

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ
имени адмирала Макарова

НОВОШИЦКИЙ А. В.

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ МАЛОТОННАЖНЫХ СУДОВ**

Николаев – 2021

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ
имени адмирала Макарова

НОВОШИЦКИЙ А. В.

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ МАЛОТОННАЖНЫХ СУДОВ**

Рекомендовано Ученым советом Национального университета
кораблестроения имени адмирала Макарова в качестве монографии
(протокол № 06 от 25.06.2021 г.)

УДК 629.5.02

Н 76

Рекомендовано Ученым советом Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова в качестве монографии (протокол № 06 от 25.06.2021 г.)

Рецензенты:

Рашковский А.С. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии судостроения;

Ревнюк П.Я. – глава правления – директор Украинского научно-исследовательского института технологии судового машиностроения

Новошицкий А.В.

Технология изготовления модульных конструкций малотоннажных судов: Монография. – Николаев : издательство Швец В.М., 2021. – 164 с.

В монографии изложена технология изготовления тонкостенных профильных элементов судовых конструкций гибкой с продольным растяжением. Технология является универсальной, энергосберегающей и применима при модульной постройке малотоннажных судов.

Приведена инженерная методика расчета основных энергосиловых параметров технологии. Разработаны технологические схемы гибки с продольным растяжением для получения гофрированных модуль-панелей, профильных модуль-элементов для корпусных конструкций, надстроек, судовых помещений.

Дано описание сконструированной и изготовленной опытно-промышленной установки.

Приведено описание гибкого технологического комплекса для изготовления модульных конструкций малотоннажных судов.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников судостроительных предприятий, может быть полезна студентам и аспирантам, специалистам в области обработки металлов давлением.

УДК 629.5.02

ISBN 978-617-7421-79-4

© Новошицкий А.В., 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ	8
1.1. Область применения тонкостенных гнутых профилей в судостроении	8
1.2. Способы формообразования гнутых профилей	11
1.3. Методы расчета основных технологических параметров гибки.....	20
РАЗДЕЛ 2. УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ПОЛОСЫ С ПРОДОЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ	28
2.1. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала без упрочнения	29
2.2. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением.....	44
2.3. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала со степенным упрочнением	53
2.4. Работа при упругопластическом изгибе с продольным растяжением полосы из материала без упрочнения	62
2.5. Работа при упругопластическом изгибе с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением	68
2.6. Испытания образцов при упругопластическом изгибе с продольным растяжением	70
РАЗДЕЛ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ГИБКОЙ С ПРОДОЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ	86
3.1. Экспериментальная установка	86
3.2. Режимы и условия исследований	90
3.3. Анализ результатов экспериментальных исследований	95

РАЗДЕЛ 4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ГИБКОЙ С ПРОДОЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ	99
4.1. Силовые воздействия на заготовку	99
4.2. Пружинение изгибаемого участка	104
4.3. Силы, действующие на профилирующие ролики	106
4.4. Работа и мощность при профилировании заготовки	108
4.5. Алгоритм расчета параметров технологического процесса изготовления профилей гибкой с продольным растяжением	110
РАЗДЕЛ 5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ	113
5.1. Особенности формообразования тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением	113
5.2. Технологические схемы и способы формообразования профилей...	115
5.3. Технические требования к установке для изготовления тонкостенных профилей	123
5.4. Профилирующая установка	125
5.5. Технологические и энергетические преимущества технологии изготовления судовых гнутых профилей гибкой с продольным растяжением	137
5.6. Рекомендации по применению тонкостенных гнутых профилей в судовых конструкциях	138
РАЗДЕЛ 6. ГИБКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МАЛОТОННАЖНЫХ СУДОВ	143
6.1. Проектирование малотоннажных судов на модульных принципах	143
6.2. Модуль-панели и унифицированные модуль-элементы	146
6.3. Поточная автоматизированная линия для изготовления модульных конструкций малотоннажных судов	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	155

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основным направлением развития современного судостроения является создание автоматизированного судокорпусного производства на базе новых высокопроизводительных и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих кардинальное повышение точности и качества изготовления деталей судовых конструкций.

Внедрение новых технологий на судостроительных предприятиях позволяет снизить трудоемкость, уменьшить металлоемкость, затраты на электроэнергию, рационально использовать производственные площади, сократить сроки постройки судов, повысить рентабельность и конкурентоспособность отечественного судостроения. Оптимальным при этом является применение модульных принципов проектирования и постройки судов, что позволяет существенно повысить эффективность судостроительного производства. Для изготовления модульных конструкций корпусов, надстроек судовых помещений необходимы унифицированные профильные детали.

Судостроительному производству присуще использование широкой номенклатуры и небольших партий гнутых профилей, изготавливаемых из высокопрочных коррозионностойких, конструкционных и легированных сталей, алюминиевых сплавов.

За последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция ускорения сменяемости изделий судостроения и снижение серийности. Малосерийность строительства судов вызывает определенные проблемы централизованных поставок профилей в относительно небольших объемах. В таких условиях оказывается целесообразным их производство непосредственно на судостроительном предприятии.

Производство тонкостенных профильных элементов для судовых конструкций на существующем заводском технологическом оборудовании не всегда возможно и рационально. С уменьшением их толщины традиционные технологии формообразования не обеспечивают необходимого качества.

Одним из направлений совершенствования процессов формообразования судовых деталей является использование при их изготовлении локального силового воздействия.

Производство профилей небольшими сериями при широкой номенклатуре непосредственно на судостроительном предприятии возможно на основе разработанной технологии профилирования с продольным растяжением [1]. Технология предусматривает последовательное локальное формоизменение заготовки при действии на нее продольной растягивающей нагрузки. Такая схема деформирования позволяет избежать применения мощного прессового оборудования и специальной крупногабаритной штамповой оснастки.

Технология позволяет получать высокоточные длинномерные тонкостенные детали с различной конфигурацией поперечного сечения и различной продольной кривизной.

При разработке и исследовании технологии профилирования использовались методы системного анализа и синтеза. Теоретические исследования деформирования полосы с предварительным продольным растяжением осуществлялись на основе деформационной теории пластичности. Адекватность теоретических результатов подтверждена экспериментальными исследованиями. Отработка технологии профилирования проводилась на изготовленных экспериментальной и опытно-промышленной профилирующих установках.

Представленная технология изготовления высокоточных тонкостенных профильных элементов судовых конструкций применима при строительстве модульных малотоннажных судов, учитывая их размеры и внешние действующие нагрузки. Согласно технологии разработан гибкий технологический комплекс для проектирования малотоннажных судов с использованием модульных конструкций, гофрированных модуль-панелей, профильных модуль-элементов. Приведена поточная автоматизированная линия с применением профилирующей растяжной установки для изготовления

унифицированных профильных деталей. Такая установка является новым универсальным средством технологического оснащения судостроительного завода, особенно при постройке малотоннажных судов.

Постройка модульных малотоннажных судов является важной и актуальной задачей судостроения. Создание маломерного речного и прибрежного флота открывает большие возможности для экономичных и экологичных водных перевозок, позволяет интегрироваться в трансевропейское речное судоходство.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

1.1. Область применения тонкостенных гнутых профилей в судостроении

Гнутые профили, изготавливаемые из полос и листов, являясь высокоэкономичным видом металлопродукции, широко используются в самолетостроении, судостроении, автомобилестроении, строительстве и других отраслях промышленности. Сортамент холодногнутому профилей характеризуется значительным разнообразием и включает уголковые, швеллерные, корытные, зетовые, С-образные и специальные широкополочные листовые профили.

Основные области применения тонкостенных гнутых профилей в судостроении:

- формирование обрешетки кают, коридоров, подволока;
- формирование помещений и выгородок, металлической раскладки;
- изготовление защитных кожухов кабельных трасс и подвесок их крепления;
- изготовление деталей приборных шкафов, светильников, инспекционных лючков;
- изготовление деталей камбуза и зашивка нержавеющей панелями;
- изготовление деталей судовой мебели и скоб для ее крепления.

Актуальной проблемой в настоящее время при проектировании и постройке судов является формирование и отделка судовых помещений. Трудоемкость работ по отделке и оборудованию помещений для транспортных судов составляет 5...9 % от общей трудоемкости их постройки [2].

Для формирования и отделки судовых помещений применяется каркасная и бескаркасная модульные системы [1–5].

При каркасной модульной системе контур помещения изготавливается из стальных гнутых профилей. Отделочные оболочки панелей изготавливают методом холодной штамповки из металлопласта или оцинкованной стали.

Некоторые примеры применения различных профилей и панелей для формирования и отделки судовых помещений с использованием каркасной модульной системы представлены на рис. 1.1–1.2 [2–5].

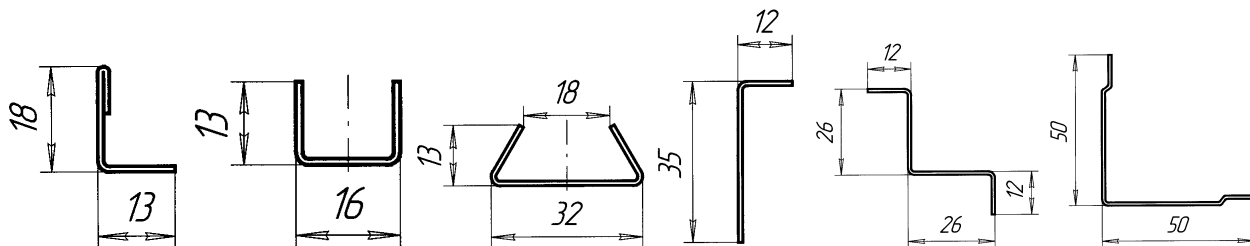


Рис. 1.1. Основные профильные элементы однорядной модульной системы М100

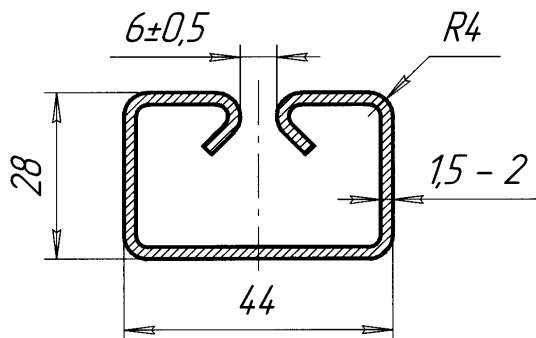


Рис. 1.2. Поперечное сечение гнутого профиля для изготовления каркасов судовых помещений ПС-37

Перспективной также считается бескаркасная модульная система. Основными ее элементами являются трехслойные панели из стальных гнутых профилей с минеральным наполнителем. Длина панелей до 3000 мм, ширина до 600 мм. Для совершенствования модульных систем необходима разработка новых технологий, в частности, для изготовления тонкостенных гнутых элементов панелей [2–5].

Тонкостенные гнутые профили используются для изготовления защитных кожухов и для крепления кабелей. Для декоративной отделки стен судовых помещений применяются панели из металлопласта, оцинкованной

стали, алюминиевых сплавов и тонкостенной нержавеющей стали с различным покрытием и рельефом.

Изготовление тонкостенных судовых конструкций обеспечивается современными высокопроизводительными способами сварки [6]. Перспективной является разработанная в Институте электросварки имени И.Е. Патона технология сборки и сварки крупногабаритных панелей с предварительным упругим растяжением [7].

Для производства судовых тонкостенных конструкций гнутые профили, выпускаемые специализированными предприятиями, не всегда применимы. Судостроение характеризуется единичным и мелкосерийным производством. Сортамент и количество гнутых профилей зависят от типов изготавливаемых судов. В таких условиях рациональным является изготовление тонкостенных гнутых профилей непосредственно на судостроительных заводах.

Рациональная технология профилирования должна соответствовать требованиям современного судостроительного производства [8, 9]. Прогрессивными ресурсосберегающими технологиями в судостроении считаются технологии, основанные на принципах минисилового локального деформирования для формообразования элементов судовых конструкций. Локальный принцип силового воздействия позволяет существенно уменьшить металлоемкость оборудования, технологической оснастки, энергоемкость технологических процессов деформирования [9, 10].

Снижение металлоемкости конструкций судов, катеров, яхт сдерживается технологическими возможностями производства тонкостенных гнутых элементов судовых деталей.

В основу разработки технологии изготовления судовых тонкостенных профильных элементов положены следующие факторы:

- необходимость использования локального силового воздействия при профилировании с целью снижения мощности профилирующего оборудования и обеспечения необходимой точности готовых профилей;

- возможность получения длинномерных тонкостенных гнутых профилей повышенной точности и жесткости, а также профилей с различной продольной кривизной;
- возможность быстрой переналадки оборудования и оснастки при переходе на выпуск профилей для судов различных типов, а также возможность автоматизации технологического процесса профилирования.

1.2. Способы формообразования гнутых профилей

Выбор рациональной технологии изготовления тонкостенных гнутых профилей выполнен на основе системного анализа путем последовательного рассмотрения структурных признаков существующих способов профилирования с учетом особенностей судостроительного производства.

В качестве основных структурных признаков способов профилирования приняты такие: вид деформации при силовом воздействии, характер распределения силового воздействия, агрегатное состояние и форма заготовки, агрегатное состояние инструмента, наличие дополнительных направляющих и фиксирующих устройств.

Технологические процессы изготовления гнутых профилей разделяются на гибку свободным изгибом, гибку-штамповку, гибку-прокатку на профилегибочных станах, волочение в фильерах или в неприводных роликах [11–22].

Холодная гибка свободным изгибом и гибка-штамповка являются наиболее применяемыми технологическими процессами в судостроении, которые осуществляются посредством поперечного изгиба плоской полосы на гидравлических, кромкогибочных прессах или с помощью различных приспособлений [2, 11–13].

При гибке свободным изгибом плоская заготовка устанавливается на опоры матрицы и изгибается усилием пуансона. Формоизменение заготовки в результате пластического деформирования происходит по переменной кривизне, вид которой зависит от расстояния между опорами, величины задаваемого

прогиба, механических свойств материала. Необходимую форму длинномерного профиля получают за одну операцию или многократными последовательными гибом с продольной подачей заготовки после каждого гибо. Величина прогиба заготовки устанавливается опытным или расчетным путем с учетом пружинения.

При гибке-штамповке заготовка размещается между пуансоном и матрицей, рабочие поверхности которых имеют конфигурацию, соответствующую форме профиля с учетом пружинения материала после снятия нагрузки. Силовое воздействие осуществляется по поверхности заготовки. В начальный период деформирования происходит свободный изгиб заготовки до того, как прямые полки заготовки не станут параллельными боковым стенкам матрицы и не войдут с ними в соприкосновение. Кривизна изгиба при этом распределяется по длине заготовки также, как и при свободном изгибе.

В конечный момент деформирования боковые поверхности пуансона и матрицы контактируют с полками заготовки по всей их длине. Усилие гибки, необходимое для деформирования заготовки до момента соприкосновения полок со стенками матрицы, такое же, как и усилие при гибке свободным изгибом, затем существенно возрастает. При обратном ходе пуансона, т. е. после разгрузки, происходит упругое пружинение согнутого уголка: радиус и угол между полками изменяется. Заданный угол между полками получают за счет выбора угла штампа с учетом пружинения. Обычно угол штампа определяют при предварительных расчетах или экспериментально в соответствии с результатами гибки первых заготовок.

Профиль со сложной формой поперечного сечения изготавливают многопереходной гибкой. Сначала изгибается одна полка, затем производят последующие гибо. Изготавливаемые таким способом профили имеют относительно невысокую точность.

Изготовление профилей сложной формы при однопереходной гибке производится в специальных штампах [2, 11–16].

Для повышения точности профилей применяется дополнительная операция – калибровка, при которой осуществляется изгиб заготовки и

последующее сжатие. Калибровка предназначена для фиксирования мест изгиба, уменьшения упругого пружинения, придания правильной формы полкам профиля. При калибровке значительно увеличивается необходимое усилие прижима.

При гибке свободным изгибом силовое воздействие на заготовку осуществляется по всей длине заготовки, а при гибке-штамповке и калибровке – по поверхности. Следовательно, усилие, необходимое для формоизменения заготовки, значительно.

Кроме того, после гибки свободным изгибом и гибки-штамповки вследствие колебания толщины и механических свойств заготовки, как правило, возникает продольная кривизна профиля, возможна потеря устойчивости его полок и образование гофров, особенно при изготовлении тонкостенных профилей. Поэтому необходимы последующие операции правки [11–13]. Существенным может быть утонение материала в местах изгиба заготовки.

Преимуществом рассмотренных технологических процессов изготовления профилей свободным изгибом и штамповкой является универсальность, возможность изготовления профилей различных типоразмеров. К недостаткам следует отнести значительную энергоемкость, необходимость использования мощного прессового оборудования, крупногабаритной штамповой оснастки, сложность автоматизации.

Для производства гнутых тонкостенных профилей на судостроительных заводах необходимо менее металлоемкое оборудование, обеспечивающее надлежащую точность профилей.

Массовое производство гнутых профилей осуществляется на разнообразных роликовых машинах [17–21]. При изготовлении профилей плоская заготовка поступательно перемещается и изгибается деформирующими роликами, которые совершают вращательное движение и оказывают многократное точечное силовое воздействие на заготовку.

Профилегибочный стан для изготовления профилей из ленты или листовых заготовок содержит станину, на которой размещены клетки с роликами,

вращающимися от электропривода, входной направляющий стол и промежуточные столы, установленные между клетями и обеспечивающими необходимое положение заготовки в процессе гибки.

Технологический процесс изготовления гнутых профилей волочением подобен гибке на роликовых машинах. Формоизменение заготовки осуществляется протяжкой через неприводные ролики или другую профилирующую оснастку [20, 21, 23–25].

Недостатком профилирования в роликовых машинах является низкая универсальность оборудования по типоразмерам профилей, необходимость значительного количества сменных профилирующих роликов и затраты времени на их замену и настройку. При изготовлении тонкостенных профилей, особенно из малопластичных высокопрочных сталей, возможно появление волнистости кромок и скрученности профилей.

Профилирование на роликовых гибочных машинах эффективно только при значительном объеме и централизованном производстве профилей [19, 20]. Для условий судостроительного предприятия его применение нецелесообразно.

Кроме рассмотренных основных технологических процессов применяются различные комбинированные способы формообразования профилей в зависимости от формы их поперечного сечения, размеров и механических свойств материала заготовки. Такие способы профилирования являются соответствующим сочетанием комбинаций приведенных выше структурных признаков и отражены в многочисленных изобретениях и патентах. Каждому структурному признаку соответствуют определенные технические решения. Из многочисленных комбинированных способов профилирования должны быть отобраны наиболее пригодные для условий судостроительного производства.

Формоизменение заготовки может осуществляться в холодном или пластичном состоянии. Пластичное состояние заготовки создается при нагреве в печах, индукционном нагреве [26], нагреве заготовки в результате пропускания

электрического тока, при воздействии ультразвуковых колебаний, лучом лазера, электроконтактным нагревом.

Предварительное деформирование заготовки производится с различными целями. Для уменьшения пружинения на поверхности заготовки создается микрорельеф из лунок с определенными размерами и расстоянием между ними. Для точного направления заготовки в роликовых машинах на заготовке формируются продольные канавки, которые при дальнейшем профилировании устраняются [17, 27].

В некоторых случаях осуществляют предварительное деформирование заготовки в продольном или поперечном направлении с последующим устранением созданных деформаций [17, 27]. Для устранения волнистости плоских участков профилей предусматривают технологическую отбортовку.

Силовое воздействие на заготовку характеризуется различным направлением и последовательностью приложения внешних нагрузок. Одновременно с изгибом заготовки для уменьшения пружинения с противоположной стороны пуансона прикладывается радиальное усилие сжатия. Это обуславливает в ряде случаев недопустимое утонение заготовки в месте изгиба.

Для предотвращения утонения мест изгиба к элементам профиля прикладывается поперечное усилие сжатия [20, 21]. Для получения профилей с минимальными радиусами гибки и создания утолщения в зоне гибки после изгиба к элементам профиля прикладываются нормальные и поперечные усилия.

При формировании профилей для уменьшения пружинения элементы заготовки перегибают, а затем при последующем деформировании разгибают.

Изготовление профилей может осуществляться без силового воздействия бесконтактным методом с помощью лазерного луча [28]. Необходимая кривизна профиля достигается в результате многократных проходов лазерным лучом вдоль линии гибки.

Возможно последовательное изготовление профилей в штампах при подаче заготовки из рулона, усилие штамповки создается кулачковым механизмом [29].

Возможно изготовление профилей последовательным деформированием жестко закрепленной заготовки, инструментом, выполненным в виде клина с винтовой рабочей поверхностью, который перемещается вдоль прижимной балки [23]. Прижимная балка закреплена на рабочем столе. Способ характеризуется локальным приложением нагрузки, однако невысокой точностью изготовленных профилей вследствие возникновения их продольной кривизны и в некоторых случаях волнистости полок.

Деформирующий инструмент, воздействующий на заготовку, может совершать сложное движение. Силовое воздействие деформирующего инструмента может быть прерывистым, при котором совершается последовательное деформирование участков профиля из рулонного материала.

Агрегатное состояние деформирующего инструмента может быть твердым с постоянной или изменяемой формой в зависимости от необходимой формы профиля, эластичным. Матрица для штамповки или профилирующие ролики могут быть изготовлены из полиуретана или твердой резины [16, 30].

Изготовление профилей может производиться гибкими элементами, например стальными канатами, расположенными в соответствии с формой профиля. Гибочное устройство содержит неподвижную и подвижную траверсы с закрепленными на них гибкими элементами, размещенными по разные стороны плоскости заготовки [31]. При создании растягивающей нагрузки гибкие элементы, контактирующие с заготовкой, производят формообразование профиля. Способ позволяет изготавливать только особо тонкостенные профили с волнистой формой поперечного сечения. Изготовление профилей со сложной конфигурацией и высокой точностью невозможно.

При формоизменении заготовки в качестве посредника между деформирующими инструментами и заготовкой могут использоваться фиксирующие и направляющие элементы для точной ориентации заготовки,

металлические прокладки, прокладки из эластичного материала, разнообразные оправки [17].

Изготовление профилей с продольной кривизной осуществляется деформированием в штампах соответствующей формы [11–15]. Для регулирования продольного изгиба профилей при их изготовлении в профилегибочных станах некоторые из пар профилирующих роликов могут перемещаться в вертикальном направлении или вдоль продольной оси и снабжаться соответствующими механизмами перемещения [19].

Для изготовления профилей с продольной кривизной применяется изгиб с тангенциальным растяжением [14, 16, 32].

С уменьшением толщины заготовок рассмотренные выше способы изготовления гнутых профилей не всегда обеспечивают необходимое их качество. Вследствие значительного пружинения и невысокой жесткости тонкостенных заготовок в изготовленных профилях, как правило, возникают различные дефекты: продольные искривления, скручивание, волнистость полок в результате потери устойчивости.

Для устранения дефектов гнутых профилей широко применяется операция правки с помощью растяжных машин, создающие осевую растягивающую нагрузку [33]. Правка растяжением является высокопроизводительным технологическим процессом и обеспечивает высокую точность правленных профилей [13].

Чтобы исключить необходимость применения дополнительного правильного оборудования, технологический процесс изготовления профилей должен предупреждать появление дефектов их формы непосредственно в процессе производства.

Для мелкосерийного производства, которое характерно для судостроения, существующие схемные решения профилирования тонкостенных элементов конструкций малопригодны. Техническая реализация их воплощается в громоздких агрегатах. Им не присущи гибкость и мобильность, необходимость

которых вытекает, кроме мелкосерийности, также из-за увеличения темпов сменяемости проектов.

За последние десятилетия по сути не были предложены схемные решения, принципиально отличные от прежних, которые удовлетворяли бы требованиям современных производств, в частности судостроения.

Мелкосерийность судостроения всегда вызывала проблему поставок материалов и полуфабрикатов, в первую очередь для достроечного производства. И проектантам, и строителям приходилось подстраиваться под номенклатуру профилей, выпускаемых в массовых количествах, сужение номенклатуры, что сдерживало творческие замыслы и приводило к удорожанию себестоимости судовых конструкций.

Наиболее близкими к требованиям судостроительного производства являются способы изготовления гнутых профилей гибкой с продольным растяжением [1, 34, 35], которые были разработаны в Николаевском кораблестроительном институте (ныне Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова).

Технологический способ гибки с продольным растяжением согласно [34] состоит в том, что концевые участки плоской заготовки деформируются в соответствии с формой получаемого профиля, а затем заготовка подвергается растяжению. При растяжении деформации от концевых участков распространяются по всей длине заготовки, и таким образом формируется профиль (рис. 1.3).

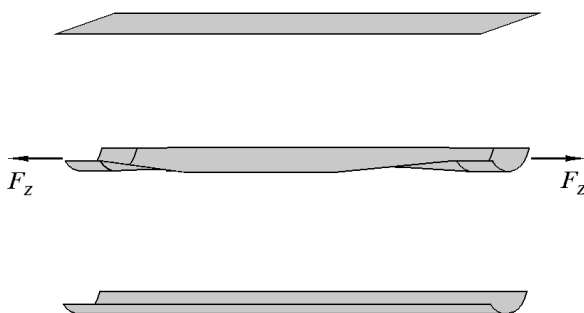


Рис. 1.3. Способ изготовления профилей с продольным растяжением по [34]

Для достижения повышенной точности профилей растянутая заготовка может подвергаться воздействию профилирующих роликов, перемещающихся от одного концевого участка к другому (рис. 1.4) [35].

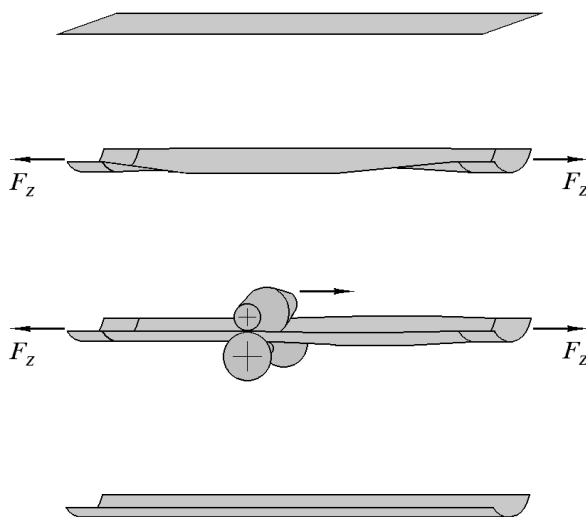


Рис. 1.4. Способ изготовления профилей с продольным растяжением по [35]

Эти способы (рис. 1.3, 1.4) характеризуются локальным силовым воздействием на растянутую заготовку в результате последовательного перемещения профилирующего инструмента. Способы пригодны для формирования тонкостенных профилей, однако они не позволяют получать профили со сложной конфигурацией. Технологические особенности способов не изучены. Экспериментальные исследования не проводились. Технологические процессы, основанные на этих методах, не разрабатывались.

Для совершенствования и использования таких способов гибки с продольным растяжением проведены исследования по определению оптимальных параметров технологического процесса, разработаны новые технологические схемы формирования тонкостенных гнутых профилей, проведены экспериментальные исследования технологии профилирования. При этом были учтены основные тенденции по оптимизации технологических процессов металлообработки [36].

1.3. Методы расчета основных технологических параметров гибки

Существующие методы расчета параметров технологических процессов изготовления профилей основываются на результатах теоретических и экспериментальных исследований пластического изгиба. Анализ этих методов позволяет обосновано подойти к установлению закономерностей формоизменения заготовки гибкой с продольным растяжением.

Проведенный обзор технологических способов изготовления гнутых профилей показывает, что формоизменение заготовки осуществляется при различных силовых воздействиях, вызывающих деформацию пластического изгиба, сжатия или растяжения.

При расчетах параметров технологического процесса профилирования устанавливают величины и характер приложения внешних нагрузок, форму и размеры профилирующей оснастки, минимально-допустимые радиусы гибки.

Расчеты параметров каждого технологического процесса профилирования производят в зависимости от формы и размеров изготавливаемого профиля, схемы деформирования, механических свойств материала заготовки.

Разнообразные формы поперечного сечения профилей являются сочетанием сопрягаемых прямо- и криволинейных участков, которые образуются в результате пластического деформирования. Любая форма поперечного сечения профиля может быть представлена как комбинация отдельных криволинейных элементов, которые характеризуются одинаковым напряженно-деформированным состоянием в процессе деформирования [11–19].

В результате последовательного расчета криволинейных элементов при заданной схеме нагружения заготовки определяется силовое воздействие на нее в зависимости от формы профиля, величины пружинения мест изгиба после разгрузки.

Согласно полученным данным по величине внешних нагрузок и скоростного режима формообразования, выбранного для обеспечения заданной

производительности, рассчитывается потребная мощность профилирующего оборудования, устанавливаются форма и размеры технологической оснастки.

Определяющими для расчета процессов профилирования являются задачи о чистом изгибе, поперечном изгибе, изгибе с тангенциальным растяжением.

Решение таких задач выполнено при различных допущениях в работах Н.И. Безухова, А.А. Ильюшина, Е.Н. Мошнина, М.В. Сторожева, И.П. Ренне, Н.Н. Малинина, Р. Хилла, И.С. Тришевского, Г.А. Смирнова-Аляева и др. [14, 15, 37–41].

Теоретический анализ пластического изгиба осуществлялся преимущественно на основе деформационной теории пластичности или теории течения.

Деформационная теория пластичности, или теория малых упругопластических деформаций, принята при инженерных расчетах параметров технологических процессов гибки в судостроении.

При аналитических методах расчета деформаций, напряжений, энергии деформирования в процессах профилирования используются различные аппроксимации зависимости «интенсивность напряжений–интенсивность деформаций». Диаграммы деформирования материала получают в результате обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях образцов в условиях одноосного напряженного состояния [42].

Для аппроксимации кривых деформирования применяются различные аналитические зависимости: линейные, степенные, показательные, логарифмические, алгебраические полиномы. При использовании ЭВМ для повышения точности расчетов кривая деформирования может быть представлена упорядоченными массивами соответствующих значений напряжений и деформаций.

Выбор того или иного метода аналитического представления кривых деформирования зависит от необходимой точности расчетов параметров гибки.

В качестве меры интенсивности деформаций при аппроксимации кривых упрочнения используется относительная или логарифмическая деформация. При пластических деформациях, меньших 15...20 %, относительная и логарифмическая деформации практически совпадают [38].

Большинство технологических процессов холодной гибки в судостроении осуществляется при относительных деформациях, меньших равномерного наибольшего относительного удлинения образцов.

Линейная аппроксимация диаграмм деформирования использовалась Е.Н. Мошным. Такая диаграмма представлялась в виде ломаной линии, состоящей из прямолинейных участков: участка упругих деформаций, соответствующих закону Гука, участка малых пластических деформаций, участка больших пластических деформаций. Предложенная упрощенная диаграмма деформирования для участка малых пластических деформаций применяется при расчетах параметров гибки в судостроении [1, 11–13]. Параметры кривой упрочнения определяют согласно механическим характеристикам, установленным при стандартных испытаниях образцов.

Линейная аппроксимация кривой деформирования в пределах пластических деформаций, возникающих при гибке, позволяет получить достаточную точность расчетов параметров гибки при использовании относительно простых аналитических зависимостей пластического изгиба.

При исследовании пластического изгиба М.И. Лысовым для учета упрочнения материала применялась степенная зависимость. В работе [18] приводятся константы кривых упрочнения наиболее используемых металлов и сплавов в состоянии поставки: листы и ленты, а также в ГОСТ 25.503-97.

Степенная и линейная аппроксимирующие зависимости используются при теоретических исследованиях гибки-прокатки профилей [19, 20].

При разгрузке после пластического деформирования принимается, что зависимость между напряжениями и деформациями соответствует закону Гука. Эффект Баушингера и пластическое последствие материала не учитываются.

Исходными для практических расчетов параметров гибки являются решения задач о пластическом изгибе полосы. Эти задачи рассмотрены согласно деформационной теории пластичности в работах [38, 40, 41].

В результате изгиба полосы возникают деформации и соответствующие напряжения в окружном (тангенциальном), радиальном и продольном (аксиальном) направлениях. Напряжения распределяются относительно нейтрального слоя, разделяющего зону растяжения и зону сжатия. Положение нейтрального слоя определяется условием равновесия внутренних сил. В результате изгибных деформаций изменяется форма поперечного сечения полосы, возникает утонение материала в местах изгиба, появляется продольная кривизна.

В зависимости от кривизны изгиба при теоретическом анализе используются различные допущения, поскольку полное решение вызывает значительные затруднения и усложняет расчетные зависимости.

В качестве меры кривизны изгиба обычно принимают относительный радиус изгиба, равный отношению радиуса изгиба к толщине изгибаемой полосы. В зависимости от величины относительного радиуса изгиба пластический изгиб разделяют на виды: объемный и линейный [14, 15].

Упругопластический изгиб соответствует стадии возникновения в растянутой и сжатой зонах полосы упругопластических деформаций, при этом упругие деформации оказывают существенное влияние на зависимость изгибающего момента от кривизны. Расчеты упругопластического изгиба полосы из сталей производят при относительных радиусах изгиба 100...200. При меньших относительных радиусах изгиба рассматривается линейный пластический изгиб, когда учитываются только тангенциальные деформации и напряжения, влияние упругой средней зоны на процесс деформирования не учитывается. Объемный пластический изгиб соответствует изгибу на относительные радиусы изгиба менее 3...5 и характеризуется значительными деформациями материала, а также возникновением сложного напряженно-деформированного состояния [14].

Исследования пластического изгиба и расчеты параметров технологических процессов гибки, штамповки, прокатки изложены в работах Е.Н. Мошнина [14, 15]. Приведены упрощенные аналитические зависимости для различных вариантов пластического изгиба. Рассмотрена задача об изгибе полосы с тангенциальным растяжением. Задача об изгибе полосы с продольным растяжением не рассматривалась.

В работах Н.Н. Малинина, [38] приведено решение задачи упругопластического изгиба при больших пластических деформациях с учетом тангенциальных и радиальных напряжений. Напряженно-деформированное состояние полосы принималось плоским, использовалось условие пластичности Треска–Сен-Венана. Получены зависимости для расчета окружных и радиальных деформаций и напряжений, возникающих при изгибе полосы, для материала с упрочнением и материала без упрочнения. Изучено изменение формы поперечного сечения полосы в процессе изгиба. Влияние продольного растяжения на упругопластический изгиб полосы не учитывалось.

В монографии М.И. Лысова [18] приведены аналитические зависимости для определения кривизны пластически изгибаемых элементов при различных схемах деформирования. Рассмотрены методы расчета и даны рекомендации по определению геометрических параметров профилирующего инструмента и оснастки при гибке свободным изгибом, гибке с тангенциальным растяжением и гибке-прокатке. Технологии формообразования рассматривались применительно к изготовлению тонкостенных деталей в авиационной промышленности. Теоретические исследования проводились с использованием при анализе пластического изгиба степенной функции. Упругопластический изгиб полосы с упругим продольным растяжением не рассматривался.

Результаты исследований по совершенствованию технологии гибки-прокатки и оборудования для изготовления гнутых профилей приведены в работе И.С. Тришевского [19]. На основе проведенных исследований получены технические решения по повышению качества гнутых профилей, интенсификации режима их формообразования. В указанных работах

рассмотрены закономерности процесса формообразования гнутых профилей в профилегибочных станах, решены задачи об изменениях формы и размеров мест изгиба, их упругого пружинения, о предельно допустимых радиусах гибки. Рассмотрены особенности профилирования с применением поперечно направленных растягивающих или сжимающих сил. Влияние продольного растяжения на процесс профилирования не рассматривалось.

Для определения точности формируемых деталей при обтяжке листа в работе А.А. Воропаева и С.С. Одингга [43] рассмотрена задача расчета пружинения заготовки по схеме нагружения: предварительное тангенциальное растяжение – изгиб при действии постоянной растягивающей силы, затем последующее растяжение при постоянной кривизне внутренней поверхности заготовки. Принято, что материал листа жестко-пластичный, использовано условие пластичности Мизеса. Приведены результаты экспериментальных исследований гибки листовых заготовок из сплава АМг-5М. Схема нагружения заготовки предварительное продольное растяжение–поперечный пластический изгиб не рассматривалась.

Для повышения точности расчетов параметров технологических процессов изготовления ответственных профильных деталей используются вариационные методы расчета, применяется метод конечных элементов.

В работе [44] рассмотрены задачи определения несущей способности балок судовых конструкций при упругопластическом изгибе с продольным растяжением. Использовалась модель жестко-пластичного тела. Установлены соотношения между изгибающим моментом и продольной силой, при которой балки не теряют несущей способности.

В работе [45] для оценки несущей способности магистральных трубопроводов приведены теоретические и экспериментальные исследования упругопластического изгиба трубы с неравномерной толщиной стенки при комбинированном нагружении внутренним давлением, изгибающим моментом и продольной силой. Использовалась деформационная теория пластичности. Напряженно-деформированное состояние трубы принималось плоским.

Главными принимались окружные и продольные напряжения, которые равномерно распределены по толщине стенки трубы. Приведены результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований. Предложена методика для оценки несущей способности участка магистрального трубопровода.

Таким образом, при теоретическом анализе процессов пластического изгиба и разработке методов расчета основных технологических параметров операций гибки принимаются гипотезы и допущения, позволяющие получать сравнительно простые расчетные аналитические зависимости. При изгибе заготовки на относительные радиусы кривизны, большие 3...5, практические расчеты процессов формоизменения заготовки основываются на решении задачи линейного упругопластического изгиба. Материал заготовки считается изотропным, принимается гипотеза плоских сечений, согласно которой приращения деформации при увеличении кривизны заготовки пропорциональны расстоянию до нейтрального слоя напряжений. При больших кривизнах гибки и различных вариантах нагружения заготовки рассматривается сложное напряженно-деформированное состояние заготовки. Используется энергетическое условие пластичности Мизеса или условие пластичности Треска–Сен-Венана. Учет упрочнения материала производится при аппроксимации кривых деформирования материала относительно простыми функциями: линейной в области упругой деформации материала и линейной или степенной функцией в области пластических деформаций. Задача о пластическом изгибе полосы с упругим продольным растяжением применительно к расчетам параметров технологических процессов профилирования не рассматривалась.

