Криволинейная анизотропия однородного тела характеризуется тем, что для разных точек тела, обладающего ею, эквивалентными являются не параллельные направления, а подчиненные каким-то другим закономерностям. Если выбрать систему криволинейных ортогональных координат так, чтобы координатные направления ее в каждой точке совпадали с эквивалентными направлениями (в отношении упругих свойств), то бесконечно малые элементы тела, ограниченные тремя парами координатных поверхностей, будут идентичными. Наоборот, элементы в виде одинаковых и одинаково направленных параллелепипедов будут в разных местах иметь различные упругие свойства.

В случае когда однородное тело является криволинейно-анизотропным, связь между деформациями и напряжениями в упругом состоянии подчиняется обобщенному закону Гука (2.21). Для опреде-

ления напряженно-деформированного состояния в осесимметричных изделиях используют соотношения (2.23), (2.24) в цилиндрической системе координат.

Для ортотропного материала с цилиндрической анизотропией и вводом «технических постоянных» – модулей Юнга и сдвига и коэффициентов Пуассона используются выражения (2.25).

Цилиндрическая анизотропия может появиться в металлических изделиях, например циркониевых сплавах, в результате соответствующих технологических процессов (например, при изготовлении труб и прутков, протяжке, прокатке проволоки и др.). При этом как, отмечалось ранее, после изготовления возникают остаточные напряжения. Поэтому учитывать анизотропию при их изготовлении необходимо.

4.1.1. Остаточные напряжения в анизотропных прутковых изделиях

В общем случае цилиндрической анизотропии ортотропного тела [1] уравнения обобщенного закона Гука выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{0r}}{E_0} \sigma_\theta - \frac{\mu_{zr}}{E_z} \sigma_z, \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{\mu_{r\theta}}{E_r} \sigma_r + \frac{1}{E_0} \sigma_\theta - \frac{\mu_{z\theta}}{E_z} \sigma_z, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\mu_{rz}}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{\theta z}}{E_0} \sigma_\theta + \frac{1}{E_z} \sigma_z, \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где $\varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$ – компоненты тензоров деформаций и напряжений соответственно; μ_{ij} – коэффициенты Пуассона для соответствующих сочетаний осей; E_r, E_z, E_0 – модули упругости в соответствующих направлениях.

В случае трансверсально-изотропного тела уравнения обобщённого закона Гука (4.1) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) - \frac{\mu'}{E'}\sigma_z, \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}(-\mu\sigma_r + \sigma_\theta) - \frac{\mu'}{E'}\sigma_z, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\mu'}{E'}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{E'}\sigma_z, \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где E , E' – модули упругости для растяжения-сжатия в направлении плоскости изотропии и нормальном к ней соответственно, μ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в этой плоскости, μ' – то же при растяжении в направлении, нормальном к плоскости изотропии.

При изготовлении осесимметричных изделий большой длины принимают отсутствие деформаций в осевом направлении ($\varepsilon_z = 0$). Тогда последнее из уравнений примет вид

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu'}{E'}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{E'}\sigma_z = 0, \quad (4.3)$$

откуда следует

$$\sigma_z = \mu'(\sigma_r + \sigma_\theta). \quad (4.4)$$

Из решения осесимметричной задачи теории упругости [2] компоненты тензора напряжений для прутковых и проволочных изделий определены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu'}(\bar{r}^2 - 1), \\ \sigma_\theta &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu'}(3\bar{r}^2 - 1), \\ \sigma_z &= \frac{\bar{a}_1}{2}(2\bar{r}^2 - 1), \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\bar{a}_1 = \frac{a_1}{R}$ – параметр, характеризующий распределение остаточных напряжений, который определяется из энергетического условия (2.1); R – радиус пруткового изделия; $\bar{r} = \frac{r}{R}$ – относительная радиальная координата.

При известных компонентах тензора напряжений σ_{ij} с помощью закона Гука (4.2) находятся компоненты тензора деформаций ε_{ij} , с учётом выражения (2.27) рассчитывается потенциальная энергия упругих остаточных напряжений:

$$U = \pi K_{CR} \bar{a}_1^2, \quad (4.6)$$

где K_{CR} – коэффициент влияния анизотропных свойств материала и его геометрических характеристик,

$$K_{CR} = \frac{R^2 (E' - \mu'^2 E)}{24 \mu'^2 E E'}.$$

Энергия пластического деформирования для усреднённого по зоне деформации σ_s определяется в соответствии с соотношением (2.28) в следующем виде

$$U_d = \pi R^2 \sigma_s \left(2 \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b}{3\sqrt{3}} \right). \quad (4.7)$$

После подстановки и преобразований уравнений (4.6) и (4.7), с учётом энергетического уравнения (2.26), получим значение неизвестного параметра $\bar{a}_1$:

$$\bar{a}_1 = \sqrt{\psi_{CR} \sigma_s \psi \left(2 \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b}{3\sqrt{3}} \right)}, \quad (4.8)$$

где $\Psi_{CR} = \frac{R^2}{K_{CR}}$ – параметр, характеризующий геометрические и механические свойства обрабатываемого материала.

Как правило, наибольшую опасность представляют растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях металлоизделий. Из выражений (4.5) для поверхностного слоя ($\bar{r} = 1$) имеем

$\sigma_r = 0, \sigma_\theta = \frac{\bar{a}_1}{2\mu'}, \sigma_z = \frac{\bar{a}_1}{2}$. Из соотношений (4.12) следует:

$$\bar{a}_1 = \sqrt{\left(2 \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b}{3\sqrt{3}}\right)} \Psi^* \sigma_s, \quad (4.9)$$

где $\Psi^* = \sqrt{\frac{\Psi_{CR} \Psi}{\sigma_s}}$ – параметр, характеризующий механические свойства обрабатываемого материала [3].

С позиции разрушения наибольшую опасность представляют максимальные окружные напряжения σ_θ , наиболее простая оценка прочности выйдет в соответствии с первой теорией прочности так:

$$\sigma_\theta^{\max} \leq \sigma_b, \quad (4.10)$$

где σ_b – предел прочности материала в окружном направлении.

Полагаем, что для металлических материалов $\sigma_b \approx \sigma_s$. С помощью выражения (4.10) получим условие прочности в виде

$$\bar{a}_1 = \sqrt{\frac{1}{4\mu'^2} \left(\ln \lambda + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b}{3\sqrt{3}} \right)} \Psi^* \leq 1, \quad (4.11)$$

где $\lambda = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2$ – вытяжка за проход.

Выполняя преобразования, из условий возможного последовательного разрушения прутка от остаточных напряжений найдём предельную вытяжку:

$$\lambda \leq \exp \left(\frac{4\mu'^2}{\psi^{*2}} - \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b}{3\sqrt{3}} \right). \quad (4.12)$$

Пользуясь формулой (4.12), построим график зависимости параметра λ , характеризующего вытяжку за проход, от параметра ψ^* , характеризующего механические свойства материала.

В качестве примера возьмём значения коэффициента Пуассона для материала $\mu' = 0,35$ и различных углов наклона волокна $\alpha_b = 6; 8; 10$ градусов.

На рис. 4.1 приведены расчётные зависимости λ от технологических параметров процесса пластического деформирования. Из рис. 4.1 следует, что с увеличением параметра ψ^* предельная вытяжка уменьшается. С увеличением угла наклона образующей технологического инструмента α_b предельная вытяжка уменьшается.

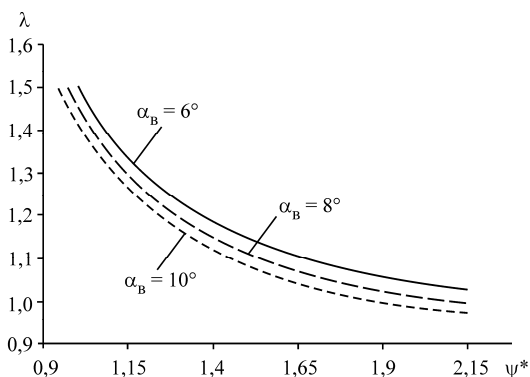


Рис. 4.1. Зависимость параметра, характеризующего вытяжку за проход, от параметра, характеризующего механические свойства материала

В случае многопереходного деформирования условие прочности будет иметь следующий вид:

$$\lambda_{\Sigma} \leq \exp \left(\frac{4\mu'^2}{\psi^{*2}} - \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b}{3\sqrt{3}} n \right), \quad (4.13)$$

где $\lambda_{\Sigma} = \left(\frac{d_0}{d_k} \right)^2$ – суммарная вытяжка; d_0 и d_k – начальный и конечный диаметр прутка соответственно; n – количество переходов.

Производство осесимметричных изделий типа прутков, проволоки, труб проводится пластической деформацией волочением, прокаткой или прессованием. Прессование, как правило, производится в горячем состоянии металла, поэтому формирование остаточных напряжений при прессовании не рассматривается.

В данной работе рассматривается механика пластического деформирования в холодном состоянии волочением и прокаткой. Вышеприведённые соотношения относятся к процессу волочения. При прокатке с диаметра d_0 до диаметра d_1 средняя степень деформации будет определяться первым слагаемым соотношения

$$\varepsilon_{\text{ср}} = 2 \ln \frac{d_0}{d_1} = \ln \lambda.$$

При этом для однопроходной прокатки соотношение (4.12) для предельной вытяжки из условия прочности заготовки от остаточных напряжений примет вид

$$\lambda \leq \exp \left(\frac{4\mu^2}{\psi^{*2}} \right). \quad (4.14)$$

На рис. 4.2 приведены расчётные зависимости предельной за проход вытяжки при прокатке λ от параметра ψ^* .

Сопоставляя рис. 4.1 и рис. 4.2 можно сделать вывод, что с позиции формирования остаточных напряжений процесс прокатки осесимметричных тел предпочтительнее по сравнению с волочением.

Соответственно для многопереходной прокатки предельная суммарная вытяжка

$$\lambda_{\Sigma} \leq \exp \left(\frac{4\mu^2}{\psi^{*2}} \right), \quad (4.15)$$

где $\lambda_{\Sigma} = \frac{d_0}{d_K}$; d_0 и d_K – начальный и конечные диаметры соответственно.

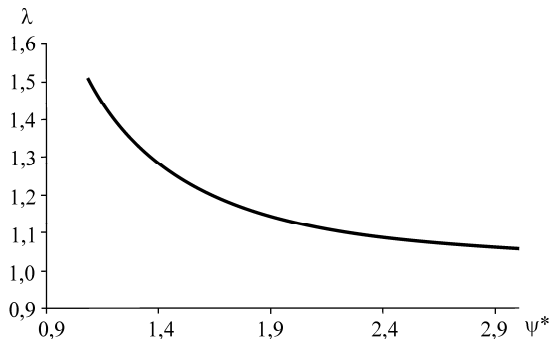


Рис. 4.2. Зависимость параметра, характеризующего вытяжку за проход, от параметра, характеризующего механические свойства материала при прокатке

Соотношение (4.15) позволяет строить технологию прокатки из условий прочности от остаточных напряжений и назначать в случае необходимости термическую обработку с целью снятия остаточных напряжений.

Таким образом, данные методики позволяют определить предельные обжатия из условий сохранения сплошности прутковой заготовки при пластическом деформировании анизотропного материала, что позволяет соответствующим образом строить технологический процесс и предотвратить последеформационное разрушение металлоизделий от остаточных напряжений.

4.1.2. Остаточные напряжения в трубах для общего случая цилиндрической анизотропии материала

Для определения остаточных напряжений в полых цилиндрических металлоизделиях используем энергетический подход, согласно

которому определены радиальные и окружные остаточные напряжения соответственно:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -a_0(R_1 - r)(r - R_2), \\ \sigma_\theta &= a_0[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)].\end{aligned}\quad (4.16)$$

Осевые остаточные напряжения для материалов, обладающих цилиндрической анизотропией, определяются в предположении $\varepsilon_z = 0$ для длинных заготовок из обобщенного закона Гука (4.1) с учетом (4.16).

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{E_z}{E_r} \mu_{rz} a_0 (r - R_1)(r - R_2) + \\ &+ \frac{E_z}{E_\theta} \mu_{\theta z} a_0 [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)].\end{aligned}\quad (4.17)$$

Подставляя (4.16), (4.17) в соотношения (4.1), в предположении $\varepsilon_z = 0$ получим компоненты тензора упругих деформаций от действия остаточных напряжений:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{a_0}{E_r} (r - R_1)(r - R_2)(1 - \mu_{rz} \mu_{zr}) - \\ &- \frac{a_0}{E_\theta} [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)] (\mu_{\theta r} + \mu_{zr} \mu_{\theta z}), \\ \varepsilon_\theta &= \frac{-a_0}{E_r} (r - R_1)(r - R_2) (\mu_{r\theta} + \mu_{z\theta} \mu_{rz}) + \\ &+ \frac{a_0}{E_\theta} [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)] (1 - \mu_{z\theta} \mu_{\theta z}).\end{aligned}\quad (4.18)$$

Параметр a_0 , входящий в выражения (4.16)–(4.18), находится из энергетического условия (2.26). После подстановки соотношений (4.16)–(4.18) в выражение (2.27) для определения потенциальной энергии упругой деформации в объеме трубы от действия остаточных напряжений, интегрирования по сечению трубы и преобразований получим для единичного по длине элемента трубы

$$U = \frac{\pi \cdot a_0^2}{60 E_r E_\theta} \bar{A} R_1^6, \quad (4.19)$$

где $\bar{R} = R_2/R_1$;

$$\begin{aligned} \bar{A} = E_\theta & \left(1 - 4\bar{R} + 5\bar{R}^2 - 5\bar{R}^4 + 4\bar{R}^5 - \bar{R}^6 \right) (1 - \mu_{rz}\mu_{zr}) + \\ & + E_r \left(6 - 14\bar{R} + 10\bar{R}^2 - 10\bar{R}^4 + 14\bar{R}^5 - 6\bar{R}^6 \right) (1 - \mu_{z\theta}\mu_{\theta z}). \end{aligned}$$

Энергия, затраченная на пластическую деформацию трубной заготовки согласно (2.28), определяется как

$$U_d = \pi (R_1^2 - R_2^2) \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n+1} \right). \quad (4.20)$$

Подставляя (4.19) и (4.20) в энергетическое условие (2.26), получим значение параметра a_0 :

$$a_0 = \frac{\sigma_{s_0}}{R_1^2} \sqrt{\frac{\psi^* 60 (1 - \bar{R}^2) \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n+1} \right)}{\bar{A}}}, \quad (4.21)$$

где $\psi^* = \frac{\psi E_r E_\theta}{\sigma_{s_0}}$ – безразмерный параметр, характеризующий механические свойства обрабатываемого материала [4, 5].

Из соотношения (4.21) по известным параметрам процесса пластического деформирования определяются значения a_0 , по формулам (4.16), (4.17) рассчитываются последеформационные остаточные технологические напряжения в трубных изделиях из материалов с цилиндрической анизотропией механических свойств. В соответствии с выражением (4.21) остаточные напряжения возрастают с увеличением угла конусности инструмента и степени деформации, а также зависят от механических свойств деформируемого материала.