Важным параметром технологического процесса гибки является величина работы, затрачиваемой для соответствующего формоизменения заготовки. Задача о величине работы при пластическом изгибе приведена в работах [17, 19]. Сравнительная оценка величины работы при различных схемах

силовых воздействий на заготовку с целью определения экономичности технологических процессов не проводилась.

Проведенный обзор методов расчета процессов гибки показывает, что задача об упругопластическом изгибе полосы с упругим продольным растяжением применительно к расчетам параметров технологического процесса профилирования не рассматривалась.

Решение такой задачи необходимо для дальнейшего развития теории пластического изгиба, а также обеспечения научной базы технологии профилирования гибкой с продольным растяжением.

Исходя из современного состояния судостроения и его тенденций возникает потребность в применении новой технологии изготовления тонкостенных профилей, которая позволит в условиях мелкосерийного производства осуществлять выпуск тонкостенных гнутых профилей расширенной номенклатуры и в требуемых объемах непосредственно на судостроительном предприятии.

Из проведенного анализа существующих способов изготовления тонкостенных профилей с учетом специфики судостроения одним из рациональных и перспективных является способ профилирования гибкой с продольным растяжением. Системного теоретического, экспериментального и технологического исследования такого способа профилирования не проводилось, не рассматривались направления расширения его технологических возможностей.

РАЗДЕЛ 2

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ПОЛОСЫ С ПРОДОЛЬНОМ РАСТЯЖЕНИЕМ

Для установления основных энергосиловых и точностных параметров технологического процесса изготовления профилей местным изгибом концевых участков заготовки, ее последующим растяжением и профилированием необходимо решение задачи упругопластического изгиба полосы, нагруженной осевой силой и изгибающим моментом. Схема нагружения полосы показана на рис. 2.1. Полоса предварительно подвергается растяжению, и при действии постоянной растягивающей нагрузки F_z осуществляется последующий изгиб при приложении изгибающего момента M .

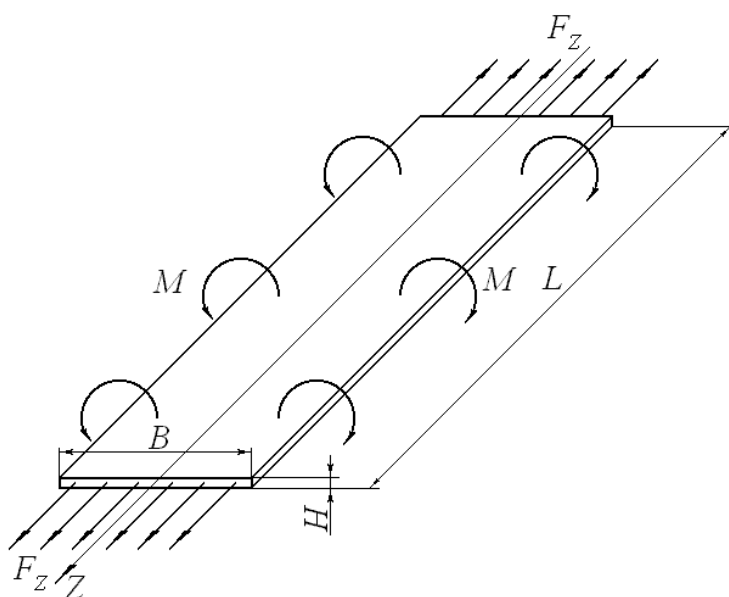


Рис. 2.1. Схема нагружения полосы

Для предотвращения неконтролируемого растяжения заготовки при изготовлении профиля растягивающие напряжения ограничиваются и не превышают предела текучести материала. Кроме того, при таком нагружении не возникает утонения заготовки при профилировании.

При теоретическом анализе упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением использованы гипотезы и допущения, применяемые в

исследованиях упругопластического изгиба и основанные на деформационной теории пластичности [37, 38]. Принята гипотеза плоских сечений, согласно которой поворот поперечных сечений полосы происходит перпендикулярно нейтральному слою напряжений. Материал полосы изотропный, т. е. сопротивление материала полосы одинаково при растяжении и сжатии. Рассматривается линейный упругопластический изгиб. Используется гипотеза пластичности Треска–Сен-Венана.

В качестве характеристики деформированного состояния полосы при изгибе принята относительная деформация продольного волокна в окружном направлении, пропорциональная кривизне изгиба и расстоянию до нейтрального слоя.

При гибке заготовок на относительные радиусы кривизны свыше 3...5 указанные выше допущения используются в практических расчетах различных способов гибки в судостроении [11–13] и позволяют разработать инженерную методику расчета основных параметров технологического процесса профилирования заготовок с предварительным продольным растяжением.

2.1. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала без упрочнения

Зачастую тонкостенные профили изготавливают из малоуглеродистых сталей, мягких алюминиевых и медных сплавов. Следовательно, при рассмотрении холодной гибки полосы зависимость между напряжениями и деформациями может быть принята согласно диаграмме деформирования идеального упругопластического материала. Использование такой аппроксимации упрощает на начальном этапе решение задачи и позволяет получить данные для последующей сравнительной оценки основных параметров пластического изгиба полосы и изгиба с предварительным продольным растяжением.

Напряженно-деформированное состояние полосы

Деформации и напряжения единичного элемента полосы показаны на рис. 2.2,*а*. На рис. 2.2,*б–г* показаны эпюры тангенциальных напряжений при изгибе полосы без растяжения, на рис. 2.2,*д–ж* эпюры тангенциальных напряжений при изгибе полосы с продольным растяжением.

При изгибе полосы, когда растягивающая сила отсутствует, вначале происходит упругий изгиб (см. рис. 2.2,*б*) и изгибающий момент пропорционален кривизне $\varphi = 1/\rho$

$$M = \varphi EI,$$

где ρ – радиус нейтрального слоя напряжений;

E – модуль нормальной упругости материала;

$I = \frac{LH^3}{12}$ – осевой момент инерции прямоугольного сечения;

L – длина полосы;

H – толщина полосы.

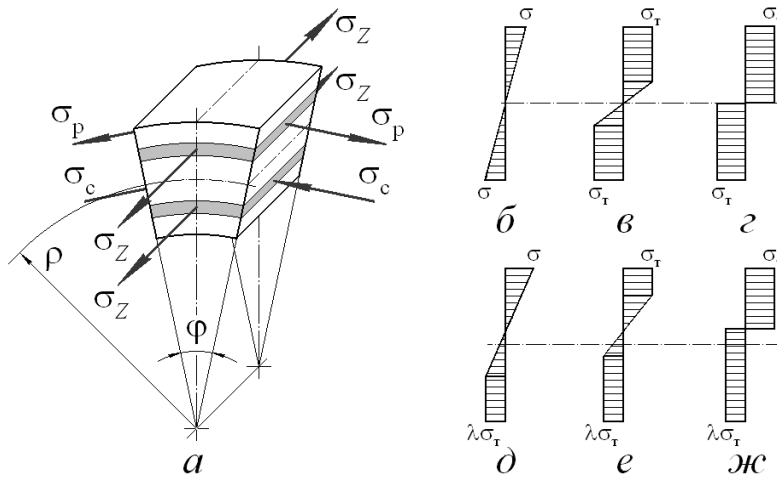


Рис. 2.2. Схема деформаций и напряжений при изгибе полосы

При $\varphi = \theta$, где $\theta = \frac{2\varepsilon_T}{H} = \frac{2\sigma_T}{EH}$ – наибольшая кривизна упругого изгиба, а

ε_T – упругая деформация, соответствующая пределу текучести материала σ_T , наибольший момент упругого изгиба определяется по известной зависимости

$$M_T = \theta EI = \sigma_T \frac{LH^2}{6}.$$

Анализ закономерностей упругопластического изгиба полосы рационально производить в относительных безразмерных величинах $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$.

Для случая линейного упругопластического изгиба, когда $F_Z = 0$, такая зависимость может быть получена следующим образом.

Схема деформаций и напряжений при упругопластическом изгибе единичного элемента полосы представлена на рис. 2.3.

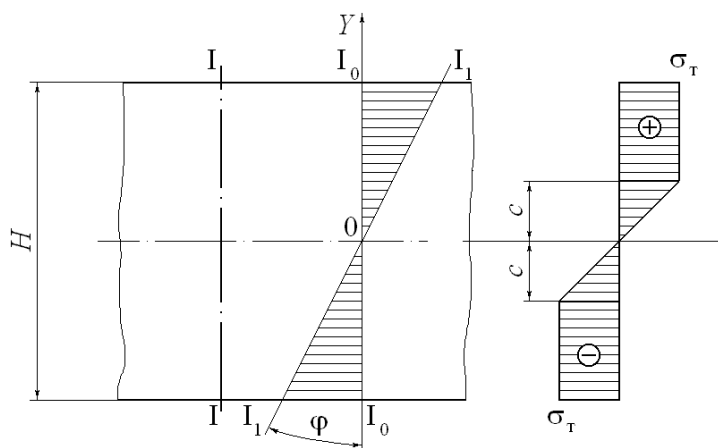


Рис. 2.3. Деформации и напряжения при упругопластическом изгибе полосы

На рисунке показан выделенный поперечными сечениями $I_0 - I_0$ и $I - I$ единичный участок изгибаемой полосы. $I_1 - I_1$ – положение сечения после приложения изгибающего момента. Поскольку расстояние между сечениями $I_0 - I_0$ и $I - I$ принято равным единице, то угол φ численно выражает кривизну полосы в момент изгиба, а деформации продольных волокон выделенного участка являются относительными деформациями $\varepsilon = \varphi y$.

Если $\varphi > \theta$, т. е. $M > M_T$, то в растянутой и сжатой зонах поперечного сечения полосы, располагаемых симметрично, возникают упругие и пластические деформации. Напряжения изгиба достигают предела текучести при $y = \pm c$. Таким образом, в полосе различаются упругая зона, в которой возникают упругие деформации, и пластическая зона, в которой деформации упругопластические.

Напряжения изгиба:

в упругой зоне при $0 < y < c$, $\sigma = \varepsilon E = \varphi y E$;

в пластической зоне при $c < y < \frac{H}{2}$, $\sigma = \sigma_T$.

Изгибающий момент, учитывая симметричное относительно оси положение напряжений,

$$M = 2 \int_{A_1} \sigma y dA + 2 \int_{A_2} \sigma_T y dA$$

где A_1 – площадь упругой зоны в растянутой области поперечного сечения;

A_2 – площадь пластической зоны в растянутой области поперечного сечения.

Для единичного элемента полосы $dA = dy$, поэтому

$$M = 2 \int_0^c \varphi E y^2 dy + 2 \int_c^{\frac{H}{2}} \sigma_T y dy.$$

После интегрирования, несложных преобразований и учитывая, что $\varphi c E = \sigma_T$, получим

$$M = \sigma_T \left(\frac{H}{2} \right)^2 - \frac{1}{3} \sigma_T c^2.$$

Формула соответствует известным решениям задачи чистого упругопластического изгиба полосы [14, 15, 18], которые представлены в ином виде.

Поскольку для единичного элемента полосы $M_T = \sigma_T \frac{H^2}{6}$, $\varepsilon_T = c\varphi = \theta \frac{H}{2}$

и $c = \frac{\theta H}{\varphi 2}$, тогда зависимость относительного изгибающего момента от относительной кривизны

$$\tilde{M} = \frac{3}{2} - \frac{1}{2\tilde{\varphi}^2}. \quad (2.1)$$

При $\varphi < \theta$, $\tilde{M} = \tilde{\varphi}$, при $\varphi = \theta$, $\tilde{M} = \tilde{\varphi} = 1$. Вычитаемая часть в формуле (2.1) отражает влияние напряжений в упругой зоне на величину изгибающего момента. При $\tilde{\varphi} > 5$ их влияние незначительно.

При больших значениях относительной кривизны полосы размеры упругого слоя значительно уменьшаются и образуется пластический шарнир (см. рис. 2.2,з), когда несущая способность полосы исчерпана и ее кривизна возрастает без увеличения изгибающего момента. Относительный изгибающий момент при этом соответствует известному значению $\tilde{M} = 1,5$ [14, 15].

Следует отметить, что анализ упругопластического изгиба проводится обычно в зависимости от относительного радиуса изгиба $\tilde{r} = \rho/H$ [14, 15], который, учитывая что $\varepsilon_T = 0,5H\theta$, связан с относительной кривизной формулой

$$\tilde{\varphi} = \frac{1}{2\varepsilon_T \tilde{r}}.$$

Для удобства пересчета параметров изгиба могут использоваться графики зависимости \tilde{r} от $\tilde{\varphi}$ при различных ε_T , которые приведены на рис. 2.4.

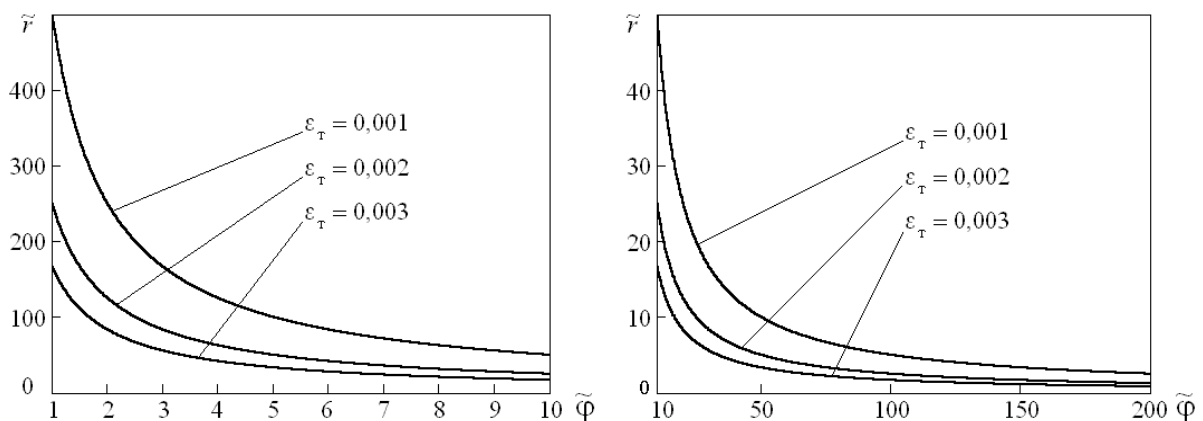


Рис. 2.4. Графики зависимости относительного радиуса кривизны полосы от относительной кривизны

Например, наибольшей относительной упругой кривизне полосы $\tilde{\varphi} = 1$, если $\varepsilon_T = 0,001$, соответствует наибольший радиус упругого изгиба $\tilde{r} = 500$. При $\tilde{\varphi} \geq 5$, когда влиянием упругой зоны на \tilde{M} можно пренебречь, $\tilde{r} \geq 100$. Относительным радиусам кривизны $\tilde{r} = 3...5$ соответствует $\tilde{\varphi} = 100...167$.

Зависимость $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$ более четко отражает физическую сущность процесса деформирования полосы при изгибе и более удобна для анализа.

На рис. 2.2,д–ж показаны эпюры напряжений в поперечном сечении при изгибе полосы с продольным растяжением силой F_Z . Осевые растягивающие напряжения в полосе $\sigma_Z = \frac{F_Z}{BH}$.

Если полоса предварительно растягивается, когда осевые растягивающие напряжения σ_Z меньше предела текучести σ_T , а затем изгибается моментом M , то пластические деформации в сжатой зоне появляются раньше, чем в растянутой, и при меньшей кривизне, чем при простом изгибе. Это обусловлено тем, что в сжатой зоне возникают более благоприятные условия для пластического деформирования, поскольку в ней действуют разнознаковые напряжения: сжимающие напряжения от изгиба и растягивающие напряжения от продольной растягивающей нагрузки.

Благодаря более раннему появлению пластических деформаций в сжатой области нейтральный слой напряжений смещается от середины к внешней поверхности полосы (см. рис. 2.2,д). При дальнейшем увеличении кривизны пластические деформации появляются также в растянутой зоне, эпюры напряжений показаны на рис. 2.2,е. При больших значениях кривизны в изгибаемой полосе образуется пластический шарнир (см. рис. 2.2,ж).

Изгибающие тангенциальные напряжения σ_ϕ и осевые растягивающие напряжения σ_Z считаются главными, поскольку рассматривается плоское напряженное состояние полосы. Радиальные напряжения не учитываются.

Для плоского напряженно-деформированного состояния принято условие пластичности Треска–Сен-Венана:

$$\text{для растянутой зоны, в которой} \quad \sigma_\phi \sigma_Z > 0, \quad \sigma_\phi = \sigma_T;$$

$$\text{для сжатой зоны, в которой} \quad \sigma_\phi \sigma_Z < 0, \quad \sigma_\phi + \sigma_Z = \sigma_T.$$

Упругопластический изгиб полосы с продольным растяжением

Схема деформаций и напряжений для упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением, когда пластические деформации возникают в растянутой и сжатой зонах, показаны на рис. 2.5 [46].

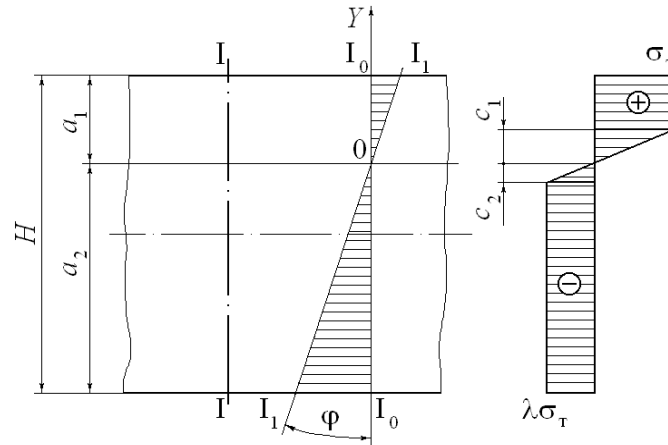


Рис. 2.5. Деформации и напряжения при изгибе полосы с продольным растяжением

В конечной стадии деформирования нейтральный слой напряжений смещен и относительные деформации единичного элемента, выделенного сечениями $I_0 - I_0$ и $I - I$, согласно гипотезе плоских сечений, пропорциональны кривизне $\varphi = 1/\rho$ и расстоянию до нейтрального слоя y .

В зоне растяжения:

при $0 < y < c_1$ возникают упругие напряжения $\sigma_p = \varepsilon E = \varphi y E$;

при $c_1 < y < a_1$ напряжения $\sigma_p = \sigma_T$.

В зоне сжатия:

при $0 < y < c_2$, возникают упругие напряжения $\sigma_c = \varepsilon E = \varphi y E$;

при $c_2 < y < a_2$, $\sigma_c = \sigma_T - \sigma_Z = \sigma_T \left(1 - \frac{\sigma_Z}{\sigma_T} \right) = \lambda \sigma_T$,

где $\lambda = (1 - \tilde{\sigma}_Z)$ – коэффициент, учитывающий влияние продольных растягивающих напряжений, характеризует величину наибольших изгибных

напряжений в сжатой зоне; $\tilde{\sigma}_z = \sigma_z / \sigma_T$ – относительные растягивающие напряжения.

Наибольшая относительная упругая деформация в сжатой зоне $\varepsilon_c = \varepsilon_T - \frac{\sigma_z}{E} = \lambda \varepsilon_T$.

Положение нейтрального слоя напряжений определяется из условия равновесия внутренних сил, возникающих в поперечном сечении,

$$\int_{A_1} \sigma_p dA + \int_{A_2} \sigma_c dA = 0,$$

где A_1 – площадь растянутой зоны поперечного сечения;

A_2 – площадь сжатой зоны поперечного сечения.

Учитывая, что для единичного элемента полосы $dA = dy$, а также значения напряжений в растянутой и сжатой зонах

$$\int_0^{c_1} \varphi y E dy + \int_{c_1}^{a_1} \sigma_T dy - \int_0^{c_2} \varphi y E dy - \int_{c_2}^{a_2} \lambda \sigma_T dy = 0$$

После интегрирования

$$\frac{\varphi E}{2} (c_1^2 - c_2^2) + \sigma_T [a_1 - c_1 - \lambda(a_2 - c_2)] = 0.$$

Поскольку $\sigma_T = \varepsilon_T E = \theta \frac{H}{2} E$, $\varepsilon_T = \varphi c_1$, $\varphi c_2 = \lambda \varepsilon_T$, $c_2 = \lambda c_1$,

протяженность упругих областей $c_1 = \frac{H \theta}{2 \varphi}$, $c_2 = \lambda \frac{H \theta}{2 \varphi}$.

После несложных преобразований положение нейтрального слоя напряжений

$$a_1 = \left[\frac{\lambda}{1+\lambda} + \frac{1}{4} \frac{\theta}{\varphi} (1-\lambda) \right] H, \quad a_2 = \left[\frac{1}{1+\lambda} - \frac{1}{4} \frac{\theta}{\varphi} (1-\lambda) \right] H$$

в относительных величинах $\tilde{a}_1 = a_1 / H$, $\tilde{a}_2 = a_2 / H$,

$$\tilde{a}_1 = \frac{\lambda}{1+\lambda} + \frac{(1-\lambda)}{4\tilde{\varphi}}; \tag{2.2}$$

$$\tilde{a}_2 = \frac{1}{1+\lambda} - \frac{(1-\lambda)}{4\tilde{\varphi}}; \tag{2.3}$$

при этом $\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 = 1$.

Формулы (2.2), (2.3) справедливы, когда напряжения в растянутой зоне $\sigma_p \geq \sigma_T$. Этому условию соответствует предельное значение кривизны φ_{II}/θ , при которой в растянутой зоне появляется пластическая деформация.

Учитывая, что $\sigma_p = \sigma_T = \varphi_{II} a_1 E = \theta \frac{H}{2} E$, то $\tilde{a}_1 = \frac{\lambda}{1+\lambda} + \frac{(1-\lambda)}{4\tilde{\varphi}_{II}} = \frac{1}{2} \frac{\theta}{\varphi_{II}}$, поэтому после преобразований

$$\tilde{\varphi}_{II} = \frac{(1+\lambda)^2}{4\lambda}. \quad (2.4)$$

Зная положение нейтрального слоя, можно определить момент, необходимый для изгиба полосы с продольным растяжением. Из условия равновесия внешних и внутренних сил

$$M = \int_{A_1} \sigma_p y dA + \int_{A_2} \sigma_c y dA.$$

Учитывая значение напряжений в растянутой и сжатой зонах,

$$M = \int_0^{c_1} \varphi E y^2 dy + \int_{c_1}^{a_1} \sigma_T y dy + \int_0^{c_2} \varphi E y^2 dy + \int_{c_2}^{a_2} \lambda \sigma_T y dy.$$

После интегрирования

$$M = \frac{\varphi E}{3} (c_1^3 + c_2^3) + \frac{\sigma_T}{2} (a_1^2 - c_1^2) + \frac{\lambda \sigma_T}{2} (a_2^2 - c_2^2).$$

После соответствующих подстановок значений a_1 , a_2 , c_1 , c_2

$$M = H^2 \frac{\sigma_T}{2} \left[\frac{\lambda}{1+\lambda} - \left(\frac{\theta}{\varphi} \right)^2 \frac{1+\lambda^3+3\lambda(1+\lambda)}{48} \right].$$

Представляя изгибающий момент и кривизну в относительных величинах

$$\tilde{M} = \frac{3\lambda}{1+\lambda} - \frac{(1+\lambda)^3}{16\tilde{\varphi}^2}. \quad (2.5)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что при $\lambda=1$, т. е. когда растягивающие напряжения равны нулю ($\sigma_z = 0$), получается формула (2.1), используемая при расчетах упругопластического изгиба. При значительной

кривизне наибольший изгибающий момент, соответствующий появлению пластического шарнира, $\tilde{M} = 1,5$, если $\lambda = 1$.

Формула (2.5) описывает зависимость относительного изгибающего момента от относительной кривизны, когда напряжения растяжения $\sigma_p \geq \sigma_T$. Это

соответствует значению относительной кривизны $\tilde{\varphi}_n \geq \frac{(1+\lambda)^2}{4\lambda}$, формула (2.4).

Если в растянутой зоне возникают только упругие деформации, решение задачи изгиба полосы отличается от рассмотренного выше. Последовательность решения аналогична.

При $\tilde{\varphi} \leq \lambda$ полоса деформируется упруго, относительный изгибающий момент равен относительной кривизне $\tilde{M} = \tilde{\varphi}$.

Схема деформаций и напряжений при изгибе полосы, если $\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$, показаны на рис. 2.6.

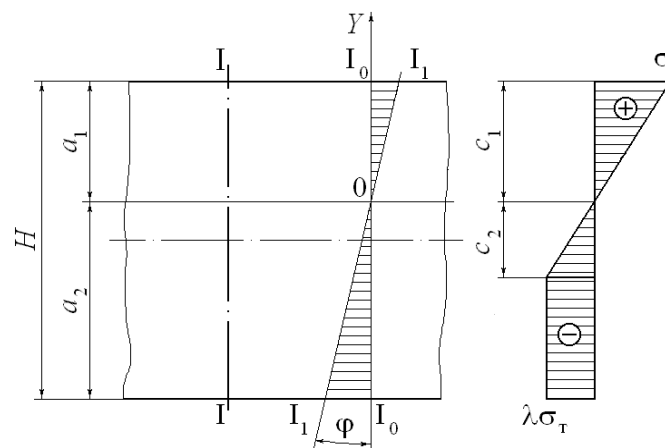


Рис. 2.6. Деформации и напряжения при изгибе полосы с продольным растяжением ($\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$)

Из условия равновесия внутренних сил

$$\int_0^{a_1} \varphi y E dy - \int_0^{c_2} \varphi y E dy - \int_{c_2}^{a_2} \lambda \sigma_T dy = 0,$$

после интегрирования

$$\frac{\varphi E}{2} (a_1^2 - c_2^2) - \sigma_T \lambda (a_2 - c_2) = 0.$$

После преобразований получается квадратное уравнение

$$a_1^2 + 2a_1c_2 + (c_2^2 - 2c_2H) = 0,$$

тогда учитывая, что $c_2 = \frac{\lambda H \theta}{2 \varphi}$,

$$a_1 = \left(\sqrt{\lambda \frac{\theta}{\varphi}} - \frac{\lambda \theta}{2 \varphi} \right) H.$$

Знак перед радикалом принят положительным, чтобы значение a_1 не было отрицательным. Тогда

$$a_2 = \left(1 + \frac{\lambda \theta}{2 \varphi} - \sqrt{\lambda \frac{\theta}{\varphi}} \right) H.$$

Координаты положения нейтрального слоя в относительных величинах

$\tilde{a}_1 = a_1/H$, $\tilde{a}_2 = a_2/H$:

$$\tilde{a}_1 = \sqrt{\frac{\lambda}{\tilde{\varphi}}} - \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}}; \quad (2.6)$$

$$\tilde{a}_2 = 1 + \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} - \sqrt{\frac{\lambda}{\tilde{\varphi}}}. \quad (2.7)$$

Если $\lambda = 1$, т. е. когда $\sigma_z = 0$ и $\tilde{\varphi} = 1$, то $\tilde{a}_1 = \tilde{a}_2 = 0,5$.

Согласно уравнениям (2.3), (2.7) на рис. 2.7 показан график изменения положения нейтрального слоя в зависимости от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений. Штриховая линия отделяет область, когда в растянутой зоне возникают упругие деформации, от области, когда в этой зоне возникают упругопластические деформации. Линия построена согласно соответствующим значениям $\tilde{\varphi}_n$, формула (2.4).

График позволяет определять положение нейтрального слоя в зависимости от относительной кривизны при различных значениях продольных растягивающих напряжений.

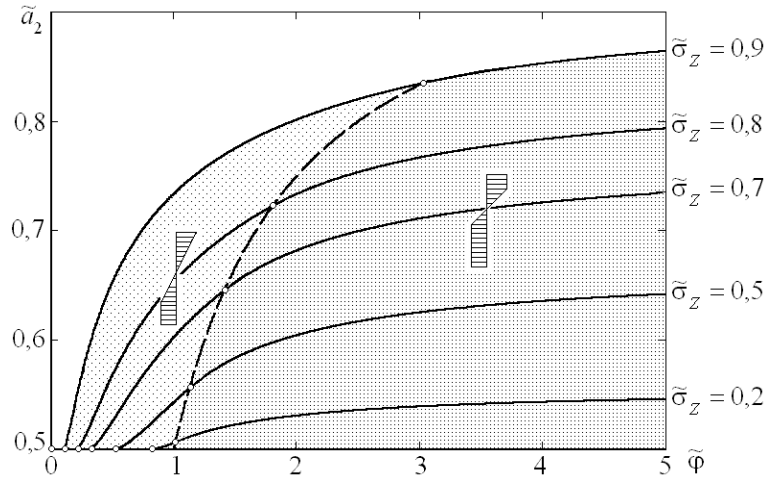


Рис. 2.7. Положение нейтрального слоя при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением

При $\sigma_p < \sigma_T$ изгибающий момент

$$M = \int_0^{a_1} \varphi E y^2 dy + \int_0^{c_2} \varphi E y^2 dy + \int_{c_2}^{a_2} \lambda \sigma_T y dy,$$

после интегрирования

$$M = \frac{\varphi E}{3} (c_1^3 + c_2^3) + \frac{\lambda \sigma_T}{2} (a_2^2 - c_2^2).$$

Учитывая значения c_1, c_2, a_1, a_2

$$M = \frac{\varphi E H^3}{3} \left[\left(\sqrt{\lambda \frac{\theta}{\varphi}} - \frac{\lambda \theta}{2 \varphi} \right)^3 + \left(\frac{\lambda \theta}{2 \varphi} \right)^3 \right] + \frac{\lambda \sigma_T H^2}{2} \left[\left(1 + \frac{\lambda \theta}{2 \varphi} - \sqrt{\lambda \frac{\theta}{\varphi}} \right)^2 - \left(\frac{\lambda \theta}{2 \varphi} \right)^2 \right].$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = 4\tilde{\varphi} \left[\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\tilde{\varphi}}} - \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^3 \right] + 3\lambda \left[\left(1 + \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} - \sqrt{\frac{\lambda}{\tilde{\varphi}}} \right)^2 - \left(\frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^2 \right]. \quad (2.8)$$

Если $\lambda = 1, \tilde{\varphi} = 1$, то $\tilde{M} = 1$.

При определенных значениях \tilde{a}_1 и \tilde{a}_2

$$\tilde{M} = \tilde{a}_2^3 \left[\frac{3\lambda}{\tilde{a}_2} + 2\tilde{\varphi} \left(\frac{\tilde{a}_1}{\tilde{a}_2} \right)^3 \right] - \frac{4\lambda^3}{\tilde{\varphi}^2}.$$

Уравнения (2.5), (2.8) устанавливают соотношение между относительным изгибающим моментом и относительной кривизной при различных значениях продольных растягивающих напряжений.

Согласно уравнениям построен график изменения относительного изгибающего момента от относительной кривизны при различных $\tilde{\sigma}_z$ (рис. 2.8).

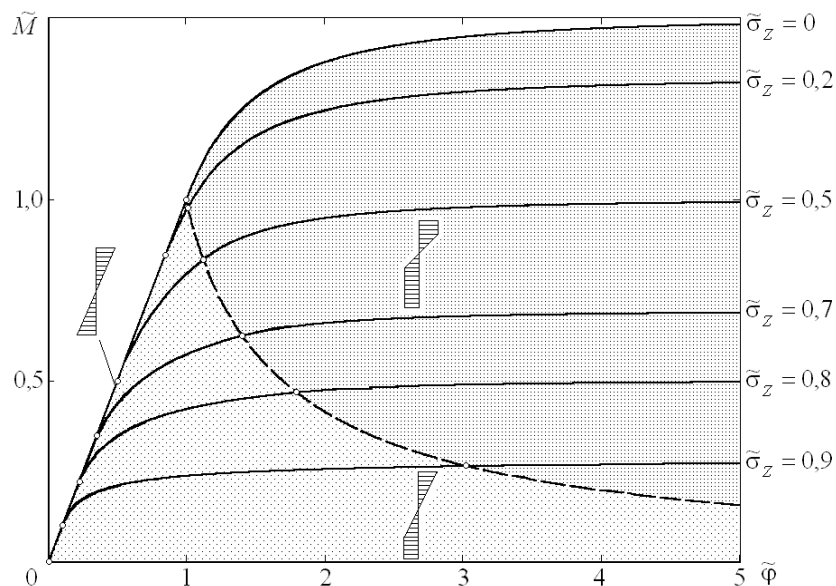


Рис. 2.8. График зависимости относительного изгибающего момента от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений

Верхняя кривая характеризует сопротивление полосы изгибу при отсутствии растягивающей силы, формула (2.1). Штриховая линия на графике отделяет область, когда в растянутой зоне полосы возникают только упругие деформации, от области, когда в этой зоне возникают упругопластические деформации. Штриховая линия построена в соответствии с уравнением (2.4). График также показывает, что при относительных кривизнах $\tilde{\varphi} \geq 5$ влияние упругого слоя на сопротивление деформированию при различных σ_z несущественно, т. е. в поперечном сечении образуется пластический шарнир. При растягивающих напряжениях $\tilde{\sigma}_z = 0,5$ ($\lambda = 0,5$) наибольший изгибающий момент, необходимый для пластического изгиба полосы, равен моменту

упругого изгиба. Если $\tilde{\sigma}_z = 0,9$ ($\lambda = 0,1$), такой изгибающий момент меньше изгибающего момента при простом изгибе примерно в 5 раз.

Полученные аналитические зависимости (2.5), (2.8) позволяют производить практические расчеты силовых параметров технологического процесса гибки профилей с продольным растяжением.

Следует отметить, что при решении задачи изгиба полосы с продольным растяжением использовалось условие пластичности Треска–Сен-Венана, условие постоянства наибольших касательных напряжений. Аналогичное решение может быть получено при использовании условия пластичности Мизеса.

Для плоского напряженного состояния условие пластичности Мизеса согласно энергетической теории может быть выражено

$$\text{для сжатой зоны } \sigma_c + \sigma_z = \beta \sigma_T;$$

$$\text{для растянутой зоны } \sigma_p = \beta \sigma_T,$$

где $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$ – для плоского напряженного состояния [38, 41].

Структура ранее полученных формул с введением коэффициента β не изменяется. При расчетах параметров упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением может быть использован приведенный предел текучести $\sigma_T^* = \beta \sigma_T$

При кривизне $\tilde{\varphi} \geq 5$, как показано ранее, для анализа изгиба полосы может быть принята диаграмма жестко-пластичного материала. При этом могут быть получены достаточно простые аналитические зависимости для расчета параметров пластического изгиба полосы с продольным растяжением.

Упругое пружинение полосы после разгрузки

Как следует из теоремы об упругой разгрузке применительно к упругопластическому изгибу полосы уменьшение ее кривизны после разгрузки пропорционально изгибающему моменту [37].

Поэтому, если зависимость между изгибающим моментом и кривизной представлена в относительных величинах $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$, то уменьшение относительной кривизны $\Delta\tilde{\varphi}$ равно относительному изгибающему моменту

$$\Delta\tilde{\varphi} = \tilde{\varphi} - \tilde{\varphi}_0 = \tilde{M}, \quad (2.9)$$

где $\tilde{\varphi}_0 = \varphi_0/\theta$ – относительная остаточная кривизна полосы.

Следовательно, согласно полученным зависимостям (2.5), (2.9) можно определить при заданной относительной кривизне относительную остаточную кривизну после разгрузки

$$\tilde{\varphi}_0 = \tilde{\varphi} - \tilde{M}. \quad (2.10)$$

Считается, что разгрузка полосы в результате снятия продольной растягивающей нагрузки не влияет на величину упругого пружинения после изгиба, так как при этом происходит параллельное продольное перемещение единичных поперечных сечений полосы.

Поскольку, как было установлено ранее, при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением происходит существенное уменьшение изгибающего момента, необходимого для изгиба полосы, то в такой же степени уменьшается ее упругое пружинение. На рис. 2.9 для примера показано упругое пружинение $\Delta\tilde{\varphi}'$ полосы при простом изгибе и упругое пружинение $\Delta\tilde{\varphi}$ при изгибе с предварительным продольным растяжением полосы при $\tilde{\sigma}_z = 0,9$ для получения одинаковой остаточной кривизны профиля $\tilde{\varphi}_0$.

Для примера, если $\tilde{\varphi}_0 = 3,5$, относительное упругое пружинение полосы $\Delta\tilde{\varphi}$ после разгрузки уменьшается также, как \tilde{M} , примерно в 5 раз по сравнению с пружинением $\Delta\tilde{\varphi}'$ при простом изгибе.

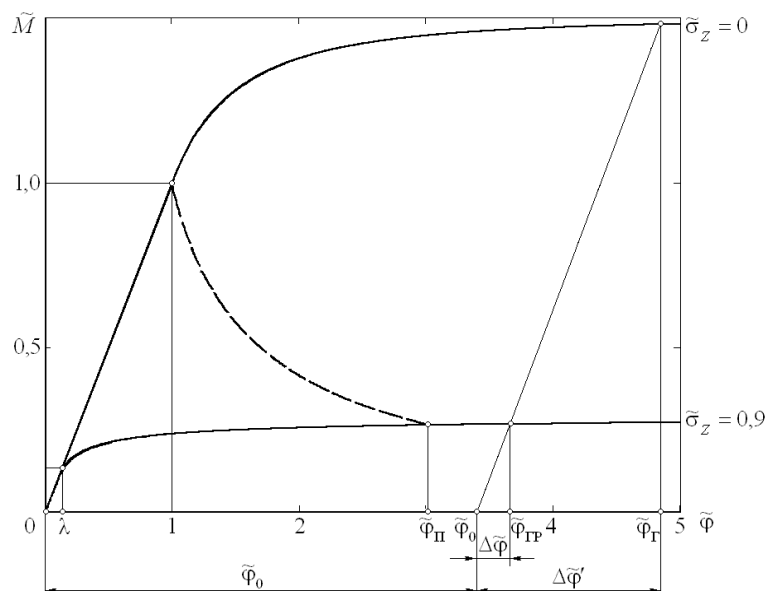


Рис. 2.9. Упругое пружинение полосы после разгрузки при простом изгибе и изгибе с предварительным растяжением

2.2. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением

Тонкостенные профили нередко изготавливают из упрочняющихся материалов (холоднокатаные полосы и ленты из нержавеющей стали, из сталей с высоким содержанием углерода, из алюминиевых сплавов и пр.). Учет упрочнения материала при анализе процесса гибки можно произвести с использованием схематизированных диаграмм деформирования материала с линейным упрочнением. Линейная аппроксимация диаграмм деформирования достаточно часто используется при расчетах параметров технологических процессов гибки и принята в судостроении [11–13].

Напряженно-деформированное состояние полосы

Решение задачи изгиба полосы с учетом упрочнения ее материала [47] аналогично рассмотренному ранее решению без учета упрочнения.

Для материала с линейным упрочнением аппроксимация зависимости напряжений от деформаций осуществляется функциями:

$$\text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_{\tau} \quad \sigma = \varepsilon E ;$$

при $\varepsilon \geq \varepsilon_T$, $\sigma = \sigma_T + \Pi(\varepsilon - \varepsilon_T)$,

где Π – модуль упрочнения материала.

Деформации и напряжения единичного элемента полосы показаны на рис. 2.10,а. На рис. 2.10,б–г показаны эпюры тангенциальных напряжений при изгибе полосы без растяжения, на рис. 2.10,д–ж эпюры тангенциальных напряжений при изгибе полосы с продольным растяжением.

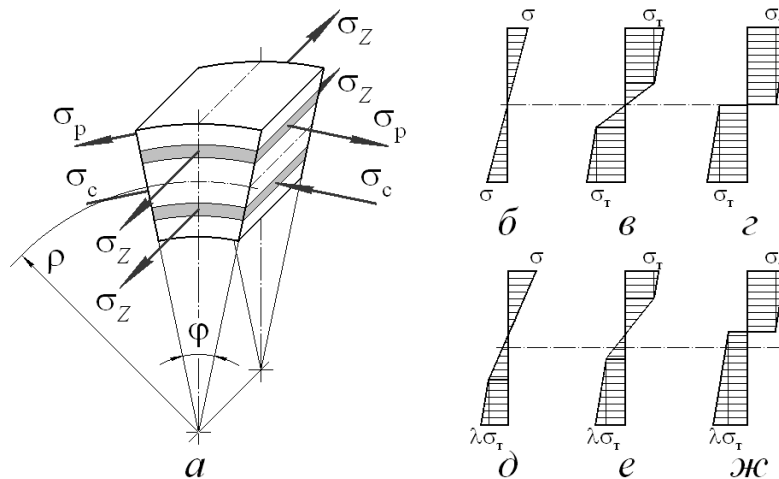


Рис. 2.10. Схема деформаций и напряжений при изгибе полосы из материала с линейным упрочнением

При простом упругом изгибе, если продольные растягивающие напряжения $\sigma_z = 0$, зависимость между относительным изгибающим моментом и кривизной линейна (см. рис. 2.10,б), $\tilde{M} = \tilde{\varphi}$.

При упругопластическом изгибе полосы без растяжения (см. рис. 2.10,в,г) зависимость $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$ может быть получена следующим образом.

Схема деформаций и напряжений при линейном упругопластическом изгибе полосы из материала с линейным упрочнением представлена на рис. 2.11.

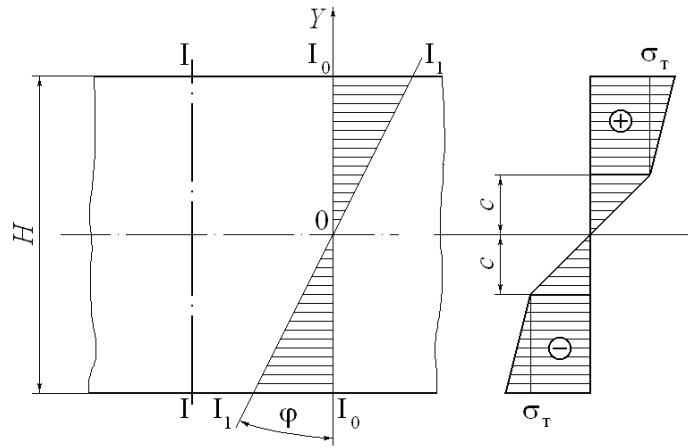


Рис. 2.11. Деформации и напряжения при изгибе полосы из материала с линейным упрочнением

Напряжения изгиба

$$\text{в упругой зоне при } 0 < y < c \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E ;$$

$$\text{в пластической зоне при } c < y < \frac{H}{2} \quad \sigma = \sigma_T + \Pi(\varphi y - \varepsilon_T).$$

$$\text{Протяженность упругой области } c = \frac{H}{2} \frac{\theta}{\varphi}.$$

Изгибающий момент, учитывая симметричное относительно оси положение напряжений,

$$M = 2 \int_0^c \varphi E y^2 dy + 2 \int_c^{\frac{H}{2}} [\sigma_T + \Pi(\varphi y - \varepsilon_T)] y dy.$$

После интегрирования и несложных преобразований получим

$$M = \sigma_T \frac{H^2}{6} \left[\left[\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\theta}{\varphi} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{\Pi}{E} \right) + \frac{\Pi \varphi}{E \theta} \right].$$

Для упрощения записи расчетных формул в дальнейшем обозначено:

$$\tilde{\varphi} = \varphi / \theta, \quad \tilde{M} = M / M_T, \quad \tilde{\Pi} = \Pi / E, \quad \tilde{a}_1 = a_1 / H, \quad \tilde{a}_2 = a_2 / H, \quad \tilde{\sigma}_Z = \sigma_Z / \sigma_T.$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = \left[\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tilde{\varphi}} \right)^2 \right] (1 - \tilde{\Pi}) + \tilde{\varphi} \tilde{\Pi}. \quad (2.11)$$

При $\tilde{\Pi} = 0$ получается формула (2.1) для материала без упрочнения. Согласно полученному уравнению (2.11) на рис. 2.12 приведен график зависимости относительного изгибающего момента от относительной кривизны при различных значениях относительного модуля упрочнения $\tilde{\Pi}$. Подобные графики могут быть использованы для расчета технологических параметров различных способов гибки.

Рис. 2.10,г соответствует случаю жестко-пластического изгиба, когда при $\tilde{\varphi} \geq 5$ влиянием упругой зоны можно пренебречь.

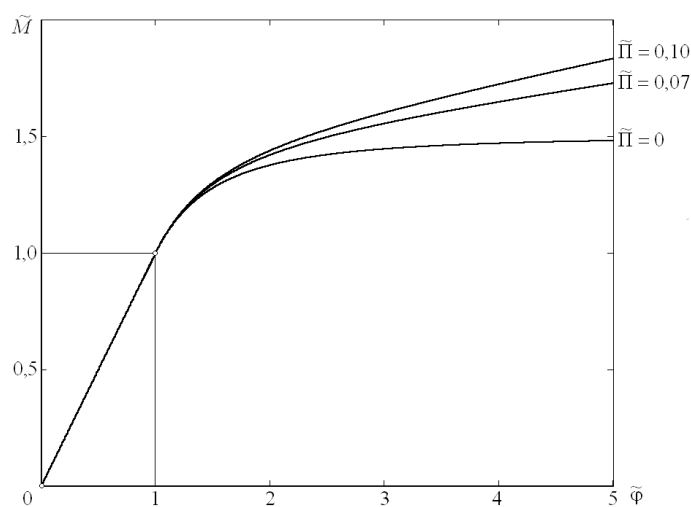


Рис. 2.12. График зависимости относительного изгибающего момента от относительной кривизны при изгибе полосы из материала с линейным упрочнением

При приложении предварительных напряжений растяжения $\sigma_Z < \sigma_T$ вначале происходит упругий изгиб полосы, когда относительный момент пропорционален упругой кривизне, затем в сжатой зоне появляются пластические деформации и нейтральный слой напряжений смещается вверх от оси симметрии. Рис. 2.10,д соответствует малым значениям кривизны изгиба, когда в растянутой зоне возникают упругие напряжения, а в сжатой упругопластические. На рис. 2.10,е показан случай возникновения упругопластических деформаций в растянутой и сжатой зонах. Рис. 2.10,ж соответствует изгибу на большие кривизны, т. е. жесткопластическому изгибу полосы.

Упругопластический изгиб полосы с продольным растяжением

Рассматривается случай, когда в растянутой и сжатой зонах поперечного сечения изгибаемой полосы возникают упругопластические деформации (рис. 2.10,е) [48, 49].

Для такого случая схема деформаций и напряжений в поперечном сечении изгибаемой полосы показана на рис. 2.13.

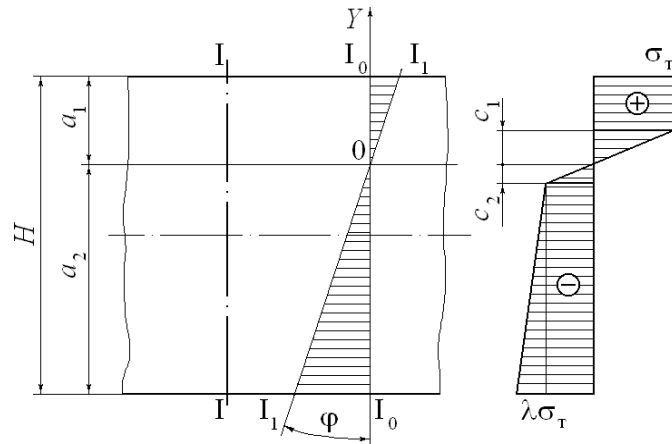


Рис. 2.13. Деформации и напряжения при изгибе с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением

Последовательность решения задачи изгиба полосы такая же, как для материала без упрочнения.

Напряжения изгиба в зоне растяжения:

$$0 < y < c_1 \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E ;$$

$$c_1 < y < a_1 \quad \sigma = \sigma_T + \Pi(\varphi y - \varepsilon_T).$$

Напряжения изгиба в зоне сжатия:

$$0 < y < c_2 \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E ;$$

$$c_2 < y < a_2 \quad \sigma = \lambda \sigma_T + \Pi(\varphi y - \lambda \varepsilon_T).$$

Протяженность упругих областей $c_1 = \frac{H \theta}{2 \varphi}$ и $c_2 = \lambda \frac{H \theta}{2 \varphi}$.

Положение нейтрального слоя определяется из условия равновесия внутренних сил в поперечном сечении полосы

$$\int_0^{c_1} \varphi y E dy + \int_{c_1}^{a_1} [\sigma_T + \Pi(\varphi y - \varepsilon_T)] dy - \int_0^{c_2} \varphi y E dy - \int_{c_2}^{a_2} [\lambda \sigma_T + \Pi(\varphi y - \lambda \varepsilon_T)] dy = 0.$$

После интегрирования и соответствующих преобразований координата положения нейтрального слоя

$$\tilde{a}_2 = \frac{1 - \tilde{\Pi} + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}\left(1 - \frac{1 - \lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2}\right) - \frac{1 - \lambda^2}{4\tilde{\varphi}}(1 - 2\tilde{\Pi})}{2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi} + (1 + \lambda)(1 - \tilde{\Pi})}, \quad (2.12)$$

$$\tilde{a}_1 = 1 - \tilde{a}_2.$$

Учитывая значения \tilde{a}_1 и \tilde{a}_2 , изгибающий момент

$$M = \int_0^{c_1} \varphi E y^2 dy + \int_{c_1}^{a_1} [\sigma_T + \Pi(\varphi y - \varepsilon_T)] y dy + \int_0^{c_2} \varphi E y^2 dy + \int_{c_2}^{a_2} [\lambda \sigma_T + \Pi(\varphi y - \lambda \varepsilon_T)] y dy.$$

После интегрирования и преобразований

$$M = \frac{\sigma_T H^2}{6} \left[4 \frac{\varphi \Pi}{\theta E} \left(\left(\frac{a_1}{H} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{H} \right)^3 \right) + \left(1 - \frac{\Pi}{E} \right) \left[3 \left(\left(\frac{a_1}{H} \right)^2 + \lambda \left(\frac{a_2}{H} \right)^2 \right) - \frac{1 + \lambda^3}{4} \left(\frac{\theta}{\varphi} \right)^2 \right] \right].$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = 4\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}(\tilde{a}_1^3 + \tilde{a}_2^3) + (1 - \tilde{\Pi}) \left[3(\tilde{a}_1^2 + \lambda\tilde{a}_2^2) - \frac{1 + \lambda^3}{4\tilde{\varphi}^2} \right]. \quad (2.13)$$

Если $\tilde{\varphi} = 1$, $\tilde{M} = 1$.

При $\tilde{\Pi} = 0$ и $\lambda = 1$ получим формулу (2.1).

При малых значениях кривизны в растянутой зоне полосы возникают только упругие деформации, а в сжатой – упругопластические (см. рис. 2.10,д). Схема деформаций и напряжений представлена на рис. 2.14.

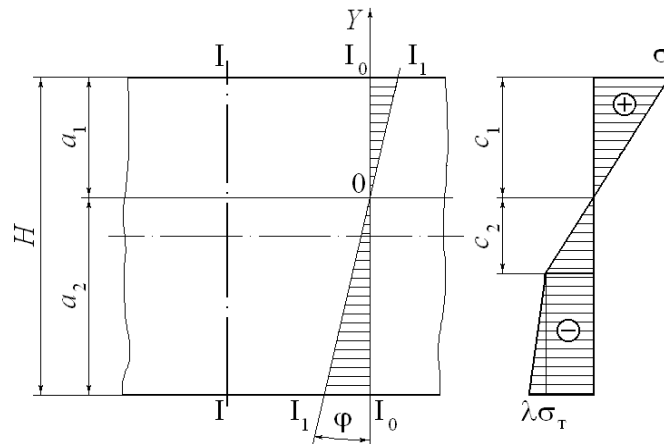


Рис. 2.14. Деформации и напряжения при изгибе с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением ($\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$)

Напряжения изгиба в зоне растяжения:

$$\text{в упругой зоне } 0 < y < a_1, \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E, \quad c = a_1.$$

Напряжения изгиба в зоне сжатия:

$$\text{в упругой зоне } 0 < y < c_2, \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E;$$

$$\text{в пластической зоне } c_2 < y < a_2, \quad \sigma = \lambda \sigma_T + \Pi(\varphi y - \lambda \varepsilon_T).$$

Условие равновесия сил

$$\int_0^{a_1} \varphi y E dy - \int_0^{c_2} \varphi y E dy - \int_{c_2}^{a_2} [\lambda \sigma_T + \Pi(\varphi y - \lambda \varepsilon_T)] dy = 0.$$

После интегрирования и несложных преобразований координата положения нейтрального слоя:

$$\tilde{a}_2 = \frac{2\tilde{\varphi} + \lambda(1 - \tilde{\Pi}) - \sqrt{(2\tilde{\varphi} + \lambda(1 - \tilde{\Pi}))^2 - (1 - \tilde{\Pi})(4\tilde{\varphi}^2 + \lambda^2(1 - \tilde{\Pi}))}}{2\tilde{\varphi}(1 - \tilde{\Pi})}, \quad (2.14)$$

$$\tilde{a}_1 = 1 - \tilde{a}_2.$$

Изгибающий момент

$$M = \int_0^{a_1} \varphi E y^2 dy + \int_0^{c_2} \varphi E y^2 dy + \int_{c_2}^{a_2} [\lambda \sigma_T + \Pi(\varphi y - \lambda \varepsilon_T)] y dy.$$

После интегрирования и преобразований

$$M = \frac{\sigma_T H^2}{6} \left[3\lambda \left(1 - \frac{\Pi}{E}\right) \left(\left(\frac{a_2}{H}\right)^2 - \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{\theta}{\varphi}\right)^2 \right) + 4\frac{\varphi}{\theta} \left[\left(1 - \frac{a_2}{H}\right)^3 + \frac{\Pi}{E} \left(\frac{a_2}{H}\right)^3 + \frac{\lambda^3}{8} \left(\frac{\theta}{\varphi}\right)^3 \left(1 - \frac{\Pi}{E}\right) \right] \right].$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = 3\lambda(1 - \tilde{\Pi}) \left(\tilde{a}_2^2 - \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2} \right) + 4\tilde{\varphi} \left[(1 - \tilde{a}_2)^3 + \tilde{\Pi} \tilde{a}_2^3 + \frac{\lambda^3}{8\tilde{\varphi}^3} (1 - \tilde{\Pi}) \right]. \quad (2.15)$$

Формула (2.11) является частным случаем приведенной зависимости, если $\sigma_z = 0$.

Формулы (2.13) и (2.15) дают одинаковые результаты, когда напряжения в растянутой зоне $\sigma_p = \sigma_t$. Этому условию соответствует предельное значение кривизны $\tilde{\varphi}_n$, при которой в растянутой зоне появляются пластические деформации.

Учитывая, что $\sigma_p = \sigma_t = \varphi_n a_1 E = \theta \frac{H}{2} E$, тогда $\frac{a_1}{H} = \frac{1}{2} \frac{\theta}{\varphi_n}$, поэтому

$$\tilde{\varphi}_n = \frac{1 - \tilde{\Pi}}{2\tilde{\Pi}} \left[\frac{\tilde{\Pi}}{1 - \tilde{\Pi}} - \lambda + \sqrt{\left(\lambda - \frac{\tilde{\Pi}}{1 - \tilde{\Pi}} \right)^2 + 2 \left(\frac{\tilde{\Pi}}{1 - \tilde{\Pi}} \right) \left(\lambda + \frac{1}{2} (1 + \lambda^2) \right)} \right]. \quad (2.16)$$

При $\tilde{\varphi} = \tilde{\varphi}_n$ величины относительного момента согласно формулам (2.13) и (2.15) одинаковы. Полученные зависимости (2.12)–(2.15) позволяют определять положение нейтрального слоя и изгибающий момент при любых кривизнах полосы.

Для примера, согласно уравнениям (2.12) и (2.14) на рис. 2.15 показан график изменения положения нейтрального слоя в зависимости от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений, когда $\tilde{\Pi} = 0,07$. Штриховая линия отделяет область, когда в растянутой зоне возникают упругие деформации, от области, когда в этой зоне возникают пластические деформации. График позволяет определять положение нейтрального слоя в зависимости от относительной кривизны.

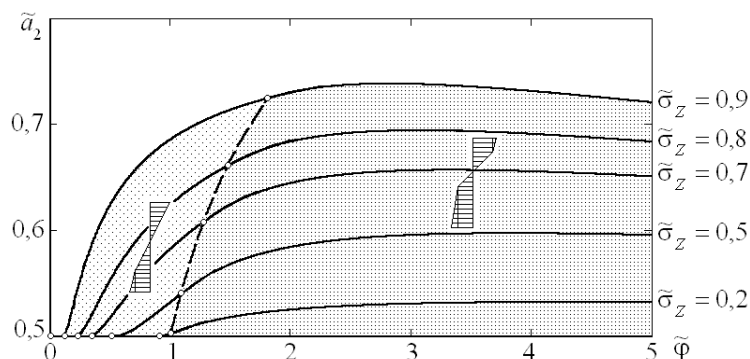


Рис. 2.15. Положение нейтрального слоя при упругопластическом изгибе с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением ($\tilde{\Pi} = 0,07$)

На рис. 2.16 показан график изменения относительного изгибающего момента в зависимости от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений согласно формулам (2.13) и (2.15), когда $\tilde{\Pi} = 0,07$. Штриховая линия отделяет область, когда в растянутой зоне возникают упругие деформации, от области, когда в этой зоне возникают пластические деформации.

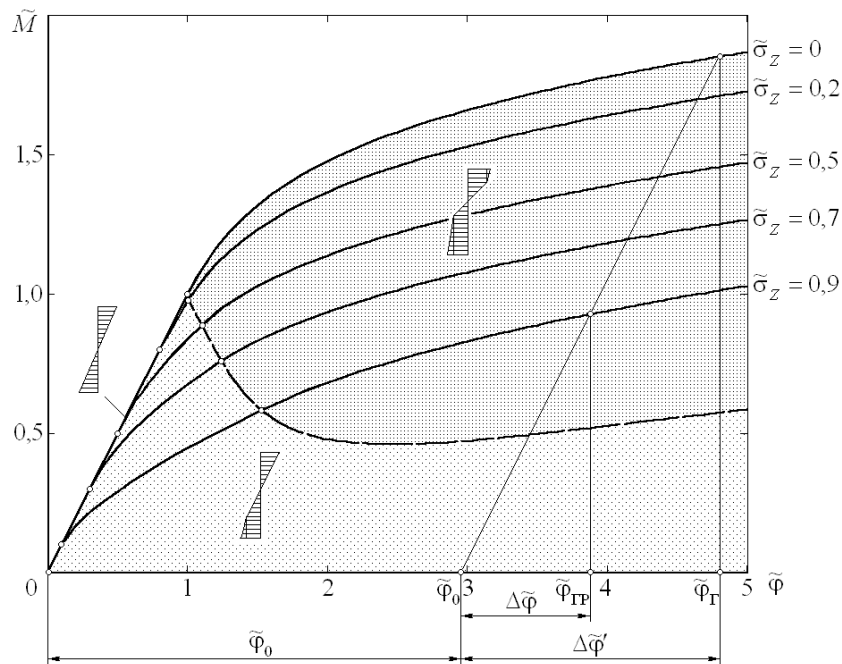


Рис. 2.16. График зависимости относительного изгибающего момента от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений ($\tilde{\Pi} = 0,07$)

График позволяет определять величину относительного изгибающего момента в зависимости от относительной кривизны при различных значениях продольных растягивающих напряжений. Верхняя кривая характеризует сопротивление полосы изгибу при отсутствии растягивающей силы, формула (2.11). График также показывает, что при относительной кривизне $\tilde{\varphi} \geq 5$ влияние упругого слоя на сопротивление деформированию при различных σ_z несущественно.

На графике показано также величины изменения относительной кривизны полосы при разгрузке после упругопластического изгиба полосы без

растяжения $\Delta\tilde{\varphi}'$ и с продольным растяжением $\Delta\tilde{\varphi}$, когда относительная остаточная кривизна $\tilde{\varphi}_0$ одинакова.

Подобные графики могут быть построены для других значений $\tilde{\Pi}$.

Таким образом, полученные аналитические зависимости (2.13) и (2.15) позволяют производить расчеты упругопластического изгиба с растяжением полосы из материала с линейным упрочнением.

Решение задачи об изгибе полосы из жестко-пластичного материала с линейным упрочнением приведено в приложении А.2.

2.3. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала со степенным упрочнением

Для упрочняющихся материалов зависимость между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций во всем диапазоне деформаций может быть с достаточной точностью описана линейно-степенной функцией. Такая аппроксимация использовалась М.Н. Лысовым при исследовании упругопластического изгиба [18], а также в ряде случаев для анализа процессов листовой штамповки [16] и гибки в профилегибочных станах [19].

Напряженно-деформированное состояние полосы

При линейно-степенной аппроксимации диаграмма деформирования материала описывается линейной функцией $\sigma = E\varepsilon$, когда $\sigma \leq \sigma_T$, и степенной $\sigma = K\varepsilon^n$, когда $\sigma \geq \sigma_T$.

Переход линейной зависимости в степенную происходит при относительной деформации ε_T

$$\sigma_T = E\varepsilon_T = K\varepsilon_T^n,$$

где K и n – константы, выражаемые через основные механические характеристики материала. Константы K и n определяются из условия, при котором бы аппроксимирующая кривая проходила через две точки диаграммы деформирования с координатами σ_T, ε_T и σ_B, ε_B :

$$n = \frac{\lg \frac{\sigma_B}{\sigma_T}}{\lg \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_T}}; \quad K = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B^n} = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_T^n}.$$

Значения K и n для различных материалов приведены в работе [18].

Для повышения точности расчетов упругопластического изгиба полосы константы K и n можно определять не по значениям предела прочности материала σ_B и относительной равномерной пластической деформации ε_B , а по конечным значениям, в пределах которых осуществляется пластический изгиб.

Закономерности процесса упругопластического изгиба могут быть более рационально представлены, как указывалось ранее, в относительных величинах.

Наибольший момент упругого изгиба единичного элемента полосы

$$M_T = \sigma_T \frac{H^2}{6} = \frac{2}{3} K \theta^n \left(\frac{H}{2} \right)^{n+2},$$

поскольку $\sigma_T = K \varepsilon_T^n = K \left(\theta \frac{H}{2} \right)^n$, $\theta = \frac{2\varepsilon_T}{H}$.

Схема деформаций и напряжений при упругопластическом изгибе полосы со степенным упрочнением представлена на рис. 2.17.

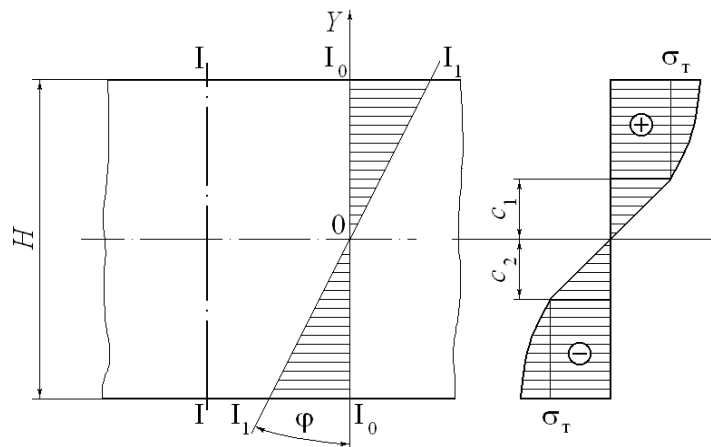


Рис. 2.17. Деформации и напряжения при изгибе полосы из материала со степенным упрочнением

Напряжения изгиба:

$$\text{в упругой зоне при } 0 < y < c \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E ;$$

$$\text{в пластической зоне при } c < y < \frac{H}{2} \quad \sigma = K(\varphi y)^n .$$

Изгибающий момент при линейном изгибе

$$M = 2 \int_0^c \varphi E y^2 dy + 2 \int_c^{\frac{H}{2}} K(\varphi y)^n y dy .$$

После интегрирования и преобразований

$$M = 2\varphi E \frac{c^3}{3} + 2 \left[\frac{K\varphi^n}{n+2} \left(\frac{H}{2} \right)^{n+2} - 2 \frac{K\varphi^n}{n+2} c^{n+2} \right] .$$

После дополнительных преобразований

$$M = \frac{\varphi E H^3}{12} \left(\frac{\theta}{\varphi} \right)^3 + \frac{K\varphi^n H^{n+2}}{2^{n+2}(n+2)} \left(1 - \left(\frac{\theta}{\varphi} \right)^{n+2} \right) .$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = \frac{3}{n+2} \tilde{\varphi}^n - \frac{1-n}{n+2} \left(\frac{1}{\tilde{\varphi}} \right)^2 . \quad (2.17)$$

Приведенная формула (2.17) соответствует известным зависимостям, которые представлены в ином виде [18].

При $n = 0$, т. е. для материала без упрочения, получается приведенная ранее формула (2.1).

Согласно формуле (2.17) зависимость относительного изгибающего момента от относительной кривизны при изгибе полосы приведена на рис. 2.18.

Подобные графики могут использоваться при определении технологических параметров гибки.

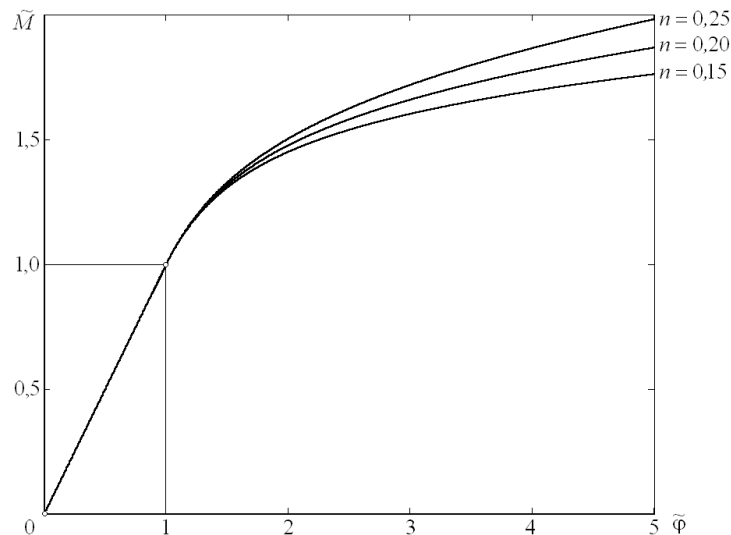


Рис. 2.18. График зависимости относительного изгибающего момента от относительной кривизны при изгибе полосы из материала со степенным упрочнением

Упругопластический изгиб полосы с продольным растяжением

Решение задачи упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением для материала с линейно-степенной аппроксимацией диаграммы деформирования [50] может быть выполнено аналогично ранее приведенным решениям.

Возможны, как указано ранее, три случая деформирования полосы:

- упругий изгиб;
- изгиб, когда в растянутой зоне возникают только упругие деформации, а в сжатой – упругопластические;
- изгиб, когда в растянутой и сжатой зонах возникают упругопластические деформации.

Деформации и напряжения при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением, когда пластические деформации возникают в растянутой и сжатой зонах, показаны на рис. 2.19.

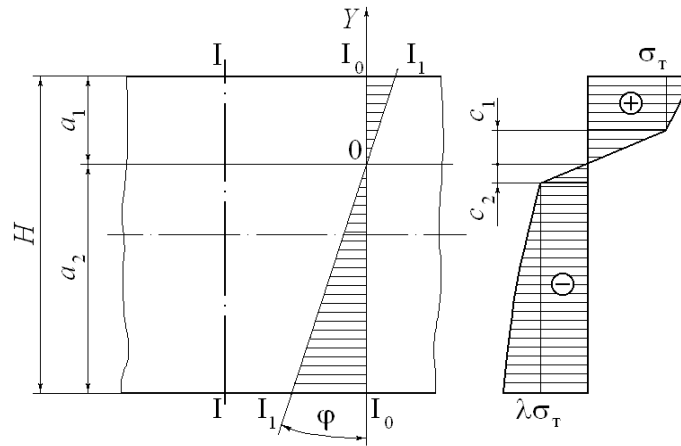


Рис. 2.19. Деформации и напряжения при изгибе с продольным растяжением полосы из материала со степенным упрочнением

Напряжения изгиба в поперечном сечении полосы с учетом условия пластичности:

в зоне растяжения

$$\text{при } 0 < y < c_1, \quad \sigma_{p1} = \varepsilon E = \varphi y E;$$

$$\text{при } c_1 < y < a_1, \quad \sigma_{p2} = K \varepsilon^n;$$

в зоне сжатия

$$\text{при } 0 < y < c_2, \quad \sigma_{c1} = \varepsilon E = \varphi y E;$$

$$\text{при } c_2 < y < a_2, \quad \sigma_{c2} = K \left(\varphi y + \frac{\sigma_Z}{E} \right)^n - \sigma_Z.$$

Положение нейтрального слоя напряжений определяется из условия равновесия внутренних сил, возникающих в поперечном сечении,

$$\int_0^{c_1} \varphi y E dy + \int_{c_1}^{a_1} K (\varphi y)^n dy - \int_0^{c_2} \varphi y E dy - \int_{c_2}^{a_2} \left[K \left(\varphi y + (1-\lambda) \varepsilon_T \right)^n - (1-\lambda) \sigma_T \right] dy = 0.$$

После интегрирования и преобразований координата положения нейтрального слоя \tilde{a}_2 может быть определена из уравнения

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\tilde{\varphi}} + \frac{2^n \tilde{\varphi}^n (1 - \tilde{a}_2)^{n+1} - 1}{n+1} = \\ & = \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}} + \frac{2^n}{\tilde{\varphi}(n+1)} \left[\left(\tilde{\varphi} \tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2} \right)^{n+1} - \frac{1}{2^{n+1}} \right] - (1-\lambda) \left(\tilde{a}_2 - \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right), \end{aligned} \quad (2.18)$$

при этом $\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 = 1$.

При известном положении нейтрального слоя можно определить момент, необходимый для изгиба полосы с продольным растяжением,

$$M = \int_0^{c_1} \varphi E y^2 dy + \int_{c_1}^{a_1} K(\varphi y)^n y dy + \int_0^{c_2} \varphi E y^2 dy + \int_{c_2}^{a_2} \left[K(\varphi y + (1-\lambda)\varepsilon_T)^n - (1-\lambda)\sigma_T \right] y dy.$$

После интегрирования и преобразований

$$M = \frac{\sigma_T H^2}{6} \left[\frac{1+\lambda^3}{2\tilde{\varphi}^2} + \frac{3\tilde{\varphi}^n 2^{n+1}}{n+2} \left[(1-\tilde{a}_2)^{n+2} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+2}} + \left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+2} \right] - \right. \\ \left. - 3(1-\lambda) \left[\frac{2^n}{(n+1)\tilde{\varphi}^{1-n}} \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+1} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+1}} \right] + \tilde{a}_2^2 - \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2} \right] \right].$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = \frac{1+\lambda^3}{2\tilde{\varphi}^2} + \frac{3\tilde{\varphi}^n 2^{n+1}}{n+2} \left[(1-\tilde{a}_2)^{n+2} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+2}} + \left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+2} \right] - \\ - 3(1-\lambda) \left[\frac{2^n}{(n+1)\tilde{\varphi}^{1-n}} \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+1} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+1}} \right] + \tilde{a}_2^2 - \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2} \right]. \quad (2.19)$$

Формула (2.17) является частным случаем приведенной зависимости при $\sigma_z = 0$.

В случае, если в растянутой зоне возникают только упругие деформации, решение задачи изгиба полосы аналогично рассмотренному ранее. Схема деформаций и напряжений при изгибе полосы показана на рис. 2.20.

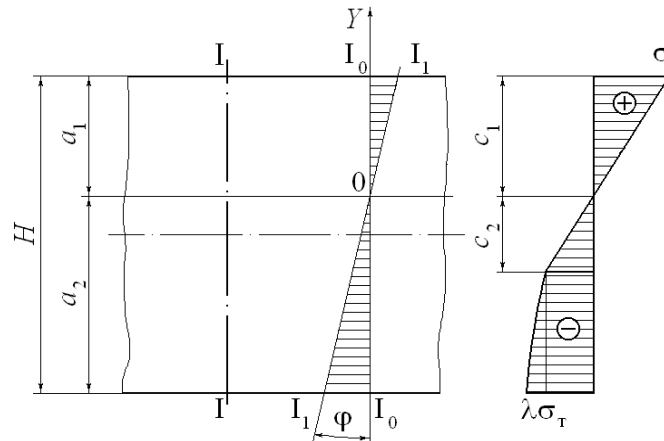


Рис. 2.20. Деформации и напряжения при изгибе с продольным растяжением полосы из материала со степенным упрочнением $\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$

Напряжения изгиба в зоне растяжения

$$0 < y < a_1 \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E .$$

Напряжения изгиба в зоне сжатия:

$$\text{в упругой зоне при } 0 < y < a_1, \quad \sigma = \varepsilon E = \varphi y E ;$$

$$\text{в пластической зоне при } c < y < \frac{H}{2}, \quad \sigma = K(\varphi y + (1-\lambda)\varepsilon_T)^n - (1-\lambda)\sigma_T .$$

Условие равновесия сил

$$\int_0^{a_1} \varphi y E dy - \int_0^{c_2} \varphi y E dy - \int_{c_2}^{a_2} \left[K(\varphi y + (1-\lambda)\varepsilon_T)^n - (1-\lambda)\sigma_T \right] dy = 0 .$$

После интегрирования и соответствующих преобразований координата положения нейтрального слоя \tilde{a}_2 может быть определена из уравнения

$$\tilde{\varphi}(1 - \tilde{a}_2)^2 = \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}} + \frac{2^n}{\tilde{\varphi}(n+1)} \left[\left(\tilde{\varphi}\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2} \right)^{n+1} - \frac{1}{2^{n+1}} \right] - (1-\lambda) \left(\tilde{a}_2 - \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right) . \quad (2.20)$$

Условие равновесия моментов

$$M = \int_0^{a_1} \varphi E y^2 dy + \int_0^{c_2} \varphi E y^2 dy + \int_{c_2}^{a_2} \left[K(\varphi y + (1-\lambda)\varepsilon_T)^n - (1-\lambda)\sigma_T \right] y dy$$

после интегрирования и преобразований

$$M = \frac{\sigma_T H^2}{6} \left[4\tilde{\varphi} \left[(1 - \tilde{a}_2)^3 - \frac{\lambda^3}{8\tilde{\varphi}^3} \right] + \frac{3\tilde{\varphi}^n 2^{n+1}}{n+2} \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+2} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+2}} \right] - \right. \\ \left. - 3(1-\lambda) \left[\frac{2^n}{(n+1)\tilde{\varphi}^{1-n}} \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+1} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+1}} \right] + \tilde{a}_2^2 - \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2} \right] \right] .$$

Относительный изгибающий момент

$$\tilde{M} = 4\tilde{\varphi} \left[(1 - \tilde{a}_2)^3 - \frac{\lambda^3}{8\tilde{\varphi}^3} \right] + \frac{3\tilde{\varphi}^n 2^{n+1}}{n+2} \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+2} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+2}} \right] - \\ - 3(1-\lambda) \left[\frac{2^n}{(n+1)\tilde{\varphi}^{1-n}} \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{1-\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^{n+1} - \frac{1}{2^{n+1}\tilde{\varphi}^{n+1}} \right] + \tilde{a}_2^2 - \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2} \right] . \quad (2.21)$$

Пластические деформации в сжатой зоне появляются при $\tilde{\varphi} = \lambda$.

Пластические деформации в растянутой зоне возникают при условии $\tilde{c}_1 = \tilde{a}_1$, при этом $\tilde{c}_1 = 1 - \tilde{a}_2$.

Согласно уравнениям (2.18), (2.20) определяется положение нейтрального слоя напряжений для общего случая упругопластического изгиба полосы.

Для примера на рис. 2.21 показан график изменения положения нейтрального слоя в зависимости от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений ($n = 0,2$). Штриховая линия отделяет область, когда в растянутой зоне возникают упругие деформации, от области, когда в этой зоне возникают пластические деформации.