В случае цилиндрической ортотропии в отношении механических свойств закон Гука определяется соотношениями (4.2). Из решения осесимметричной задачи теории упругости для трубной заготовки компоненты тензора напряжений определены следующим образом [6]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -a_0 (R_1 - r)(r - R_2), \\ \sigma_z &= a_0 \mu' [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)], \\ \sigma_\theta &= a_0 [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)].\end{aligned}$$

По известным компонентам тензора напряжений находятся компоненты тензора упругих деформаций согласно (4.2) и рассчитывается потенциальная энергия упругих остаточных напряжений в соответствии с выражением (2.27):

$$U = \pi K_{AR} a_0^2, \quad (4.22)$$

где K_{AR} – коэффициент влияния анизотропных свойств материала и геометрических характеристик, в частности толщины стенки трубы

$$K_{AR} = a'_4 + a'_3 + a'_2 + a'_1 + a'_0, \quad (4.23)$$

при этом

$$\begin{aligned}a'_4 &= \left(\frac{R_1^6 - R_2^6}{3} \right) \left(8 \left(\frac{1}{E} - \frac{\mu'^2}{E'} \right) - 3 \left(\frac{1 + \mu}{E} \right) \right), \\ a'_3 &= \left(\frac{R_1^5 - R_2^5}{5} \right) \left(\left(\frac{1}{E} - \frac{\mu'^2}{E'} \right) (-24R_1 - 24R_2) - \left(\frac{1 + \mu}{E} \right) (-10R_1 - 10R_2) \right), \\ a'_2 &= \left(\frac{R_1^4 - R_2^4}{4} \right) \left(\left(\frac{1}{E} - \frac{\mu'^2}{E'} \right) (34R_1R_2 + 9R_2^2 + 9R_1^2) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1 + \mu}{E} \right) (16R_1R_2 + 4R_2^2 + 4R_1^2) \right),\end{aligned}$$

$$a'_1 = 2R_1R_2(R_1^3 - R_2^3)(R_1 + R_2) \left(\left(\frac{1+\mu}{E} \right) - 2 \left(\frac{1}{E} - \frac{\mu'^2}{E'} \right) \right);$$

$$a'_0 = R_1^2R_2^2(R_1^2 - R_2^2) \left(2 \left(\frac{1}{E} - \frac{\mu'^2}{E'} \right) - \left(\frac{1+\mu}{E} \right) \right).$$

Энергия пластического деформирования определяется соотношением (2.28) с учётом деформационного упрочнения:

$$U_d = \pi(R_1^2 - R_2^2)\sigma_{s_0}\varepsilon \left(1 + \frac{m\varepsilon^n}{n+1} \right). \quad (4.24)$$

После подстановки уравнений (4.22) и (4.24) в уравнение (2.26) и преобразований получим значение параметра a_0 :

$$a_0 = \sqrt{\Psi_{AR}\varepsilon\Psi \left(1 + \frac{m\varepsilon^n}{n+1} \right)}, \quad (4.25)$$

$$\Psi_{AR} = \frac{\sigma_{s_0}(R_1^2 - R_2^2)}{K_{AR}} - \text{параметр, характеризующий геометрические}$$

и механические свойства обрабатываемого материала.

Степень пластической деформации ε при этом определяется в зависимости от вида технологического процесса.

При волочении в расчётах удобнее пользоваться усреднённым по сечению значением степени деформации, которое определяется для трубной заготовки выражением (1.40). Тогда определяющее соотношение (4.25) примет вид

$$a_0 = \sqrt{\Psi_{AR}\Psi \left(2\ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4\operatorname{tg}\alpha(1-a^3)}{3\sqrt{3}(1-a^2)} \right) \left(1 + \frac{m \left(2\ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4\operatorname{tg}\alpha(1-a^3)}{3\sqrt{3}(1-a^2)} \right)^n}{n+1} \right)} \quad (4.26)$$

Из выражения (4.26) следует, что уменьшение угла конусности технологического инструмента приводит к снижению уровня остаточных напряжений в трубной заготовке. Тем не менее это позволяет соответствующим образом строить технологический процесс и предотвратить последеформационное разрушение металлоизделий от остаточных напряжений.

При прокатке трубной заготовки среднего начального диаметра d_0 до среднего конечного диаметра d_1 степень пластической деформации определяется как

$$\varepsilon = \frac{d_0}{d_1} = \ln \lambda. \quad (4.27)$$

Тогда параметр a_0 , используемый для определения, будет выражен следующим образом:

$$a_0 = \sqrt{\psi_{AR} \psi \ln \lambda \left(1 + \frac{m(\ln \lambda)^n}{n+1} \right)}. \quad (4.28)$$

Выражение (4.28) определяет распределение остаточных напряжений в трубах после прокатки из трансверсально-изотропных материалов, где видно, что при увеличении величины обжатия λ уровень остаточных напряжений будет повышаться.

Таким образом, представленные методики позволяют определить остаточные напряжения в цилиндрических трубных изделиях после процессов пластического деформирования анизотропных материалов.

4.2. Влияние остаточных напряжений на прямолинейность прутковых изделий

В реальных условиях при производстве прутковых изделий возможно нарушение осевой симметрии из-за распределения остаточных напряжений [2]. Нарушение прямолинейности в прутках главным образом связано с нарушением симметрии осевых напряжений

σ_z , которое возможно из-за различия условий трения по периметру заготовки в зоне деформации, а также за счет неудовлетворительного центрирования заготовки относительно оси волочения. Нарушение симметрии распределения остаточных осевых напряжений можно учесть, используя выражение для определения осевой компоненты тензора осевых остаточных напряжений (2.35)

$$\sigma_z = \frac{1}{2} (2\bar{r}^2 - 1) (\bar{a}_1 + \Delta\sigma \sin \theta), \quad (4.29)$$

где $\Delta\sigma$ – разность напряжений, характеризующая асимметрию распределения осевых остаточных напряжений; θ – окружное направление (рис. 4.3).

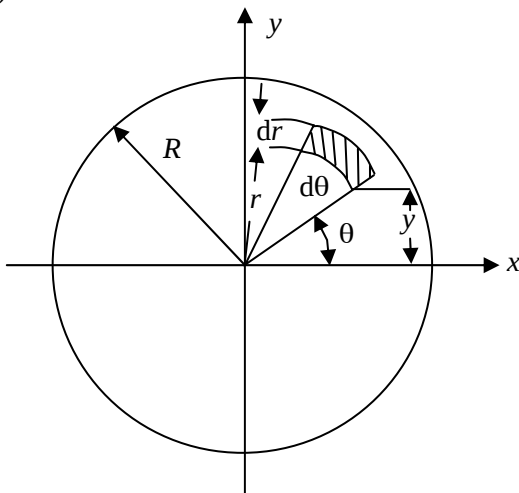


Рис. 4.3. Сечение прутковой заготовки

Последующий расчет требует перехода от цилиндрической к декартовой системе координат с целью определения результирующего изгибающего момента.

Результирующий изгибающий момент от осевых остаточных напряжений запишется в виде следующего выражения:

$$M_x = \iint_F \sigma_z y dF, \quad (4.30)$$

где F – площадь пруткового изделия.

При этом из геометрических соотношений имеем

$$\left. \begin{aligned} dF &= r dr d\theta = R^2 \bar{r} d\bar{r} d\theta, \\ y &= r \sin \theta = R \bar{r} \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

где по-прежнему $\bar{r} = r / R$.

Подставляя выражения (4.29) и (4.31) в (4.30), получим

$$M_x = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (2\bar{r}^2 - 1) (\bar{a}_1 + \Delta\sigma \sin \theta) R^3 \bar{r}^2 \sin \theta d\bar{r} d\theta. \quad (4.32)$$

После интегрирования выражения (4.32) по площади сечения, подстановки пределов интегрирования и упрощений получим результирующий изгибающий момент от асимметричных остаточных осевых напряжений

$$M_x = \frac{\pi}{30} R^3 \Delta\sigma. \quad (4.33)$$

Под действием изгибающего момента от остаточных напряжений прутковая заготовка принимает криволинейную форму, геометрия которой определяется уравнением изгиба стержней [7]

$$\frac{1}{R_0} = \frac{M_x}{EI_x}, \quad (4.34)$$

здесь $I_x = \frac{\pi R^4}{4}$ – осевой момент инерции стержня круглого сечения;

R_0 – радиус кривизны стержня.

С учетом соотношения (4.33) из выражения (4.34) получим радиус кривизны пруткового изделия:

$$R_0 = \frac{2\Delta\sigma}{15ER}. \quad (4.35)$$

При известном $\Delta\sigma$ можно прогнозировать возможную криволинейность пруткового изделия после волочения.

Соотношение (4.35) позволяет решать и обратную задачу – определять асимметрию распределения остаточных напряжений для полученной при волочении криволинейности прутковой заготовки.

$$\Delta\sigma = \frac{15}{2} \frac{ER}{R_0}. \quad (4.36)$$

Таким образом, в работе предложена методика оценки криволинейности пруткового или проволочного изделия при наличии асимметрии остаточных напряжений.

4.3. Асимметрия остаточных напряжений и криволинейность трубных изделий

Рассмотрим влияние условий пластического деформирования трубных изделий на появление асимметрии распределения остаточных напряжений в соответствии с выражениями (4.21). Как и в случае деформирования прутков, нарушение симметрии в трубах для осевых напряжений σ_z можно учесть следующим образом:

$$\sigma_z = \mu \left[2(\bar{r} - 1)(\bar{r} - \bar{R}) + \bar{r}(2\bar{r} - 1 - \bar{R}) \right] (\bar{a}_1 + \Delta\bar{a}_1 \sin \theta), \quad (4.37)$$

где $\bar{r} = \frac{r}{R_1}$, $\bar{R} = \frac{R_2}{R_1}$, $\bar{a}_1 = R_1^2 \cdot a_0$; $\Delta\bar{a}_1$ – разность напряжений, характеризующая асимметрию; θ – окружное направление (рис. 4.4).

Перейдем от цилиндрической к декартовой системе координат с целью определения результирующего изгибающего момента [8].

Результирующий изгибающий момент от осевых остаточных напряжений запишется следующим образом:

$$M_x = \iint_F \sigma_z y dF, \quad (4.38)$$

где F – площадь сечения трубы.

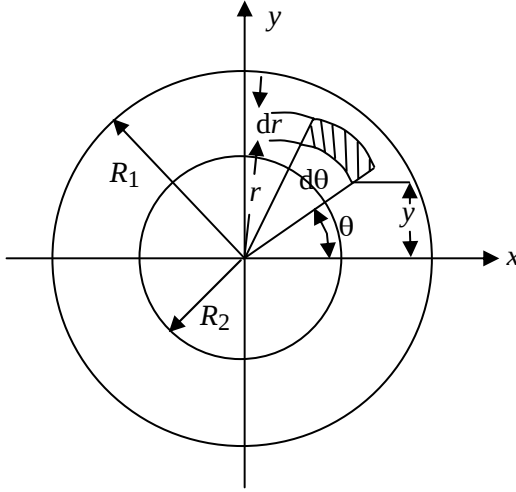


Рис. 4.4. Сечение трубы

При этом из геометрических соотношений имеем

$$\begin{aligned} dF &= r dr d\theta = R_1^2 \bar{r} d\bar{r} d\theta, \\ y &= r \sin \theta = R_1 \bar{r} \sin(\theta). \end{aligned} \quad (4.39)$$

Подставляя (4.39) и (4.37) в (4.38), получим результирующий момент

$$M_x = \int_{\frac{R_2}{R_1}}^1 \int_0^{2\pi} \left(\mu \left[2(\bar{r} - 1)(\bar{r} - \bar{R}) + \bar{r}(2\bar{r} - 1 - \bar{R}) \right] \times \right. \\ \left. \times (\bar{a}_1 + \Delta \bar{a}_1 \sin \theta) R_1^3 \bar{r}^2 \right) \sin \theta d\bar{r} d\theta. \quad (4.40)$$

После интегрирования выражения (4.40) по площади сечения, подстановки пределов интегрирования и упрощений получим результирующий изгибающий момент от ассиметричных остаточных осевых напряжений:

$$M_x = \left(\frac{1}{20} R_1^3 - \frac{1}{12} R_1^2 R_2 - \frac{1}{20} \frac{R_2^5}{R_1^2} + \frac{1}{12} \frac{R_2^4}{R_1} \right) \Delta \bar{a}_1 \cdot \pi \cdot \mu. \quad (4.41)$$

Под действием изгибающего момента от остаточных напряжений трубная заготовка принимает криволинейную форму, геометрия которой определяется уравнением (4.34), где $I_x = \pi \frac{R_1^4}{4} \left(1 - \frac{R_2^4}{R_1^4} \right)$ – осевой момент инерции трубы; R_0 – радиус кривизны трубной заготовки.

С учётом соотношения (4.41) получим радиус кривизны стержневой заготовки:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{\mu \cdot \Delta \bar{a}_1 (3 - 5\bar{R} - 3\bar{R}^5 + 5\bar{R}^4)}{15E \cdot R_1 (1 - \bar{R}^4)}. \quad (4.42)$$

При известном $\Delta \bar{a}_1$ можно прогнозировать возможную криволинейность трубной заготовки после волочения.

Так же как и для прутковых заготовок, соотношение (4.42) позволяет решить обратную задачу определения асимметрии распределения остаточных напряжений для полученной при волочении криволинейной трубной заготовки

$$\Delta \bar{a}_1 = \frac{15R_1 \cdot E (1 - \bar{R}^4)}{R_0 \cdot \mu (3 - 5\bar{R} - 3\bar{R}^5 + 5\bar{R}^4)}. \quad (4.43)$$

На рис. 4.5 приведены расчётные зависимости радиуса криволинейности трубы $R_1 = 0,1$ м при различных соотношениях R_2/R_1 от параметра $\Delta \bar{a}_1 / E$, характеризующего механические свойства материала и распределение остаточных напряжений ($\mu = 0,32$).

Из рис. 4.5 следует, что с увеличением отношения $\frac{\Delta \bar{a}_1}{E}$ криволинейность возрастает по линейной зависимости.

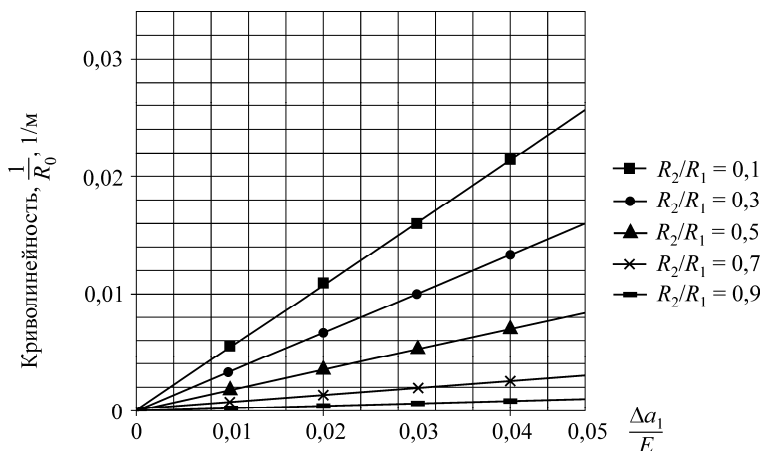


Рис. 4.5. Криволнейность трубных изделий

Построим график зависимости кривизны трубы от толщины стенки. На рис. 4.6. приведены расчетные зависимости кривизны от толщины стенки трубы для различных материалов.

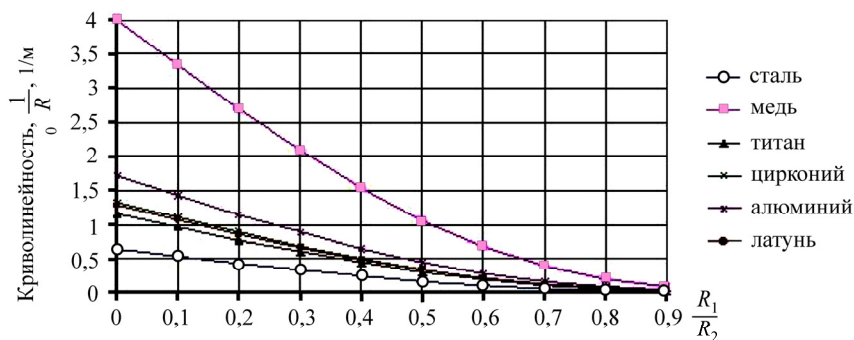


Рис. 4.6. Зависимость криволнейности от относительной толщины стенки трубы R_1/R_2

Из рис. 4.6 следует, что с увеличением толщины стенки трубы кривизна изделий уменьшается.