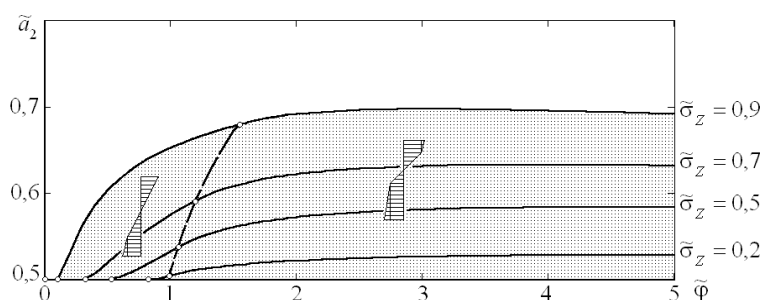


Рис. 2.21. Положение нейтрального слоя при упругопластическом изгибе с продольным растяжением полосы из материала со степенным упрочнением ($n = 0,2$)

График позволяет определять положение нейтрального слоя в зависимости от относительной кривизны при различных значениях продольных растягивающих напряжений.

Уравнения (2.19) и (2.21) устанавливают в общем виде соотношение между относительным изгибающим моментом и относительной кривизной при различных значениях продольных растягивающих напряжений.

Для примера на рис. 2.22 показан график изменения относительного изгибающего момента от относительной кривизны при различных $\tilde{\sigma}_z$, $n = 0,2$. Верхняя кривая характеризует сопротивление полосы изгибу при отсутствии растягивающей силы. Штриховая линия на графике отделяет область, когда в

растянутой зоне возникают упругие деформации, от области, когда в этой зоне возникают пластические деформации.

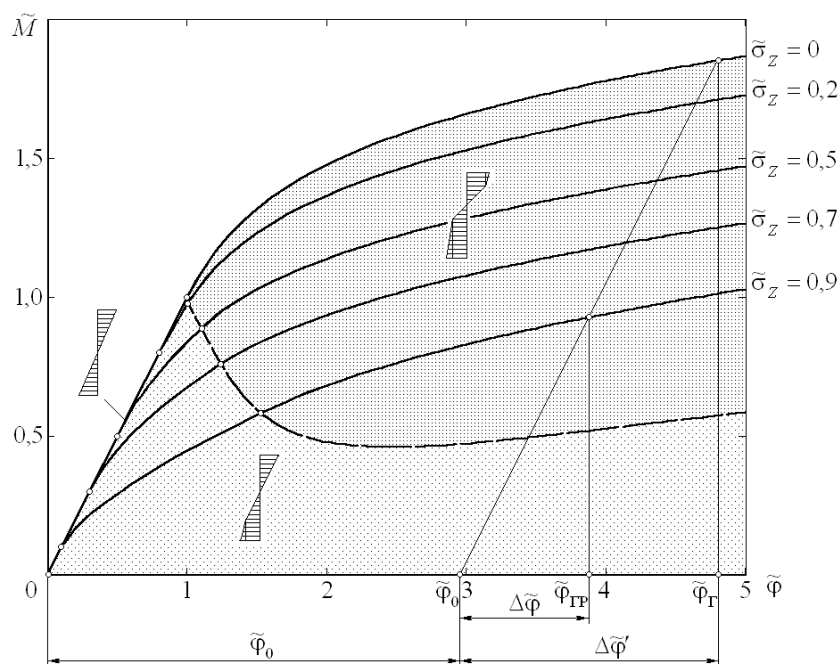


Рис. 2.22. График зависимости относительного изгибающего момента от относительной кривизны при различных величинах продольных растягивающих напряжений ($n = 0,2$)

Приведенные зависимости позволяют производить практические расчеты силовых параметров технологического процесса гибки профилей с продольным растяжением при аппроксимации диаграммы упрочнения материала линейно-степенной функцией.

Следует отметить, что приведенные в подразделах 2.1, 2.2, 2.3 решения задачи упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением отражают основные закономерности ее деформирования. Дальнейшее уточнение полученных решений связано с учетом влияния продольных изгибающих моментов, уточнением условий пластичности, учетом объемного напряженного состояния при малых относительных радиусах кривизны.

2.4. Работа при упругопластическом изгибе с продольным растяжением полосы из материала без упрочнения

Величина работы при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением необходима для расчета мощности профилирующего оборудования. Кроме того, это позволяет произвести сравнительную оценку энергозатрат при различных способах формообразования профиля [51, 52].

Сравнительная оценка энергозатрат может быть произведена как отношение величин работ, необходимых для придания единичному элементу полосы одинаковой остаточной кривизны при упругопластическом изгибе полосы с предварительным продольным растяжением и при чистом упругопластическом изгибе.

Работа, необходимая для деформирования полосы, определяется из условия равенства величин работы внешних и внутренних сил.

Работа при упругопластическом изгибе единичного элемента полосы, длиной 1 и шириной 1, без растяжения равна сумме работ, затрачиваемых на упругий изгиб A_y и последующее пластическое деформирование A_{Π} :

$$A_{\Sigma} = A_y + A_{\Pi}.$$

Наибольшая работа для упругого изгиба полосы $A_y = \frac{M_{\tau} \theta}{2}$. Для единичного элемента полосы $M_{\tau} = \sigma_{\tau} \frac{H^2}{6}$, $\theta = \frac{2\varepsilon_{\tau}}{H} = \frac{\sigma_{\tau}}{E} \frac{2}{H}$, тогда

$$A_y = \frac{\sigma_{\tau}^2 H}{E 6}.$$

Наибольшая работа упругого изгиба полосы может быть принята в качестве характеристики энергозатрат, поскольку учитывает толщину полосы и механические характеристики ее материала.

Работа для последующего пластического изгиба полосы

$$A_{\Pi} = \int_{\theta}^{\varphi} M d\varphi.$$

Для удобства анализа энергозатрат при различных вариантах изгиба полосы целесообразно рассматривать зависимость изгибающего момента от кривизны в относительных величинах $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$ согласно подразделу 2.1.

На рис. 2.23 показана зависимость относительного изгибающего момента от относительной кривизны при простом изгибе (кривая 1), и зависимость относительного изгибающего момента от относительной кривизны при предварительном приложении продольной силы (кривая 2), если $\tilde{\sigma}_z = 0,9$, т. е. $\lambda = 0,1$. Для получения одинаковой остаточной кривизны $\tilde{\varphi}_0$ изгибающий момент и кривизна изгиба $\tilde{\varphi}_r$ при простом упругопластическом изгибе значительно больше, чем при упругопластическом изгибе с продольным растяжением. Величина относительной работы при различных вариантах изгиба единичного элемента полосы характеризуется площадью, лежащей соответственно между кривой 1 и кривой 2 и осью абсцисс при одинаковой относительной остаточной кривизне.

На рис. 2.23 обозначена относительная работа \tilde{A}_y наибольшего упругого изгиба и относительная работа \tilde{A}_n для последующего пластического изгиба.

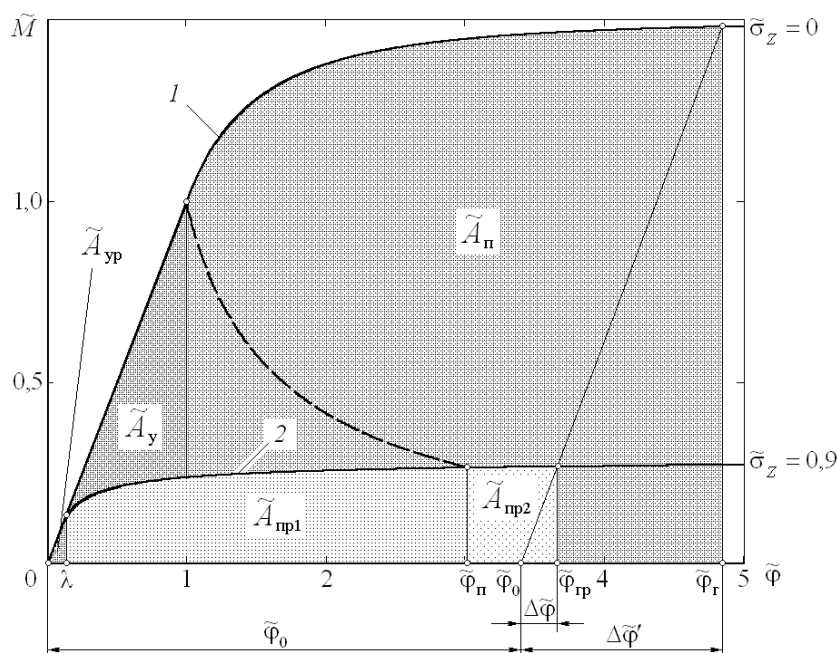


Рис. 2.23. График относительных работ при простом изгибе полосы и изгибе с продольным растяжением ($\tilde{\sigma}_z = 0,9$)

При упругом изгибе $\tilde{\theta} = 1$ и $\tilde{M}_T = 1$, поэтому наибольшая относительная работа упругого изгиба элемента полосы равна $\tilde{A}_y = 1/2$.

Относительная работа, затрачиваемая на последующее пластическое деформирование элемента полосы,

$$\tilde{A}_n = \int_1^{\tilde{\varphi}_r} \tilde{M} d\tilde{\varphi}.$$

Учитывая значение относительного изгибающего момента, формула (2.1),

$$\tilde{A}_n = \int_1^{\tilde{\varphi}_r} \left[\frac{3}{2} - \frac{1}{2\tilde{\varphi}^2} \right] d\tilde{\varphi}.$$

После интегрирования

$$\tilde{A}_n = \frac{3}{2} \tilde{\varphi}_r + \frac{1}{2\tilde{\varphi}_r} - 2.$$

Суммарная относительная работа $\tilde{A}_\Sigma = \tilde{A}_y + \tilde{A}_n$

$$\tilde{A}_\Sigma = \frac{3}{2} (\tilde{\varphi}_r - 1) + \frac{1}{2\tilde{\varphi}_r}.$$

Если $\tilde{\varphi}_r = 1$, то $\tilde{A}_\Sigma = 1/2$.

Количественное значение величины работы, затрачиваемой для деформирования единичного элемента полосы,

$$A_\Sigma = \tilde{A}_\Sigma M_T \theta.$$

Учитывая значение $A_y = \frac{M_T \theta}{2}$, величина работы

$$A_\Sigma = 2A_y \tilde{A}_\Sigma.$$

Работа при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением равна работе для предварительного упругого растяжения и последующего упругопластического изгиба.

Работа, затрачиваемая на упругопластический изгиб полосы, равна сумме работ на каждой стадии ее деформирования: на стадии упругого изгиба $0 \leq \tilde{\varphi} \leq \lambda$, упругопластического изгиба при малых кривизнах $\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$ и при кривизнах,

когда в сжатой и растянутой зонах возникают пластические деформации, $\tilde{\varphi} \geq \tilde{\varphi}_n$ (см. рис. 2.23). На рисунке обозначено:

$\tilde{A}_{ур}$ – относительная работа упругого изгиба при действии растягивающей нагрузки;

$\tilde{A}_{пр1}$ – относительная работа пластического изгиба при действии растягивающей нагрузки на участке $\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$;

$\tilde{A}_{пр2}$ – относительная работа пластического изгиба при действии растягивающей нагрузки, когда $\tilde{\varphi} \geq \tilde{\varphi}_n$.

Как было показано ранее, при гибке с растяжением пластические деформации в сжатой зоне появляются при $\tilde{\varphi} \geq \lambda$, поэтому относительная работа для упругого изгиба элемента полосы

$$\tilde{A}_{ур} = \frac{1}{2} \lambda^2.$$

Когда $\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_n$, то с учетом формулы (2.8), относительная работа пластического изгиба

$$\tilde{A}_{пр1} = \int_{\tilde{\varphi}_r}^{\tilde{\varphi}_n} 4\tilde{\varphi} \left[\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\tilde{\varphi}}} - \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^3 \right] + 3\lambda \left[\left(1 + \frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} - \sqrt{\frac{\lambda}{\tilde{\varphi}}} \right)^2 - \left(\frac{\lambda}{2\tilde{\varphi}} \right)^2 \right] d\tilde{\varphi}.$$

После интегрирования

$$\tilde{A}_{пр1} = 3\lambda(\tilde{\varphi}_n - \tilde{\varphi}_r) - 4\lambda\sqrt{\lambda}(\sqrt{\tilde{\varphi}_n} - \sqrt{\tilde{\varphi}_r}).$$

На стадии нагружения, когда $\tilde{\varphi} \geq \tilde{\varphi}_n$, то с учетом формулы (2.5), получим

$$\tilde{A}_{пр2} = \int_{\tilde{\varphi}_n}^{\tilde{\varphi}_r} \left[\frac{3\lambda}{1+\lambda} - \frac{1+\lambda^3+3\lambda(1+\lambda)}{16} \frac{1}{\tilde{\varphi}^2} \right] d\tilde{\varphi}.$$

После интегрирования

$$\tilde{A}_{пр2} = \frac{3\lambda}{1+\lambda}(\tilde{\varphi}_r - \tilde{\varphi}_n) - \frac{1+\lambda^3+3\lambda(1+\lambda)}{16} \left(\frac{1}{\tilde{\varphi}_r} - \frac{1}{\tilde{\varphi}_n} \right).$$

Суммарная относительная работа упругопластического изгиба при действии растяжения

$$\tilde{A}_{\Sigma при} = \tilde{A}_{ур} + \tilde{A}_{пр1} + \tilde{A}_{пр2}.$$

Работа, затрачиваемая на предварительное упругое растяжение полосы,

$$A_p = \frac{F_z \Delta l}{2},$$

где $\Delta l = \varepsilon_z L = \frac{\sigma_z}{E} L$ – удлинение полосы в результате растяжения.

После соответствующих подстановок и преобразований получим для единичного элемента полосы

$$A_p = (1 - \lambda)^2 \sigma_\tau^2 \frac{H}{2E}.$$

Относительная работа для упругого растяжения полосы

$$\tilde{A}_p = \frac{A_p}{M_\tau \theta},$$

после подстановки соответствующих значений

$$\tilde{A}_p = \frac{3}{2} (1 - \lambda)^2.$$

При $\tilde{\sigma}_z = 0, \lambda = 1, \tilde{A}_p = 0;$

при $\tilde{\sigma}_z = 1, \lambda = 0, \tilde{A}_p = \frac{3}{2}.$

Если $\sigma_z = \sigma_\tau$, т. е. $\tilde{\sigma}_z = 1$, работа внутренних сил при наибольшем упругом растяжении полосы в 3 раза больше, чем при наибольшем упругом изгибе.

Суммарная относительная работа при изгибе с растяжением с учетом работы на растяжение

$$\tilde{A}_{\Sigma p} = \tilde{A}_p + \tilde{A}_{\Sigma \text{ри}}$$

Для определения количественного значения величин работ при деформировании полосы следует учесть ее длину и ширину. Таким образом, величина работы:

для простого изгиба

$$A_{\Sigma k} = 2 A_y \tilde{A}_\Sigma B L;$$

для упругопластического изгиба при действии растягивающей нагрузки

$$A_{\Sigma\text{рик}} = 2 A_y \tilde{A}_{\Sigma\text{ри}} BL;$$

для растяжения полосы

$$A_{\text{рк}} = 2 A_y \tilde{A}_p BL.$$

Суммарная количественная работа при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением

$$A_{\Sigma\text{рк}} = A_{\text{рк}} + A_{\Sigma\text{рик}}.$$

Сравнительная оценка энергозатрат при различных вариантах деформирования полосы может быть выполнена как отношение величин относительных работ, необходимых для придания единичному элементу полосы одинаковой остаточной кривизны.

Согласно проведенным расчетам на рис. 2.24 показан график соотношения суммарных работ сил при гибке полосы с растяжением и без растяжения для получения остаточной кривизны $\tilde{\varphi}_0 \leq 10$, а на рис. 2.25 показан соответствующий график если $\tilde{\varphi}_0 > 10$.

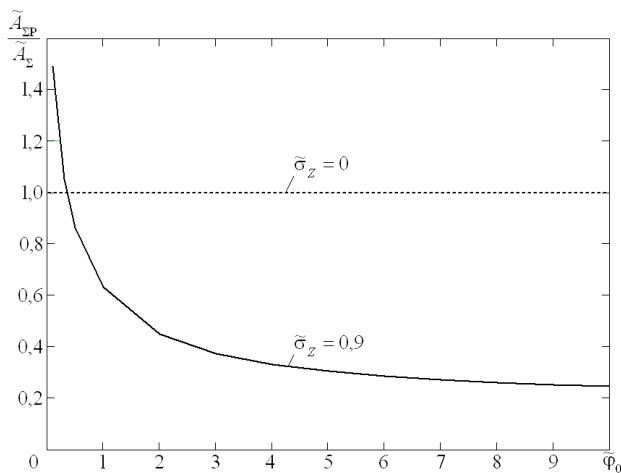


Рис. 2.24. График соотношения суммарных работ сил при гибке полосы с растяжением и без растяжения ($\tilde{\varphi}_0 \leq 10$)

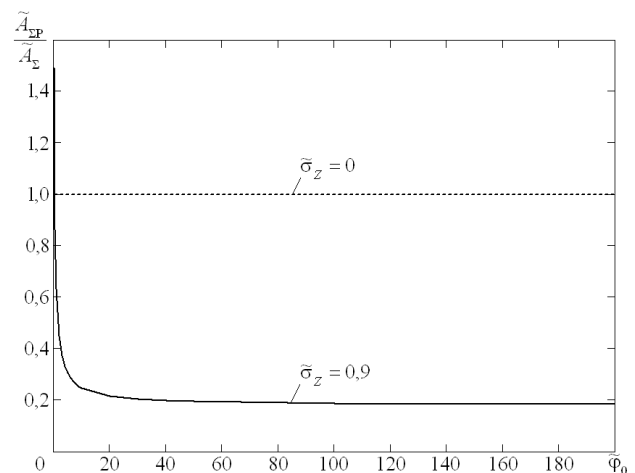


Рис. 2.25. График соотношения суммарных работ сил при гибке полосы с растяжением и без растяжения ($\tilde{\varphi}_0 \leq 200$)

Приведенные данные показывают, что при $\tilde{\varphi}_0 = 0,3$ энергозатраты при простом упругопластическом изгибе полосы и упругопластическом изгибе

полосы с продольным растяжением одинаковы. При $\tilde{\varphi}_0 = 0,1$ эти энергозатраты примерно в 1,5 раза больше. При значительных кривизнах, которые наиболее часто встречаются при изготовлении тонкостенных профилей, когда $\tilde{\varphi}_0 > 5$ эти энергозатраты приблизительно в 5 раз меньше.

2.5. Работа при упругопластическом изгибе с продольным растяжением полосы из материала с линейным упрочнением

Расчет работы изгиба полосы из материала с линейным упрочнением производится аналогично расчету работы при упругопластическом изгибе полосы из материала без упрочнения. На рис. 2.26 показаны относительные работы при простом изгибе полосы – кривая 1 и изгибе с продольным растяжением – кривая 2.

Величина работы наибольшего упругого изгиба при простом изгибе определяется также, как для материала без упрочнения, $\tilde{A}_y = \frac{1}{2}$.

Величина относительной работы при дальнейшем упругопластическом изгибе полосы, учитывая формулу (2.11),

$$\tilde{A}_n = \int_1^{\tilde{\varphi}_r} \left[\left[\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tilde{\varphi}} \right)^2 \right] (1 - \tilde{\Pi}) + \tilde{\varphi} \tilde{\Pi} \right] d\tilde{\varphi}.$$

Величина работы при упругом изгибе полосы из материала с линейным упрочнением при действии растягивающей нагрузки определяется как для материала без упрочнения $\tilde{A}_{yp} = \frac{1}{2} \lambda^2$.

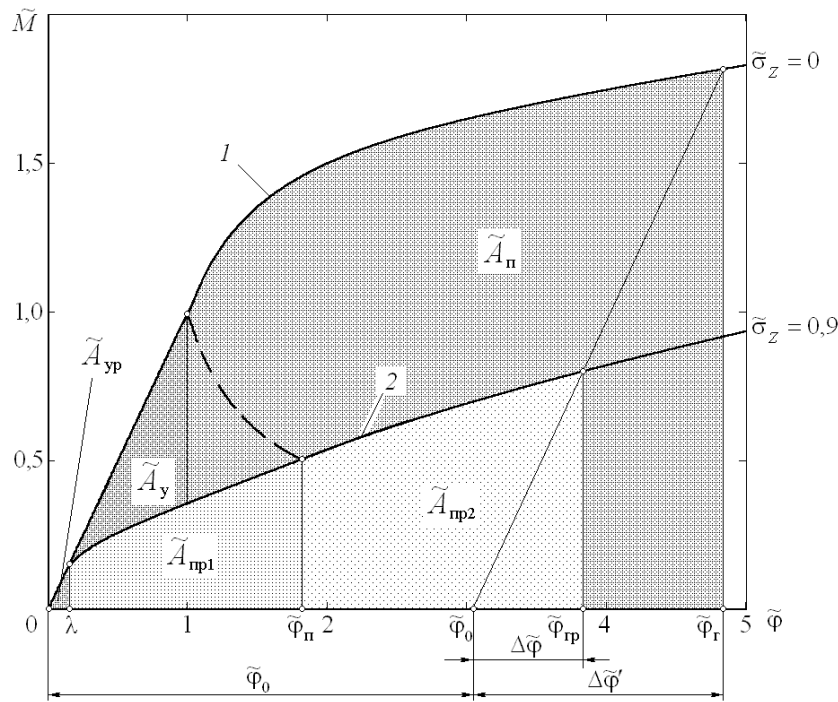


Рис. 2.26. График соотношения работ при простом изгибе полосы и изгибе с продольным растяжением ($\tilde{\sigma}_z = 0,9$; $\tilde{\Pi} = 0,07$)

Величина работы при упругопластическом изгибе полосы, если $\lambda \leq \tilde{\varphi} \leq \tilde{\varphi}_п$, используя формулу (2.15), определяется по формуле

$$\tilde{A}_{пр1} = \int_{\tilde{\varphi}_р}^{\tilde{\varphi}_п} \left[3\lambda(1 - \tilde{\Pi}) \left(\tilde{a}_2^2 - \frac{\lambda^2}{4\tilde{\varphi}^2} \right) + 4\tilde{\varphi} \left[(1 - \tilde{a}_2)^3 + \tilde{\Pi}\tilde{a}_2^3 + \frac{\lambda^3}{8\tilde{\varphi}^3} (1 - \tilde{\Pi}) \right] \right] d\tilde{\varphi}.$$

На участке, когда $\tilde{\varphi} \geq \tilde{\varphi}_п$ используя формулу (2.13), получим

$$\tilde{A}_{пр2} = \int_{\tilde{\varphi}_п}^{\tilde{\varphi}_р} \left[4\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}(\tilde{a}_1^3 + \tilde{a}_2^3) + (1 - \tilde{\Pi}) \left[3(\tilde{a}_1^2 + \lambda\tilde{a}_2^2) - \frac{1 + \lambda^3}{4\tilde{\varphi}^2} \right] \right] d\tilde{\varphi}.$$

В результате численного интегрирования приведенных зависимостей построены графики соотношения работ при упругопластическом изгибе с растяжением и простом упругопластическом изгибе полосы из материала с линейным упрочнением, если $\tilde{\Pi} = 0,02$, представлены на рис. 2.27 и 2.28.

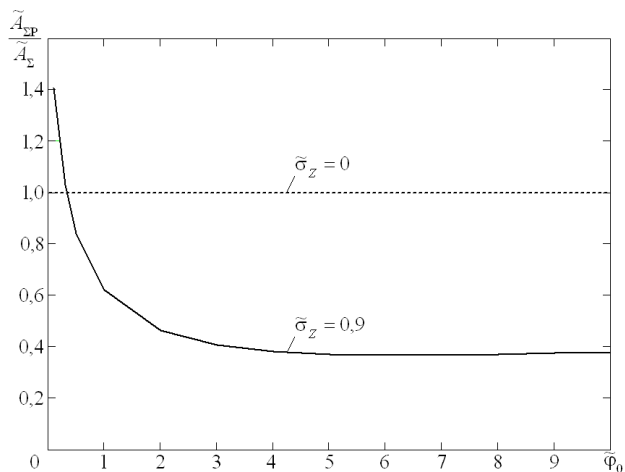


Рис. 2.27. График соотношения суммарных работ сил при гибке полосы с растяжением и без растяжения ($\tilde{\varphi}_0 \leq 10$, $\tilde{\Pi} = 0,02$)

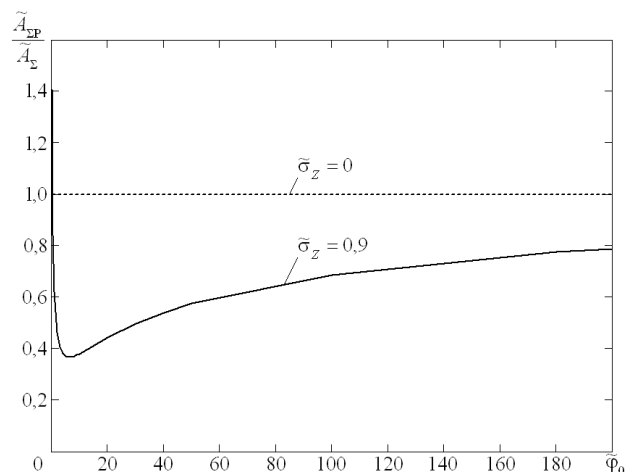


Рис. 2.28. График соотношения суммарных работ сил при гибке полосы с растяжением и без растяжения, ($\tilde{\varphi}_0 \leq 200$, $\tilde{\Pi} = 0,02$)

Согласно полученным данным с рис. 2.27–2.28, при гибке растянутой полосы ($\tilde{\sigma}_z = 0,9$, $\tilde{\Pi} = 0,02$) для получения одинаковой остаточной кривизны относительный изгибающий момент и пружинение уменьшаются на 15...45 %, а суммарная относительная работа деформирования на 20...55 % по сравнению с простым изгибом.

Величины работ при упругопластическом изгибе полосы из материала со степенным упрочнением могут быть рассчитаны аналогичным образом, используя соответствующие аналитические зависимости, приведенные в подразделе 2.3, формулы (2.19) и (2.21).

2.6. Испытания образцов при упругопластическом изгибе с продольным растяжением

Исследования проводились для проверки достоверности принятых допущений и расчетных схем при решении задачи упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением.

Целью испытаний являлось экспериментальное исследование влияния осевых продольных напряжений на параметры упругопластического изгиба

образцов и сравнение экспериментальных данных с аналитическими зависимостями, полученными при теоретическом анализе [53].

Образцы для испытаний

Для испытаний использовались плоские образцы (рис. 2.29) из нержавеющей сталей. Толщина образцов находилась в пределах 0,18...0,30 мм. При такой толщине образцов их упругое пружинение при разгрузке достаточно значительно, что облегчает процесс испытаний и уменьшает погрешность измерений. Толщина образцов измерялась микрометром с ценой деления 0,01 мм.

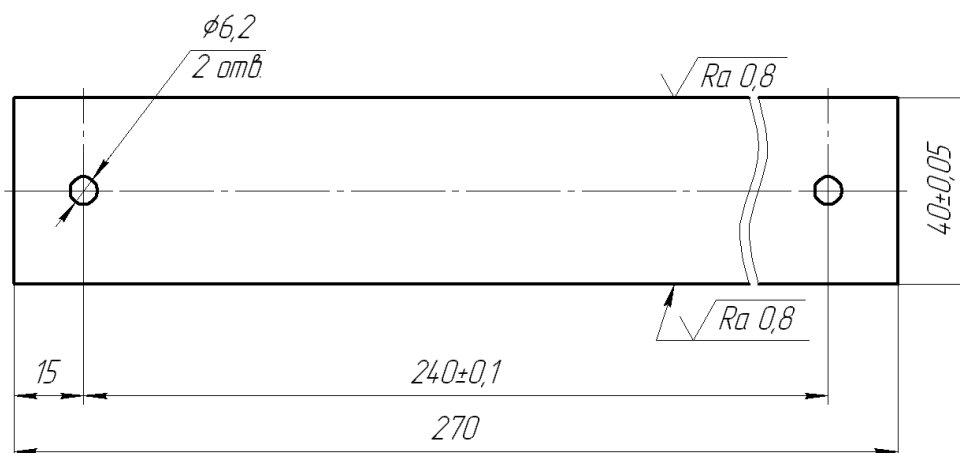


Рис. 2.29. Экспериментальный образец

Отверстия на концах образцов выполнены для их дополнительной фиксации и предотвращения возможного проскальзывания при действии растягивающей нагрузки.

Заготовки образцов нарезались из рулонного проката вдоль линии прокатки, что соответствует условиям изготовления тонкостенных профилей из полосы, которая получается делением рулона.

Для получения образцов одинаковых размеров заготовки образцов собирались в пакеты по 20...50 штук, которые сжимались двумя жесткими стальными пластинами, после чего производилась обработка торцов пакетов фрезерованием и шлифованием, сверлились отверстия на концах образцов (рис. 2.30).

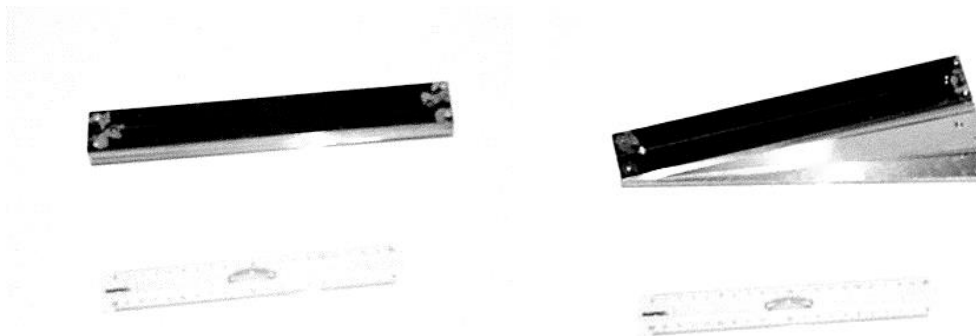


Рис. 2.30. Пакеты образцов

Таким же образом изготавливались плоские стандартные десятикратные образцы для определения механических характеристик материала и получения диаграммы растяжения.

Испытаниям подвергались три партии образцов.

Испытание образцов на растяжение производилось в соответствии с ГОСТ 11701-84 [54]. По результатам испытаний стандартных образцов основные механические характеристики и параметры упрочнения материалов образцов приведены в табл. 2.1.

Для испытуемых материалов определялся условный предел текучести. При линейной аппроксимации диаграммы растяжения модуль упрочнения материала определялся на начальном участке диаграммы растяжения, когда относительная деформация соответствовала наибольшим изгибным деформациям образцов при проведении испытаний (ϵ_r, σ_r). В таблице также приведено значение модуля упрочнения материалов, когда аппроксимирующая прямая проходит через точки предела текучести и предела прочности (ϵ_b, σ_b).

Константы кривой степенного упрочнения K и n определялись в соответствии со значениями предела текучести и предела прочности материала образцов, а также в пределах деформаций гибки.

Таблица 2.1

Механические свойства материалов образцов

Материал образцов	Толщина образцов H , мм	Механические свойства материала				Константы линейного упрочнения				Константы степенного упрочнения				
		Модуль упругости E , МПа	Условные значения		σ_b , МПа	ϵ_b	Аппроксимация в пределах деформаций гибки		Аппроксимация в пределах деформаций гибки		K_r , МПа	n_r	Аппроксимация при больших деформациях	
			предел текучести	предел прочности			σ_T , МПа	ϵ_T	P_r , МПа	P_r/E			P , МПа	P/E
Партия 1 X18H9T	0,18	200000	284	0,0014	556	0,171	21785	0,1	1595	0,0079	407	0,055	711	0,14
Партия 2 X18H9T	0,19	200000	236	0,0012	467	0,186	14263	0,07	1252	0,0063	323	0,047	587	0,135
Партия 3 ЭИ-435	0,30	200000	362	0,0018	611	0,145	16178	0,08	1736	0,0087	450	0,034	769	0,119

Для примера на рис. 2.31 приведены различные случаи аппроксимации экспериментальной кривой растяжения стали из X18Н9Т (партия 1). Кривая упрочнения 3 построена по значениям напряжений и деформаций согласно экспериментальным диаграммам растяжения. Прямая 1 отражает линейную аппроксимацию, когда она проходит через точки, соответствующие пределу текучести и пределу прочности. Кривая 2 соответствует аппроксимации степенной функцией. На рис. 2.32 показана погрешность определения напряжений при аппроксимации диаграммы растяжения через точки $(\varepsilon_T, \sigma_T)$ и $(\varepsilon_B, \sigma_B)$. В пределах наибольших деформаций растяжения степенная аппроксимация (кривая 2), дает завышенные значения величин напряжений, линейная (кривая 1) – заниженные. В том и другом случаях, погрешность аппроксимации достигает 20 %. Наибольшая погрешность возникает в области малых пластических деформаций.

На рис. 2.33 приведен фрагмент кривой упрочнения в пределах деформаций, возникающих при гибке образцов. Такая аппроксимация позволяет более точно воспроизводить действительный характер деформирования образцов на участке $(\varepsilon_T, \sigma_T) - (\varepsilon_r, \sigma_r)$. Прямая 2 соответствует линейной аппроксимации, кривая 4 – степенной, а кривые 1 и 3 соответствуют линейной и степенной аппроксимациям на участке $(\varepsilon_T, \sigma_T)$ и $(\varepsilon_B, \sigma_B)$.

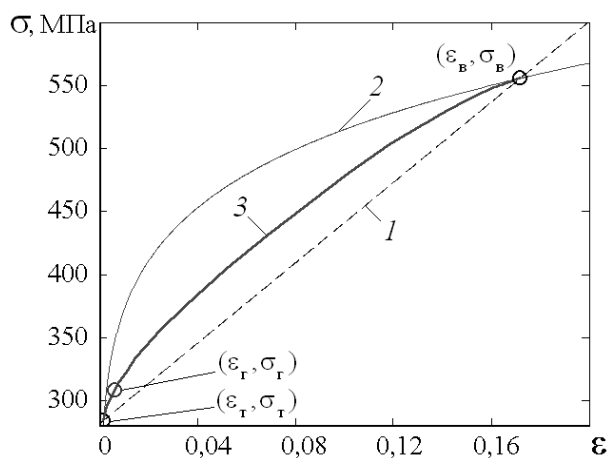


Рис. 2.31. Аппроксимация кривой

упрочнения через точки $(\varepsilon_T, \sigma_T)$, $(\varepsilon_B, \sigma_B)$

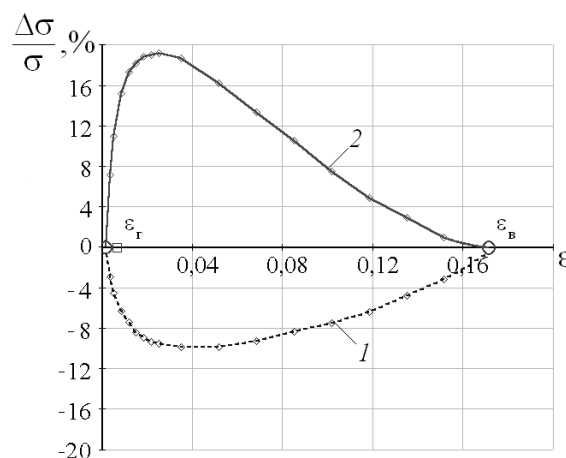


Рис. 2.32. Погрешность

аппроксимации кривой упрочнения

На рис. 2.34 показана величина погрешности при аппроксимации кривой упрочнения в пределах деформаций, возникающих при гибке образцов. Наибольшая точность аппроксимации кривой деформирования достигается при использовании степенной функции (кривая 4). Погрешность аналитического определения напряжений по сравнению с действительными не превышает 2 %. При аппроксимации линейной функцией (кривая 2) погрешность несколько больше. Для сравнения на рисунке приведены также кривые погрешностей аппроксимации кривой упрочнения линейной (кривая 1) и степенной (кривая 3) функциями при больших пластических деформациях.

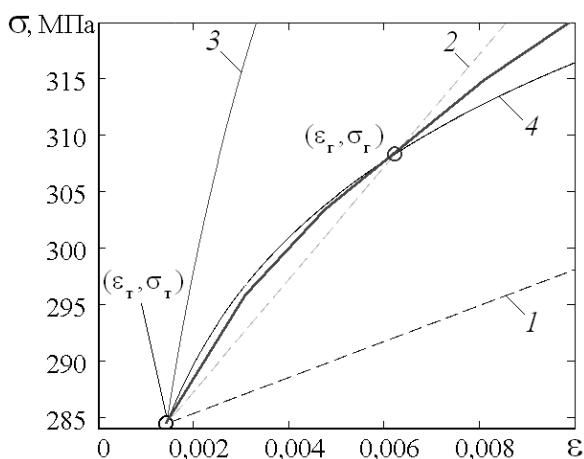


Рис. 2.33. Аппроксимация кривой упрочнения через точки (ϵ_T, σ_T) , (ϵ_T, σ_T)

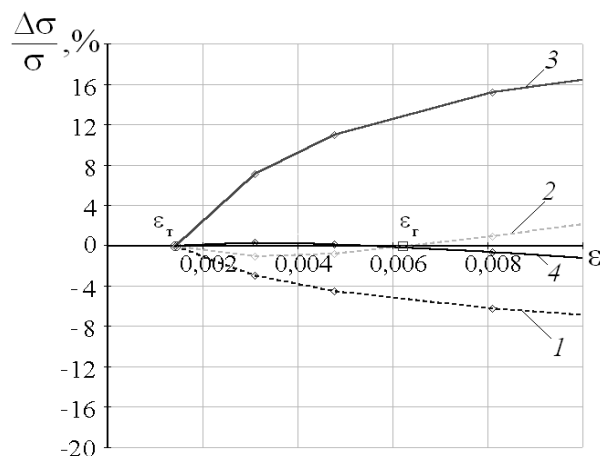


Рис. 2.34. Погрешность аппроксимации кривой упрочнения в пределах деформаций гибки

Приспособление для испытаний

Для проведения испытаний сконструировано и изготовлено приспособление, предназначенное для испытания образцов при изгибе с предварительным продольным растяжением с использованием универсальной испытательной машины. Машина обеспечивала возможность задавать с достаточной точностью усилие предварительного растяжения образцов, создавать одинаковую скорость растяжения при определении механических характеристик материала образцов и их изгибе в приспособлении.

Универсальная испытательная машина для проведения испытаний имеет следующие характеристики:

- максимальная сила 10 кН;
- диапазон измерения силы 0,1...10 кН;
- диапазон измерения скорости 0,001...10 мм/мин;
- предельная погрешность измерения силы, не более 1 %;
- погрешность измерения перемещений, не более $\pm 0,01$ мм.

Приспособление позволяет производить испытания одновременно двух образцов. Это исключало возможность эксцентричного нагружения несущих деталей растяжной машины при растяжении образцов, а также ускоряло процесс проведения испытаний.

Конструктивная схема приспособления показана на рис. 2.35. Общий вид приспособления представлен на рис. 2.36.

При испытаниях образцы 5 устанавливались между цилиндрической оправкой 10, выполняющей роль пуансона, и двумя массивными прижимами 8, являющимися матрицами.

Захваты, осуществляющие деформирование концевых участков образцов и их зажим, сформированы из наконечников 6 и прижимных планок 7. Необходимая сила прижима образцов 5 создавалась при затяжке винтов 4.

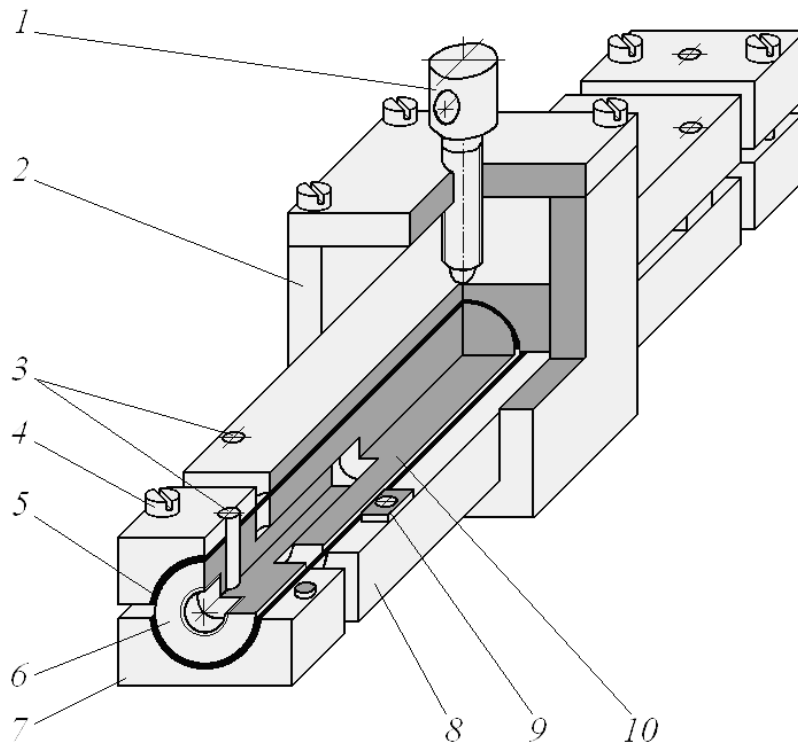


Рис. 2.35. Приспособление для испытаний образцов
 1 – винт силовой; 2 – рамка силовая; 3 – штифты; 4 – винт;
 5 – образец; 6 – наконечник; 7 – планка прижимная;
 8 – прижимы; 9 – шайба ограничительная; 10 – оправка

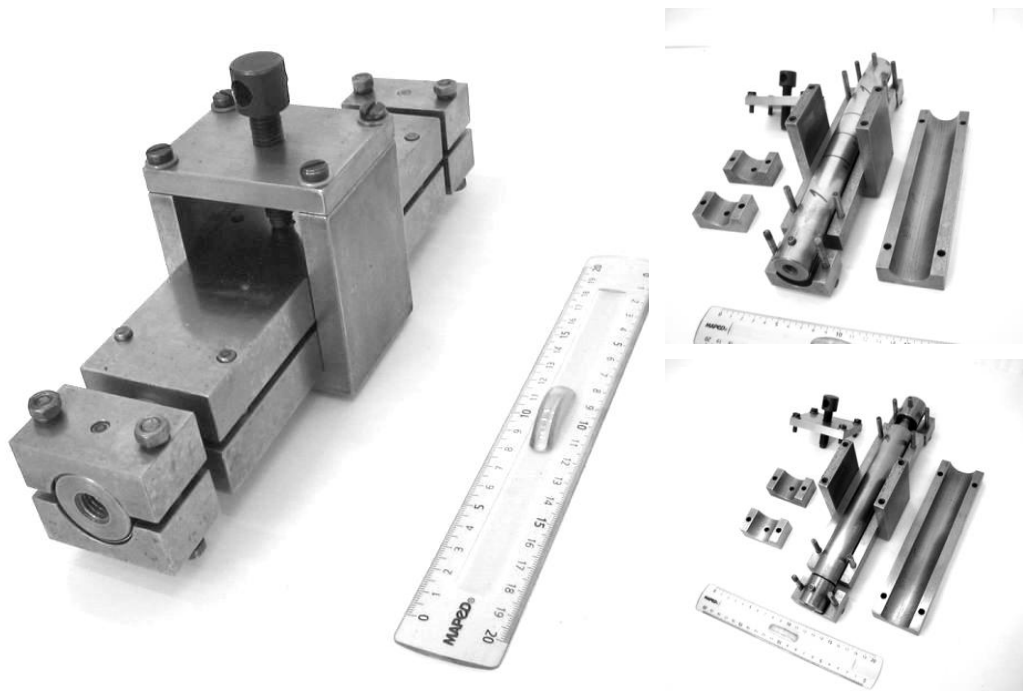


Рис. 2.36. Общий вид приспособления для испытаний образцов

В оправке с двух сторон имеются направляющие отверстия, в которые входят центрирующие выступы наконечников 6. В наконечниках выполнены глухие резьбовые отверстия для крепления к траверсам растяжной машины.

Точность взаимного положения наконечников, прижимных планок и образцов, а также прижимов обеспечивалась цилиндрическими штифтами 3. Штифты, находящиеся в концевых захватах, исключали возможность проскальзывания образцов при приложении растягивающей нагрузки.

Рамка 2 с силовым винтом 1, закрепленная на одном из прижимов, обеспечивала при вращении силового винта необходимую силу для обжима образцов вокруг оправки.

Для предотвращения недопустимых контактных напряжений в местах соприкосновения образцов с рабочими поверхностями оправки и прижимов, предельное перемещение прижимов ограничивалось металлическими ограничительными шайбами 9. Шайбы подбирались определенной толщины, в зависимости от толщины образцов, и располагались на направляющих штифтах. Кроме того, между образцами и прижимами в некоторых случаях устанавливались фторопластовые прокладки.

Приспособление обеспечивало также возможность испытывать образцы без изгиба прижимами и создавать после деформирования концевых участков только растягивающую нагрузку. Это позволяло отслеживать величину участка распространения концевых изгибных деформаций в зависимости от σ_z , а также анализировать форму образцов при различных величинах относительных деформаций растяжения.

Режимы и условия испытаний

При проведении испытаний образцы 5 укладывались между оправкой 10 и присоединенными к ней наконечниками 6. С помощью прижимных планок 7 и штифтов 3 осуществлялось деформирование и зажим концевых участков образцов в результате затяжки винтов 4. Затем устанавливались прижимы 8. Взаимное положение прижимов фиксировалось штифтами 3 (см. рис. 2.35).

Подготовленное к испытаниям приспособление с образцами навинчивалось резьбовыми отверстиями наконечников на шпильки, закрепленные в подвижной и неподвижной траверсах универсальной испытательной машины FP-10/1 (Германия) (рис. 2.37).

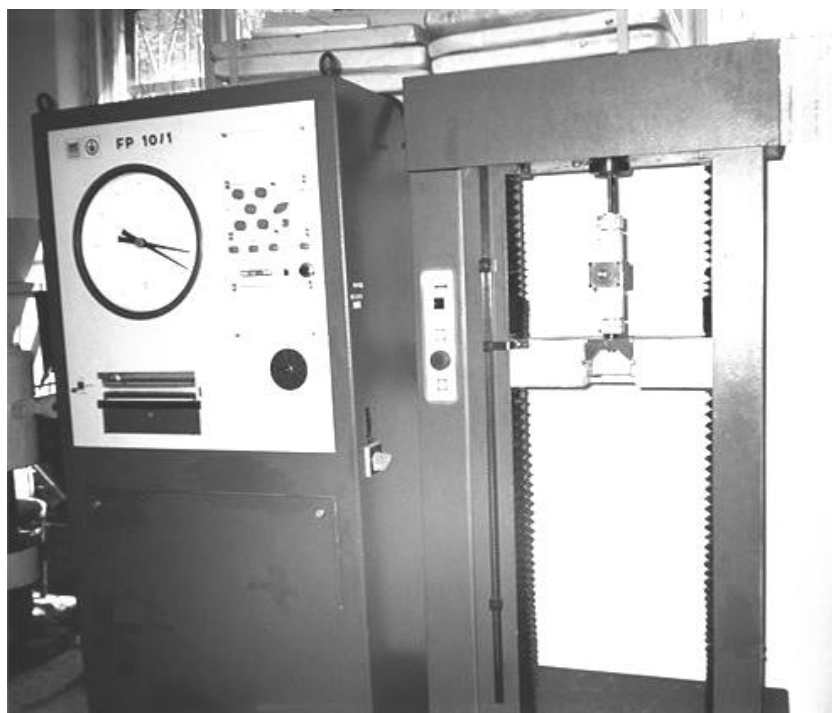


Рис. 2.37. Установка приспособления в испытательной машине FP-10/1

При перемещении подвижной траверсы испытательной машины со скоростью 1 мм/мин создавалась необходимая растягивающая сила в зависимости от задаваемых напряжений растяжения. Затем образцы изгибались при вращении силового винта и сближении прижимов к оправке. Перемещение прижимов ограничивалось шайбами.

Деформация образца при испытаниях показана на рис. 2.38. Образец изгибался по оправке с радиусом $R_{\text{опр}} = 14,4$ мм при действии различных продольных напряжений σ_z . На рисунке обозначено R_r – радиус изгиба образца; R_0 – остаточный радиус изгиба образца.

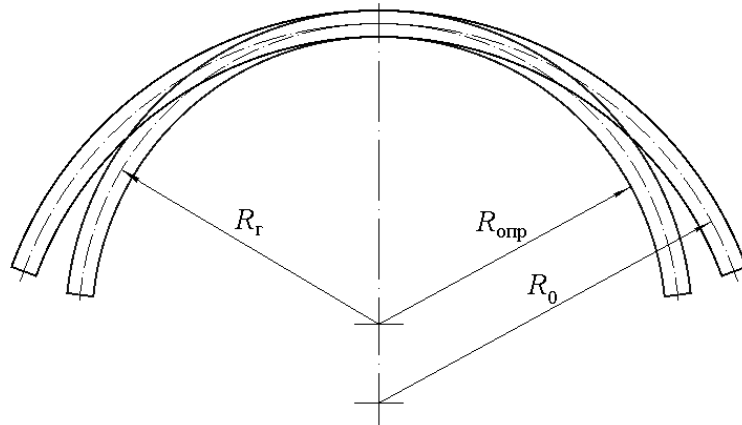


Рис. 2.38. Деформация образца при испытании

После деформирования образцов растягивающая нагрузка снималась, производилось снятие и разборка приспособления. Образцы после испытаний показаны на рис. 2.39.



Рис. 2.39. Образцы после испытаний

Величины остаточных радиусов кривизны определялись согласно значениям остаточного прогиба. Остаточный прогиб деформированного образца замерялся посередине и в двух сечениях, расположенных на расстоянии 30 мм от середины образца, с помощью специального приспособления (рис. 2.40). Приспособление для определения прогиба образца 1 состоит из призмы 2, индикатора часового типа 3 с ценой деления 0,01 мм. Замер остаточного прогиба f образца осуществлялся на базе $b = 20$ мм. Каждое значение остаточного прогиба образцов получено из серии опытов по 7 пар образцов.

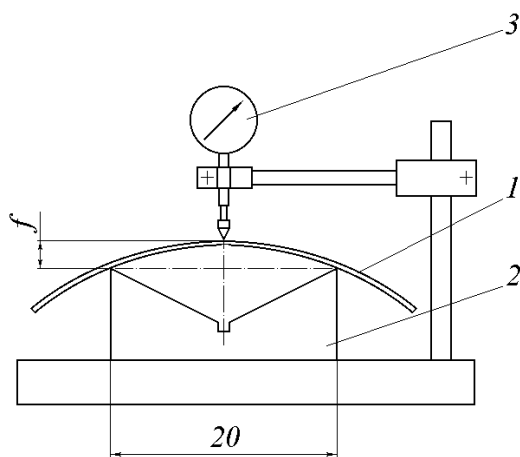


Рис. 2.40. Схема измерения остаточного прогиба образца

Анализ результатов испытаний образцов

Статистическая обработка результатов испытаний образцов производилась согласно [55, 56].

Был принят следующий порядок статистической обработки группы результатов наблюдений.

1. Определялось среднее арифметическое значение остаточного прогиба по результатам трех замеров прогибов a_1, a_2, a_3 для каждого из 14 образцов. Исключалась известная систематическая погрешность результатов наблюдений

$$f = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3} - h.$$

2. Вычислялось среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения, $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$, где n – число результатов наблюдений ($n = 14$).

3. Вычислялась оценка среднего квадратического отклонения результата наблюдения $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}$.

4. Вычислялась оценка среднего квадратического отклонения результата измерения $S_{\bar{f}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$.

5. Проверена гипотеза о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению.

6. Вычислялись доверительные границы ε (доверительный интервал) случайной погрешности результата измерений при доверительной вероятности $P = 0,95$; $\varepsilon = tS_{\bar{f}}$, где $t = 2,16$ – коэффициент Стьюдента при $n = 14$.

7. Вычислялись границы неисключенной систематической погрешности результата измерения.

Допускаемая погрешность индикатора стрелочного типа 0,025 мм (при делении шкалы 0,01 мм) $\varepsilon_c = 0,025$ мм.

8. Вычислялись доверительные границы погрешности результата измерения.

Согласно результатам обработки, экспериментальные значения величин прогибов образцов представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Величины остаточных прогибов образцов в зависимости от продольных напряжений растяжения

Материал образцов, толщина					
X18H9T, $H = 0,18$ мм		X18H9T, $H = 0,19$ мм		ЭИ-435, $H = 0,30$ мм	
$\tilde{\sigma}_z$	$f_s = \bar{f} \pm \Delta f$	$\tilde{\sigma}_z$	$f_s = \bar{f} \pm \Delta f$	$\tilde{\sigma}_z$	$f_s = \bar{f} \pm \Delta f$
0	$2,11 \pm 0,04$	0	$2,50 \pm 0,05$	0	$2,51 \pm 0,04$
0,2	$2,27 \pm 0,04$	0,2	$2,59 \pm 0,04$	0,2	$2,62 \pm 0,03$
0,5	$2,38 \pm 0,04$	0,5	$2,70 \pm 0,04$	0,5	$2,72 \pm 0,03$
0,7	$2,54 \pm 0,04$	0,7	$2,91 \pm 0,04$	0,7	$2,85 \pm 0,03$
0,8	$2,67 \pm 0,04$	0,8	$3,06 \pm 0,05$	0,8	$2,96 \pm 0,03$
0,9	$2,87 \pm 0,05$	0,98	$3,39 \pm 0,06$	0,9	$3,15 \pm 0,03$
1,0	$3,17 \pm 0,08$	1,0	$3,48 \pm 0,04$	1,0	$3,41 \pm 0,04$

В результате испытаний образцов получены зависимости остаточного прогиба образцов от величины продольных напряжений растяжения.

Параметры упругопластического изгиба образцов для каждой серии опытов определялись в следующей последовательности:

1. Относительная кривизна образцов при изгибе

$$\tilde{\varphi} = \frac{R_y}{R_r},$$

где $R_r = R_{\text{опр}} + \frac{H}{2}$ – радиус кривизны образца;

$R_y = \frac{H E}{2 \sigma_T}$ – наибольший радиус упругого изгиба образца.

2. Остаточная относительная кривизна

$$\tilde{\varphi}_0 = \frac{R_y}{R_0},$$

где R_0 – остаточный радиус кривизны образца, рассчитывался в зависимости от опытного значения прогиба f при соответствующих значениях $\tilde{\sigma}_Z$ по формуле

$$R_0 = \frac{b^2}{8f} + \frac{f}{2}.$$

3. Величина относительного упругого пружинения после разгрузки образца

$$\Delta\tilde{\varphi} = \frac{R_y}{R_r} - \frac{R_y}{R_0} = \tilde{\varphi}_r - \tilde{\varphi}_0.$$

Величина относительного упругого пружинения согласно теореме о разгрузке равна относительному изгибающему моменту

$$\tilde{M} = \Delta\tilde{\varphi}.$$

Таким образом, в результате испытаний определялась величина относительного упругого пружинения и соответственно относительный изгибающий момент в зависимости от величины продольных напряжений растяжения для различных материалов. Экспериментальные данные позволяют произвести их сравнение с теоретическими значениями, полученными при решении задачи упругопластического изгиба полосы из материала с линейным упрочнением.

Теоретические значения параметров упругопластического изгиба образцов определялись в соответствии с формулой (2.13). Производился расчет величины относительного изгибающего момента \tilde{M} в зависимости от

относительной кривизны при упругопластическом изгибе образцов $\tilde{\varphi}_r$ и соответствующих напряжений $\tilde{\sigma}_z$. Рассчитывалась остаточная относительная кривизна образцов

$$\tilde{\varphi}_0 = \tilde{\varphi}_r - \tilde{M}.$$

В соответствии со значениями $\tilde{\varphi}_0$ определялись теоретические значения величин прогибов образцов при соответствующих напряжениях растяжения по формуле

$$f = R_0 - \frac{H}{2} - 0,5 \sqrt{4 \left(R_0 - \frac{H}{2} \right)^2 - b^2},$$

где $R_0 = \frac{R_y}{\tilde{\varphi}_0}$ – теоретическое значение остаточного радиуса кривизны образца.

Теоретические и экспериментальные значения прогибов образцов представлены на рис. 2.41.

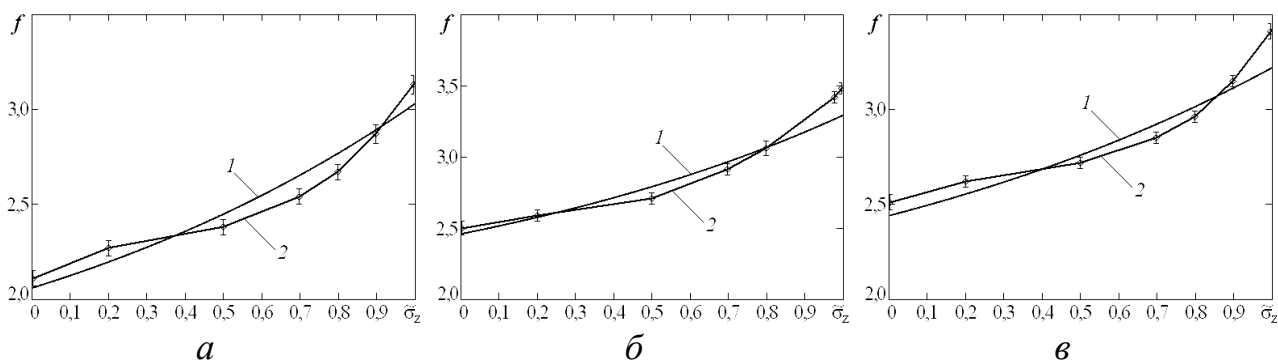


Рис. 2.41. Графики зависимостей остаточных прогибов образцов от величины осевых напряжений растяжения:

a – X18N9T, $H = 0,18$ мм, $\tilde{P} = 0,1$; b – X18N9T, $H = 0,19$ мм, $\tilde{P} = 0,07$;

v – ЭИ-435, $H = 0,30$ мм, $\tilde{P} = 0,08$;

1 – теоретическая зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает их удовлетворительное согласование. Наибольшее отклонение результатов теоретических и экспериментальных данных не превышает 20 % (рис. 2.41). Такое отклонение обусловлено колебаниями механических свойств образцов, их толщин, неточностью аппроксимации

диаграммы растяжения, расчетной схемой деформирования, погрешностями измерений.

Теоретические и экспериментальные зависимости относительного упругого пружинения и относительного изгибающего момента в зависимости от осевых растягивающих напряжений представлены на рис. 2.42.

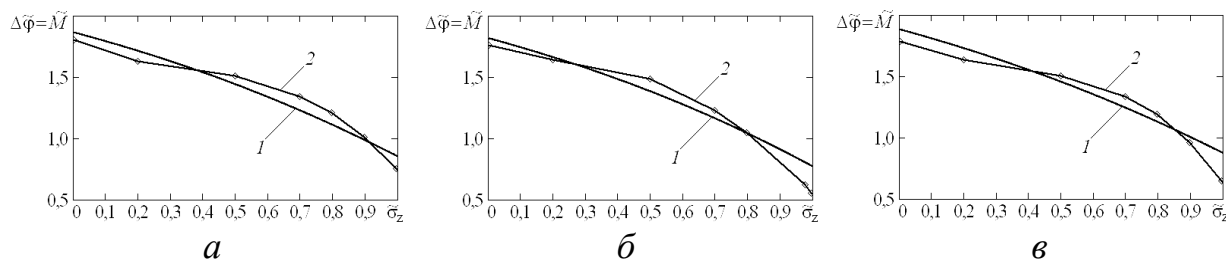


Рис. 2.42. Графики зависимостей относительных пружинений и относительных

изгибающих моментов от величины осевых напряжений растяжения:

а – X18Н9Т, $H = 0,18$ мм, $\tilde{\Pi} = 0,1$; *б* – X18Н9Т, $H = 0,19$ мм, $\tilde{\Pi} = 0,07$;

в – ЭИ-435, $H = 0,30$ мм, $\tilde{\Pi} = 0,08$;

1 – теоретическая зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

Эксперименты подтверждают установленную теоретическим решением закономерность, что с ростом величины $\tilde{\sigma}_z$ интенсивно уменьшается относительное пружинение и величина изгибающего момента. Величина изгибающего момента при $\tilde{\sigma}_z = 0,9$ по сравнению с изгибающим моментом без предварительного растяжения при $\tilde{\sigma}_z = 0$ уменьшается в несколько раз. Значения расчетных и экспериментальных данных достаточно близки. При $\tilde{\sigma}_z = 0,9 \dots 1,0$ отклонения расчетных и экспериментальных данных находятся в пределах 10...20 %.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования образцов показывают достаточную достоверность полученных теоретических решений задачи упругопластического изгиба полосы с предварительным продольным растяжением и возможность их использования для расчетов параметров технологического процесса профилирования.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ГИБКОЙ С ПРОДОЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ

Целью экспериментального исследования стало определение основных закономерностей технологии изготовления тонкостенных гнутых профилей гибкой с продольным растяжением [53].

Исследования проводились в условиях, близких к промышленному производству профилей на специально спроектированной и изготовленной экспериментальной установке.

В процессе исследований изучались различные технологические схемы изготовления тонкостенных гнутых профилей, необходимых для формирования судовых конструкций.

Производился анализ точности изготовленных профилей, сравнение результатов испытаний с аналитическими зависимостями, полученными при решении задачи об упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением.

3.1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка обеспечивала возможность изготовления профилей со сложной формой поперечного сечения, с предварительным гофрированием заготовки, профилей с продольной кривизной, гофрированных профилей, профилей с различной продольной конфигурацией.

Изготовление опытных партий профилей на экспериментальной установке позволило уточнить технические требования, необходимые для проектирования опытно-промышленной профилирующей установки.

Конструктивная схема экспериментальной установки показана на рис. 3.1. Общий вид установки представлен на рис. 3.2.

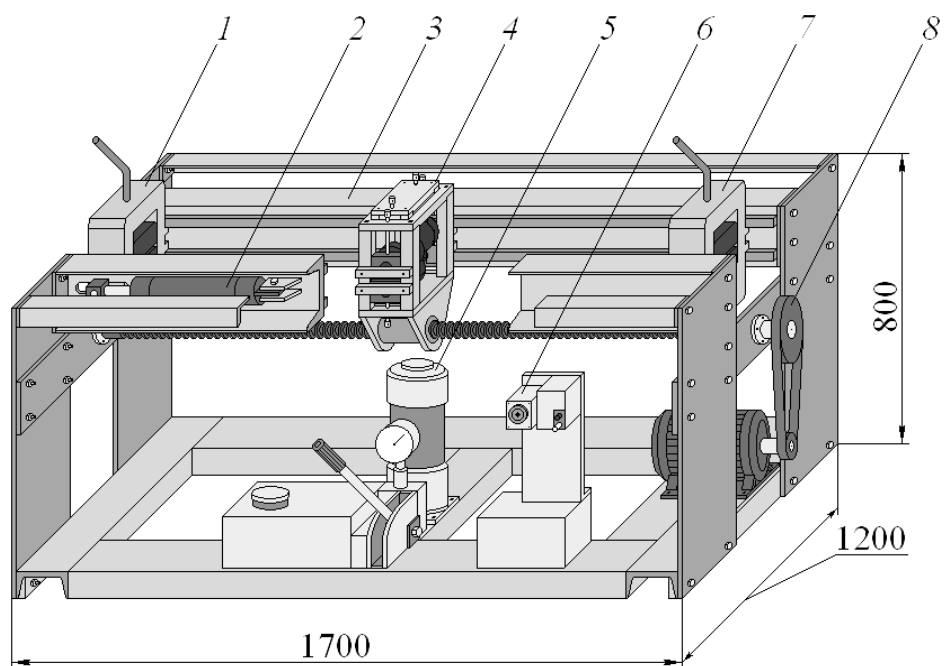


Рис. 3.1. Конструктивная схема экспериментальной установки

1 – головка гибочная подвижная; 2 – гидроцилиндр; 3 – корпус; 4 – каретка;
 5 – насосная станция; 6 – пульт управления; 7 – головка гибочная неподвижная;
 8 – механизм перемещения каретки

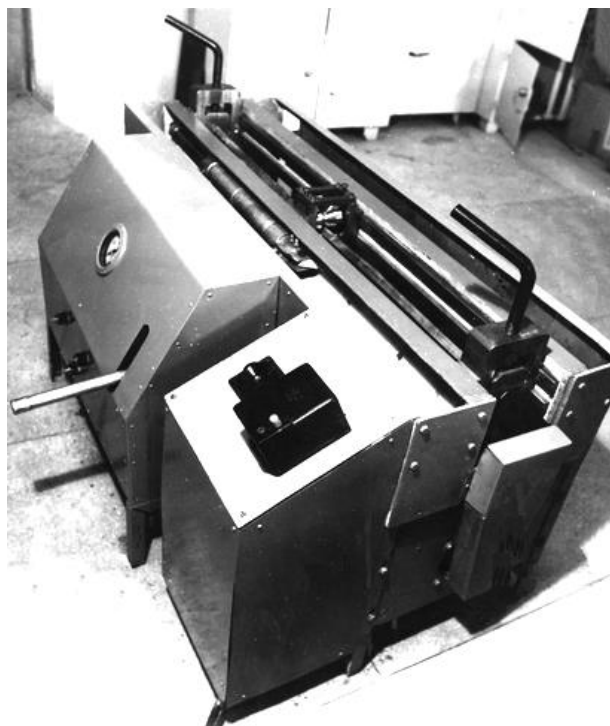


Рис. 3.2. Общий вид экспериментальной установки

Техническая характеристика установки приведена ниже:

Толщина обрабатываемого материала	0,2...1 мм
Максимальная ширина заготовки	100 мм
Максимальная длина профиля	не ограничивается
Минимальная длина профиля	1500 мм
Ход каретки	1400 мм
Скорость перемещения каретки	0,1 м/с
Сила растяжения, наибольшая	20 кН
Сила прижима концевых участков заготовки	50 кН
Насосная станция ручная	
– рабочее давление гидростанции	2 МПа
Привод передвижения:	
– тип электродвигателя	4А80В4У3
– частота вращения	1430 мин ⁻¹
– мощность	0,8 кВт
Масса установки	не более 200 кг

Корпус 3 включает в себя силовую часть, присоединенную к сварной конструкции из боковых стенок, швеллеров, уголков и защитных листов. Внутри корпуса размещаются механизм передвижения каретки 8, насосная станция 5, пульт управления 6.

Силовая часть сформирована из продольных балок и боковых пластин. К продольным балкам – швеллерам присоединены выполненные с высокой точностью продольные планки, являющиеся направляющими для каретки 4 и гибочных головок 1 и 7. Продольные балки воспринимают нагрузки, возникающие при растяжении и профилировании заготовки.

Гибочные головки выполнены в виде рамок, в верхней части которых имеются резьбовые отверстия для силовых винтов, создающих необходимое силовое усилие для деформирования и зажима концевых участков заготовки. Внутри рамок размещаются съемные штампы, рабочие поверхности которых

соответствуют форме поперечного сечения изготавливаемых профилей. Рамки гибочных головок имеют боковые выступы для точной установки относительно направляющих продольных планок. Неподвижная гибочная головка 7 крепится в необходимом месте болтами и штифтами к продольным балкам. Подвижная гибочная головка 1 соединена по боковым сторонам со штоками гидроцилиндров 2 с помощью захватов и болтов. Корпус каждого гидроцилиндра крепится болтами к планкам, приваренным к боковой стенке швеллеров. При подаче давления в гидроцилиндры в заготовке, концевые участки которой зафиксированы в захватах, создается необходимое постоянное усилие растяжения. При приложении к заготовке растягивающей нагрузки продольные балки подвергаются действию сжимающих нагрузок, которые располагаются в плоскости симметрии швеллеров, что исключает возможность возникновения значительных изгибающих моментов.

В каретке устанавливается сменная обойма с профилирующими роликами. В обойме размещаются бронзовые вкладыши, являющиеся подшипниками скольжения, и профилирующие ролики. Необходимое межосевое расстояние между профилирующими роликами создается при помощи силовых винтов обоймы и набора прокладок между бронзовыми вкладышами.

Обойма имеет возможность свободно перемещаться в вертикальном направлении, следуя за положением деформируемых участков заготовки. Необходимое вертикальное позиционирование обоймы в случае изготовления профилей с заданной продольной кривизной осуществляется регулировочным винтом. На корпусе каретки выполнены направляющие для перемещения по продольным планкам, закрепленным на швеллерах. В нижней части корпуса каретки имеются проушины, в которые устанавливается гайка силового винта механизма передвижения.

Механизм передвижения осуществляет возвратно-поступательное движение каретки. Он состоит из электродвигателя, клиноременной передачи и передачи винт–гайка. Опоры ходового винта размещаются в боковых пластинах корпуса. Опора ходового винта, на выходном конце которого располагается шкив

ременной передачи, включает в себя сдвоенные радиально–упорные подшипники. Противоположная опора, включающая радиальный шариковый подшипник, выполнена плавающей.

Для питания гидроцилиндров использована насосная станция с ручным приводом и пневмогидроаккумулятором. Пневмогидроаккумулятор позволяет компенсировать утечки в гидросистеме и поддерживать заданное давление в гидроцилиндрах подвижной гибочной головки. Давление в гидросистеме контролируется манометром. Поскольку деформации растяжения заготовки невелики, то с помощью пневмогидроаккумулятора обеспечивается практически постоянное усилие растяжения без дополнительного регулирования давления ручным насосом.

Гидроцилиндры двухстороннего действия создают необходимое растяжение заготовки при перемещении подвижной гибочной головки. Диаметр поршня – 50 мм, диаметр штока – 20 мм, максимальное рабочее давление – 20 МПа.

Для предварительного гофрирования заготовки в местах изгиба и расположения ребер жесткости перед неподвижной гибочной головкой предусмотрено крепление консоли, в которой устанавливается дополнительная обойма с роликами предварительного деформирования.

Для изготовления профилей любой длины перед экспериментальной установкой размещалась рулонница, в которой находился рулон ленты длиной 300...500 м. При проведении опытов свободный конец ленты подавался в направляющие планки к роликам предварительного деформирования, а затем к захватам. Подача очередного участка ленты для профилирования осуществлялась с помощью механизма передвижения каретки.

3.2. Режимы и условия исследований

В качестве заготовок использовались полосы шириной 20...100 мм и толщиной 0,15...1,0 мм из малоуглеродистых и низколегированных сталей, нержавеющей сталей, медных и алюминиевых сплавов, а также из оцинкованной

и плакированной сталей. Использовались штучные заготовки, а также заготовки из рулона для их непрерывно-циклического профилирования.

Заготовка размещалась между профилирующими роликами и захватами гибочных головок. При вращении вручную силовых винтов гибочных головок производилась гибка и захват концевых участков заготовки. Усилие растяжения заготовки выбиралось с таким расчетом, чтобы в заготовке создавались заданные растягивающие напряжения. Величина растягивающей нагрузки устанавливалась и контролировалась с помощью манометра. Зависимость величины растягивающей нагрузки от показаний манометра получена по результатам предварительной тарировки с использованием динамометра.

После растяжения заготовки профилирующие ролики, установленные в районе подвижного захвата, сближались при вращении силовых винтов обоймы. Необходимый радиальный зазор между профилирующими роликами задавался соответствующим набором прокладок между подшипниками роликов. При включении механизма перемещения каретки производилось профилирование заготовки. Ход каретки ограничивался конечными выключателями.

Форма рабочих поверхностей калибрующих роликов предварительно рассчитывалась с учетом пружинения в соответствии с аналитическими зависимостями, приведенными в разд. 2. Некоторые пары профилирующих роликов показаны на рис. 3.3.

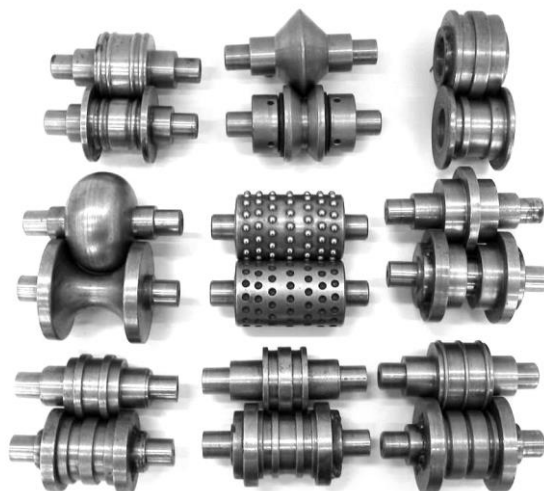


Рис. 3.3. Профилирующие ролики

Точное взаимное осевое расположение парных роликов осуществлялось упорными боковыми буртами.

Ролики изготавливались цельными, насадными, составными. Насадные ролики устанавливались на осях и фиксировались гайками. Для получения различных форм поперечного сечения профилей использовались также соответствующие наборы профильных дисков, закрепляемых на осях. На роликах для предварительного гофрирования заготовки выполнялись кольцевые выступы и соответствующие канавки. Размеры кольцевых выступов и канавок задавались в зависимости от выбранной формы гофров и толщины полосы.

Предварительное гофрирование заготовки позволяло также обеспечивать ее более точное позиционирование относительно профилирующих роликов.

После профилирования производился анализ формы полученного профиля, замерялись остаточный радиус кривизны мест изгиба, углы между полками, продольная кривизна, прямолинейность боковых кромок, скрученность. С помощью штангенциркуля, угломера, мерных линеек определялось соответствие формы поперечного сечения заданной, кроме того, для контроля формы некоторых профилей изготавливались соответствующие шаблоны. В качестве шаблонов использовались также рабочие поверхности захватов. Продольная кривизна профиля устанавливалась на базовой длине 1000 мм с использованием концевых мер и щупов. Скрученность профиля определялась визуально, а также по отклонениям расположения торцевых кромок профиля на базе 1 м.

Проводился сравнительный анализ формы поперечного сечения профиля при различных величинах растягивающих напряжений в интервале 0,2...1,0 предела текучести материала заготовки. Проводились также опыты по определению влияния радиального зазора на точность формы поперечного сечения профиля.

В процессе испытаний были изготовлены равнобокие и неравнобокие уголки, швеллеры, корытные и С-образные профили, профили с различной

формой гофров, профили с несимметричным поперечным сечением. Формы поперечных сечений некоторых изготовленных профилей показаны на рис. 3.4.

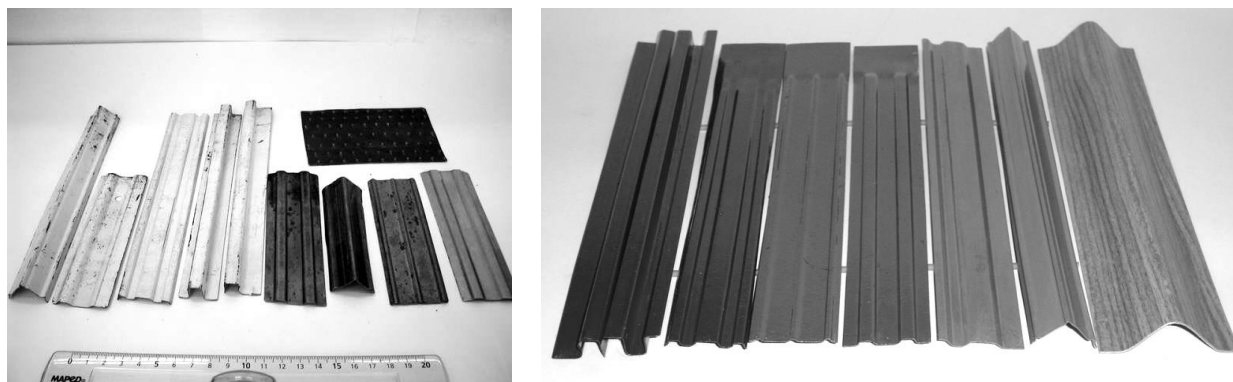


Рис. 3.4. Гнутые профили

Для изготовления профилей с продольной кривизной по ходу перемещения каретки производилось вертикальное смещение обоймы с профилирующими роликами на различную высоту. Продольная кривизна возникала также при установке обоймы со смещением в начальный период деформирования.

Предварительная правка полосовых заготовок не производилась. В некоторых случаях заготовке специально придавались различные искажения и производилось сравнение формы профилей с формой профилей, изготовленных из точных заготовок.

Для получения профилей с периодически повторяющимися по длине плоскими и изогнутыми участками заготовка зажималась в плоских захватах, а затем осуществлялось профилирование при периодическом увеличении и уменьшении расстояниями между осями калибрующих роликов.