Криволинейность изделий, как прутковых, так и трубных, исправляется правкой на специальных правильных машинах. Однако при правке можно ожидать появления дополнительных остаточных напряжений.

Таким образом, с помощью приведенной методики возможна оценка криволинейности изделий по уровню остаточных напряжений.

4.4. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при производстве трубных изделий

Закономерности распределения остаточных напряжений зачастую носят противоречивый характер, затрудняющий анализ закономерностей формирования остаточных напряжений [9]. Одной из причин данного несоответствия может быть появление вторичных пластических деформаций, вызванных самими технологическими остаточными напряжениями. Вторичные пластические деформации могут привести к необратимым изменениям формы и непрогнозируемому перераспределению остаточных напряжений в металлоизделиях.

Оценим возможность появления вторичных пластических деформаций за счет достижения уровня остаточных напряжений некоторого предельного состояния, соответствующего переходу изделий от упругого к пластическому состоянию. Так, для осесимметричных трубных металлоизделий (рис. 4.7) распределение упругих остаточных напряжений определяется соотношениями (4.21), а напряженное состояние характеризуется их интенсивностью:

$$\sigma_i = \frac{a_0}{\sqrt{2}} \sqrt{(Pr)^2 + ((1-\mu)Sr + Pr)^2 + ((2\mu-1)Sr + (\mu-1)Pr)^2}, \quad (4.44)$$

где $Pr = r(2r - R_1 - R_2)$, $Sr = (r - R_1)(r - R_2)$.

Для трубных изделий характерными точками, в которых возможно появление вторичных пластических деформаций, являются точки, расположенные на внутренней и внешней поверхности. Вы-

ражение (4.44) для внутренней поверхности заготовки ($r = R_2$), учитывая, что $Sr_2 = 0$, $Pr_2 = R_2(R_2 - R_1)$ при $r = R_2$, запишется в виде

$$\sigma_i = \frac{a_0 |Pr_2|}{\sqrt{2}} \sqrt{2 + (\mu - 1)^2}. \quad (4.45)$$

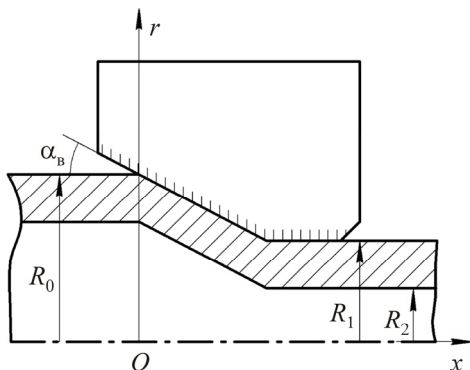


Рис. 4.7. Трубная заготовка при волочении

Соответственно для внешней поверхности ($r = R_1$), учитывая, что $Sr_1 = 0$, $Pr_1 = R_1(R_1 - R_2)$ при $r = R_1$, получим

$$\sigma_i = \frac{a_0 |Pr_1|}{\sqrt{2}} \sqrt{2 + (\mu - 1)^2}. \quad (4.46)$$

Из сопоставления соотношений (4.45) и (4.46) следует, что максимальная интенсивность остаточных напряжений соответствует внешней поверхности заготовки, где и следует ожидать появления вторичных пластических деформаций.

Условием появления вторичных пластических деформаций является условие перехода в пластическое состояние [10]:

$$\sigma_i = \sigma_T, \quad (4.47)$$

где σ_T – предел текучести материала заготовки.

Таким образом, из условия пластичности (4.47) можно получить предельное значение параметра a_0 , соответствующего появлению вторичных пластических деформаций:

$$a_0^{\text{np}} = \frac{\sigma_{\text{т}} \sqrt{2}}{Pr_1 \sqrt{2 + (\mu - 1)^2}}. \quad (4.48)$$

Параметр a_0 определяется условиями осесимметричного деформирования в коническом технологическом инструменте и физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала в следующем виде [11]:

$$a_0 = \frac{\sigma_{\text{т}} \psi^*}{R_1^2} \sqrt{\frac{60}{(1 - \mu^2) \bar{B}}} \varepsilon, \quad (4.49)$$

где $\bar{R} = R_2 / R_1$; $\bar{B} = 7(1 + \bar{R}^4) + 22\bar{R}^2 - 18\bar{R}(1 + \bar{R}^2)$; $\psi^* = (\psi E / \sigma_{\text{т}})^{1/2}$.

Приравняв соотношения (4.48) и (4.49), найдем предельную степень деформации, в результате которой появятся вторичные пластические деформации:

$$\varepsilon_{\text{np}} = \frac{(1 - \mu^2) K_R}{30(2 + (\mu - 1)^2)(\psi^*)^2}, \quad (4.50)$$

где $K_R = \frac{\bar{B} R_1^4}{Pr_1^2}$ – постоянная, зависящая от геометрических размеров трубной заготовки.

Для пластического состояния характерным является равенство $\mu = 0,5$, в соответствии с которым выражение (4.50) принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{\text{np}} = \frac{0,011 K_R}{(\psi^*)^2} = \frac{0,011 \sigma_{\text{т}} K_R}{\psi E}. \quad (4.51)$$

В разд. 1.5 для определения степени деформации при пластическом деформировании трубной заготовки волочением использована формула (1.40), которая для случая волочения за несколько переходов примет следующий вид:

$$\varepsilon_{\Sigma} = 2 \ln \lambda_{\Sigma} + \frac{4n(1-a^3)}{3\sqrt{3}(1-a^2)} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}, \quad (4.52)$$

где λ_{Σ} – суммарная вытяжка; n – количество переходов.

Из равенства (4.55) в соответствии с соотношением (4.54) можно определить количество переходов многократного волочения, соответствующих появлению вторичных пластических деформаций.

Таким образом, предложена методика оценки возможного появления вторичных пластических деформаций от остаточных напряжений, возникающих при пластической деформации осесимметричных трубных металлоизделий. Методика позволяет определить количество переходов многократного деформирования, соответствующих появлению вторичных пластических деформаций от остаточных напряжений в трубных металлоизделиях и последующему перераспределению остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
2. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и прямолинейность прутковых изделий после волочения // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 18–19.
3. Колмогоров Г.Л. Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Формирование остаточных технологических напряжений и прочность анизотропных осесимметричных прутковых металлоизделий // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 395–400.
4. Кузнецова Е.В., Балабанов Д.С. Остаточные напряжения в трубных металлоизделиях с учетом анизотропии материалов / При-

кладная математика и механика: материалы науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007.

5. Кузнецова Е.В., Мерзлякова О.Н. Влияние анизотропии механических свойств на уровень остаточных напряжений в трубах // Прикладная математика и механика: материалы науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008.

6. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при производстве трубных изделий // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 4. – С. 30–31.

7. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов. – Киев: Вища школа, 1979. – 696 с.

8. Пат. 2290616 РФ. Способ определения асимметрии остаточных напряжений / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, Т.Е. Мельникова, заявитель и патентообладатель Перм. гос. техн. ун-т. – № 2005115352/28, заявл. от 20.05.2005, опубл. 27.12.2006. Бюл. № 36.

9. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М: Наука, 1989. – 321 с.

10. Колмогоров Г.Л. Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при волочении / Изв. вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 12. – С. 16–17.

11. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и потенциальная энергия при изготовлении трубных заготовок // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 19–21.

Глава 5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ЦИРКОНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В настоящее время актуальной является разработка технологий изготовления оборудования для атомной промышленности. Наиболее широкое применение в ядерных реакторах имеют циркониевые сплавы, обладающие высокой коррозионной стойкостью, малым сечением захвата тепловых нейтронов, низким содержанием случайных примесей в сплаве и др. Из циркониевых сплавов в атомной промышленности изготавливаются различные изделия, такие как тонкостенные трубы для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) – главных конструктивных элементов активной зоны ядерного реактора, содержащих ядерное топливо [1], тонкостенные трубы для каналов водяных и кипящих реакторов, прутки для пробок-заглушек ТВЭлов и др. Наиболее прецизионными из этих изделий являются трубы для оболочек ТВЭлов, так как выход ТВЭлов из строя с разгерметизацией оболочек абсолютно недопустим. В связи с этим необходимо исследовать параметры, которые влияют на прочность, износостойкость и надежность таких изделий.

Оболочки ТВЭлов изготавливаются обычно на специализированных заводах. Это связано со специфическими условиями производства изделий из циркониевых сплавов: использование специальных вакуумных печей, правильных машин, травильных установок и пр. Любая схема производства циркониевых труб включает в себя обработку давлением. Известно, что практически все технологические процессы пластического деформирования связаны с появлением в готовых изделиях самоуравновешенной системы технологических остаточных напряжений.

Как показано в гл. 1, на величину и распределение остаточных напряжений по объему изделия влияют основные технологические параметры процесса обработки, физические свойства и механические характеристики материала. Для того чтобы оценить уровень остаточ-

ных напряжений, возникающих в циркониевых изделиях после пластического деформирования, рассмотрим особенности физических и механических свойств циркония и циркониевых сплавов, деформационное поведение и влияние параметров технологии производства на качество, технологическую и конструкционную прочность и точность циркониевых изделий.

5.1. Виды циркониевых изделий и области применения

5.1.1. Применение циркониевых изделий в атомной промышленности

Из циркониевых сплавов в атомной промышленности изготавливаются такие изделия, как: особотонкостенные трубки для оболочек твэлов длиной до 4,5 м, диаметром 8–20 мм, со стенкой толщиной 0,3–1 мм; тонкостенные трубы для каналов водо-водяных и кипящих реакторов длиной до 8 м, диаметром 80–130 мм, со стенкой толщиной 3–6 мм; прутки диаметром 8–20 мм для пробок-заглушек твэлов и прутки больших диаметров для массивных концевых изделий кассет-сборок; листы толщиной 1–4 мм для изготовления кожухов кассет и каландровых труб; листы и ленты толщиной 0,3–1,5 мм для дистанционирующих решеток и других деталей кассет; проволока для тех же целей, прутки и трубы разных размеров для крепления и подвески твэлов в кассетах-сборках, а также для других деталей, находящихся в активной зоне реактора (рис. 5.1, 5.2) [2]. Наиболее ответственными изделиями являются трубки для оболочек твэлов, так как выход твэлов из строя с разгерметизацией оболочек недопустим. К твэльным трубкам предъявляются повышенные требования, важнейшие из которых высокая коррозионная стойкость, высокое качество металла, точность геометрических размеров, высокие механические свойства.

Поскольку оболочечные трубки имеют стенки толщиной менее 1 мм, а в отдельных конструкциях твэлов до 0,35–0,4 мм, внутренние дефекты в виде неметаллических включений, плен, засоров, ликвационных неоднородностей, трещин и т.п. могут быть допущены в раз-

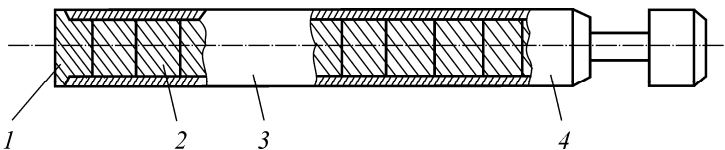


Рис. 5.1. Схематический чертеж стержневого твэла: 1 – пробка-заглушка; 2 – таблетки двуокиси урана; 3 – оболочка из циркониевого сплава

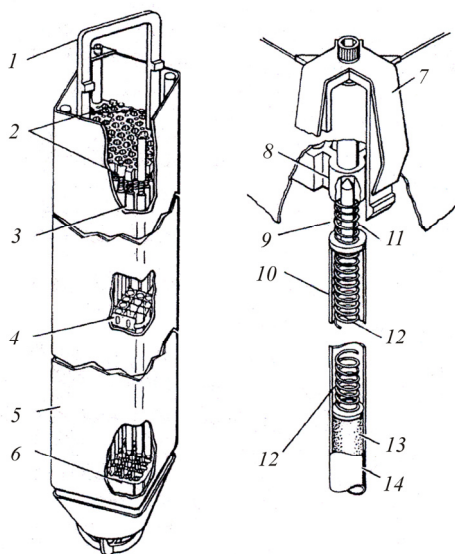


Рис. 5.2. Схема кассет кипящего реактора: 1 – подвеска; 2 – крепящие прутки; 3 – оболочка твэла из циркониевого сплава; 4 – дистанционирующая решетка; 5 – топливный канал; 6 – нижняя крепящая деталь; 7 – крепление кассеты; 8 – верхняя крепящая деталь; 9 – узел дифференциального расширения; 10 – оболочка твэла; 11 – пружина, дистанционирующая газосборник; 12 – газосборник; 13 – таблетки двуокиси урана; 14 – оболочка

мерах не более 5–10 % толщины стенки. Поэтому все трубки тщательно проверяют методом неразрушающей дефектоскопии.

Точность геометрических размеров оболочечных труб принадлежит к важнейшим параметрам труб, поскольку твэлы должны надежно крепиться в поддерживающих и дистанционирующих деталях

во избежание вибраций и фреттинг-коррозии. Практически важными являются не только точные диаметры наружной и внутренней стенок трубки, но в особенности отсутствие эксцентрисичности (разностенности). Разностенность приводит к резкому падению эффективной пластичности, выражаемой равномерным относительным тангенциальным удлинением при испытании труб внутренним давлением до разрушения.

Высокие механические свойства оболочечных труб – это возможность создания экономичных и надежных твэлов. Отметим наиболее важные показатели механических свойств труб.

1. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ при комнатной температуре, а также при эксплуатационных температурах (особенно важен в тангенциальном направлении при двухосном напряженном состоянии, характерном для растяжения оболочки внутренним давлением).

2. Предел прочности или временное сопротивление разрыву при тех же условиях.

3. Остаточное удлинение при испытании на разрыв труб в продольном, осевом и тангенциальном направлениях при комнатной и эксплуатационной температурах.

4. Предел текучести, равномерное и общее удлинение, получаемые при гидростатическом давлении жидкости внутри трубы, вызывающем разрыв трубы в условиях замкнутых концов трубы.

5. Сужение поперечного сечения: при разрыве и уменьшении толщины стенки.

6. Сопротивление усталости. В данном случае речь идет о малоцикловой усталости, когда число циклов изменений уровня мощности не превышает нескольких тысяч в год.

5.1.2. Свойства циркония

Элемент периодической системы ЦИРКОНИЙ – Zr, химический элемент с атомным номером 40, атомная масса 91,224. Расположен в группе IVB, в 4-м периоде периодической системы. Значение эффективного сечения захвата тепловых нейтронов $1,8 \cdot 10 - 29 \text{ м}^2$.

В 1789 г. М.Г. Клапрот выделил из драгоценного камня циркона оксид нового элемента. Элемент цирконий получил в 1829 швед Й.Я. Берцелиус. Этот цирконий имел много примесей. Чистый цирконий был получен в 1925 А. Ван Аркелем. Содержание в земной коре 0,02 % по массе. В свободном виде не встречается. Образует более 30 минералов. По способу получения цирконий разделяется на иодидный и губчатый (электролизный).

Цирконий – серебристо-серый металл. Принадлежит к аллотропным металлам. Существует в двух модификациях. От 273 °С до 863 °С устойчива гексагональная модификация с параметрами элементарной ячейки: $a = 0,3231$ нм, $c = 0,5146$ нм. Выше 863 °С устойчива кубическая объемно-центрированная β -модификация с параметрами решетки: $a = 0,361$ нм до точки плавления. Температура плавления 1855 °С, температура кипения 4350 °С.

Чистый цирконий пластичен, сваривается в инертной атмосфере. Наличие примесей кислорода, азота, углерода, водорода ухудшает пластичность, твердость, прочность на разрыв [2].

Переход объемно-центрированной решетки β -Zr в гексагональную плотноупакованную α -решетку имеет большое значение в технологии обработки циркония и его сплавов, так как в результате этого перехода возникает структура, определяющая свойства материала во всем диапазоне рабочих температур.

Плотность циркония ρ при комнатной температуре равна 6,5 г/см³.

Точка плавления циркония лежит между 1852 и 1857 °С. Общепринятое значение 1855 °С. Значения средней теплоёмкости C иодидного циркония в зависимости от температуры приведены ниже [3]:

Интервал температуры, °С	0–100	100–200	200–300	300–400	500–600	800–850	850–863	863–900
Теплоемкость C , Дж/(кг · К)	288	298	322	318	388	390	414	404

Теплопроводность циркония определяется с помощью отношения Видемана–Франца, т.е. через значения электропроводности. Значения коэффициента теплопроводности циркония λ приведены ниже:

Температура, °С	25	100	200	300
λ , Вт/(м · град)	21,1	20,4	19,6	18,7

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) циркония зависит от текстуры данного образца поликристаллического циркония. Это объясняется очень резко выраженной анизотропией ТКЛР по осям монокристалла циркония [2]. Основные физические свойства циркония представлены ниже [3].

Физические свойства циркония

Кристаллическая структура с размерами ячеек, Е	
α -гексагональная плотнейшая упаковка	$a = 3,228$; $c = 5,120$; $c/a = 1,59$
β -кубическая объемно-центрированная	$a = 3,61$;
Плотность (после горячей прокатки), г/см ³	6,586
Плотность (после холодной прокатки), г/см ³	6,505
Твердость (кристаллический пруток) по Роквеллу (шкала В)	25–30
Предел прочности при разрыве (прокатный брусок 6,35 мм, сошлифованный до 4,06 мм), кг/мм ²	90
Температура плавления (β -Zr), °С	1830±40
Температура кипения, °С	2900
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ К	
α -Zr (β интервале 298–1143 К) вдоль оси a	5,5
вдоль оси c	10,8
β -Zr (β интервале 1143–1600 К)	9,7
Удельное электросопротивление (кристаллический пруток), 10 ⁻⁶ Ом·см	45

Что касается механических свойств циркония, то наиболее вероятными можно считать значения при 20 °С: модуль Юнга $E = 10^5$ МПа; модуль сдвига $G = 3,55 \cdot 10^4$ МПа. Гексагональная кристаллическая структура у α -Zr обуславливает заметно выраженную анизотропию упругих свойств. Анизотропия упругих свойств характерна и для поликристаллического циркония и зависит от состояния металла. Холодная деформация несколько увеличивает нормальный модуль упругости, заметной становится и его анизотропия [4].

С повышением температуры модуль упругости уменьшается. Данные об изменении модуля упругости в зависимости от температуры для йодидного циркония приведены в табл. 5.1. Модуль сдвига и коэффициент Пуассона йодидного циркония при комнатной температуре соответственно равны $3,35 \cdot 10^3$ кгс/мм² и 0,31–0,33. Модуль упругости губчатого циркония мало отличается от модуля йодидного металла и при комнатной температуре составляет $(9\text{--}9,5) \cdot 10^3$ кгс/см².

Систематические данные о влиянии легирования на упругие свойства циркония отсутствуют. Однако сведения об упругих свойствах промышленных сплавов позволяют считать, что легирование циркония элементами Sn, Fe, Cr, Ni, Cu и Mo в соответствующих пределах приводит к некоторому увеличению модулей упругости и сдвига.

Значения модулей упругости циркония и его сплавов в интервале температуры 20–500 °С приведены в табл. 5.1. Модуль сдвига сплавов Zr–1% Nb и Zr–2,5% Nb при 20 °С составляет $3,55 \cdot 10^3$ и $3,2 \cdot 10^3$ кгс/мм² соответственно. Данные о влиянии условий эксплуатации (облучения и наводороживания) на характеристики упругости циркония и его сплавов весьма ограничены и порой противоречивы. Было установлено, что облучение интегральным потоком тепловых нейтронов $7 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см² увеличивает модуль упругости при комнатной температуре на 4–9 % для сплава циркалой-2 и на 2–9 % для сплава циркалой-3. В то же время после облучения в интегральном потоке быстрых нейтронов $2,7 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см²

Таблица 5.1

Модуль упругости циркония и его сплавов

Сплав	Направление	Модуль упругости, 10^3 кгс/мм ²					
		20 °С	100 °С	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С
Zr (йодидный)	–	8,3–9,6	7,8–9,2	7,1–8,6	6,3–7,9	6,0–7,2	4,8–6,5
Zr (губчатый)	–	9,0–9,2	8,6–8,8	7,9–8,0	7,0–7,4	6,0–6,8	5,2–6,2
Циркалой-2	Прод.	9,6	9,1	8,5	7,9	7,35	6,8
	Попер.	10,4	10,1	9,4	8,8	8,15	7,5
Циркалой-4	Прод.	8,8	8,5	8,0	7,45	6,9	6,4
	Попер.	9,9	9,4	8,8	8,15	7,5	6,9
Zr–1% Nb	Прод.	9,3	8,9	8,4	8,0	7,7	7,1
Zr-ATR (0,5% Cu+0,5% Mo)		11,0	10,3	9,6	8,8	7,9	–
Zr–2,5% Nb		9,1	8,6	8,2	7,8	7,5	7,0
Zr–2,5% Nb (+0,01 % H ₂)		9,6	8,9	8,15	7,75	7,15	6,5
Zr–2,5% Nb (+0,03% H ₂)		9,85	9,25	8,5	8,05	7,2	6,45
Zr–2,5% Nb (+0,05% H ₂)		10,3	9,65	8,75	8,3	7,5	6,4

Примечание. Все данные относятся к сплавам в отожженном состоянии.

при температуре ниже 100 °С модуль упругости сплава циркалой-2 не изменяется [5].

Исследование влияния наводороживания на упругие свойства сплавов циркония позволило обнаружить двойственный характер эффекта присутствия водорода. В области температуры существования гидридов в наводороженном сплаве Zr–2,5% Nb модуль упругости выше, чем в ненаводороженном (см. табл. 5.1), при этом различие тем больше, чем выше содержание водорода в сплаве. При повышении температуры происходит растворение гидридов, что

приводит к снижению модуля упругости, и в области температуры существования твердого раствора водорода в сплаве его модуль упругости ниже, чем в ненаводороженном состоянии.

Отличительной особенностью циркония и большинства его сплавов является исключительная ковкость, сохраняющаяся даже при температурах жидкого азота. Эта высокая ковкость объясняется тем, что цирконий может деформироваться в трех плоскостях сдвига и во многих плоскостях двойникования, и сопротивление циркония пластической деформации при пониженных температурах меньше, чем в случае металлов, подобных магнию, цинку и бериллию, у которых возможные направления деформации более ограничены. Обработка циркония давлением затруднена вследствие его гексагональной кристаллической структуры и высокой степени быстро нарастающего упрочнения (наклепа) в процессе деформации [5].

В большинстве случаев трудности при обработке давлением возникают из-за налипания металла на рабочую поверхность инструмента, что является характерным свойством не только циркония, но также титана и гафния. Если приняты меры по предотвращению налипания, металл может легко обрабатываться давлением обычными методами.

Значение твердости предварительно отожженного чистого циркония колеблется от 75 до 150 единиц при испытании вдавливанием алмазной пирамиды, предел текучести равен 5,6–10,5 кг/мм², предел прочности при растяжении равен 17,5–28,1 кг/мм². При оценке механических свойств циркония важно знать условия отжига. Цирконий обладает высокой температурой плавления, однако по своим механическим свойствам он более сходен с металлами, имеющими более низкую температуру плавления. Несмотря на высокие температуры плавления, цирконий и его сплавы обладают неудовлетворительными высокотемпературными механическими свойствами и являются малоперспективными для использования их при температурах выше 500° [5].

5.1.3. Коррозионная стойкость

Чистый цирконий обладает наиболее высокой коррозионной стойкостью, и любой легирующий элемент или примесь ухудшают это свойство. Наличие весьма малых количеств таких примесей, как азот, углерод, титан, алюминий, кремний и некоторых других в той или иной мере увеличивает скорость коррозии циркония, поэтому необходимо ввести в цирконий один, два или более легирующих элементов, которые парализуют вредное действие примесей. Поскольку циркониевые твэльные трубки должны работать не менее трех лет, а каналные – 30 лет, коррозионная стойкость циркония должна быть достаточной для такого срока службы; ею обладают только специально легированные циркониевые сплавы. Но легирование циркония необходимо не только ради повышения коррозионной стойкости. Циркониевые трубы подвергаются значительным (часто знакопеременным) напряжениям, как правило, двухосным; в процессе эксплуатации на трубах осаждаются продукты коррозии деталей первого контура, соли жесткости и т.п., в результате чего трубки–оболочки твэлов перегреваются. Эти условия эксплуатации требуют от циркониевых труб высоких механических свойств в диапазоне температур от комнатной до рабочей (300–380 °С) и до 1000–1200 °С (в случае потери теплоносителя аппаратом водо-водяного энергетического реактора ВВЭР): высокие пределы текучести и прочности, минимальная скорость ползучести, высокие длительная прочность и сопротивление усталостному разрушению [2].

Известно, что облучение в реакторе значительно влияет на механические свойства циркония: повышает прочностные характеристики. Вместе с тем при облучении понижаются характеристики пластичности, вязкости, что крайне вредно. Поэтому повышение прочностных характеристик труб путем легирования и термомеханической обработки необходимо проводить, учитывая сохранение необходимой пластичности металла при его эксплуатации в реакторе.

5.1.4. Принципы легирования циркония

Чистый цирконий характеризуется относительно низкими прочностными свойствами и высокой пластичностью. Механические свойства его заметно зависят от степени загрязненности примесями, содержание которых, в свою очередь, определяется способом производства. При 20 °С пределы текучести и прочности наиболее чистого металла, полученного иодидным рафинированием, составляют соответственно 13 и 28,5 кгс/мм², а относительное удлинение и сужение – 14 и 40 %. Цирконий, получаемый магниетермическим способом (губчатый цирконий), более прочен; при 20 °С пределы прочности и текучести его составляют 48 и 30,5 кгс/мм², а относительные удлинение и сужение – 13,7 и 31,4 %.

Одним из способов повышения прочности циркония является легирование. Большинство элементов характеризуются ограниченной, изменяющейся с температурой растворимостью в цирконии (за исключением Ti и Hf) и образуют с ним химические соединения. В связи с этим среди сплавов циркония в зависимости от механизма упрочнения можно условно выделить сплавы, прочность которых определяется упрочнением твердого раствора, и сплавы, упрочняющиеся за счет дисперсионного твердения. К сплавам первой группы в первую очередь относятся сплавы с Ti и Hf, образующими непрерывные твердые растворы, а также сплавы с кислородом и азотом, у которых диаграммы состояния с цирконием характеризуются наличием широкой области твердых растворов. Ко второй группе относятся сплавы с элементами, у которых диаграммы состояния с цирконием характеризуются наличием эвтектического или эвтектоидного превращений, например Fe, Cr, Ni, Mo, Al, W, V и Cu [4].

Увеличение предела текучести циркония можно осуществить за счет легирования кислородом, которое при комнатной температуре прямо пропорционально содержанию кислорода и подчиняется выражению $\sigma_{0,2} = 31,3C_{O_2}^{0,5}$, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; C_{O_2} – содержание O_2 (ат. %). Введение азота более эффективно. Однако упрочняющий эффект вследствие легирования этими элементами заметно

снижается при повышении температуры до 300 °С и выше. Так, предел прочности сплава циркония с 0,2% O₂ снижается от 44 до 16 кгс/мм² при повышении температуры испытания от 20 до 315 °С.

Сплавы с Al являются наиболее прочными из известных сплавов циркония, особенно при повышенной температуре. Пределы прочности и текучести сплава Zr – 2% Al составляют 32,4 и 22,5 кгс/мм² при 500 °С и 38,3 и 17,3 кгс/мм² при 650 °С. Однако эти сплавы характеризуются низкой коррозионной стойкостью и практического применения не нашли. Сплавы с Sn менее прочны, чем сплавы с Al, но уровень их прочности достаточно высок и при комнатной, и при повышенной температурах. Благодаря сочетанию относительно высоких прочностных характеристик и коррозионной стойкости в воде при повышенной температуре сплавы с оловом явились основой создания наиболее широко используемых в настоящее время сплавов циркония – циркалов. Влияние легирования на прочность циркония при 20 и 500 °С показано на рис. 5.3 [4].

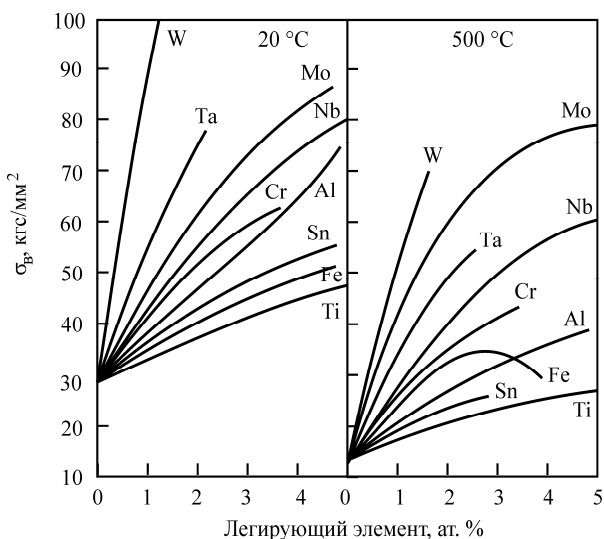


Рис. 5.3. Влияние легирования на предел прочности циркониевого сплава

Легирование циркония одним из элементов в большинстве случаев не обеспечивает получения требуемого комплекса коррозионных и прочностных свойств, и из двойных сплавов циркония практическое применение нашли только сплавы с 1 и 2,5% Nb, 0,5% Ta и 2,5% Cu.

Из большого количества разработанных к настоящему времени многокомпонентных сплавов циркония нашли практическое применение или рассматриваются как перспективные следующие сплавы: оженит – 0,5; Zr – 3% Nb – 1 % Sn; Zr – 0,6% Mo – 0,5% Cu; Zr – 2,5% Nb – 0,5% Cu; Zr – 1,2% Cr – 0,1 % Fe; Zr – 1% Cu – 0,6% Fe. Механические свойства этих сплавов, а также бинарных сплавов с Ta и Nb и сплавов типа циркалой приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Механические свойства при растяжении некоторых сплавов циркония [4]

Сплав*	20 °С			200 °С		
	σ_b , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	Δ , %	σ_b , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
Zr (йодидный)	22	8	45	14	5	55
Циркалой-2	48	31	22	25	15	34
Циркалой-4	49	31	28	30	18	32
Zr–0,5% Ta	30	13	40	20	8	42
Zr–1% Nb	35	20	30	26	16	31
Zr–2,5% Nb	45	28	25	32	22	24
Zr–5% Nb	65	–	20	57	–	17
Оженил-0,5	29	12	33	20	8	42
Zr– 3% Nb–1% Sn	60	46	28	45	34	30
Zr–1,2% Cr–0,1% Fe**	56	40	13	–	–	–
Ц2М	50	35	15	37	24	16

Сплав*	20 °С			200 °С		
	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	Δ , %	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
Zr–0,6% Cu–0,5% Mo	48	31	25	31	20	33
Zr–1% Cu–0,6% Fe	47	36	20	–	–	–
Zr–0,4% Al–3,4% Nb	65	–	30	45	–	35
Zr–3,9% Al–0,5% Mo	98	–	18	80	–	20
Zr–5,3% Al–1,1% Mo	95	–	18	80	–	22
Zr–1,5% Al–1,1% Mo	91	–	20	70	–	25

* Листовой материал, отожженный в ($\alpha+\beta$)-области.