Проведены испытания, когда вместо калибрующих роликов использовались ползуны длиной 150 мм. Формы рабочих поверхностей ползуну соответствовали формам поперечных сечений изготавливаемых профилей. На концевых участках ползуну выполнялись криволинейные приемные фаски. Ползуны устанавливались в обойме, которая имела свободу вертикального

перемещения. Профили, изготовленные с применением в качестве профилирующего инструмента ползунов, имели повышенную точность формы.

Для получения рифленых профилей использовались ролики, на одном из которых имелись сферические выступы, а на другом – сферические впадины. Продольная кривизна таких профилей находилась в допусках.

Профилирующие ролики и соответствующие им изготовленные профили представлены на рис. 3.5.

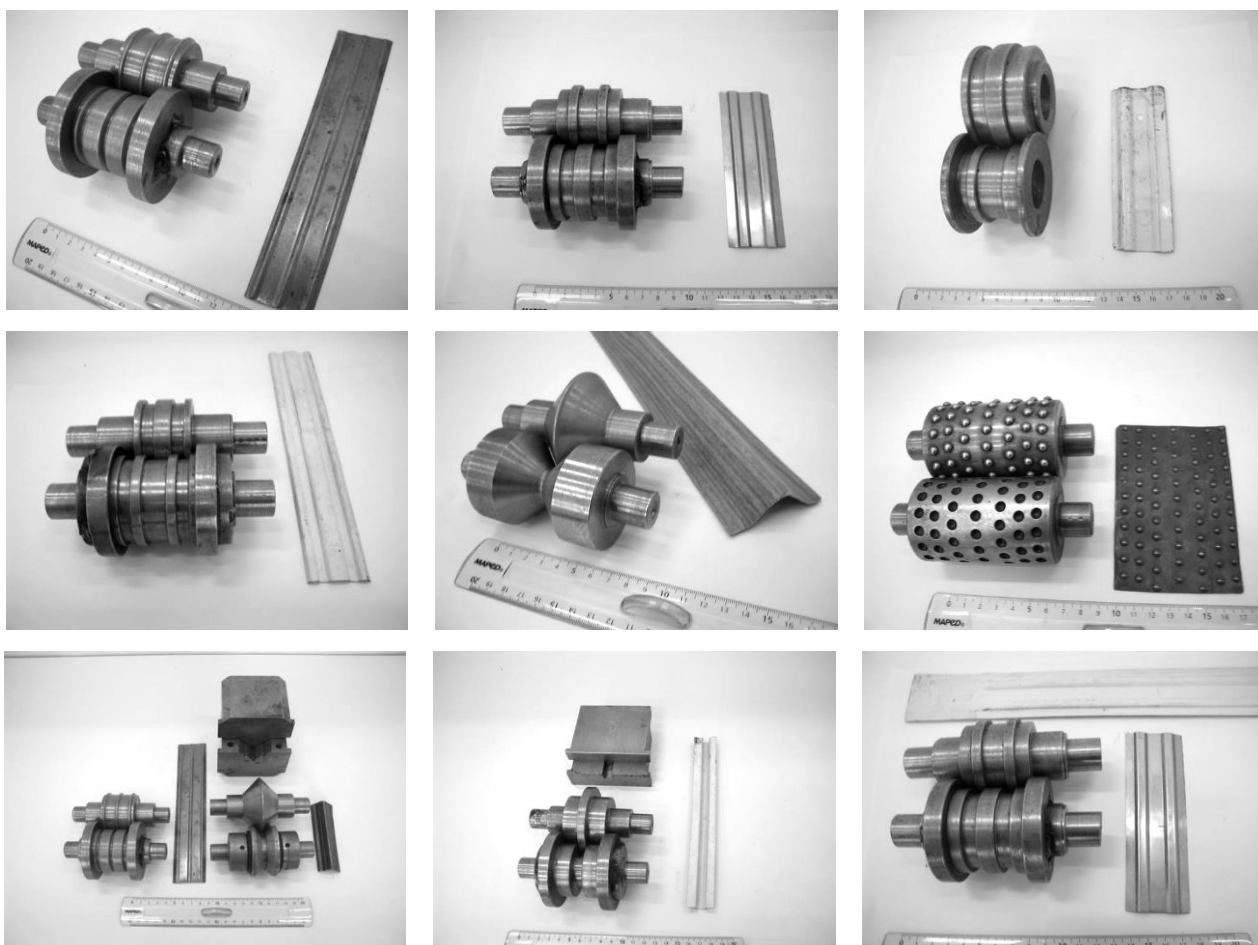


Рис. 3.5. Профилирующие ролики и гнутые профили

Проводились опыты по изучению процесса профилирования без использования профилирующего инструмента. Заготовка зажималась в захватах, рабочие поверхности которых выполнялись в форме полуцилиндра. Затем производилось растяжение до напряжений, превышающих предел текучести материала заготовки до относительной деформации растяжения 1...2 %. При длине заготовки, равной 30...40 ее ширины, получался профиль

соответствующей формы. При значительной длине заготовки ее средняя часть оставалась плоской. Центры тяжести поперечных сечений располагались на линии, соединяющей центры тяжести поперечных сечений заготовки в захватах.

Для проверки эффективности крепления концевых участков заготовки в захватах рабочие поверхности захватов выполнялись плоскими, с рифлениями, использовались фрикционные накладки, резина малой толщины. При создании достаточного усилия прижима проскальзывания концевых участков заготовок не было.

При использовании заготовок из рулона изготавливались профили длиной до 6 метров. В таких профилях значительного отклонения формы в местах захвата не происходило. Существенного повреждения поверхностей в местах захвата при изготовлении профилей даже из плакированного материала не возникало.

Изготавливались профили с отбортовкой концевых участков, с поперечными ребрами в концах захватов. В этих случаях обеспечивалась более надежная фиксация заготовки при растяжении.

Проверена возможность изготовления профилей с криволинейными продольными гофрами. Такие профили были получены при синхронном периодическом перемещении пар деформирующих роликов вдоль их оси по ходу перемещения каретки. Криволинейные волнообразные гофры повысили жесткость изготовленных профилей как в продольном, так и в поперечном направлениях.

3.3. Анализ результатов экспериментальных исследований

Проведенные испытания позволили установить основные закономерности технологии изготовления тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением.

Рассматриваемая технология изготовления профилей является достаточно универсальной и позволяет получать разнообразные тонкостенные

гнутые профили, необходимые для изготовления тонкостенных судовых конструкций.

Сравнение результатов многочисленных измерений радиусов гибки, углов пружинения с теоретическими зависимостями, полученными при решении задачи упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением, показало их удовлетворительное согласование. Эксперименты подтвердили установленную закономерность, что с ростом величины усилия растяжения упругое пружинение значительно уменьшается. Отклонения радиусов кривизны мест изгиба, углов между полками от расчетных значений не превышали 5...10 % и находились в пределах допусков при напряжениях растяжения, равных 0,9...1,0 предела текучести материала заготовки.

При осуществлении процесса профилирования за один проход профилирующих роликов волнистости полок профилей не возникает.

Различные искажения формы заготовок (продольная кривизна, скрученность, волнистость кромок, серповидность, местные вмятины и т. п.) в процессе гибки устраняются и не влияют на форму изготовленного профиля. Предварительная правка заготовок не требуется.

Продольная кривизна изготовленных профилей находится в допустимых пределах при свободном вертикальном плавающем перемещении обоймы с профилирующим инструментом.

Продольная кривизна профилей может регулироваться в зависимости от задаваемой величины и направления вертикального перемещения деформирующих роликов по ходу их перемещения. Таким образом, при формировании поперечного сечения профиля ему может быть придана также продольная кривизна в любом направлении. В этом случае процесс деформирования осуществляется при одновременном упругопластическом изгибе заготовки в поперечном и продольном направлениях. Существенного отклонения форм поперечных сечений при остаточных прогибах профилей до 50 мм/м не наблюдалось.

Рассматриваемая технология позволяет получать профили с плоскими концевыми участками. Концевые участки могут быть выполнены с поперечными гофрами, а также с отбортовкой кромок, при этом усилие прижима концевых участков может быть снижено. Если по ходу движения каретки расстояние между деформирующими роликами изменять соответствующим образом, то можно получать профили с чередующимися по длине гофрированными и плоскими участками. Наличие плоских участков на профилях во многих случаях позволяет упростить процесс сборки различных судовых конструкций.

Предварительное приложение к заготовке растягивающей нагрузки предупреждает появление винтообразного искривления профилей. У профилей с симметричным поперечным сечением скрученности практически не наблюдалось. У профилей с несимметричным поперечным сечением при действии растягивающих напряжений, равных $0,9 \dots 1,0$ предела текучести материала заготовки скрученность не превышала 1° на 1 метр длины.

Так как при действии растягивающей нагрузки величина изгибающих моментов, необходимых для формоизменения заготовки, существенно уменьшается, вместо деформирующих роликов может использоваться другой формирующий инструмент в виде ползунов из различных материалов. В этом случае точность формы изготовленных профилей может быть повышена.

На экспериментальной установке апробирована технология изготовления профилей с различной формой поперечного сечения. Изготовлено несколько тысяч метров профилей. Возможно изготовление профилей любой длины.

Экспериментальные исследования изготовления тонкостенных гнутых профилей в условиях, близких к промышленному производству, на изготовленной экспериментальной установке показали, что разработанная технология является достаточно универсальной и позволяет изготавливать высокоточные тонкостенные профили разнообразной конфигурации. Наличие осевой растягивающей силы предотвращает возникновение волнистости кромок, продольной кривизны и скрученности профилей, обеспечивает их точность в пределах допусков, установленных существующими стандартами.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность использования аналитических зависимостей, полученных при решении задачи об упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением, для расчета параметров технологии изготовления тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением.

РАЗДЕЛ 4

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ГИБКОЙ С ПРОДОЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования являются научной основой, позволяющей производить расчеты параметров технологии изготовления судовых тонкостенных гнутых профилей гибкой с продольным растяжением [57, 58].

Основные параметры технологического процесса профилирования необходимы для настройки профилирующей установки и технологической оснастки. Профилирующая установка имеет механизм для деформирования и захвата концевых участков заготовки, механизм растяжения, механизм передвижения каретки с профилирующими роликами.

Последовательность технологических операций при профилировании:

1. Размещение заготовки между захватами.
2. Деформирование и зажим концевых участков.
3. Растяжение заготовки.
4. Подача каретки с профилирующими роликами к подвижному захвату.
5. Прижим профилирующих роликов к заготовке.
6. Перемещение каретки с профилирующими роликами к неподвижному захвату (формирование профиля).
7. Разжим захватов и профилирующих роликов.
8. Извлечение готового профиля.

Исходными данными для расчета технологических параметров гибки являются форма поперечного сечения профиля и механические характеристики его материала.

4.1. Силовые воздействия на заготовку

Схема сил, действующих на заготовку при осуществлении технологического процесса профилирования, показана на рис. 4.1.

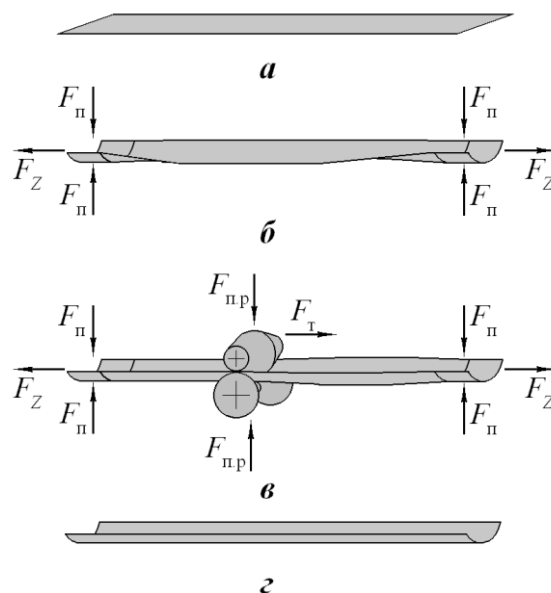


Рис. 4.1. Схема силовых воздействий на заготовку при профилировании

Технологический процесс изготовления профиля из заготовки (см. рис. 4.1,а) предусматривает проведение следующих операций: гибку конечных участков заготовки и их захват, приложение растягивающей нагрузки (см. рис. 4.1,б), создание необходимых усилий на профилирующие ролики и тяговых усилий для их перемещения (см. рис. 4.1,в), разгрузку и удаление готового профиля (см. рис. 4.1,г).

Таким образом, при расчете параметров технологического процесса должны быть определены: F_Z – сила растяжения заготовки, создающая постоянные растягивающие напряжения в заготовке; F_3 – сила, необходимая для деформирования конечных участков заготовки; F_n – сила прижима конечных участков заготовки; F_{np} – сила прижима профилирующих роликов; F_T – сила для перемещения профилирующих роликов.

Сила предварительного растяжения необходима для расчета силовой части установки и привода механизма растяжения. Должно быть обеспечено постоянство усилия растяжения заготовки, чтобы избежать возможных отклонений формы поперечного сечения профиля по ходу последовательного перемещения профилирующих роликов.

При изготовлении конкретного профиля сила предварительного натяжения задается в зависимости от размеров поперечного сечения заготовки и механических характеристик ее материала.

Величина растягивающей силы

$$F_Z = \sigma_Z HB,$$

где H и B – соответственно толщина и ширина заготовки.

Величина осевых растягивающих напряжений в заготовке для обеспечения стабильности технологического процесса и предотвращения ее неконтролируемого пластического растяжения принимается равной $\sigma_Z = 0,8...0,9\sigma_T$.

Для материала с упрочнением величина растягивающих напряжений может задаваться равной пределу текучести материала заготовки: $\sigma_Z = \sigma_T$. В этом случае вследствие упрочнения ее материала исключается возможность неконтролируемого пластического растяжения заготовки. Большая величина σ_Z может назначаться также с целью уменьшения упругого пружинения участков изгиба при деформировании.

Мощность механизма растяжения установки определяется в зависимости от величины растягивающей силы, соответствующей наибольшим размерам поперечного сечения заготовки и скорости перемещения подвижных захватов.

Величина изгибающего момента является основным расчетным параметром, используемым при расчетах процессов гнутья. Ее значение определяет величины сил, необходимых для формоизменения заготовки.

При всем многообразии форм гнутые профили состоят из различных сочетаний плоских и криволинейных участков. Для определения совокупных силовых воздействий на заготовку необходимо производить последовательно силовой и геометрический расчеты каждого криволинейного участка профиля.

Криволинейный участок, являющийся местом изгиба, характеризуется остаточным радиусом кривизны R_0 , углом загиба α_0 и углом между прямолинейными участками профиля β_0 . Чтобы обеспечить заданные

остаточные радиус R_0 и угол β_0 , следует производить изгиб заготовки на меньший радиус R_r и угол β_r с учетом упругого пружинения (рис. 4.2).

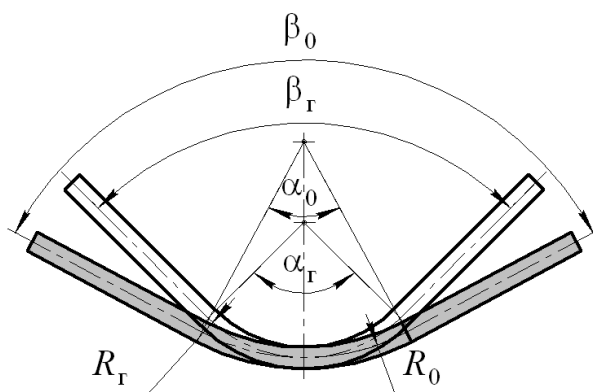


Рис. 4.2. Деформации изгибаемого участка заготовки

В соответствии со значениями R_r и β_r определяются размеры гибочной оснастки.

В разд. 2 на основе решения задачи упругопластического изгиба полосы с продольным растяжением получены формулы для расчета относительного изгибающего момента \tilde{M}_r в зависимости от относительной кривизны $\tilde{\varphi}_r$ при изгибе. При расчете относительной остаточной кривизны $\tilde{\varphi}_0$ следует учесть упругое пружинение. Относительное упругое пружинение $\Delta\tilde{\varphi}$, как указывалось ранее в разд. 2, согласно теореме об упругой разгрузке равно относительному изгибающему моменту,

$$\tilde{M}_r = \tilde{\varphi}_r - \tilde{\varphi}_0.$$

Для практических расчетов удобно определять величину изгибающего момента в зависимости от заданной остаточной кривизны.

Чтобы получить зависимость \tilde{M}_r от $\tilde{\varphi}_0$ должна быть решена система уравнений: уравнение, описывающее зависимость относительного изгибающего момента \tilde{M} от относительной кривизны при изгибе $\tilde{\varphi}$ и уравнение упругой разгрузки при заданной величине растягивающих напряжений (см. раздел 2).

Система уравнений может быть решена численным методом либо графически. В результате решения системы определяется относительный

изгибающий момент в зависимости от заданной относительной остаточной кривизны. При этом величина упругого относительного пружинения равна величине относительного изгибающего момента.

Для практических расчетов на рис. 4.3 представлены графики зависимости \tilde{M}_r от $\tilde{\varphi}_0$, построенные при решении системы уравнений для различных значений относительного коэффициента упрочнения $\tilde{\Pi}$, когда $\tilde{\sigma}_z = 0,9$ ($\lambda = 0,1$). Принятое значение $\tilde{\sigma}_z$ выбрано из условия обеспечения стабильности процесса профилирования.

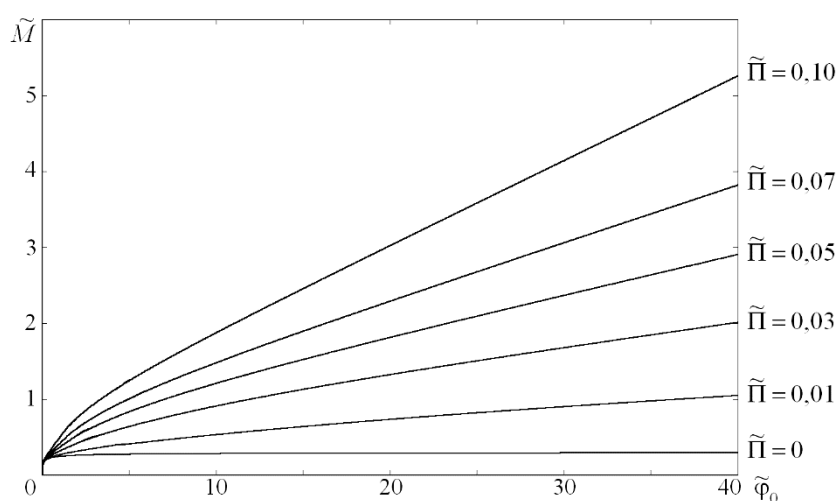


Рис. 4.3. Графики зависимости относительного изгибающего момента от относительной остаточной кривизны ($\tilde{\sigma}_z = 0,9$)

Графики позволяют определять в соответствии с заданными исходными данными основные параметры гибки. Вычисляя предварительно $\tilde{\varphi}_0 = R_y / R_0$, по графику определяется относительный изгибающий момент \tilde{M}_r , который одновременно характеризует величину относительного упругого пружинения. Аналогичным образом могут быть получены графики в случае аппроксимации диаграммы деформирования степенной функцией. Для некоторых значений $\tilde{\varphi}_0$ величина \tilde{M}_r приведена в табл. 2.1, 2.2.

Сила для деформирования концевых участков F_3 заготовки зависит от формы изготавливаемого профиля, его материала, определяется также, как для случая простой гибки без растяжения с учетом длины концевого участка.

Длина концевого участка заготовки из условия предотвращения недопустимых пластических поверхностных деформаций изготавливаемого профиля в местах захвата принимается равной $0,5 \dots 1,0$ ширины заготовки.

Величина изгибающего момента, необходимого для гибки концевых участков заготовки, определяется по формулам, приведенным в разд. 2, при $\tilde{\sigma}_z = 0$. При непрерывно-циклическом профилировании заготовки из рулона участок заготовки в подвижный захват поступает уже сформированным.

Сила, необходимая для прижима концевых участков заготовки и их удержания в захватах за счет сил трения, определяется по формуле

$$F_{\text{п}} = \frac{F_z}{2f},$$

где f – коэффициент трения между заготовкой и рабочими поверхностями захватов ($f = 0,15 \dots 0,2$).

Между заготовкой и захватами могут размещаться фрикционные накладки, которые обеспечивают значение $f = 0,4 \dots 0,5$.

Для захвата и удержания концевых участков заготовки могут использоваться самозажимные клиновые или эксцентриковые механизмы.

Надежная фиксация концевых участков заготовки обеспечивается также при отгибе выступающих частей концевых участков заготовки, а также при выполнении их с продольными ребрами жесткости.

Согласно расчетным значениям $F_{\text{п}}$ и F_3 определяются конструкция хватного устройства и параметры его привода. Расчеты показывают, что для тонкостенных заготовок обычно $F_{\text{п}} > F_3$.

4.2. Пружинение изгибаемого участка

Пружинение уменьшает кривизну изгибаемого участка заготовки после разгрузки (см. рис. 4.2). В соответствии с величиной упругого пружинения

рассчитываются формы рабочих поверхностей захватов и рабочих поверхностей профилирующих роликов.

При заданных остаточном радиусе кривизны R_0 и угле между прямолинейными участками β_0 изгибаемого участка профиля несложно определить радиус гибки R_r и угол загиба β_r с учетом упругого пружинения.

Так как

$$\tilde{M}_r = \tilde{\varphi}_r - \tilde{\varphi}_0 = \frac{R_y}{R_r} - \frac{R_y}{R_0},$$

то после преобразований радиус кривизны при изгибе

$$R_r = \frac{R_y}{\tilde{\varphi}_0 + \tilde{M}_r},$$

где $R_y = \frac{HE}{2\sigma_T}$ – наибольший радиус упругого изгиба.

Значение \tilde{M}_r выбирается по графикам (см. рис. 4.3) в зависимости от $\tilde{\varphi}_0$ или рассчитывается согласно решению системы уравнений, описывающих процесс изгиба и последующей разгрузки заготовки.

Угол β_0 связан с углом загиба α_0 зависимостью $\alpha_0 + \beta_0 = \pi$, поэтому угол пружинения, т. е. угол, на который уменьшается угол между полками после разгрузки, будет численно равен изменению угла загиба, но с противоположным знаком $\Delta\beta = -\Delta\alpha$. Поскольку длина участка изгиба после упругой разгрузки остается прежней, то относительное изменение угла загиба пропорционально относительному изменению кривизны

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0}.$$

Подставив значение $\frac{\Delta\varphi}{\theta} = \frac{M}{M_T}$, получим

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} = \frac{\tilde{M}_r}{\tilde{\varphi}_0}.$$

Учитывая значение $\Delta\alpha$ и α_0 ,

$$\frac{\beta_0 - \beta_r}{\pi - \beta_0} = \frac{\tilde{M}_r}{\tilde{\Phi}_0},$$

следовательно, угол гибки

$$\beta_r = \beta_0 \cdot \left(1 + \frac{\tilde{M}_r}{\tilde{\Phi}_0} \right) - \pi \cdot \frac{\tilde{M}_r}{\tilde{\Phi}_0}.$$

Приведенные расчетные зависимости достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов, которые получены при испытаниях образцов при упругопластическом изгибе с продольным растяжением, и использовались для расчетов технологической оснастки при экспериментальном исследовании технологии профилирования на экспериментальной профилирующей установке.

В результате последовательного расчета каждого криволинейного участка профиля определяется суммарное силовое воздействие на заготовку, а также формы рабочих поверхностей профилирующих роликов и концевых захватов.

4.3. Силы, действующие на профилирующие ролики

Начало контакта роликов с заготовкой происходит около подвижного захвата в районе концевых изгибных деформаций, возникающих в результате деформирования концевого участка заготовки в захватах и последующего приложения растягивающей нагрузки F_z . Плоскость, проходящая через оси роликов, перпендикулярна линии действия растягивающей нагрузки. При приложении усилий прижима $F_{пр}$ к профилирующим роликам осуществляется деформирование участка заготовки в соответствии с формой рабочих поверхностей роликов. Межцентровое расстояние роликов устанавливается с учетом толщины заготовки и выбранного радиального зазора. Поскольку в процессе продольного перемещения роликов центры тяжести поперечных сечений заготовки смещаются при ее последовательном деформировании, то должна быть обеспечена свобода их совместного вертикального перемещения.

При этом блок деформирующих роликов перемещается по вертикальным направляющим каретки и самоустанавливается в нужное положение относительно линии действия растягивающей нагрузки, которая проходит через центры тяжести поперечных сечений заготовки в захватах.

В результате перемещения роликов под действием тягового усилия F_T осуществляется последовательное формирование профиля. При этом на ролики будут действовать радиальные силы, расположенные под некоторым углом к вертикальной оси. Величина тягового усилия равна, без учета сил трения, горизонтальным составляющим радиальных сил. Величина сил, действующих на ролики, зависит от размеров и формы поперечного сечения изготавливаемого профиля, материала заготовки.

Разнообразные формы поперечного сечения профиля могут быть представлены в виде комбинаций единичных плоских или криволинейных элементов.

Для типовых профилей, уголков, швеллеров, С-образных, корытного типа разработаны достаточно обоснованные теоретически и экспериментально методы расчета силовых воздействий на валки профилегибочных станков [17, 19]. Приведенные в этих работах расчетные зависимости могут быть использованы при расчете усилий, действующих на деформирующие ролики, при соответствующей корректировке величин изгибающих моментов, значения которых в случае формообразования профилей с продольным растяжением определяются согласно разд. 2. Поскольку величины изгибающих моментов при этом существенно меньше изгибающих моментов при простом изгибе, то соответствующим образом изменяются величины сил, действующих на ролики.

Для любых других форм профилей силы, действующие на профилирующие ролики, могут быть определены аналогично при последовательном расчете криволинейных участков поперечного сечения профиля.

Сила для перемещения профилирующих роликов F_T должна преодолевать сопротивление, возникающее в результате формоизменения

заготовки, силы трения качения роликов по заготовке, силы трения в опорах роликов, силы трения между кареткой и направляющими станины установки.

Без учета потерь на трение сила для перемещения профилирующих роликов F_p определяется из условия, что работа, совершаемая силой для перемещения роликов на 1 м, равна работе упругопластического изгиба заготовки такой же длины.

Работа силы F_p при перемещении роликов на 1 м, когда $L = 1$ м,

$$A_{\Sigma} = F_p \cdot 1 = 2A_y \tilde{A}_{\Sigma\text{ри}} \cdot b \cdot 1,$$

следовательно, $F_p = 2A_y \tilde{A}_{\Sigma\text{ри}} b$, где b – суммарная длина участков изгиба в поперечном сечении профиля при одинаковых радиусах кривизны участков изгиба.

4.4. Работа и мощность при профилировании заготовки

Величина работы, необходимой для профилирования заготовки, определяется в соответствии с данными, приведенными в подразд. 2.4.

Рассматривается заготовка длиной L , шириной B , длина концевого захвата l_3 , суммарная длина участков изгиба в поперечном сечении b .

Работа для формоизменения заготовки без приложения растягивающей нагрузки определяется согласно формуле

$$A_{\Sigma\text{к}} = 2A_y \tilde{A}_{\Sigma} bL.$$

Работа для формоизменения заготовки при действии растягивающей нагрузки затрачивается на деформирование ее концевых участков в захватах $A_{\text{зк}}$, создание растягивающей нагрузки $A_{\text{рк}}$, последующее формоизменение заготовки после приложения растягивающей нагрузки:

$$A_{\Sigma\text{рк}} = A_{\text{зк}} + A_{\text{рк}} + A_{\Sigma\text{рик}}.$$

Работа для формоизменения заготовки в местах захвата

$$A_{\text{зк}} = 2A_y \tilde{A}_{\Sigma} b l_3,$$

где $l_3 = 0,5 \dots 1,0 \cdot B$ – длина участков захвата заготовки.

Работа для деформирования заготовки при действии растягивающей нагрузки

$$A_{\Sigma \text{рик}} = 2 A_{\text{уи}} \tilde{A}_{\Sigma \text{ри}} b(L - l_3).$$

Работа для продольного растяжения заготовки

$$A_{\text{рк}} = A_{\text{уи}} \tilde{A}_{\text{р}} (L - l_3).$$

Оценка эффективности технологического процесса при различных вариантах профилирования полосы может быть проведена в зависимости от соотношения $A_{\Sigma \text{рк}} / A_{\Sigma \text{к}}$.

При формоизменении заготовки на профилирующей установке соотношение работ при различных вариантах профилирования больше на 10...20 %, чем указано в подразд. 2.4, в связи с дополнительными энергозатратами на деформирование концевых участков и увеличением работы на растяжение прямолинейных неизгибаемых участков профиля.

Теоретическая мощность, необходимая для перемещения профилирующих роликов со скоростью V ,

$$P_{\text{р}} = F_{\text{р}} V.$$

Полная мощность, необходимая для изгиба профиля, с учетом потерь, связанных с силами трения между заготовкой и профилирующими роликами, между кареткой и направляющими,

$$P = \frac{P_{\text{р}}}{\eta},$$

где $\eta \approx 0,5$ – КПД, показывающий соотношение между величинами теоретической и действительной мощностей.

4.5. Алгоритм расчета параметров технологического процесса изготовления профилей гибкой с продольным растяжением

Проведенный анализ силовых воздействий на заготовку и ее соответствующее деформирование позволяет определить необходимые данные для настройки механизмов профилирующей установки и проектирование технологической оснастки.

Исходными данными для расчета технологических параметров профилирования являются форма сечения профиля и его материал.

Расчет технологических параметров профилирования производится в следующей последовательности.

1. Согласно заданной форме профиля рассчитываются геометрические характеристики прямолинейных и криволинейных изгибаемых участков профиля, а также необходимая ширина заготовки.

2. Определяются механические характеристики материала. Выбирается метод аппроксимации диаграммы растяжения материала, и рассчитываются соответствующие параметры упрочнения согласно данным раздела 2.

3. Определяются сила предварительного растяжения заготовки F_Z и сила прижима ее концевых участков F_{II} . Эти данные используются для настройки соответствующих механизмов профилирующей установки. Номограмма для определения силы растяжения и силы прижима концевых захватов представлена на рис. 4.4.

4. Определяются вспомогательные расчетные данные: радиус кривизны наибольшего упругого изгиба, относительная остаточная кривизна, наибольший момент упругого изгиба.

5. В зависимости от полученного значения относительной остаточной кривизны и выбранного метода аппроксимации диаграммы растяжения материала согласно соответствующим уравнениям $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$, приведенным в разд. 2, и уравнению упругой разгрузки определяются относительные изгибающие моменты для случая простого изгиба полосы и изгиба полосы с растяжением, а также их количественное значение.

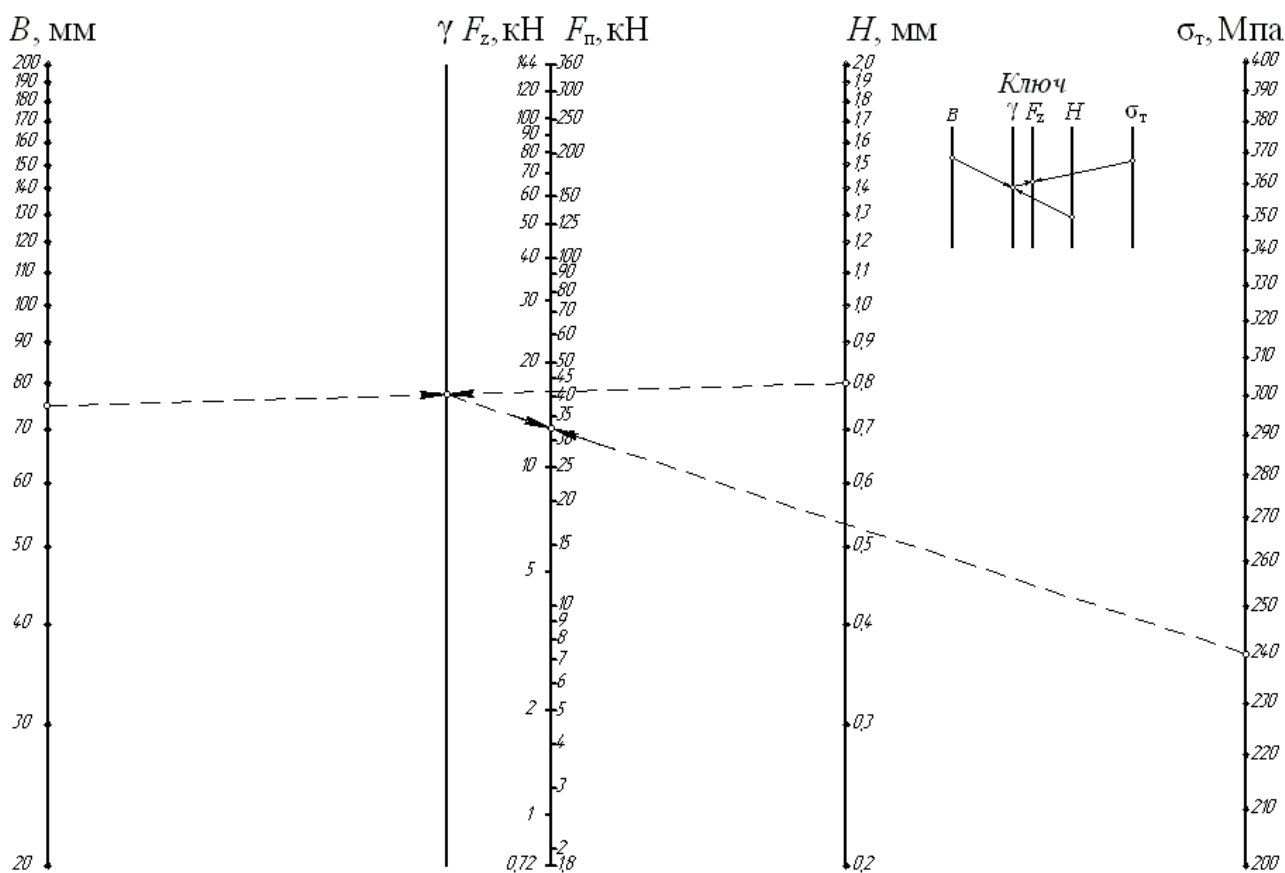


Рис. 4.4. Номограмма для определения силы растяжения и силы прижима
концевых захватов

6. При известных значениях \tilde{M}_r и $\tilde{\varphi}_0$ рассчитываются радиусы кривизны криволинейных участков и углы гибки между прямолинейными участками профиля. Алгоритм расчета параметров технологического процесса изготовления профилей гибкой с продольным растяжением представлен на рис. 4.5 [59].

7. В соответствии с полученными расчетными данными выполняются контуры форм сечений калибров для проектирования рабочих поверхностей концевых захватов и профилирующих роликов. В случае, если в профиле имеются криволинейные участки с различными геометрическими характеристиками, производится соответствующий параллельный расчет.



Рис. 4.5. Алгоритм расчета параметров технологического процесса изготовления профилей гибкой с продольным растяжением

8. Вычисляется работа, необходимая для формоизменения заготовки, сила для перемещения профилирующих роликов, теоретическая мощность механизма передвижения и мощность механизма для зажима концевых участков заготовки.

9. Вычисляется необходимая мощность механизмов передвижения и зажима концевых участков заготовки.

РАЗДЕЛ 5

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют дать рекомендации по разработке технологии и оборудования для изготовления судовых тонкостенных профилей повышенной точности и жесткости.

5.1. Особенности формообразования тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением

Особенности формообразования тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением установлены на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Формообразование профилей гибкой с продольным растяжением происходит при локальном силовом воздействии. Вначале производится местный изгиб концевых участков заготовки в зажимах, выполненных в соответствии с формой изготавливаемого профиля. После приложения растягивающей нагрузки, когда осевые растягивающие напряжения близки к пределу текучести, концевые изгибные деформации распространяются на части длины заготовки с обоих концов. При значительной длине заготовки ее средняя часть остается плоской. Центры тяжести изогнутых и неизогнутых поперечных сечений заготовки располагаются на линии, соединяющей центры тяжести поперечных сечений заготовки в зажимах. При небольшой длине заготовки концевые изгибные деформации от растяжения смыкаются и возможно получение волнистого профиля, если осевые продольные напряжения больше предела текучести.

Изготовление профилей с малыми радиусами мест изгиба и сложной формой поперечного сечения осуществляется при локальном воздействии профилирующих роликов. В результате перемещения роликов от одного

концевого участка заготовки к другому происходит ее последовательное формообразование. Необходимая форма профиля в каждом поперечном сечении заготовки создается в момент прохождения формирующих роликов. Форма подгибаемых элементов профиля соответствует геометрии рабочих поверхностей деформирующих роликов. В зоне разгрузки, лежащей позади перемещающихся роликов, процесс формообразования профиля сопровождается упругим пружинением, поэтому форму рабочих поверхностей роликов следует рассчитывать согласно данным разд. 4.

В результате приложения растягивающей нагрузки к заготовке снижается необходимый для ее профилирования изгибающий момент, упругое пружинение, а также силы, действующие на заготовку. Формоизменение заготовки обусловлено преимущественно, как показано при теоретическом анализе, тангенциальными пластическими деформациями сжатия, и в местах изгиба не происходит существенного утонения материала.

Следует отметить, что после предварительного деформирования концевых участков заготовки и последующего приложения растягивающей нагрузки на участке между концевыми захватами и профилирующими роликами возникает продольный изгибающий момент, стремящийся придать заготовке необходимую форму. Формоизменение заготовки может производиться за один проход деформирующих роликов без потери устойчивости элементов профиля и возникновения их волнистости.

Продольные остаточные деформации в местах изгиба, возникающие от тангенциальных изгибных пластических деформаций, компенсируются небольшой вытяжкой заготовки, поэтому искривления и продольного скручивания изготовленного профиля не возникает.

Величина продольного искривления профиля может регулироваться. Одновременно с процессом профилирования профилю может быть придана заданная продольная кривизна в нужном направлении.

При профилировании усилие растяжения заготовки ограничивается напряжениями, меньшими предела текучести. Поэтому площади захвата

концевых участков заготовки задаются таким образом, чтобы недопустимые повреждения поверхности изготовленных профилей не возникали. Кроме того, для предотвращения таких повреждений на рабочие поверхности захватов могут быть нанесены специальные фрикционные покрытия или использованы упругие накладки. Это обеспечивает возможность изготовления профиля любой длины в непрерывно-циклическом режиме.