** Листовой материал, закаленный в заготовке, холоднокатаный и состаренный.

Из табл. 5.2 видно, что наиболее прочными являются сплавы, содержащие ниобий. Для них характерна относительно малая степень разупрочнения при повышении температуры. Предел текучести сплавов типа циркалой при повышении температуры от 20 до 300 °С уменьшается практически в три раза, в то время как для сплавов циркония с ниобием, например Zr – 2,5% Nb менее чем в два раза.

Для большинства сплавов циркония свойственен монотонный характер увеличения пластичности и снижения характеристик прочности с повышением температуры до 400 °С, с последующим более заметным возрастанием разупрочнения, начиная с температуры – 450 °С [4].

Благодаря высоким прочностным характеристикам сплавы, легированные ниобием, рассматриваются как наиболее перспективные конструкционные материалы для изготовления высоконагруженных деталей и конструкций, например технологических каналов, работающих при температуре до 300–350 °С.

Важнейшие требования к легированию, включая и специфические черты технологии изделий, таковы [2]:

1) легирующий элемент должен иметь небольшое сечение захвата тепловых нейтронов, чтобы не обесценить основное положительное качество циркония – малое сечение захвата нейтронов;

2) легирующий элемент должен обеспечивать коррозионную стойкость твэльных оболочек, канальных труб и других деталей активной зоны на весь срок эксплуатации;

3) легирующий элемент должен обеспечивать механическую надежность твэлов и каналов при всех возможных режимах работы реактора, включая скачки мощности и аварийные ситуации;

4) легирующий элемент не должен образовывать относительно долгоживущих радиоактивных нуклидов с сильным α -излучением, так как это удорожает разгрузку реактора, хранение и транспортировку отработавших твэлов.

Антикоррозионное легирование циркония имеет целью подавление вредного влияния азота и некоторых других примесей и тем самым стабилизацию высокой коррозионной стойкости чистого циркония. Выбор легирующих элементов должен делаться на основе некоторых теоретических представлений о механизме коррозии циркония.

5.1.5. Промышленные циркониевые сплавы

Ряд положительных физических и механических свойств циркония, таких как высокая коррозионная стойкость, исключительная ковкость, а также малое поперечное сечение захвата тепловых нейтронов, позволяет использовать циркониевые изделия в различных областях техники. Необходимо отметить, что в промышленности чистый цирконий почти не используется. В основном применяют изделия из циркониевых сплавов. Легирование циркония еще в большей степени повышает коррозионную стойкость и прочностные характеристики.

К основным промышленным сплавам циркония можно отнести сплавы, которые используются в атомной энергетике: сплавы циркалой-2 и циркалой-4 ((Zr–1,5% Sn, Fe, Cr, Ni, O) и (Zr–1,5Sn, Fe, Cr, O,

Ni < 0,007 %) соответственно); сплав Н-1 (Zr–1% Nb), разработанный специально для оболочечных труб и прутков для пробок-заглушек; сплав Н-2,5 (Zr–2,5% Nb), разработанный специально для канальных труб, а также листа, ленты, прутков и труб для различных деталей активной зоны, таких как шестигранные кожухи для трубчатых и прутковых подвесок, твэльных сборок реакторов РБМК (кипящих реакторов) и др.

В табл. 5.3 представлены механические свойства труб диаметром 9,15X7,7 мм из сплава Н-1 в зависимости от содержания кислорода (трубы отожжены после холодной прокатки с обжатиюм порядка 50 % при 580 °С в течение 3 ч). Кроме определенного уровня механических свойств, особенно радиального предела текучести при рабочих температурах 350–400 °С, весьма существенна скорость тангенциальной ползучести при этих температурах.

Таблица 5.3

Механические свойства труб диаметром 9,15X7,7 мм из сплава Н-1

Содержание кислорода, %	Температура испытаний						Направление
	20 °С			350–380 °С			
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	
0,05	400–430	240–270	45–50	200–230	90–100	45–50	Осевое
0,05	350–360	290–310	35–38	160–180	130–160	25–33	Попер.
0,13	520–530	330–350	40–42	220–230	120–130	45–50	Осевое
0,16	580–590	420–430	39–41	250–260	150–160	45–48	Осевое

Особенно важно значение сопротивления ползучести оболочек твэлов мощных реакторов ВВЭР (водо-водяных реакторов), в которых давление воды достигает 16 МПа. При этом температура на поверхности твэлов доходит до 350 °С, в ряде случаев может достигать 380–400 °С [2].

5.2. Остаточные напряжения в трубах из циркониевых сплавов после пластического деформирования

Герметизация оболочки твэлов необходима для исключения попадания продуктов деления топлива в теплоноситель, что может повлечь распространение радиоактивных элементов за пределы активной зоны. Поскольку уран, плутоний и их соединения химически активны, их химическая реакция с водой может повлечь деформацию твэла и другие нежелательные последствия. Материал оболочки твэлов должен обладать высокой коррозионной, эрозионной и термической стойкостью; он не должен существенно изменять характер поглощения нейтронов в реакторе. Разрушение оболочек твэлов может привести к серьезным последствиям, поэтому к производству циркониевых труб предъявляют повышенные требования [2]:

- 1) малое сечение захвата тепловых нейтронов оболочкой, определяемое содержанием примесей и толщиной стенки труб;
- 2) достаточная прочность и пластичность оболочки, определяемые прочностью и пластичностью материала в осевом и особенно тангенциальном направлениях, ориентацией гидридов и отсутствием дефектов в трубах;
- 3) высокое сопротивление коррозии в среде теплоносителя, которое зависит от содержания примесей в сплаве, наиболее благоприятной структуры материала, соответствующего качества поверхности труб и ее очистки, особенно от фторидов;
- 4) герметичность в течение длительного срока службы;
- 5) высокая точность геометрических (диаметр, толщина стенки) размеров;
- 6) отсутствие дефектов в стенке.

Эти требования удовлетворяются путем выполнения и соблюдения определенных технологических режимов и параметров в процессе изготовления труб для оболочек твэлов и применением методов контроля в ходе их изготовления.

Процессы изготовления циркониевых изделий связаны с использованием различных методов обработки давлением, что приво-

дит к появлению в готовых изделиях технологических остаточных напряжений. Чтобы избежать нежелательных остаточных напряжений или уменьшить их до допустимых значений, необходимо знать закономерности формирования остаточных напряжений и зависимость их от технологических параметров процесса обработки материала. Технологический процесс при этом должен обеспечить благоприятное распределение остаточных напряжений и повышение эксплуатационных характеристик готовых изделий.

5.2.1. Производство оболочек твэлов

Одним из основных этапов производства циркониевых труб является холодная прокатка. Например, как показано на рис. 5.4, для циркония применяется прокатка труб на станах типа «Рокрайт», обеспечивающая получение больших обжатий за один проход. В этом процессе участвуют два основных вала, смонтированных в клети, движущейся возвратно-поступательно на конической оправке. Труба обрабатывается при помощи полукруглых ручьевых калибров, которые перемещаются возвратно-поступательно, обжимая трубу на оправке.

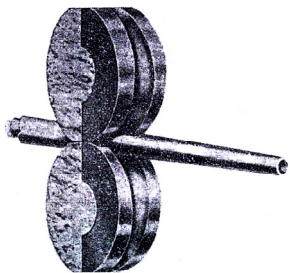


Рис. 5.4. Прокатка труб на станах типа «Рокрайт»

Размеры труб находятся в следующих пределах: максимальный наружный диаметр ~114 мм, минимальный внутренний диаметр 16–19 мм. Могут быть получены допуски, по размерам равные допускам тянутых труб, и высокое качество поверхности, особенно внутренней [5].

При прокатке на станах ХПТ (холодная прокатка труб) степень деформации за переход составляет 40–70 % в зависимости от состава и состояния циркониевого сплава и размеров исходной трубной заготовки (рис. 5.5)

При прокатке происходит существенное упрочнение. На рис. 5.6 показаны изменения свойств сплава Н-1 при прокатке.

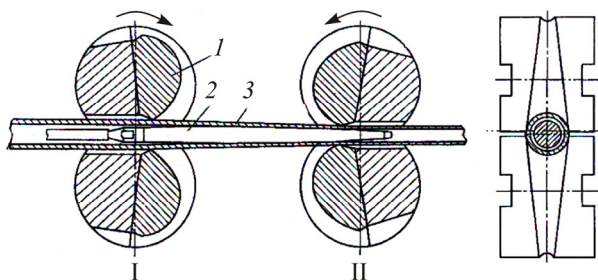


Рис. 5.5. Прокатка на стане ХПТ: I и II – начало и конец рабочего хода, соответственно; 1 – калибры; 2 – оправка; 3 – труба

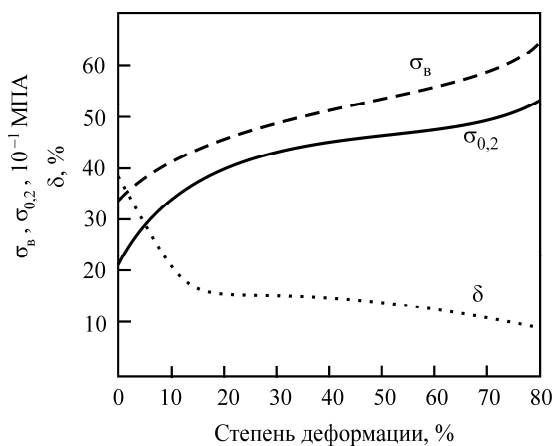


Рис. 5.6. Изменение свойств сплава Н-1 при холодной прокатке

Прокатка труб связана с неравномерностью пластической деформации по сечению и длине трубы, которая является основной причиной появления остаточных напряжений. Неравномерность пластической деформации зависит в основном от степени пластической деформации за переход, формы (геометрии) калибров и величины подачи. Поэтому для обеспечения высокого качества и точности, получения единообразной геометрии и текстуры по сечению и в стенке

трубы необходимо иметь режимы деформации при прокатке с учетом минимизации технологических остаточных напряжений, а также обеспечения последеформационной прочности [4].

При пластическом деформировании реализуются большие степени деформации, при этом остаточные напряжения в некоторых случаях могут превышать физический предел текучести или прочности материала. Для пластичных материалов при превышении остаточных напряжений предела текучести возможно появление вторичных пластических деформаций, приводящих к изменению размеров. Для хрупких материалов это превышение приведет к разрушению.

5.2.2. Деформационное поведение циркониевых сплавов

Для определения технологических остаточных напряжений необходимо знать ряд механических характеристик, в том числе параметры кривой сопротивления деформации материала.

Наличие у циркония множества плоскостей скольжения и двойникования обуславливает его высокую пластичность, сохраняющуюся даже при температуре жидкого азота. Поведение циркония при пластической деформации вплоть до момента разрушения может быть охарактеризовано следующим соотношением величин истинного напряжения и деформации: $\sigma = m\varepsilon^n$, где m – эмпирическая константа, а n – показатель степени упрочнения.

Показатель степени упрочнения заметно связан с текстурой металла и степенью пластической деформации. Листовой цирконий характеризуется существенным различием показателя степени упрочнения в продольном и поперечном направлениях. Для сильно текстурированного металла в холоднодеформированном состоянии показатель упрочнения выше в поперечном направлении, чем в продольном, и равен соответственно 0,17 и 0,07. В отожженном состоянии наблюдается обратная картина, и показатель деформационного упрочнения равен 0,22 для продольного направления и 0,11 для поперечного. Для слабо текстурированного металла различие показателей деформационного упрочнения в продольном и поперечном направлениях практически отсутствует.

Для мелкозернистого циркония характерно наличие площадки текучести на кривых растяжения. При этом с увеличением температуры испытаний от 196 до 300 °С и уменьшением величины зерна площадка текучести становилась более четкой. Введение небольших количеств водорода приводит к исчезновению площадки текучести.

Механические свойства циркония и его сплавов могут быть существенно изменены в результате холодной деформации и термической обработки. С увеличением степени холодной деформации прочностные характеристики циркония возрастают, а пластичность снижается. Предел текучести при 200 °С иодидного циркония может быть повышен в 2,5 раза в результате холодной деформации на 20 %. Аналогичное изменение прочности характерно и для губчатого циркония. Влияние степени холодной деформации на механические свойства при растяжении иодидного и губчатого циркония, а также сплавов Zr-1% Nb, Zr-2,5% Nb, циркалой-2, оженит-0,5 показано на рис. 5.7 [4].

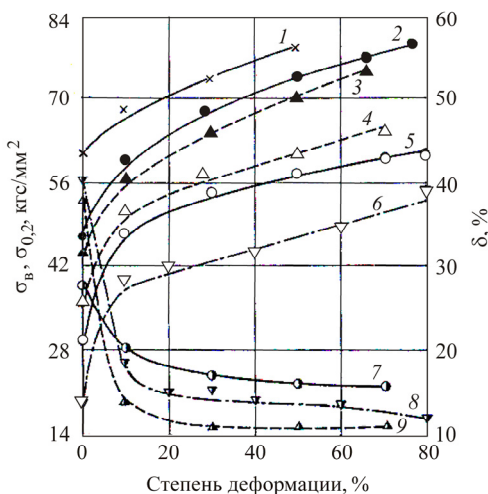


Рис. 5.7. Влияние холодной деформации на механические свойства при растяжении сплавов циркалой-2, оженит-0,5, Zr – 1% Nb и Zr – 2,5% Nb:

$$\left. \begin{array}{l} 1 - \sigma_{\text{в}} (\text{Zr} - 2,5\% \text{Nb}), \quad 2 - \sigma_{\text{в}} \\ 6 - \sigma_{0,2} \end{array} \right\} (\text{Zr} - 1\% \text{Nb}), \quad \left. \begin{array}{l} 3 - \sigma_{\text{в}} \\ 5 - \sigma_{0,2} \end{array} \right\} (\text{оженит-0,5}), \quad \left. \begin{array}{l} 4 - \sigma_{0,2} \\ 7 - \delta \end{array} \right\} (\text{циркалой-0,5})$$

$$\left. \begin{array}{l} 8 - \delta \end{array} \right\}$$

Пластическая деформация в цирконии протекает по преимущественным системам скольжения и двойникования. Это приводит к появлению резко выраженной текстуры в полуфабрикатах из циркониевых сплавов. Наличие текстуры оказывает существенное влияние на многие физико-механические свойства полуфабрикатов из циркония, что делает необходимым исследование факторов, влияющих на формирование того или иного типа текстуры.

Как следствие текстурированности могут наблюдаться значительные различия механических свойств в различных направлениях; в одних и тех же полуфабрикатах, полученных по различной технологии. Горяче- и холоднокатаные листы из сплавов циркония характеризуются на 40–50 % более высокими значениями предела текучести в поперечном направлении, чем в продольном.

Знание механических характеристик и параметров технологического процесса позволяет найти последеформационные остаточные напряжения, а также выявить влияние технологии изготовления на качество готовой продукции.

5.2.3. Распределения остаточных напряжений в оболочках твэлов

С помощью выражения (2.26) по известным параметрам процесса пластического деформирования определяются значения a_0 , по формулам (2.44)–(2.46) рассчитываются остаточные напряжения в случае изотропных материалов, так как для труб не всегда имеют место отличие механических свойств в различных направлениях.

В качестве примера определим технологические остаточные напряжения в трубной заготовке из циркониевых сплавов Н-1 и Н-2,5 после пластического деформирования. Остаточные напряжения определены после прокатки труб с учетом механических характеристик, приведенных в табл. 5.1–5.3.

Параметры деформационного упрочнения для циркониевых сплавов Н-1 (Zr–1%Nb) и Н-2,5 (Zr–2,5%Nb) были определены с использованием экспериментальные диаграммы (см. рис. 5.4). С помо-

щью методов аппроксимации функций (наименьших квадратов и интерполирования), при наложении линий тренда в программной оболочке Excel был найден наиболее подходящий вид функции деформационного упрочнения сплавов циркония, представленный на рис. 5.8 [6].

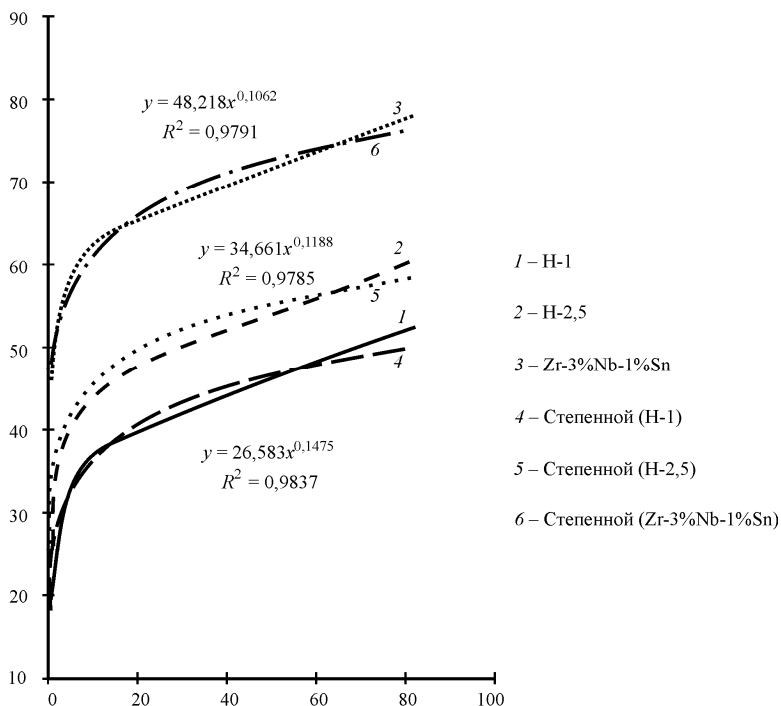
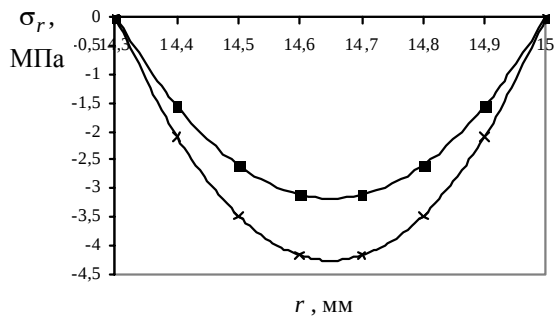
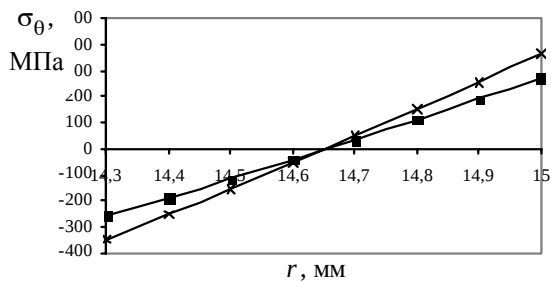


Рис. 5.8. Экспериментальные диаграммы растяжения сплавов Zr-1%Nb, Zr-2,5%Nb, Zr-3%Nb-1%Sn

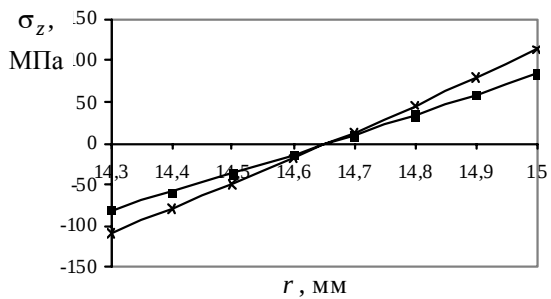
Достоверность расчета для сплава Zr-1%Nb составила 0,9837, для Zr-2,5%Nb – 0,9785, для Zr-3%Nb – 1%Sn – 0,9791. Подбор выполнялся по диаграмме растяжения холоднокатанных сплавов Zr-1%Nb (H-1), Zr-2,5%Nb (H-2,5), Zr-3%Nb-1%Sn при комнатной температуре $t = 25^\circ\text{C}$. Эмпирические коэффициенты, входящие в выражение (2.9), определены: для сплава Zr-1%Nb (H-1) $m = 26,583$, $n = 0,1475$,



a



б



в

Рис. 5.9. Распределение расчетных значений:
a – радиальных; *б* – окружных; *в* – осевых
остаточных напряжений по толщине стенки
трубы; ■ – Zr-1%Nb, × – Zr-2,5%Nb

погрешность составляет 1,7 %; для сплава Zr–2,5%Nb (Н-2,5) $m = 34,661$, $n = 0,1188$; погрешность составляет 2,2 %; для сплава Zr–3%Nb–1%Sn $m = 48,218$, $n = 0,1062$, погрешность составляет 2,1 %.

На рис. 5.9 представлено распределение расчетных значений технологических остаточных напряжений по толщине стенки трубы с размерами, соответствующими размерам тонкостенных трубок для оболочек твэлов – $R_1 = 15$ мм и $R_2 = 14,3$ мм, при соотношении $F_{\text{нач}}/F_{\text{кон}} = 1,2$, параметре деформативности $\psi = 0,425 \cdot 10^{-4}$ и коэффициенте Пуассона $\mu = 0,31$ [7]. Полученные результаты показывают, что остаточные напряжения возрастают с увеличением степени пластической деформации, а также зависят от механических свойств сплавов, и в целом, соответствуют известным экспериментальным данным по распределению остаточных напряжений в трубных изделиях [8].

5.2.4. Влияние анизотропии на уровень остаточных напряжений в циркониевых оболочках

Известно, что цирконий и его сплавы обладают анизотропией упругих свойств и ведут себя как ортотропные материалы. Холодная деформация несколько увеличивает нормальный модуль упругости, заметной становится и его анизотропия. Для холоднодеформированного на 75–90 % иодидного циркония модуль упругости при комнатной температуре составляет $(9,0 \pm 1,7) \cdot 10^3$ кгс/мм² в направлении прокатки и $8,3 \cdot 10^3$ кгс/мм² в поперечном направлении.

Большинство данных по оценке упругих свойств сплавов циркония получено для сплавов типа циркалой (Zr + Al). При комнатной температуре модуль упругости сплавов типа циркалой равен $(9,7\text{--}10) \cdot 10^3$ кгс/мм², с повышением температуры до 550 °С происходит его монотонное уменьшение до $(6\text{--}6,6) \cdot 10^3$ кгс/мм². Модуль сдвига сплава циркалой-2 при комнатной температуре составляет $3,68 \cdot 10^3$ кгс/мм². Для текстурированных образцов из сплавов типа циркалой характерно различие модулей упругости в направлении прокатки и в поперечном направлении (см. табл. 5.2). В поперечном направлении величина модуля, как правило, на 10–15 % выше,

чем в направлении прокатки. Данные о характеристиках упругости других сплавов весьма малочисленны. Модуль упругости для сплава АТР $[\text{Zr}-(0,4 \div 0,6)\%\text{Cu}-(0,5 \div 0,6)\%\text{Mo}]$ несколько выше, чем у сплавов типа циркалой. При комнатной температуре он равен $11 \cdot 10^3$ кгс/мм², а при 400 °С $7,9 \cdot 10^3$ кгс/мм².

Модуль упругости сплавов $\text{Zr}-1\%\text{Nb}$ и $\text{Zr}-2,5\%\text{Nb}$ при комнатной температуре мало чем отличается от модуля упругости чистого циркония, но несколько меньше, чем у сплавов типа циркалой и составляет $9,3 \cdot 10^3$ и $9,1 \cdot 10^3$ кгс/мм². При температурах 300–400 °С модуль упругости сплавов с ниобием и сплавов типа циркалой практически одинаков. С увеличением содержания ниобия от 5 до 20 % модуль упругости циркония в области температуры 20–300 °С уменьшается. При комнатной температуре он составляет $8,8 \cdot 10^3$; $8,2 \cdot 10^3$ и $6,1 \cdot 10^3$ кгс/мм² соответственно для сплавов с 5, 10 и 20 % Nb. Для этих сплавов, характерно меньшее изменение модуля при нагреве, и в области температуры выше 500 °С для сплавов с 5 и 10 % Nb его величина заметно выше, чем у сплавов типа циркалой и чистого циркония (соответственно $6,55 \cdot 10^3$ и $5,8 \cdot 10^3$ кгс/мм² при температуре 900 °С). Такой характер изменения модуля упругости обусловлен особенностями фазового состава сплавов.

На механические свойства влияет технология изготовления изделий (табл. 5.4). Так, механические свойства в продольном и поперечном направлениях труб из циркалой-2, полученных волочением, практически одинаковы; в то время как трубы из сплава $\text{Zr}-2,5\%\text{Nb}$, изготовленные волочением, обладают более высоким пределом текучести в поперечном направлении, чем в продольном.

Далее, используя методики определения остаточных напряжений с учетом анизотропии механических свойств, можно определить величины остаточных напряжений для сплавов $\text{Zr}-1\%\text{Nb}$, $\text{Zr}-2,5\%\text{Nb}$, $\text{Zr}-3\%\text{Nb}-1\%\text{Sn}$, которые нашли наибольшее применение в атомной промышленности.

Таблица 5.4

Влияние технологии изготовления на механические свойства труб и листов из сплавов циркония [4]

Сплав	Вид полуфабриката и технология получения	Направление	20 °С			300 °С		
			σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
Циркалой-2	Лист (холоднокатаный)	Продольное	50	31	23	25	14	42
		Поперечное	48	43	37	24	18	55
	Труба (хол. волочение, 15 %)	Продольное	67	58	10	38	34	7
		Поперечное	72	60	11	38	35	13
	Труба (хол. прокатка, 60 %)	Продольное	70	55	16,5	43	36	12
		Поперечное	69	55	22	10	35	19
	Труба (хол. прокатка, 65 %)	Продольное	73	59	6	44	35	5,4
		Поперечное	76	62	12	41	36	11,6
	Труба (гор. прессование + волочение 17 %)	Продольное	64	38	23	38	32	26
		Поперечное	66	–	18	36	–	23
	Труба (гор. прессование + прокатка 40 %)	Продольное	76	56	16	46	35	9
		Поперечное	76	60	32	48	40	24
Zr-2,5%Nb	Труба (гор. прессование + прокатка 45 %)	Продольное	76	56	22	51	38	11
		Поперечное	79	66	27	56	44	23
	Труба (гор. прессование)	Продольное	–	–	–	45	35	–
		Поперечное	–	–	–	48	45	–
	Труба (гор. прессование + волочение 20 %)	Продольное	80	64	7	57	46	6
		Поперечное	87	83	7,5	63	57	4
Циркалой-4	Труба (гор. прессование + волочение 23 %)	Продольное	75	54	8	48	38	8,5
		Поперечное	83	79	8	53	51	8,5
	Лист (холоднокатаный)	Продольное	51	30	15	25	13	38
		Поперечное	48	44	37	24	19	60
Zr-1%Nb	Лист (холоднокатаный)	Продольное	31	18	41	22	14	42
		Поперечное	30	27	31	14	16	40
	Труба (холоднокатаная)	Продольное	32	15	40	–	–	–
		Поперечное	24	20	45	–	–	–

5.2.5. Влияние параметров технологии и ортотропии механических свойств на уровень остаточных напряжений в циркониевых оболочках

Как показано в предыдущем разделе, при изготовлении циркониевых труб наблюдается заметно выраженная анизотропия механических свойств в продольном и поперечном направлении. Полагаем, что $E_r = E_\varphi = E$ – модули упругости в поперечном, E_z – модуль в продольном направлении, а коэффициенты $\mu_{rz} = \mu_{\varphi z} = \mu$. Тогда уравнения, определяющие технологические остаточные напряжения в трансверсально-изотропных материалах, примут следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -a_0 (R_1 - r)(r - R_2), \\ \sigma_\theta &= a_0 \left[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right], \\ \sigma_z &= a_0 \frac{\mu E_z}{E} \left[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right],\end{aligned}\tag{5.1}$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{R_1^2} \sqrt{\frac{60 \psi \sigma_{s_0} \varepsilon_{\text{ст}} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{\text{ст}}^n}{(n+1)} \right)}{K \cdot B}}; \quad \bar{K} = \frac{1}{E} \left(1 - \frac{E_z \mu^2}{E} \right).$$

Поскольку при прокатке циркониевых труб появляется анизотропия в продольном и поперечном направлениях, то коэффициенты деформационного упрочнения в этих направлениях будут разными. С помощью аппроксимации экспериментальных диаграмм определены функции деформационного упрочнения сплавов Zr–1%Nb, Zr–2,5%Nb, Zr–3%Nb–1%Sn и иодидного циркония для продольного (a) и поперечного ($\bar{\sigma}$) направлений, а также коэффициенты упрочнения, приведенные на рис. 5.10.

Степень пластической деформации при прокатке трубных изделий определяется следующим выражением [9]:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 1,15 \times \ln \frac{H_0}{H_1} + \frac{\text{tg } \alpha_m}{\sqrt{3}},\tag{5.2}$$

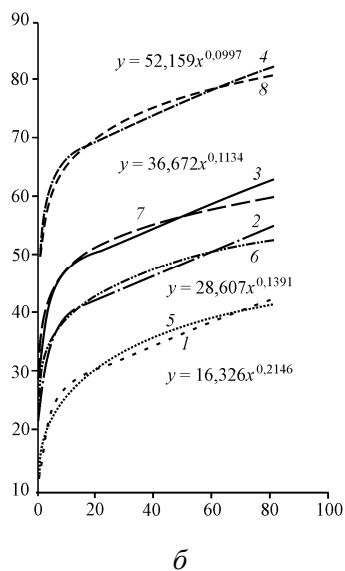
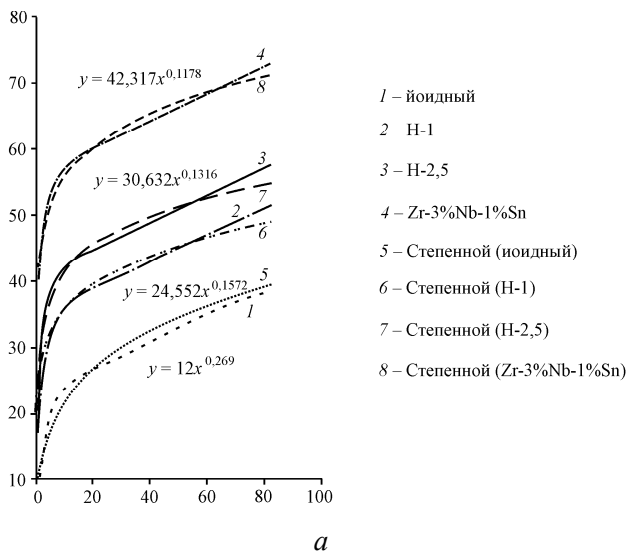


Рис. 5.10. Экспериментальные диаграммы растяжения и их аппроксимация для продольного (а) и поперечного (б) направлений металлоизделий

где $H_0 = (R_{\text{вх1}} - R_{\text{вх2}})$ – толщина стенки трубы до прокатки; $H_1 = (R_1 - R_2)$ – толщина стенки трубы после прокатки; $\text{tg } \alpha_m = \sqrt{\frac{\Delta \bar{H}}{2 - \Delta \bar{H}}}$; $\bar{H} = \frac{\Delta H}{R}$; $\Delta H = H_0 - H_1$; R – радиус вала.

Основными параметрами, которые влияют на значение остаточных напряжений в процессе холодного деформирования труб, являются величины $\text{Ln } \frac{H_0}{H_1}$ и радиус вала R . В соответствии с выражением (5.2) при увеличении радиуса вала остаточные напряжения будут уменьшаться.