Получение тонкостенных профилей повышенной жесткости производится при предварительном формировании гофров на плоской заготовке в местах изгиба и расположения продольных ребер жесткости.

Рассмотренные особенности показывают, что создание растягивающей нагрузки обеспечивает оптимальные условия формообразования профиля. При её действии полки профиля приобретают прямолинейную форму. Продольные пластические деформации от поперечного изгиба заготовки компенсируются в результате ее некоторого пластического растяжения. Этим предупреждается появление продольной изогнутости, а также продольной скрученности даже при формировании профилей с несимметричным поперечным сечением. В случае необходимости, повышенная точность профилей может быть достигнута после деформирования роликами последующим упругопластическим растяжением изготовленного профиля, как при правке растяжением. При использовании предложенного способа в большинстве случаев не требуется предварительная правка заготовки, поскольку различные отклонения ее формы, как показано экспериментально, устраняются в процессе изготовления профиля.

5.2. Технологические схемы и способы формообразования профилей

С учетом особенностей технологии профилирования разработаны новые технологические схемы формообразования гнутых профилей для судовых конструкций [63–71]. Технологические схемы разработаны и отобраны на основе анализа структурных признаков, которые характеризуют различные способы изготовления гнутых профилей (подраздел 1.2), а также по результатам исследований на экспериментальной профилирующей установке.

Основные предложенные технологические схемы профилирования с продольным растяжением показаны на рис. 5.1–5.7, 5.10.

Процесс поштучного изготовления профилей характеризуется относительно невысокой производительностью, рационально изготовление профилей в автоматизированном непрерывно-циклическом режиме при подаче заготовки из рулона (рис. 5.1). При таком способе профилирования заготовка 4 подается из рулона 6, зажимается в захватах неподвижной 5 и тянущей 1 зажимных головок. Тянущей головкой в заготовке создаются постоянные напряжения растяжения. В результате перемещения роликов 2 вдоль оси заготовки осуществляется формирование профиля. Затем после разжима захватов готовый профиль с помощью захватов 3 выталкивается. При повторении рабочего цикла изготавливается последующий участок профиля. Профиль необходимой длины отрезается.

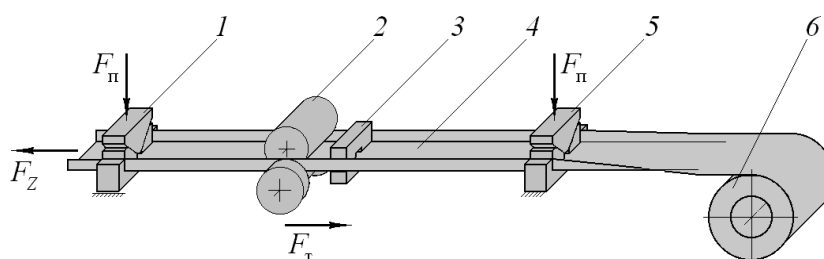


Рис. 5.1. Способ изготовления профилей

Для изготовления профилей повышенной жесткости и с относительно малыми радиусами кривизны в местах изгиба 3...5, на плоскую заготовку следует предварительно наносить продольные гофры жесткости [63, 69]. Предварительное гофрирование заготовки может осуществляться роликами, установленными перед захватами (рис. 5.2). Рассмотренный способ позволяет изготавливать высокоточные профили повышенной жесткости с различной формой поперечного сечения.

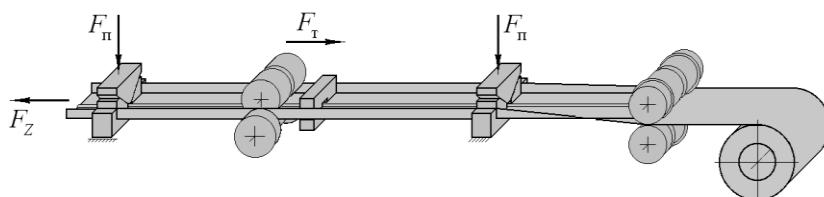


Рис. 5.2. Способ изготовления профилей повышенной жесткости

Возможно изготовление профилей с плоскими концевыми участками или с концевыми участками, на которых нанесены поперечные ребра жесткости. Кромки концевых захватов могут быть выполнены с отбортовкой (рис. 5.3). При таком исполнении концевых участков осуществляется более надежный захват заготовки. Кроме того, отбортовка может использоваться для соединения профилей при сборке металлоконструкций.

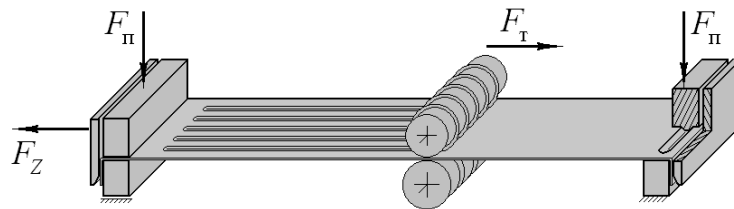


Рис. 5.3. Способ изготовления профилей с плоскими концевыми участками

Технологические схемы для получения профилей с периодически повторяющимися гофрами показаны на рис. 5.4. Такие профили могут быть получены при использовании профилирующих роликов соответствующей формы (рис. 5.4,а) или, если в процессе профилирования изменять расстояние между профилирующими роликами (рис. 5.4,б).

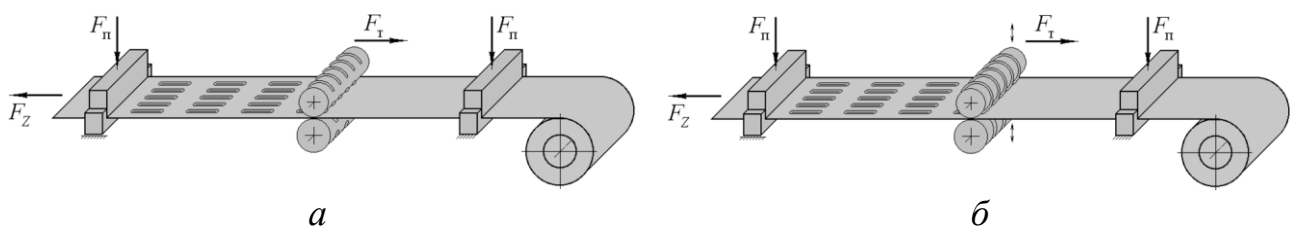


Рис. 5.4. Способ изготовления профилей с периодически повторяющимися гофрами

Рассматриваемая технология позволяет изготавливать также профили с продольными криволинейными гофрами [64]. Сущность способа показана на рис. 5.5,а. Вначале производится местный изгиб заготовки в захватах, затем приложение растягивающей нагрузки и последовательное гофрирование заготовки профилирующими роликами с одновременным их синхронным перемещением в поперечном направлении. Криволинейные гофры могут быть

нанесены также при колебательном повороте блока профилирующих роликов (рис. 5.5,б). Формы рабочих поверхностей профилирующих роликов выбираются в соответствии с формой гофров. Вследствие действия растягивающей нагрузки обеспечивается достаточная точность формы изготавливаемых профилей. Закономерность поперечного перемещения роликов или же их поворота определяется в зависимости от заданной конфигурации гофров и их расположения.

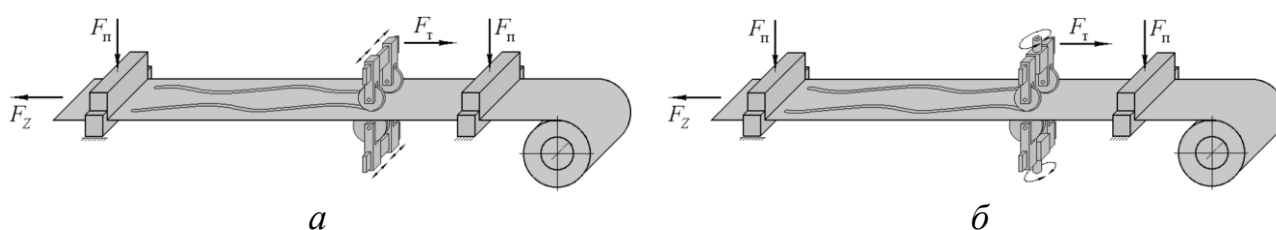


Рис. 5.5. Способ изготовления профилей с продольными криволинейными гофрами

Преимуществом рассматриваемой технологии является также возможность изготовления гнутых профилей со знакопеременной поперечной кривизной (рис. 5.6) [65]. При профилировании концевые участки заготовки деформируются в зависимости от величины заданной поперечной кривизны и ее направления. Блок деформирующих роликов располагается в районе одного из захватов. Соответствующие пары деформирующих роликов, из которых составляется блок, устанавливаются в вертикальном положении в зависимости от заданной формы профиля. При перемещении блока к противоположному захвату каждая пара деформирующих роликов одновременно смещается соответствующим образом в вертикальном направлении для формообразования необходимой поперечной кривизны заготовки по ее длине. Расположение соответствующих пар роликов в каждом поперечном сечении может быть определено расчетным путем. Закономерность вертикального перемещения деформирующих роликов определяется в зависимости от необходимой конфигурации изготавливаемого профиля. Величина силы растяжения выбирается из условия, чтобы напряжения растяжения не превышали предела

текучести материала заготовки. При такой величине силы растяжения обеспечивается достаточная точность формы профиля и при разгрузке она существенно не изменяется. В случае необходимости, по результатам первоначальной гибки осуществляется корректировка величины вертикального перемещения профилирующих роликов по длине изготавливаемого профиля.

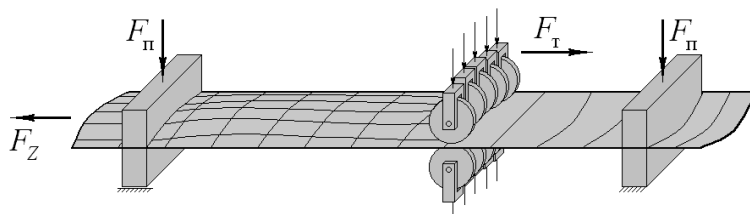


Рис. 5.6. Способ изготовления профилей со сложной кривизной

Предварительное приложение к плоской заготовке растягивающей нагрузки позволяет изготавливать высокоточные рифленые профили [66]. На рис. 5.7 показан процесс изготовления рифленых профилей зажимом конечных участков в захватах, приложением растягивающей силы и последовательным деформированием заготовки роликами при их продольном перемещении.

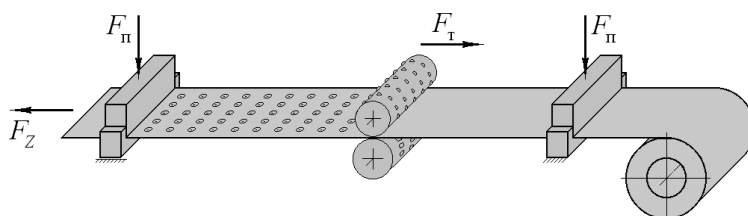


Рис. 5.7. Способ изготовления рифленых профилей

В этом случае на одном из роликов выполнены сферические выступы, а на другом – соответствующие впадины. В зависимости от расположения выступов на заготовке могут быть нанесены рифли с параллельным или шахматным расположением. Для обеспечения стабильности процесса рифления выступы рационально располагать по дуге окружности (рис. 5.8). При этом высота дуги окружности должна быть больше осевого шага сферических выступов $a \geq 1,1P$, чтобы обеспечить непрерывность зацепления роликов, а также повысить продольную жесткость изготавливаемого профиля.

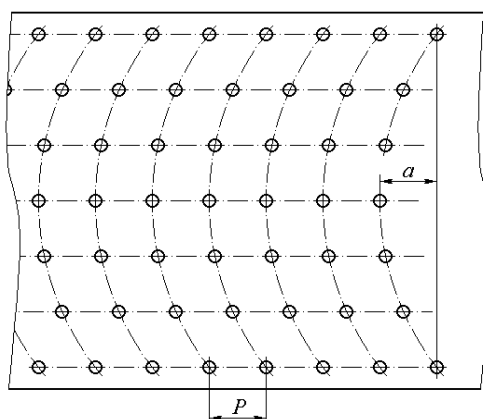


Рис. 5.8. Схема расположения выступов на рифленном профиле

В качестве выступов могут применяться стальные закаленные шарики, установленные в ролике с натягом. Размеры сферических лунок на парном ролике выполняются с учетом толщины заготовки (рис. 5.9).

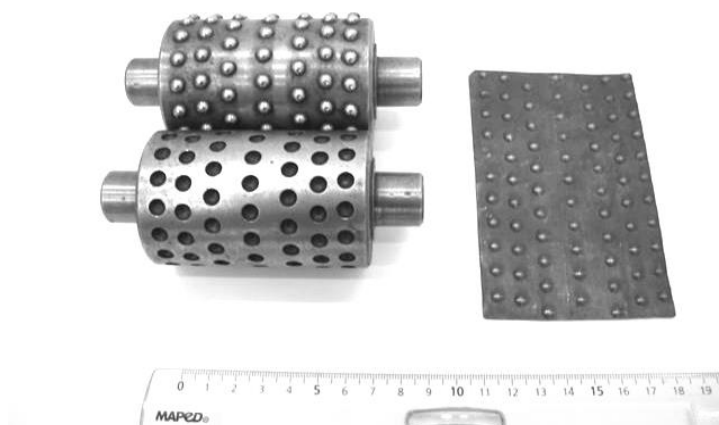


Рис. 5.9. Профилирующие ролики для изготовления рифленных профилей

Во время последовательного изгиба участка заготовки в плоскости, перпендикулярной ее продольной оси, можно одновременно осуществлять продольную гибку деформированного участка [67]. При этом в зоне деформирования возникает изгиб во взаимно перпендикулярных плоскостях. Таким образом могут изготавливаться профили с различной продольной кривизной (рис. 5.10) на специальной растяжной машине [70].

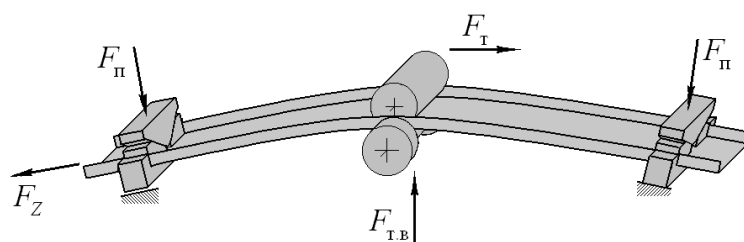


Рис. 5.10. Способ изготовления профилей с продольной кривизной

Предварительное приложение к плоской заготовке растягивающей нагрузки позволяет изготавливать высокоточные перфорированные профили [68]. На рис. 5.11 показан процесс изготовления перфорированных профилей зажимом концевых участков в захватах, приложением растягивающей силы и последовательным деформированием заготовки роликами при их продольном перемещении. В этом случае на одном из роликов выполнены выступы с режущими кромками, а на другом – соответствующие впадины.

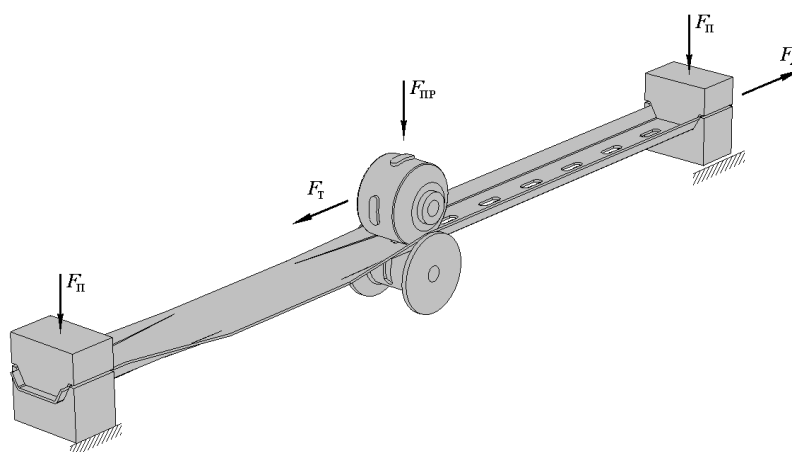


Рис. 5.11. Способ изготовления перфорированных профилей

При изготовлении судовых гнутых профилей из малопластичных материалов применим способ изготовления профилей с нагревом токами высокой частоты (рис. 5.12) [71]. Вследствие нагрева участков заготовки и повышения их пластичности необходимая сила растяжения уменьшается. Температуру нагрева выбирают такой, чтобы снизить предел текучести и повысить пластичность материала. Например, для стальных заготовок температура нагрева 700...800°C.

Согласно предложенному способу производится местный изгиб заготовки в захватах и приложение силы растяжения, последовательное деформирование заготовки роликами при их продольном перемещении с нагревом индуктором токов высокой частоты участка заготовки перед профилирующими роликами (рис. 5.12).

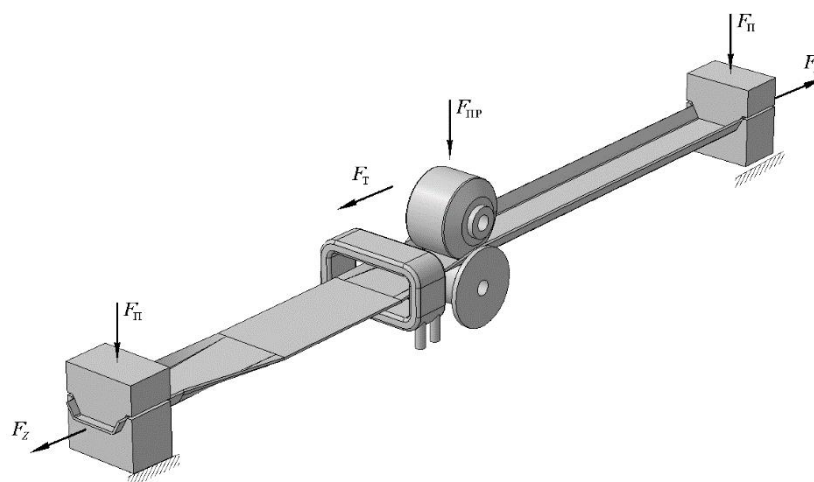


Рис. 5.12. Способ изготовления профилей с нагревом заготовки токами высокой частоты

Предложенный способ применим для производства высокоточных гнутых профилей из малопластичных материалов. Изготовление таких профилей другими известными способами без применения последующей правки невозможно.

При изготовлении судовых гнутых профилей со сложной конфигурацией применимы различные комбинации рассмотренных технологических схем. Новые способы профилирования могут быть получены при более детальном анализе структурных признаков технологии изготовления гнутых профилей.

5.3. Технические требования к установке для изготовления тонкостенных профилей

Технологический процесс профилирования разрабатывается в зависимости от конфигурации изготавливаемого профиля и его габаритных размеров.

В общем случае, согласно рассмотренным технологическим схемам, технологический процесс предусматривает проведение таких операций:

- подача заготовки;
- деформирование и захват концевых участков заготовки;
- растяжение заготовки;
- профилирование;
- удаление изготовленного профиля или разделение его на мерные части.

Конструкция профилирующей установки [69] должна обеспечивать осуществление указанных операций для получения профилей с допускаемыми предельными отклонениями формы и размеров.

Основные технические требования к промышленной установке с учетом опыта эксплуатации экспериментальной установки могут быть сформулированы следующим образом.

Заготовка должна быть точно ориентирована относительно продольной оси установки на протяжении всего цикла профилирования. Это требование определяет необходимость соответствующего взаимного расположения захватов и правильности траектории продольного перемещения профилирующих роликов.

Должно быть обеспечено деформирование концевых участков заготовки в соответствии с формой изготавливаемого профиля и их надежный захват.

Для предотвращения недопустимых отклонений формы поперечного сечения по длине изготавливаемого профиля необходимо обеспечить постоянство растягивающей нагрузки на участке между подвижной зажимной головкой и профилирующими роликами.

Учитывая значительную величину осевой растягивающей нагрузки, конструктивная компоновка силовой части установки должна быть выполнена таким образом, чтобы действующие силы располагались в одной плоскости и не создавали недопустимых изгибных деформаций элементов силовой части, влияющих на траекторию движения профилирующих роликов.

Следует обеспечить синхронность сближения профилирующих роликов в момент деформирования заготовки около концевого захвата и их свободу вертикального перемещения, а также перпендикулярность осей профилирующих роликов относительно продольной оси установки.

Рабочие движения механизмов установки для продольной подачи заготовки, деформирования и зажима концевых участков, профилирования должны осуществляться, по возможности, в автоматическом режиме.

Для получения профилей повышенной жесткости необходимо устанавливать перед неподвижным захватом ролики для предварительного нанесения на заготовку продольных гофров и зажимное устройство для ее протягивания.

В случае изготовления профилей с продольной кривизной концевые захваты должны иметь шарниры, а каретка – механизм вертикального перемещения профилирующих роликов.

Для получения профилей со сложной кривизной установка должна быть снабжена механизмами для продольного и вертикального перемещений профилирующих роликов, входящих в состав деформирующего блока [70].

Профилировочная установка может встраиваться в автоматическую линию по производству судовых тонкостенных конструкций. Следует предусмотреть возможность быстрой переналадки установки на выпуск профилей другой конфигурации.

Кроме рассмотренных технических требований, обеспечивающих технологию изготовления профилей, установка должна удовлетворять существующим требованиям безопасности эксплуатации, эргономическим и эстетическим требованиям, требованиям к надежности и долговечности.

5.4. Профилирующая установка

В соответствии с изложенными техническими требованиями сконструирована и изготовлена установка для изготовления тонкостенных профилей с шириной заготовки до 200 мм [69]. Общий вид и конструктивная схема профилирующей установки представлены на рис. 5.13, 5.14.

Разработанная профилирующая установка, а также экспериментальная профилирующая установка могут использоваться в качестве прототипов при проектировании профилирующих установок с различной шириной и толщиной заготовок.

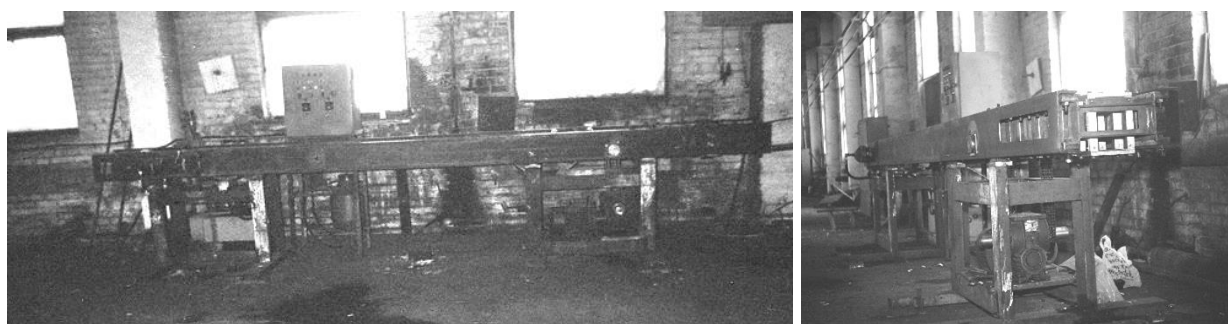


Рис. 5.13. Общий вид профилирующей установки

Техническая характеристика установки представлена ниже:

Толщина обрабатываемого материала	0,2...1,5 мм
Максимальная ширина заготовки	200 мм
Максимальная длина профиля	не ограничивается
Минимальная длина профиля	3000 мм
Ход каретки	3000 мм
Сила растяжения, наибольшая,	60 кН
Производительность линии	до 10 м/мин
Насосная станция СВ-М5А-40:	
– тип насоса	Г 12-32АМ
– подача масла	12 л/мин
– тип электродвигателя	4А100L6
– мощность	2,2 кВт
– рабочее давление гидростанции	6,3 МПа

Привод передвижения:

– тип электродвигателя	4А80В4У3
– частота вращения	1430 мин ⁻¹
– мощность	1,5 кВт
– тип редуктора	РЧУ-100

Масса установки не более 2 т

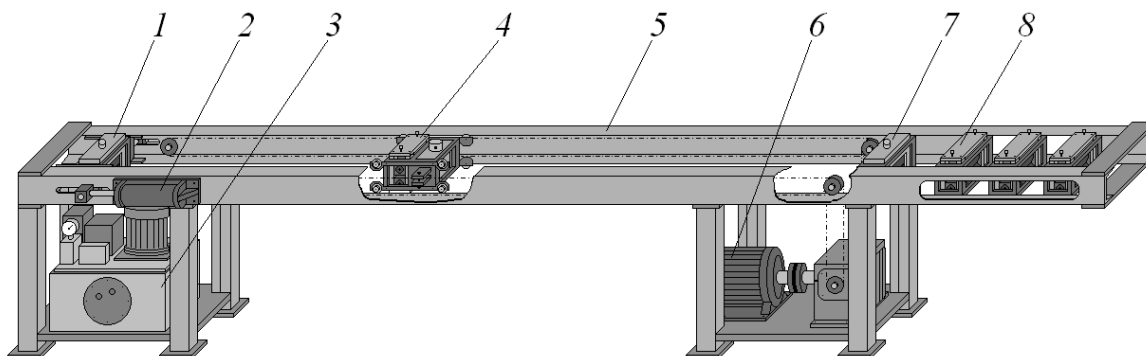


Рис. 5.14. Конструктивная схема профилирующей установки

- 1 – головка зажимная тянущая; 2 – гидроцилиндры; 3 – гидростанция;
4 – каретка; 5 – станина; 6 – механизм передвижения каретки;
7 – головка зажимная неподвижная; 8 – обойма

Основные технические характеристики установки (сила растяжения заготовки, сила для деформирования и захвата концевых участков заготовки, силы для перемещения профилирующих роликов) определены на основе методики расчета параметров технологического процесса изготовления профилей гибкой с продольным растяжением (раздел 4). Полученные данные явились исходными для проектирования силовой части установки, ее механизмов, технологической оснастки в соответствии с принятыми методами расчета деталей машин по основным критериям работоспособности.

Станина 5 состоит из продольных балок с опорами, внутри которых расположен привод перемещения каретки 6 и гидростанция 3.

В качестве продольных балок использованы швеллеры, воспринимающие нагрузки в процессе профилирования заготовки. Базовая продольная

геометрическая ось установки располагается между горизонтальными осями швеллеров.

В рабочей зоне между продольными балками располагаются неподвижная и тянущая зажимные головки (рис. 5.15). В головках имеются гнезда, в которых размещаются обоймы со сменными захватами (рис. 5.16) для деформирования и зажима концевых участков заготовки. Рабочие поверхности захватов должны соответствовать форме изготавливаемого профиля. Неподвижная зажимная головка крепится болтами и штифтами к продольным балкам.



Рис. 5.15. Неподвижная и тянущая зажимные головки



Рис. 5.16. Обойма со сменными захватами

Подвижная зажимная головка перемещается по направляющим, прикрепленным к продольным балкам. Сила для растяжения заготовки создается при перемещении тянущей зажимной головки с помощью гидроцилиндров

двухстороннего действия (рис. 5.17). Учитывая, что для растяжения заготовки необходимы значительные усилия, механизм растяжения выполнен гидравлическим, поскольку он обеспечивает постоянство действующей нагрузки и возможность ее регулирования в широких пределах.



Рис. 5.17. Гидроцилиндр

Насосная станция обеспечивает питание гидропривода профилировочной установки (рис. 5.18). В состав насосной установки входят: пластинчатый насос с электродвигателем, бак, манометр, золотник включения манометра, обратный клапан, предохранительный клапан с регулировочным винтом.

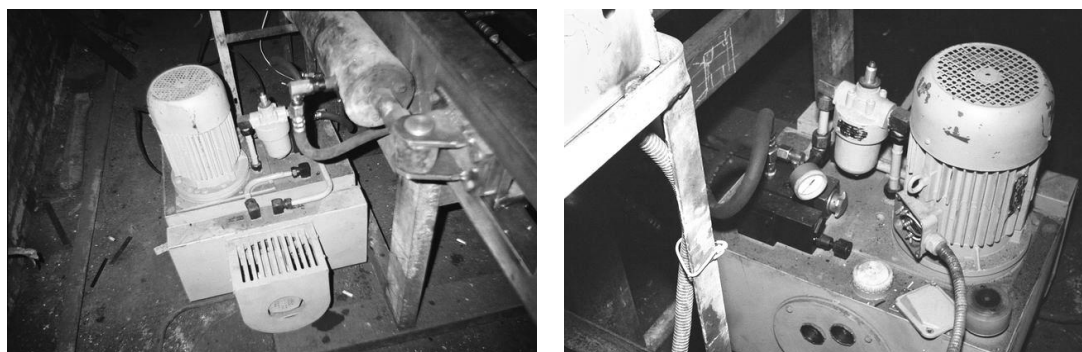


Рис. 5.18. Насосная станция

При создании силы, растягивающей заготовку, продольные балки подвергаются действию сжимающих нагрузок. Выполненная конструктивная компоновка силовой части обеспечивает то, что возникающие силы сжатия не вызывают изгиба швеллеров, что повлияло бы на траекторию движения каретки.

Центральность приложения растягивающих и сжимающих сил создается при установке захватов таким образом, чтобы продольная ось профиля совпадала с базовой осью установки.

На консольной части продольных балок имеются гнезда (рис. 5.19) для размещения технологической оснастки, осуществляющей позиционирование заготовки, ее правку, нанесение гофров, предварительное деформирование (рис. 5.20).



Рис. 5.19. Гнезда для размещения технологической оснастки

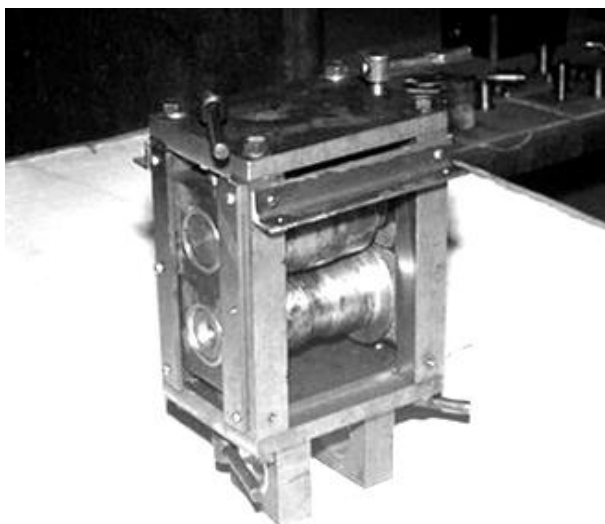


Рис. 5.20. Обойма со сменными профилирующими роликами

Каретка (рис. 5.21) предназначена для установки сменной обоймы с профилирующими роликами и их перемещения для формоизменения заготовки. Обойма устанавливается в направляющих пазах корпуса каретки и может

свободно перемещаться в вертикальном направлении, отслеживая положение продольной оси профиля.



Рис. 5.21. Каретка

Для обеспечения перпендикулярности осей профилирующих роликов относительно продольной оси профиля на боковых участках корпуса каретки имеются регулировочные винты. На корпусе каретки закреплены ходовые ролики (рис. 5.22), на которых каретка перемещается по боковым полкам продольных балок с помощью тяговой цепи, прикрепленной к проушинам.



Рис. 5.22. Ходовые ролики

Каретка 4 с профилирующими роликами и зажимным механизмом осуществляет челночное перемещение вдоль балок, боковые полки которых служат направляющими. Механизм передвижения каретки включает в себя

привод, состоящий из электродвигателя, червячного редуктора (рис. 5.23) и двухступенчатой цепной передачи (рис. 5.24).

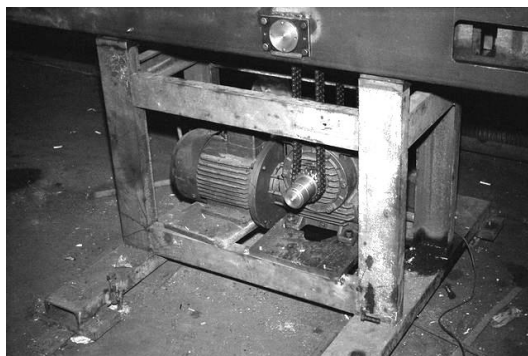


Рис. 5.23. Электродвигатель с червячным редуктором

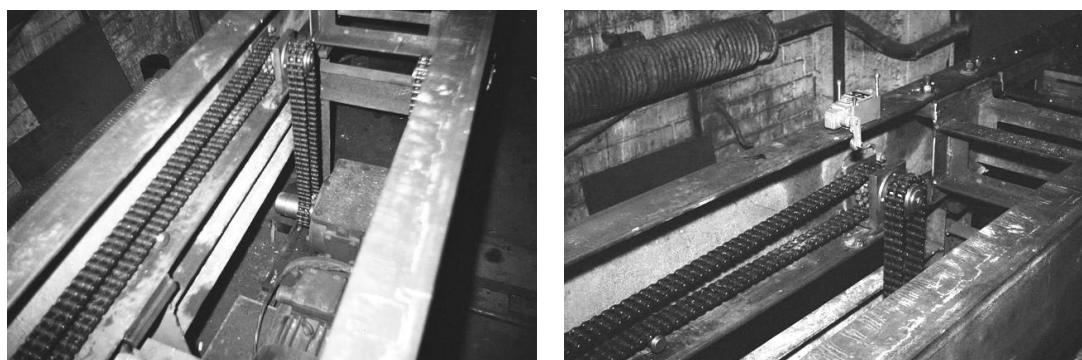


Рис. 5.24. Привод механизма передвижения каретки

Необходимое натяжение цепей создается с помощью натяжных устройств (рис. 5.25).

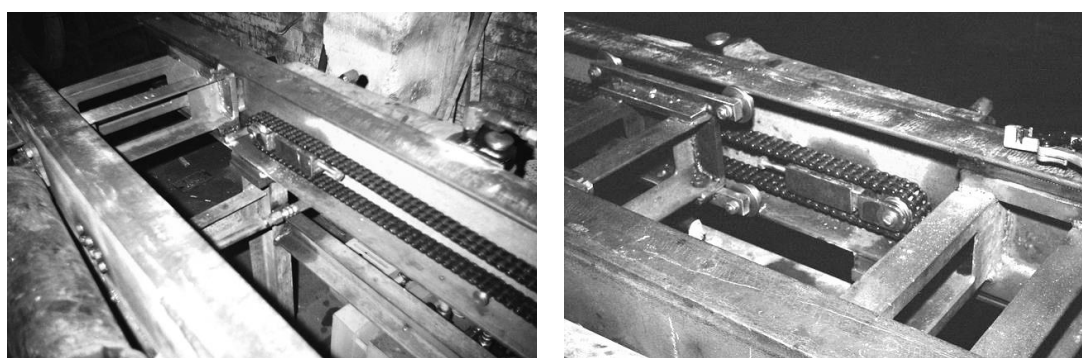


Рис. 5.25. Натяжное устройство

После подачи и зажима заготовки в неподвижной и тянущей зажимных головках гидроцилиндрами 2 создается постоянная растягивающая нагрузка.

Величина растягивающей нагрузки определяется в зависимости от размеров поперечного сечения заготовки, механических характеристик ее материала и контролируется по показаниям манометра. Затем при перемещении каретки от тянущей головки осуществляется формирование профиля. Необходимое положение захватов и профилирующих роликов устанавливается с помощью шаблонов или по результатам пробной гибки. При обратном ходе каретки и разжатых захватах готовый профиль с помощью зажимного механизма выталкивается, а затем подается последующий участок заготовки.

На выходном конце установки может быть установлено абразивное отрезное устройство. Отрезка профиля необходимой длины осуществляется по сигналу концевого выключателя, установленного в соответствующем положении.

Переход к изготовлению профиля другой конфигурации сводится к замене обойм с соответствующим профилирующим инструментом.

При необходимости изготовления большой партии однотипных профилей установка позволяет производить их изготовление в автоматизированном режиме.

Электрооборудование установки смонтировано в пульте управления (рис. 5.26). На панели пульта управления имеются кнопки для включения и отключения питания цепи управления, для аварийного отключения питания, для включения и отключения питания гидростанции, для включения привода передвижения каретки влево–вправо, а также арматура, сигнализирующая о включении цепи управления, гидростанции, привода передвижения каретки. На станине установки закреплены конечные выключатели ограничения хода гидроцилиндров и каретки (рис. 5.27).

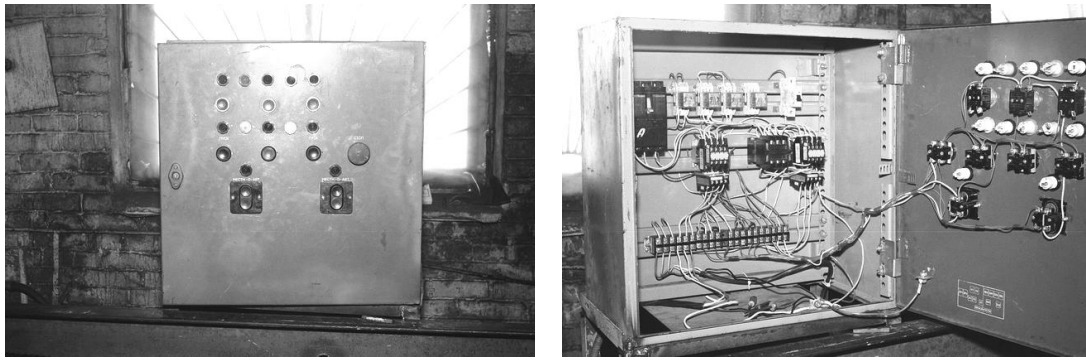


Рис. 5.26. Пульт управления

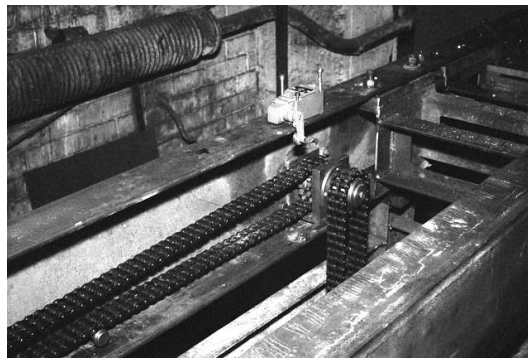


Рис. 5.27. Конечный выключатель для ограничения хода каретки

На судостроительном предприятии профилировочная установка может входить в состав поточной линии по производству различных судовых конструкций.