Рассмотрим влияние величины обжатия на осевые остаточные напряжения для сплава Zr-1%Nb при различных отношениях $\frac{H_0}{H_1} = 1,1-1,3$. На рис. 5.11 показано распределение технологических остаточных напряжений по сечению трубы.

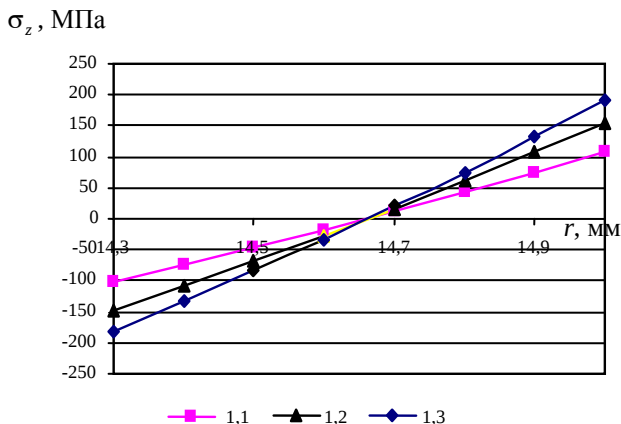


Рис. 5.11. Распределение осевых остаточных напряжений по сечению трубы при разных значениях обжатия

Методика учета анизотропии механических свойств (отличие их в продольном и в поперечном направлении) и степени пластической деформации при определении остаточных напряжений позволяет давать рекомендации по соотношению технологических параметров при прокатке таким образом, чтобы остаточное напряженное состояние не превышало предельные прочностные характеристики сплава, из которого изготавливается изделие. По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что на величину технологических остаточных напряжений существенно влияют механические свойства сплавов, отличие свойств в продольном и поперечном направлениях металлоизделия.

5.3. Влияние остаточных напряжений на точность цилиндрических изделий

Изготовление цилиндрических изделий, прутков и труб путем обработки металлов давлением связано с возникновением технологических остаточных напряжений и как результат их действия упругими деформациями, которые будут влиять на отклонения от номинальных размеров детали после изготовления.

Для цилиндрических изделий точность определяется заданными диаметрами, которые зависят от радиальных деформаций, вызванных действием остаточных напряжений [10]

$$u_r = \varepsilon_0 \cdot r. \quad (5.3)$$

Следовательно, определив упругую деформацию ε_0 , используя закон Гука, можно рассчитывать изменение размеров заготовки вследствие действия остаточных напряжений.

Изготовление оболочек твэлов осуществляется обычно на специализированных заводах, одним из которых является ОАО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов, Удмуртия) [11]. Это связано со специфическими условиями производства изделий из циркониевых сплавов: использование специальных вакуумных печей, плавильных машин, травильных установок и пр. При этом любая схема производ-

ства циркониевых труб включает в себя обработку пластическим деформированием, возможно появление технологических остаточных напряжений, а также перераспределение существующих остаточных напряжений на заключительных стадиях обработки, что может привести к изменению заданных размеров и потере необходимой точности.

5.3.1. Упругие деформации от действия остаточных напряжений в прутках

После пластического деформирования цилиндрических металлоизделий за счет остаточных напряжений имеет место их упругая деформация. Наличие аналитических зависимостей для расчета остаточных напряжений позволяет оценить упругую деформацию и точность металлоизделий после обработки металлов давлением.

Так, например, для прутковой заготовки окружная деформация будет определяться после подстановки компонент тензора остаточных напряжений (2.35) в обобщенный закон Гука (2.36). При этом получим

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} \frac{\bar{a}_1}{4\mu} \left[(3\bar{r}^2 - 1) - \mu(\bar{r}^2 - 1) - 2\mu(2\bar{r}^2 - 1) \right], \quad (5.4)$$

где $\bar{r} = \frac{r}{R}$.

Для поверхностных слоев ($\bar{r} = 1, 0$) выражение (5.4) примет вид

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\bar{a}_1}{2\mu E} (1 - \mu^2) \quad (5.5)$$

и для наружного размера прутковой заготовки

$$u_{r|_{r=1}} = \frac{\bar{a}_1}{2\mu E} (1 - \mu^2) R_n, \quad (5.6)$$

где R_n – номинальный радиус прутковой заготовки, равный радиусу калибрующего отверстия инструмента.

Соотношение (5.6) определяет изменение радиуса пруткового изделия вследствие возможного снятия остаточных напряжений, например, термообработкой.

После подстановки $\bar{a}_1$ в выражение (5.6) найдем в соответствии с (5.3) перемещения на внешней поверхности прутка за счет упругой деформации от действия остаточных напряжений:

$$u_{r|r=1} = \frac{(1-\mu^2)R_H}{2\mu E} \sqrt{\frac{24\psi\sigma_{s0}E\mu^2}{1-\mu^2}\varepsilon_{cp}\left(1+\frac{m\varepsilon_{cp}^n}{(n+1)}\right)}. \quad (5.7)$$

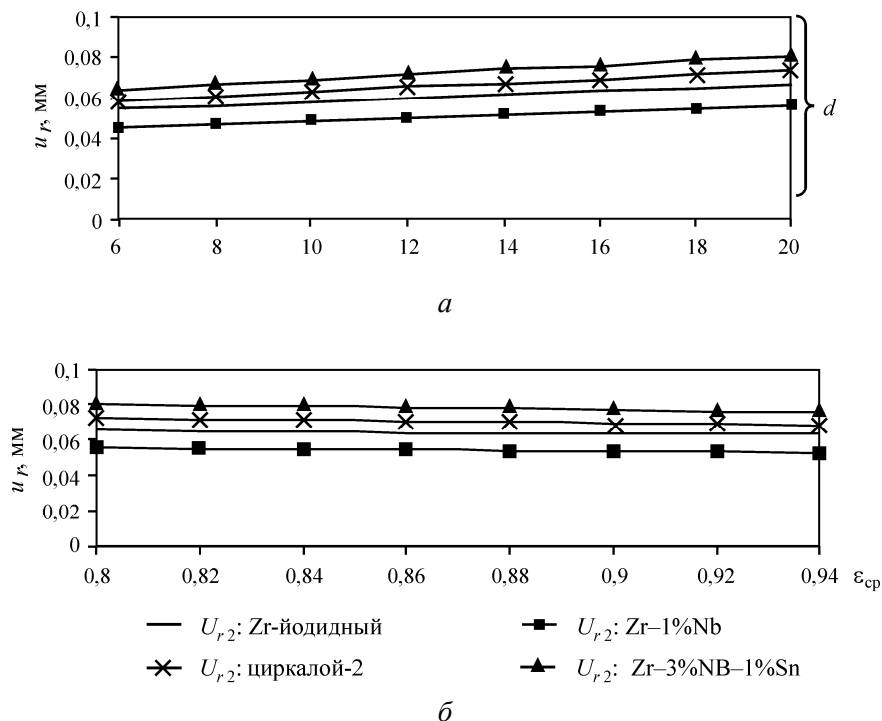


Рис. 5.12. Влияние остаточных напряжений на точность изделий в зависимости от номинального диаметра прутка (a) и от степени пластической деформации при $d = 20$ мм (b) для различных циркониевых сплавов

Формула (5.7) позволяет оценить изменение радиуса прутковой заготовки за счет упругой деформации от остаточных напряжений, сформированных за данный переход деформирования [12].

На рис. 5.12 приведены результаты расчета u_r для прутков из сплавов циркония в зависимости от номинального диаметра от 6 до 20 мм, а также влияние величины степени пластической деформации от 0,8 до 0,94.

Из рис. 5.12 следует, что отклонения от заданных размеров достигают 0,08 мм, а с увеличением диаметра прутка радиальные перемещения растут. Влияние степени пластической деформации, напротив, незначительно и отклонения при изменении ее величины от 6 до 20 % остаются на одном уровне.

5.3.2. Точность трубных изделий

Для оценки точности трубных металлоизделий после пластического деформирования при наличии остаточных напряжений используем тот же подход, что и для прутков. После подстановки компонент тензора остаточных напряжений (5.1) в обобщенный закон Гука и преобразований окружные деформации определяются в виде [13]

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{a_0}{E} \left[(r - R_1)(r - R_2)(1 - \mu - 2\mu^2) + r(2r - R_1 - R_2)(1 - \mu^2) \right]. \quad (5.8)$$

Для наружных поверхностных слоев ($r = R_1$) выражение (5.8) примет вид

$$\varepsilon_{\theta}|_{r=R_1} = \frac{a_0 R_1^2}{E} (1 - \bar{R})(1 - \mu^2), \quad (5.9)$$

следовательно, изменение наружного размера трубной заготовки определяется в соответствии с выражением (5.3)

$$u_r|_{r=R_1} = \frac{a_0 R_1^2}{E} (1 - \bar{R})(1 - \mu^2) R_1^n, \quad (5.10)$$

и после преобразований

$$u_r \Big|_{r=R_1} = (1 - \bar{R}) R_1^H \sqrt{\frac{60 \psi \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{(n+1)} \right) (1 - \mu^2)}{E \bar{B}}}, \quad (5.11)$$

где R_1^H – номинальный наружный радиус трубной заготовки.

Аналогично для внутренних поверхностных слоев ($r = R_2$) выражение (5.8) примет вид

$$\varepsilon_\theta \Big|_{r=R_2} = \frac{a_0 R_1^2}{E} \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \right) (1 - \mu^2).$$

Тогда изменение внутреннего размера изделия составит

$$u_r \Big|_{r=R_2} = \frac{a_0 R_2^2}{E} \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \right) (1 - \mu^2) R_2^H, \quad (5.12)$$

после преобразований получим

$$u_r \Big|_{r=R_2} = \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \right) R_2^H \sqrt{\frac{\psi \sigma_{s_0} 60 \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{(n+1)} \right) (1 - \mu^2)}{E \bar{B}}}, \quad (5.13)$$

где R_2^H – номинальный внутренний радиус трубной заготовки.

Формулы (5.11), (5.13) позволяют оценить изменение размеров трубы за счет упругой деформации от остаточных напряжений, сформированных при пластическом деформировании.

На рис. 5.13 представлены зависимости влияния остаточных напряжений на точность трубных изделий из различных сплавов циркония. Расчет выполнен для трубы: $a - R_1 = 15$ мм и $R_2 = 14,3$ мм при $d/d_0 = 1,3$, $\mu = 0,31$, $\alpha = 6 - 20^\circ$; δ – относительная толщина стенки трубы варьировалась $\bar{R} = 0,8 - 0,94$. $R_1 = 15$ мм, $\alpha = 15^\circ$. Точность определена для циркония – иодидного и сплавов: циркалой-2, Zr-1%Nb, Zr-3%Nb-1%Sn. Для сравнения приведены изменения ра-

диальных размеров для труб, изготовленных из сталей 85, 12Г2А и титанового сплава ВТ1 при тех же технологических параметрах.

Результаты показали (рис. 5.13), что при увеличении угла наклона канала волокна перемещение на внешнем и внутреннем радиусе изменяется от 40 до 60 мкм в зависимости от сплава циркония. Для сталей и титанового сплава при тех же условиях изменение радиальных размеров меньше, до 45 мкм. Влияние толщины стенки трубы на последеформационную точность немного больше. Например, при относительной толщине стенки трубы из сплава $Zr-3\%Nb-1\%Sn$ внутренний радиус изменился на 100 мкм.

При производстве прецизионных изделий необходимо высокое качество, а также точность и прочность. Обычно в технологии производства предусмотрен контроль качества, где определяются характеристики готовой продукции и отклонение от заданных размеров вплоть до нескольких микрон.

Обозначим U_{r1} и U_{r2} как перемещения на внешнем и внутреннем радиусах трубной заготовки соответственно, $a = R_1^H - R_2^H$ – номинальная толщина стенки трубы.

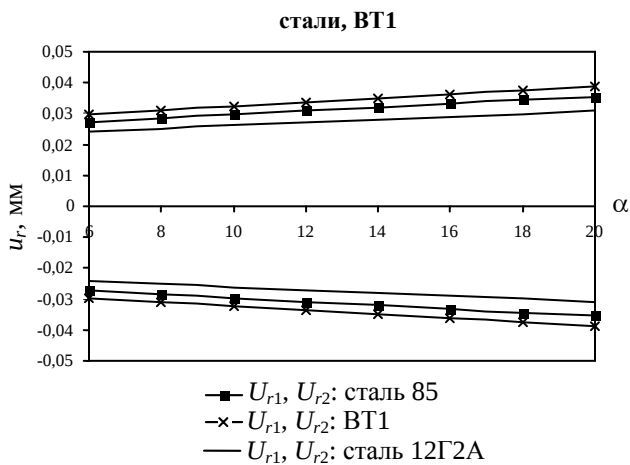
Тогда

$$\Delta = a_1 - a, \quad (5.14)$$

где Δ – отклонение от номинальных размеров; $a_1 = \frac{U_{r1}}{R_1^H} + \frac{U_{r2}}{R_2^H}$ – толщина стенки трубы с учетом упругих деформаций от действия остаточных напряжений после волочения.

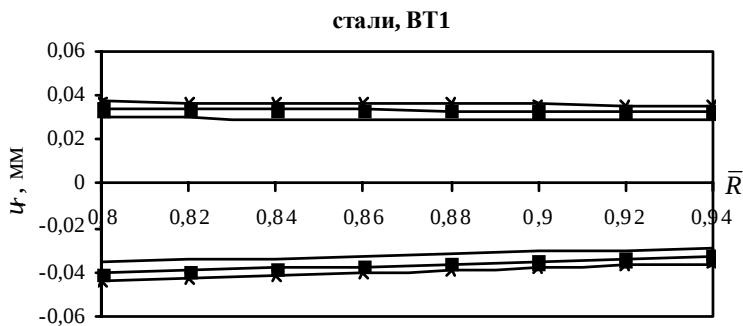
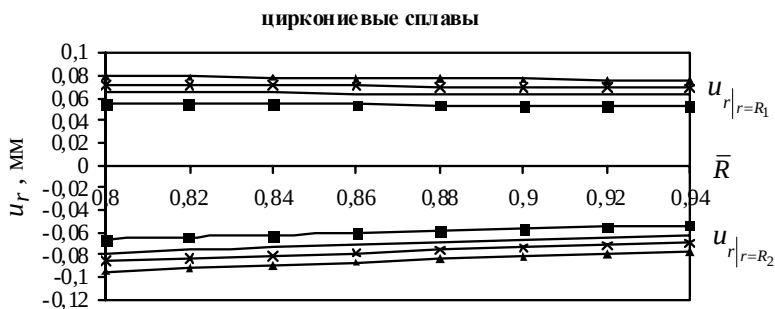
Подставляя выражения (5.11) и (5.13) для перемещений на внутреннем и внешнем радиусах в формулу (5.14), найдем параметр деформативности ψ :

$$\psi = \frac{E\bar{B}\Delta^2 a^2}{60\sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m\varepsilon_{cp}^n}{n+1}\right) (1-\mu^2) (2a - a^2 - 1)^2}. \quad (5.15)$$



a

Рис. 5.13. Влияния остаточных напряжений на точность изделий в зависимости от угла наклона канала волокна α (a) и от относительной толщины стенки трубы $\bar{R}$ (б) для различных циркониевых сплавов и сталей (см. также на с. 216)



б

Рис. 5.13. Окончание

Определив отклонения от номинальных размеров после изготовления трубной заготовки, используя приведенные выше аналитические соотношения, связывающие технологические параметры процесса, геометрию детали и механические характеристики материала изделия, по формуле (5.15) можно определить величину параметра ψ , характеризующего долю скрытой потенциальной энергии остаточных напряжений.

5.3.3. Влияние остаточных напряжений на точность заготовок из анизотропных материалов

Циркониевые сплавы, применяемые для производства оболочек твэлов, относятся к анизотропным материалам. Оценим изменение номинальных размеров трубной заготовки для общего случая цилиндрической анизотропии.

Согласно выражениям (4.18) упругие деформации от действия технологических остаточных напряжений в трубе из анизотропного материала определяется выражением

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta} = & \frac{a_0}{E_r} (R_1 - r)(r - R_2)(\mu_{r\theta} + \mu_{z\theta}\mu_{rz}) + \\ & + \frac{a_0}{E_{\theta}} [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)](1 - \mu_{z\theta}\mu_{\theta z}). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Для внешних поверхностных слоев трубы ($r = R_1$) окружная деформация будет определяться в виде

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{a_0}{E_{\theta}} R_1^2 (1 - \bar{R})(1 - \mu_{z\theta}\mu_{\theta z}). \quad (5.17)$$

Следовательно, изменение наружного размера трубной заготовки в соответствии с соотношением (5.3) заготовки определяется выражением

$$U_{R_1} = \frac{a_0}{E_{\theta}} R_1^2 (1 - \bar{R})(1 - \mu_{z\theta}\mu_{\theta z}) R_1^{\eta}. \quad (5.18)$$

После подстановки a_0 и преобразований получим

$$U_{R_1} = (1 - \bar{R})(1 - \mu_{z\theta}\mu_{\theta z}) R_1^{\eta} \sqrt{\frac{\psi \sigma_{s_0} 60 E_r (1 - \bar{R}^2) \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n + 1}\right)}{E_{\theta} \bar{A}}}, \quad (5.19)$$

где $\bar{A}$ – коэффициент, входящий в соотношение (4.19).

Аналогично для внутренних поверхностных слоев ($r = R_2$) окружные деформации будут определяться как

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{a_0}{E_{\theta}} R_2^2 \left(1 - \frac{1}{R}\right) (1 - \mu_{z\theta} \mu_{\theta z}), \quad (5.20)$$

а изменение внутреннего размера изделия как

$$U_{R_2} = \frac{a_0}{E_{\theta}} R_2^2 \left(1 - \frac{1}{R}\right) (1 - \mu_{z\theta} \mu_{\theta z}) R_2^H. \quad (5.21)$$

После преобразований получим

$$U_{R_2} = \left(1 - \frac{1}{R}\right) (1 - \mu_{z\theta} \mu_{\theta z}) R_2^H \sqrt{\frac{\psi \sigma_{s_0} 60 E_r \left(1 - \bar{R}^2\right) \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n+1}\right)}{E_{\theta} \bar{A}}}. \quad (5.22)$$

Формулы (5.19), (5.22) позволяют оценить изменение размеров трубы за счет упругой деформации от остаточных напряжений в металлоизделиях из сплавов, проявляющих анизотропию свойств.

Наличие аналитических зависимостей для определения остаточных напряжений позволяет найти параметр деформативности, входящий в соотношения для определения a_0 для сплавов с анизотропией механических свойств [14]. Пусть измерен внешний диаметр готовой трубы D_1 , тогда изменение диаметра от действия остаточных напряжений можно определить так:

$$\Delta D_1 = D_1 - D_H, \quad (5.23)$$

где D_H – номинальный диаметр калибрующего инструмента. Или через обозначение перемещения на внешнем радиусе:

$$\Delta D_1 = 2U_{R_1}. \quad (5.24)$$

Подставляя выражения (5.19) для определения перемещений на внешнем радиусе в формулу (5.24), можно определить параметр деформативности ψ :

$$\psi = \frac{(D_1 - D_n)^2 E_\theta \cdot \bar{A}}{240 \sigma_{s_0} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{n+1} \right) (1 - \bar{R})^2 (1 - \mu_{z\theta} \mu_{\theta z})^2 R_1^{n^2} E_r (1 - \bar{R}^2)} . \quad (5.25)$$

Таким образом, определив отклонения от номинальных размеров после деформирования трубной заготовки, используя приведенные выше аналитические соотношения, связывающие технологические параметры процесса, находим величину параметра ψ , характеризующего долю скрытой потенциальной энергии остаточных напряжений при пластическом деформировании заготовок из анизотропных материалов.

5.3.4. Отклонения от номинальных размеров циркониевых прутков и труб под действием остаточных напряжений

Точность цилиндрических изделий является очень важной характеристикой качества металлопроката. Например, прутковые изделия из циркония, используемые как заглушки оболочек твэлов, должны соответствовать номинальным размерам, а точный наружный диаметр оболочечных труб необходим для надежного крепления в поддерживающих и дистанционирующих деталях во избежание вибраций и фреттинг-коррозии. Соблюдение внутреннего диаметра необходимо для обеспечения расчетного кольцевого зазора между столбом таблеток и оболочкой и симметрии теплоотдачи от таблеток к оболочке и теплоносителю. Практически важными являются не только точные диаметры наружной и внутренней стенок трубки, но и отсутствие эксцентricности (разностенности).

Точность прутковых заготовок определена после подстановки выражения (5.6) (где $\bar{a}_1$ находится из соотношения (4.8) – для трансверсально-изотопного материала) в условие (5.3) с учетом окружных деформаций, входящих в выражения (4.2). На рис. 5.14 приведены результаты расчета возможных радиальных упругих перемещений для прутков при снятии остаточных напряжений термообработкой

(отжиг) в зависимости от анизотропных свойств материала (разница в значении модуля упругости в осевом и радиальном направлении), начиная с 0 (изотропный материал), затем 10, 20, 30 %.

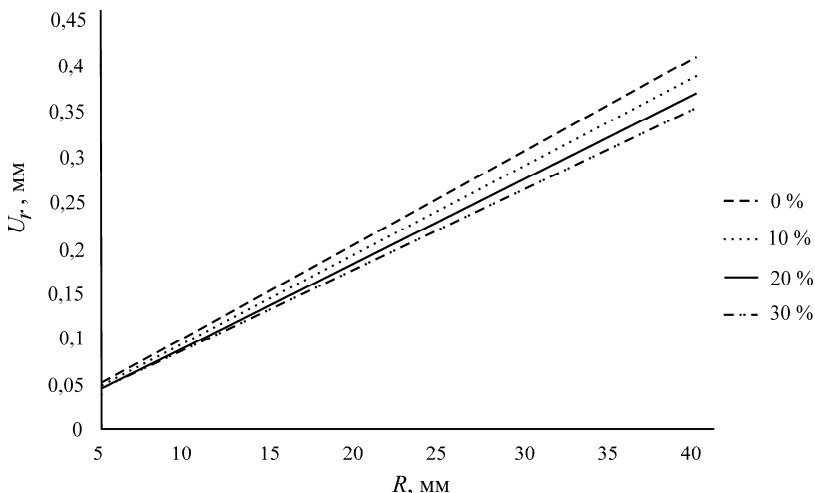


Рис. 5.14. Оценка радиальных перемещений от действия остаточных напряжений в прутковых изделиях

Для расчётов использовались следующие данные: прутки с радиусом $R = 4,5\text{--}40$ мм, угол наклона образующей волокна $\alpha = 8^\circ$, модуль упругости в осевом направлении $E = 9 \cdot 10^4$ МПа (для изотропного материала), $\mu' = 0,31$, предел текучести $\sigma_{s_0} = 195$ МПа, диаметры заготовки до и после пластической деформации $\frac{d_0}{d_1} = 1,1$, $\psi = 0,03$.

Из рис. 5.14 следует, что радиальные перемещения возрастают пропорционально увеличению радиуса прутка. При нарастании анизотропии свойств (разница в свойствах между продольным и поперечным направлениями) уменьшается величина радиальных перемещений. Для прецизионных деталей приведенные значения перемещений могут быть значительными, поэтому учет влияния технологических остаточных напряжений на точность таких металлоизделий необходим.

Следует отметить, что для прутков обычной точности диаметрами от 4,5 до 81 мм предельные отклонения находятся в пределах $\pm 0,50$ мм [15], что соизмеримо с данными, приведенными на рис. 5.14. Кроме предельных отклонений по точности, существуют предельные отклонения по прямолинейности, что свидетельствует о возможности неравномерности распределения остаточных напряжений по периметру прутковых металлоизделий.

Аналогичные расчёты выполнены для отклонений от номинальных размеров в соответствии с выражениями (5.18) и (5.21), связанных с действием остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях трубных металлоизделий. На рис. 5.15 приведены результаты расчета возможных радиальных упругих перемещений на наружной и внутренней поверхностях оболочечных холоднокатаных труб при снятии остаточных напряжений в зависимости от анизотропных свойств материала (разница в значении модуля упругости в осевом и радиальном направлении), начиная с 0 (изотропный материал), 10, 20 %.

Для расчётов использовались следующие данные: наружный диаметр трубы 9,07–9,15 мм, внутренний диаметр трубы 7,72–7,85, модуль упругости в осевом направлении $E' = 9 \cdot 10^4$ МПа, $\mu' = 0,31$, предел текучести $\sigma_{s_0} = 205$ МПа, диаметры заготовки до и после пластической деформации $\frac{d_0}{d_1} = 1,1$, $\psi = 0,02$.

Знак минус в результатах расчётов (см. рис. 5.15, б) означает, что упругое перемещение вследствие снятия остаточных напряжений при отжиге, а также за счет релаксации напряжений или термической обработки приведет к уменьшению внутреннего радиуса трубы на величину U_{r2} . С увеличением радиуса трубной заготовки возможные радиальные перемещения растут. При увеличении анизотропности (разница в свойствах между радиальными и осевыми направлениями) изделия уменьшается величина радиальных перемещений. Отклонения от номинального размера на наружной поверхности больше, чем на внутренней.

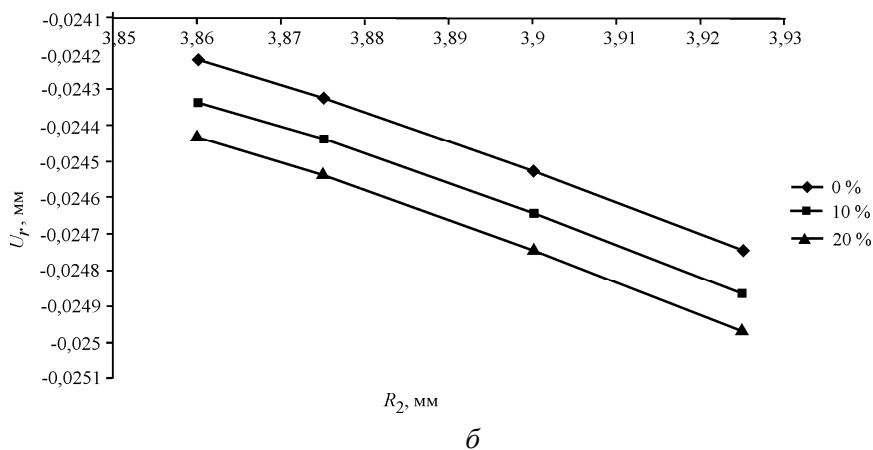
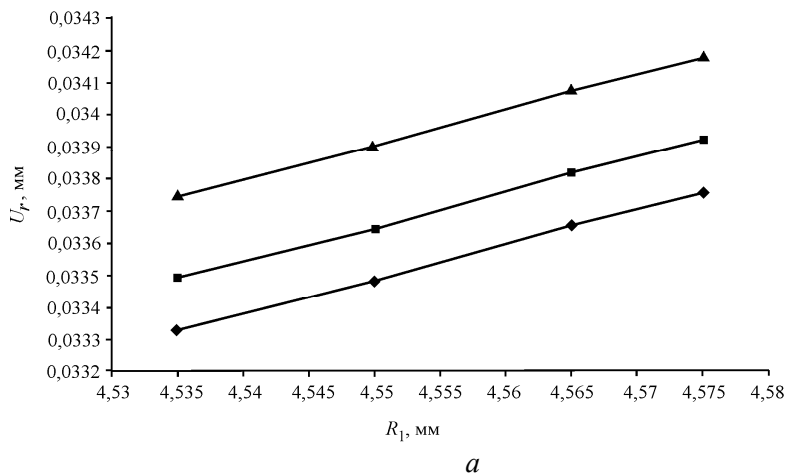


Рис. 5.15. Оценка радиальных перемещений от действия остаточных напряжений в трубных изделиях на внешней (а) и внутренней (б) поверхности трубы

Геометрические размеры труб и их предельные отклонения указаны в табл. 5.5. Наличие допуска овальности в данной таблице говорит о возможной неравномерности остаточных напряжений по периметру и длине трубных изделий.

Длина труб не более 4500 мм. Отклонение от прямолинейности трубы на длине 500 мм не более 0,5 мм, на всей длине трубы не более 1,5 мм.

Сравнивая результаты расчётов, представленные на рис. 5.15 и допуски по размерам труб в табл. 5.5, можно сделать вывод, что радиальные отклонения на наружной и внутренней поверхностях циркониевых труб соизмеримы с предельными отклонениями от номинальных размеров обычной точности [16].

Таблица 5.5

Геометрические размеры труб и их предельные отклонения [16]

Наружный диаметр		Внутренний диаметр		Толщина стенки, не менее	Овальность* по наружному диаметру, не более
Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.		
9,07	±0,05	7,73	+0,06	0,62	0,04
9,10				0,63	
9,13		7,72 7,73	+0,07...+0,06	0,62–0,63	
9,15		7,72 7,73	+0,07...+0,06	0,62–0,63	
13,58		11,7	+0,10	0,85	0,06

* Овальность – разность максимального и минимального значений наружного диаметра в любом поперечном сечении трубы.

Таким образом, в данном разделе представлены методики оценки возможного отклонения от номинальных размеров прутков и труб за счет упругой деформации от остаточных напряжений, сформированных в процессе пластического деформирования анизотропных металлоизделий. Изменение геометрических размеров за счет упругой деформации от действия остаточных напряжений может быть существенным, что говорит о необходимости их учета при изготовлении высокоточных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин С.А. Циркониевые сплавы для ядерных энергетических реакторов. – М.: Учеба, 2007. – 92 с.
2. Займовский А.С. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Наука, 1981.
3. Блюменталь, Уоррен Б. Химия циркония. – М.: Изд-во ИЛ, 1963.
4. Ривкин Е.Ю. Прочность сплавов циркония. – М.: Наука, 1974.
5. Меерсона Г.А. Металлургия циркония. – М.: Изд-во ИЛ, 1959.
6. Кузнецова Е.В., Рузанова Е.А., Соколовская К.Р. Оценка точности изготовления прецизионных циркониевых изделий, используемых в термоядерных реакторах // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2004: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – С. 68.
7. Кузнецова Е.В., Балабанов Д.С. Остаточные напряжения при производстве циркониевых труб / Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2006: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – С. 103.
8. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.
9. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
11. Kolmogorov G., Kuznetcova E, Filippov V. Residual stresses and accuracy of pipe preparations by manufacture zirconium tubes for the nuclear industry // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 524–525. – P. 703–708. – Trans Tech Publications, Switzerland.
12. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Формирование остаточных технологических напряжений и прочность анизотропных осесимметричных прутковых металлоизделий // Механика

композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 395–400.

13. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Влияние последеформационных остаточных напряжений на точность металлоизделий / Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 7. – С. 42–44.

14. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Остаточные напряжения и прочность анизотропных осесимметричных металлоизделий // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2009): материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов и молодых учёных. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-а. – 2010. – С. 48–54.

15. Прутки [Электронный ресурс]. Продукция Чепецкого механического завода (ЧМЗ). – URL: <http://www.chmz.net/product/zr/prutki/> свободный.

16. Трубы [Электронный ресурс]. Продукция Чепецкого механического завода (ЧМЗ). – URL: <http://www.chmz.net/product/zr/truba/> свободный.

Научное издание

КОЛМОГОРОВ Герман Леонидович,
КУЗНЕЦОВА Елена Владимировна,
ТИУНОВ Валерий Викторович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ
МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Монография

Редактор и корректор *И.А. Мангасарова*

Подписано в печать 25.06.12. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 14,25. Тираж 150 экз. Заказ № 127/2012.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33