Состав технологической оснастки профилирующей установки определяется в зависимости от размеров, конфигурации, необходимого количества изготавливаемых профилей, технологической схемы профилирования.

В общем случае для осуществления технологического процесса профилирования необходима следующая технологическая оснастка:

- устройство для деформирования и захвата концевых участков заготовки;
- профилирующие ролики или ползуны;
- вспомогательный инструмент для обеспечения стабильности процесса профилирования.

Конструкция основных составных частей технологической оснастки зависит от выбранной системы калибровки, которая определяется формой изготавливаемых профилей.

Наиболее просты профилирующие инструменты для изготовления открытых профилей, у которых внутренние и наружные поверхности в процессе профилирования непосредственно соприкасаются с рабочими поверхностями.

При изготовлении полузакрытых профилей (рис. 5.28) должны устанавливаться в гнездах консольной части профилирующей установки вспомогательные ролики для предварительного деформирования отдельных элементов профиля.

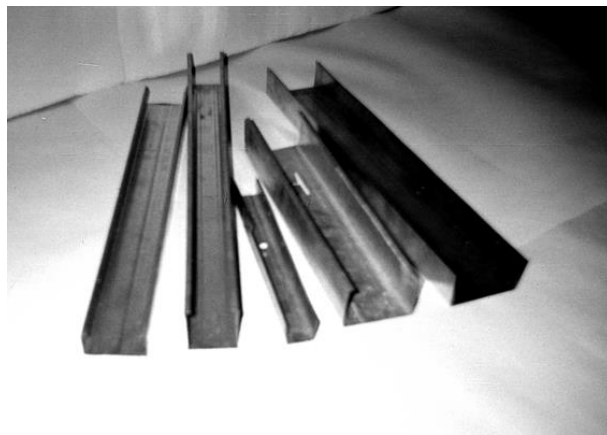


Рис. 5.28. Тонкостенные профили

Технологические переходы при изготовлении С-образного профиля представлены на рис. 5.29.

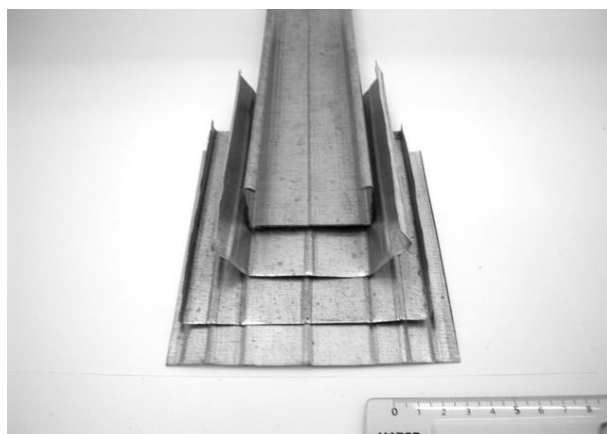


Рис. 5.29. Технологические переходы при изготовлении С-образного профиля

Профилирование закрытых профилей трубчатого или коробчатого поперечного сечения должно осуществляться с использованием соответствующих оправок.

Устройства для деформирования и захвата концевых участков профиля размещаются в подвижной и неподвижной гибочных головках. Захваты устанавливаются в головках таким образом, чтобы базовая продольная геометрическая ось профиля находилась в горизонтальной плоскости симметрии продольных балок. В этом случае, при растяжении заготовки в продольных балках будут возникать только напряжения сжатия. Положение захватов устанавливается с помощью регулировочных винтов гибочных головок. Фиксация концевых участков заготовки осуществляется при создании соответствующего усилия прижима элементов захватов. Для надежной фиксации концевых участков могут использоваться клиновые или эксцентриковые механизмы, которые при необходимости могут обеспечивать самозажатие концевых участков заготовки при ее растяжении.

Предварительное деформирование и прижим концевых участков заготовки, их освобождение после профилирования может производиться вручную или автоматически с помощью винтового, эксцентрикового или гидравлического механизма.

Для изготовления профилей с продольной кривизной предусматривается шарнирное крепление захватов в гибочных головках, чтобы захваты могли самоустанавливаться в зависимости от направления действия растягивающей нагрузки.

Основные профилирующие ролики или ползуны, перемещаясь от одного захвата к другому, осуществляют окончательное формирование заготовки.

Профилирующие ролики устанавливаются на подшипниках, размещенных в направляющих обоймы.

Для предотвращения осевого смещения роликов относительно друг друга на нижнем ролике имеются боковые направляющие бурты (рис. 5.30).

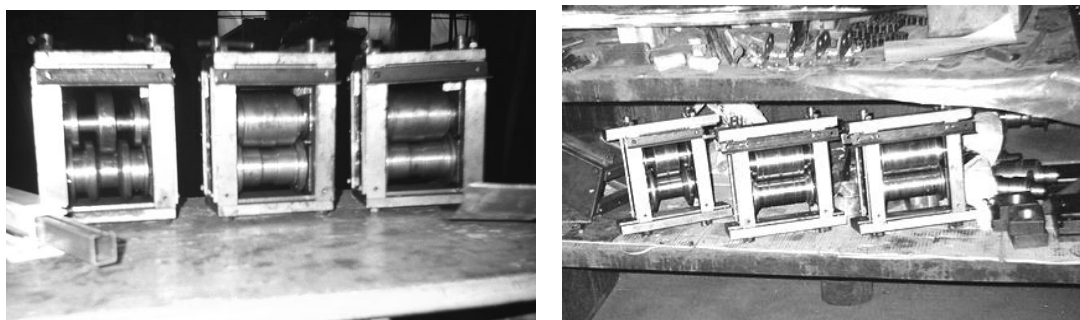


Рис. 5.30. Обоймы с профилирующими роликами

Необходимый зазор между роликами устанавливается с помощью регулировочных винтов и прокладок.

Перпендикулярность осей роликов относительно базовой продольной оси профиля обеспечивается соответствующей настройкой подвижной каретки и с помощью регулировочных винтов.

При осуществлении процесса профилирования обойма с разжатыми роликами устанавливается в районе подвижной зажимной головки, затем ролики сближаются до упора. При профилировании обойма с профилирующими роликами свободно перемещается в вертикальном направлении и самоустанавливается относительно оси заготовки.

В случае изготовления профилей с продольной кривизной в подвижной каретке предусмотрена установка винтового, эксцентрикового или гидравлического механизма для регулирования необходимого положения обоймы в каретке по ходу ее перемещения.

Для предварительного гофрирования заготовки перед неподвижной гибочной головкой в консольной части установки размещается обойма с роликами, имеющими кольцевые выступы и соответствующие впадины в зависимости от формы продольных гофров.

Гофры предусматривают в местах будущего изгиба и расположения ребер жесткости. Форма и размеры рабочих поверхностей роликов определяются в зависимости от пластичности материала заготовки и ее толщины.

Нанесение продольных гофров в местах изгиба сопровождается уменьшением толщины заготовки. Это утонение в некоторой степени

компенсируется за счет тангенциальных напряжений сжатия, возникающих при последующем профилировании.

При изготовлении полузакрытых профилей после гофрирования в гнездах консольной части могут устанавливаться ролики для предварительного подгиба боковых полок профиля.

Для точного направления заготовки на консольной части установки предусмотрены регулируемые направляющие планки, размещенные в консольной части установки.

Установка обеспечивает возможность изготовления унифицированных деталей малых сечений при модульной постройке малотоннажных судов.

5.5. Технологические и энергетические преимущества технологии изготовления судовых гнутых профилей гибкой с продольным растяжением

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что рассматриваемая технология изготовления тонкостенных гнутых профилей в условиях судостроительного производства обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными способами профилирования [71].

Технология обеспечивает возможность изготовления высокоточных гнутых тонкостенных профилей с различной конфигурацией и любой длины. Технология расширяет технологические возможности производства и позволяет создавать менее металлоемкие судовые конструкции с более рациональной формой.

Теоретический анализ работ при различных случаях формоизменения заготовки показывает, что предлагаемая технология является менее энергоемкой. Энергозатраты для формообразования профиля при приложении продольных растягивающих напряжений, близких к пределу текучести материала, существенно уменьшаются по сравнению с традиционными технологиями профилирования.

При использовании технологии не требуются затраты на предварительную правку заготовок и проведение дополнительных технологических операций для получения профилей со сложной конфигурацией. Возможность получения профилей любой длины значительно снижает затраты на проведение электросварочных работ при сборке судовых конструкций.

Процесс профилирования характеризуется локальным приложением нагрузки в процессе формоизменения заготовки. При наличии продольной растягивающей нагрузки уменьшаются силовые воздействия на заготовку. Это приводит к существенному уменьшению установленной мощности профилирующей установки и, следовательно, ее энергопотребления.

Профилирующая установка для осуществления данной технологии обладает меньшими массогабаритными параметрами по сравнению с прессами и роликовыми профилегибочными станами. Ее использование исключает использование крупногабаритной штамповой оснастки, затраты на транспортировку, правку профилей, поступающих со специализированных предприятий. Установка обеспечивает высокий уровень механизации производства профилей, снижение стоимости менее металлоемких судовых конструкций.

5.6. Рекомендации по применению тонкостенных гнутых профилей в судовых конструкциях

Разработанные способы профилирования обеспечивают возможность изготовления разнообразных гнутых профилей любой длины, что позволяет создавать менее металлоемкие судовые конструкции.

В зависимости от поперечных размеров судовые гнутые профили могут быть условно разделены на три группы: профили с шириной заготовки до 100 мм, до 200 мм, до 800 мм и более. В зависимости от назначения профили могут использоваться как отделочные и декоративные, так и в силовых судовых конструкциях.

В качестве заготовок для изготовления тонкостенных профилей рациональным является применение полос или лент в рулонах. Материалом

заготовки могут быть холоднокатаная, горячекатаная, легированная сталь, медные, алюминиевые и другие сплавы, биметаллические и плакированные материалы.

Гнутые профили малых сечений могут иметь разнообразную форму: от уголковых, швеллерных, корытных, С-образных до специальных профилей сложной конфигурации (рис. 5.31). Такие профили применимы для отделки судовых помещений, в конструкциях металлических шкафов, электрощитов, пультов управления, для прокладки каналов электропроводки и др.

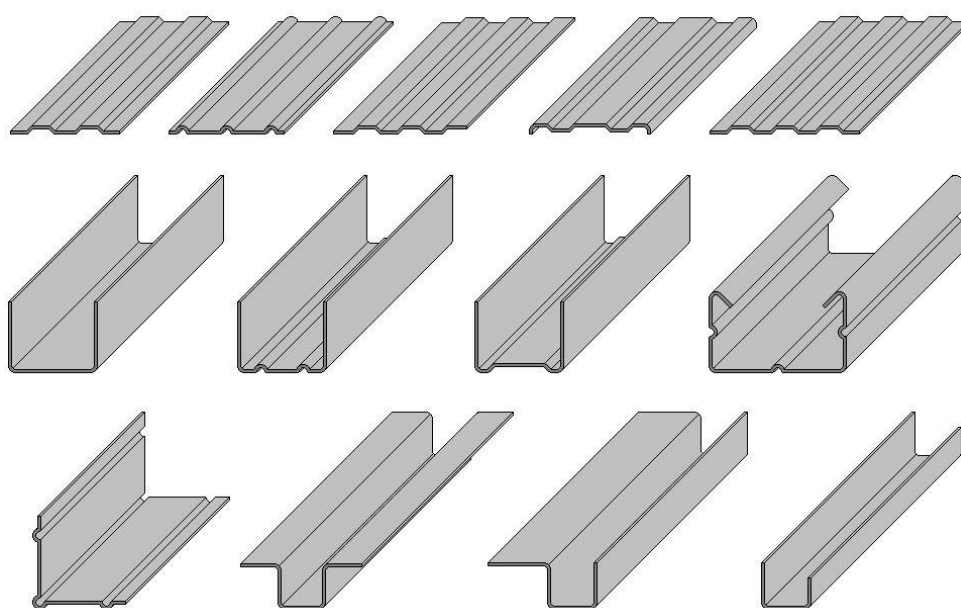


Рис. 5.31. Гнутые профили малых сечений

Для формирования корпусов малотоннажных судов могут использоваться в качестве продольных и поперечных балок набора тонкостенные профили повышенной жесткости с шириной заготовки до 200 мм и с различной формой поперечного сечения.

Наиболее оптимальным по металлоемкости является С-образный профиль, обеспечивающий повышенную прочность и жесткость балок набора. Такие балки могут быть выполнены с соответствующей продольной кривизной.

Отделочные тонкостенные профили повышенной жесткости с шириной заготовки до 100 мм могут использоваться для наружной и внутренней отделки судовых бытовых помещений, при изготовлении судовой мебели и позволяют

создавать легкие и жесткие конструкции, отвечающие требованиям технической эстетики. Они предоставляют возможность дизайнерам ориентироваться не только на профили, выпускаемые промышленностью, но и принимать современные художественные решения. Материалом для профилей может служить лента из нержавеющей стали, алюминиевых сплавов, сталей с покрытиями.

Гофры профилей могут иметь криволинейную форму (рис. 5.32). Профилям также можно придать необходимую продольную кривизну.

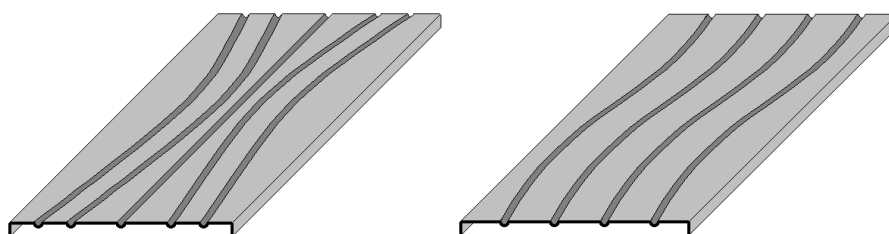


Рис. 5.32. Профили с криволинейными гофрами

Использование гнутых тонкостенных гофрированных профилей взамен гладких листов позволит снизить металлоемкость различных судовых конструкций, облегчит работы по их сборке и устранил последующую правку.

Для таких конструкций могут применяться гофрированные широкополочные гнутые профили волнистого типа (рис. 5.33,а), с периодически повторяющимися гофрами круглой или трапециевидальной формы (см. рис. 5.33,б), рифленые профили (см. рис. 5.33,в), а также профили с поперечными гофрами и отогнутыми концевыми участками (рис. 5.34).

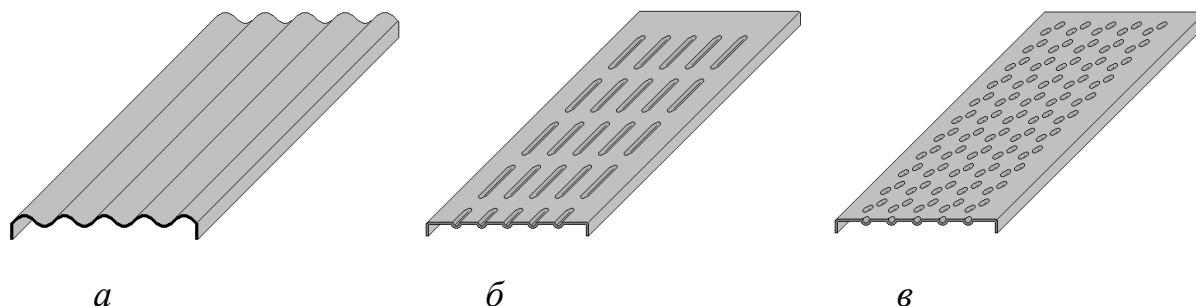


Рис. 5.33. Гофрированные широкополочные гнутые профили

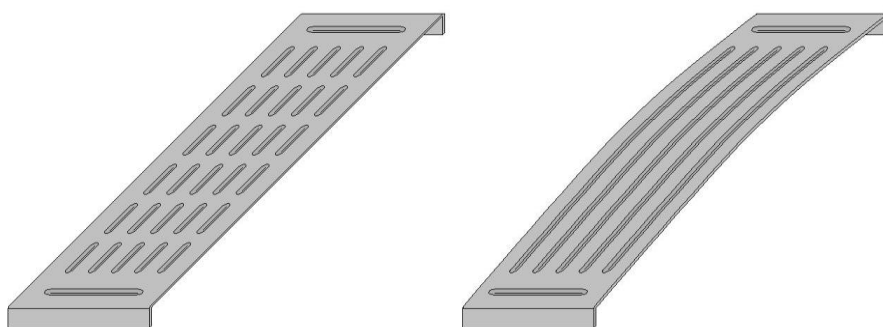


Рис. 5.34. Профили с поперечными гофрами
и отогнутыми концевыми участками

Перспективным в ближайшее время считается применение для формирования корпусов малотоннажных судов, рубок, надстроек трехслойных панелей.

Оптимальные по металлоемкости трехслойные гофровые панели (рис. 5.35) состоят из плоских наружных листов, соединенных внутренним гофрированным элементом с помощью лазерной, электронно-лучевой или контактной роликовой сварки. Внутренние полости панелей могут быть полыми либо содержать полимерный наполнитель.

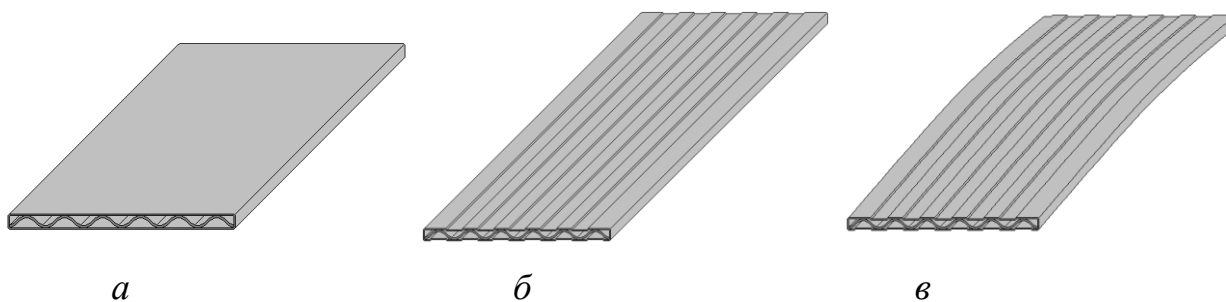


Рис. 5.35. Трехслойные гофровые панели

Разработанные способы профилирования обеспечивают возможность изготовления элементов панелей с рациональными геометрическими параметрами в зависимости от расчетных типоразмерных рядов для судов с различным водоизмещением. Кроме того, наружные листы панелей могут быть выполнены с различными ребрами жесткости (см. рис. 5.35,б), а также с продольной кривизной (рис. 5.35,в).

В качестве внутренних гофрированных элементов панелей применимы широкополочные профили с плоскими боковыми полками или элементами замкового типа, с отогнутыми концевыми участками для соединения с соседними панелями.

При производстве корпусных конструкций из трехслойных панелей возникают технологические трудности, связанные со сложностью соединения панелей, выполненных в виде полуфабрикатов с определенными габаритными размерами по ширине и длине. Технологические трудности возможно уменьшить при создании поточной линии, если осуществлять профилирование рулонных заготовок на длину, соответствующей длине секции корпуса судна. Причем некоторые участки профилей могут быть криволинейными.

Сборка крупногабаритных панелей может совмещаться со сваркой с применением предварительного упругого растяжения согласно технологии, разработанной в Институте электросварки им. И.Е. Патона [7].

Крупногабаритные панели применимы в конструкциях надстроек, рубок, переборок судов различного назначения и водоизмещения.

Применение рекомендуемых тонкостенных профилей повышенной точности и жесткости позволяет проектировать и изготавливать судовые конструкции, отличающиеся меньшей металлоемкостью и меньшими затратами на их производство. Важным является то, что на основе предлагаемой технологии возможно производство таких профилей небольшими сериями при широкой номенклатуре непосредственно на судостроительном предприятии. Технология применима для модульной постройки малотоннажных судов.

РАЗДЕЛ 6

ГИБКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МАЛОТОННАЖНЫХ СУДОВ

К транспортным речным судам относятся грузовые, пассажирские, грузопассажирские теплоходы, паромы, буксиры, баржи. Существует потребность в таких судах в связи с увеличением объемов водных перевозок [72 – 77].

Конкурентоспособные малотоннажные суда должны формироваться на модульных принципах и для их постройки необходимо специальное судостроительное производство на базе судостроительного завода.

Предлагаемый гибкий технологический комплекс предполагает модульное проектирование малотоннажных судов и использование для их постройки автоматизированной поточной линии в соответствии с технологией профилирования с продольным растяжением.

6.1. Проектирование малотоннажных судов на модульных принципах.

При модульном проектировании осуществляется комплектование конструкций разнообразных судов из ограниченного числа первичных общих конструктивных и функциональных модуль-элементов [3].

При модульном проектировании производится унификация конструкций и базовых параметров малотоннажных судов на основе модульного формирования корпусов, модульного обустройства надстроек, судовых помещений, агрегатирование движительно-рулевого комплекса и других судовых устройств.

Для формирования судовых корпусных конструкций в настоящее время применяют модульно-панельный метод проектирования. Типовая сварная наборная модуль-панель состоит из гладких стальных листов, усиленных

ребрами жесткости путем приварки горячекатаных сортов профилей. Такая массивная конструкция требует большого объема сварочных работ и необходимость правки для устранения возникающего коробления. Применяется для предотвращения коробления панелей технология сварки с предварительным упругим растяжением с помощью специальной растяжной машины [7].

Для строительства малотоннажных судов, а также катеров, яхт, учитывая их размеры и внешние действующие нагрузки, эффективным является применение модуль-панелей из гнутых тонкостенных гофрированных профилей, обладающих необходимой прочностью, жесткостью и высокой точностью. Такие детали могут изготавливаться при профилировании заготовок с продольным растяжением. Замена сварных модуль-панелей безнаборными помимо значительного снижения трудоемкости изготовления уменьшает массу судовых конструкций, особенно при применении тонкостенных высокопрочных коррозионно-стойких материалов.

Перед конструкторами при проектировании малотоннажных судов стоит задача установления рациональных конструкций модуль-объектов для последующего изготовления на автоматизированной поточной линии.

Разработанная технология профилирования обеспечивает возможность изготовления судовых высокоточных длинномерных модуль-панелей любой конфигурации, различных размеров по толщине и ширине, в том числе рифленых и перфорированных, а также с различной продольной кривизной.

В результате модульного проектирования малотоннажных судов должен быть разработан сортамент модуль-панелей для корпуса судна, сортамент модуль-панелей для надстроек, служебных и жилых помещений, модуль-агрегаты различных судовых устройств [77].

По конструктивному назначению судовые модуль-панели могут быть трех типов: силовые, ограждающие и декоративные. Силовые модуль-панели применяют для формирования наружной обшивки корпуса судна. Проектные модуль-панели могут быть плоскостными и с продольной кривизной для формирования средней части корпуса. Для носовой и кормовой оконечности

модульные панели могут быть с продольными криволинейными гофрами и со сложной кривизной. Конфигурация силовых модуль-панелей определяется с учетом действующих нагрузок, при этом устанавливают форму и размеры гофров и их количество. В качестве материалов для силовых модуль-панелей применимы высокопрочные хромистые стали и алюминиевые сплавы, толщиной заготовок 1,5...3 мм. Силовые гнутые профили специальной формы необходимы при установке и монтаже функциональных модуль-агрегатов судна.

Ограждающие модуль-панели из гофрированных листовых профилей предназначены для формирования наружных и внутренних переборок, палубных надстроек, входят в состав агрегатно-функциональных модулей.

Декоративные модуль-панели с учетом эстетических позиций формируют из особо тонкостенных коррозионно-стойких материалов для отделки служебных и жилых помещений судна по каркасной или безкаркасной модульной системе.

Безнаборные модуль-панели являются законченными деталями для дальнейшей сборки судовых конструкций. Из проектных силовых модуль-панелей формируются модуль-секции, которые входят в состав объемной части корпуса судна. Из проектных ограждающих и декоративных модуль-панелей формируются модуль-блоки надстроек. Гнутые профили малых сечений для изготовления трапов, дверей, рам, каналов проводки, стоек могут быть унифицированы.

Важным является проектирование функциональных модулей для выполнения одной из функций судна. В кормовой оконечности судна устанавливаются функциональные модуль-агрегаты с движительно-рулевым комплексом. В носовой оконечности судна размещают агрегат якорно-швартовного устройства. Имеются различные модуль-агрегаты, исходя из целевого назначения судна. В состав модуль-агрегатов входят ограждающие модуль-панели, а также силовые гнутые профили специальной формы.

В результате модульного проектирования малотоннажного судна осуществляется разработка рациональных форм обводов корпуса с учетом

основных положений теории корабля, создание сортамента (альбомов) модуль-панелей, унифицированных профильных деталей, конструктивных модуль-секций. Особо стоит задача выбора функциональных модуль-агрегатов, исходя из энергетических характеристик судна.

В зависимости от архитектурно-конструктивного типа проектируемого судна определяются проектно-компоновочные работы.

6.2. Модуль-панели и унифицированные модуль-элементы для малотоннажных судов.

Выбор модуль-панелей и профильных модуль-элементов для малотоннажных судов должен быть выполнен с учетом их эксплуатационных и технологических характеристик. Выбранные модуль-объекты должны обладать надлежащей технологичностью и обеспечивать модульную постройку малотоннажных судов.

Производственные возможности поточной технологической линии на основе разработанной технологии профилирования позволяют получать силовые модуль-панели для корпусов судов, модуль-панели для обустройства надстроек, жилых и служебных помещений. Возможно изготовление специальных профильных модуль-элементов для ребер жесткости, стоек, шпангоутов и других деталей.

Проектные модуль-объекты выбираются исходя из конструктивно-технологических особенностей проектируемого судна, применяемого материала, способа соединения сваркой или клепкой.

На начальном этапе модуль-объекты могут быть выбраны согласно рекомендаций изложенных в пункте 5.6. Кроме того, гнутые профили малых сечений могут быть с прорезями, с отверстиями для соединений, сварными, рисунок 6.1.

Перфорированные профили создают удобство для сборки-крепления различных судовых приспособлений и устройств. Замкнутые сварные профили, (рис. 6.1 з), обладают большей прочностью и жесткостью.

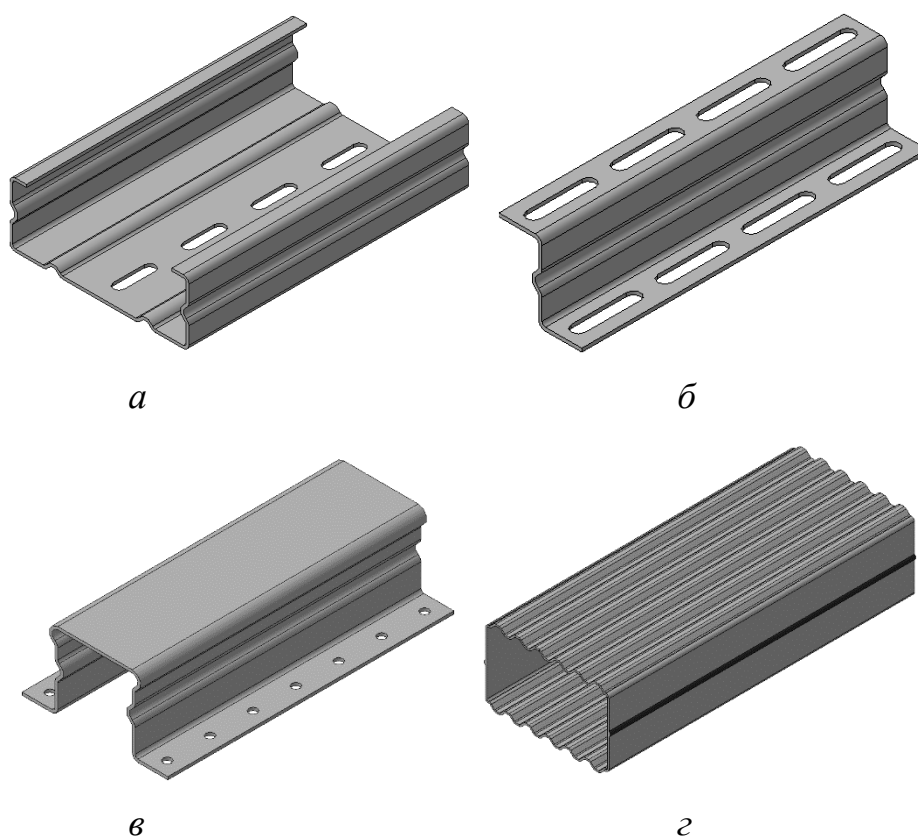


Рис. 6.1. Гнутые профили малых сечений

а – профиль С – образный; *б* – зетовый профиль;

в – корытный профиль; *г* – замкнутый сварной профиль

Для эффективного применения необходим тщательный выбор модуль-элементов, а также разработка принципиально новых конструкторских решений на основе разработанной технологии. Оптимальными прочностными и технологическими параметрами для малотоннажных судов обладают двухслойные модуль-панели из плоских или гофрированных листов для наружной обшивки судна и наборных тонкостенных листовых профилей с трапецидальными или круглыми гофрами (рис. 6.2). Такие модуль-панели по сравнению с применяемыми сварными модуль-панелями с набором из прокатных профилей обладают меньшей массой и меньшей трудоемкостью при изготовлении. Для набора вместо листовых гофрированных профилей могут применяться корытные профили, рисунок 6.1, *в*. Высокими прочностными свойствами обладают трехслойные панели, изготовленные из двухслойных, с дополнительными гофрированными листами и пластиковым наполнителем

(рис. 6.2). Важным является выбор материалов для модуль-объектов, исходя из условия их коррозионной стойкости.

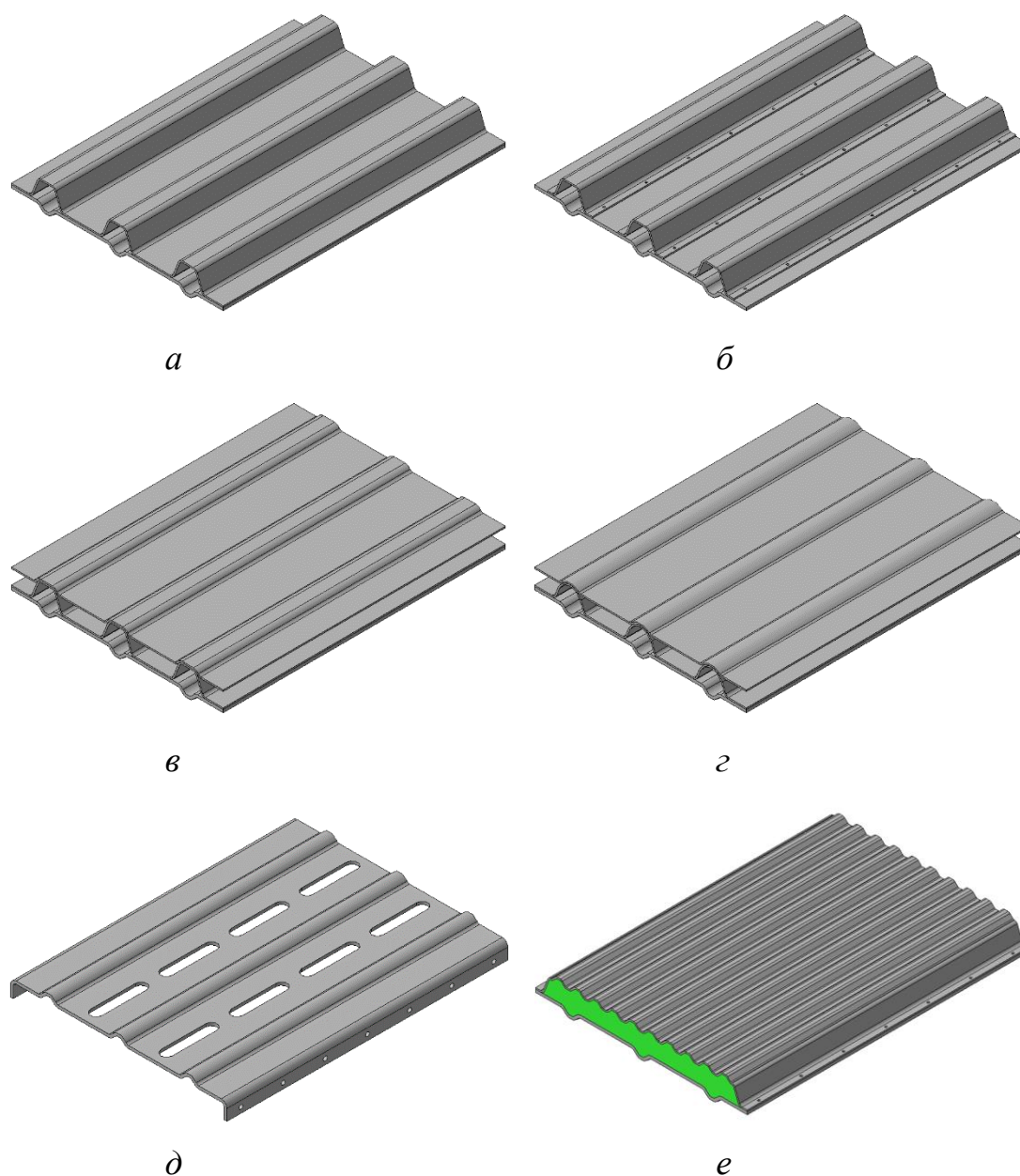


Рис. 6.2. Модуль-панели

a – двухслойная панель с корытными гофрами; *б* – двухслойная панель с корытными профилями; *в* – трехслойная панель; *г* – трехслойная панель; *д* – перфорированная панель; *е* – трехслойная панель с полимерным наполнителем

6.3. Поточная автоматизированная линия для изготовления модульных конструкций малотоннажных судов.

Для постройки конкурентоспособных малотоннажных судов традиционная технология судостроения требует усовершенствования. Корпусообработывающее производство включает плазовые работы, предварительную обработку листов и профилей, тепловую и механическую резку проката, гибку, механическую обработку, при этом требуется значительное количество разнообразного оборудования. Такая технология применяется при серийном строительстве судов. Большинство технологического оборудования не приспособлено для обработки тонкостенных деталей из высокопрочных сталей и легких сплавов.

Для строительства малотоннажных судов в условиях многономенклатурного и мелкосерийного производства необходима специальная поточная линия. Разработанная поточная линия предназначена для модульной постройки малотоннажных судов в соответствии с их конструктивно-технологическими характеристиками. Поточная линия обеспечивает осуществление основных технологических операций корпусообработывающего, сборочно-сварочного производства. На поточной линии реализуется технологический процесс постройки малотоннажных судов на основе модульного метода.

Технологическая схема поточной линии изготовления модульных конструкций малотоннажных судов показана на рисунке 6.3.

Постройка малотоннажных судов осуществляется в такой последовательности. Металл поступает в рулонах и устанавливается в разматывающее устройство. Полоса подается через направляющие валки и очистное устройство в профилирующую установку. В профилирующей установке изготавливается профиль необходимой формы. После отрезания изготовленный профильный модуль-элемент поступает на приемный стол. Модуль-панель наружной обшивки судна перемещается на построечное место. После смены технологической оснастки производится изготовление модуль-

панелей надстройки, жилых и служебных помещений. Эти модуль-панели укладываются для дальнейшей обработки в контейнеры 9, 10 и направляется на участки для модульного изготовления надстроек и других судовых помещений.

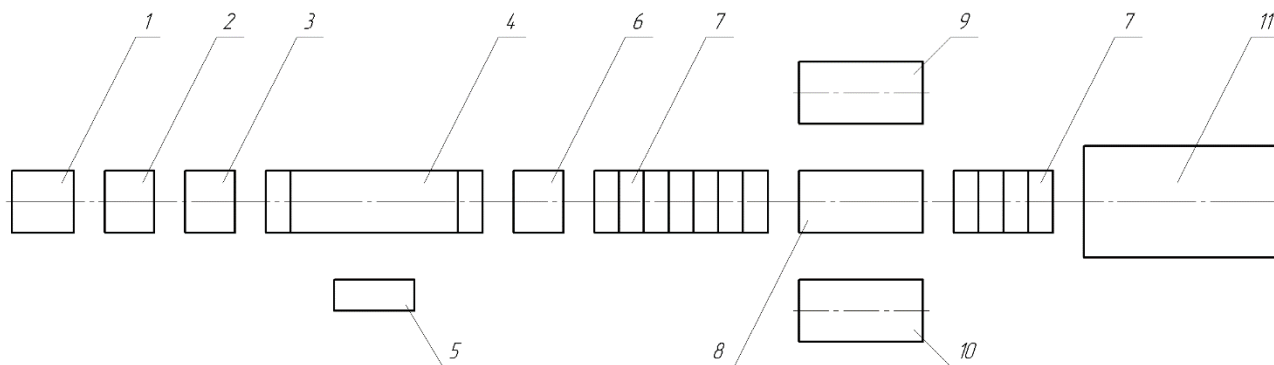


Рис. 6.3. Технологическая схема поточной линии изготовления модульных конструкций малотоннажных судов

- 1 – разматывающее устройство; 2 – направляющие валки;
 3 – очистное устройство; 4 – профилирующая установка; 5 – пульт управления;
 6 – отрезное устройство; 7 – рольганг; 8 – стол;
 9, 10 – контейнеры; 11 – построечное место

Металл для постройки поставляется металлургическими заводами в рулонах согласно заданным техническим условиям. Размеры рулонов: 500...750 мм по внутреннему диаметру, 750...1500 мм по наружному диаметру. Партией считаются рулоны одной плавки, одной ширины, одного режима термической обработки. Предварительная правка полосовой заготовки не требуется. Рулон металла устанавливается в разматывающем устройстве с механическим приводом. В очистном устройстве производится несложная механическая очистка полосы.

В профилирующей установке производится формирование профиля, соответствующего проектным данным модуль-панелей. Профилирующая установка для модуль-панелей аналогична опытно-промышленной установке для изготовления профилей небольших сечений, рисунок 5.13. Технические требования к профилирующей установке приведены в пункте 5.3. Для работы на

поточной линии в автоматизированном режиме установка дополнительно снабжается устройствами для установки блока формирующих роликов в крайних положениях, механизмами для автоматического зажима концевых участков заготовки, создания заданной силы растяжения.

Профилирующая установка может работать с ручным или автоматизированным управлением с пульта. Перед началом работы оператор устанавливает технологическую оснастку, блок профилирующих роликов, зажимы необходимой формы, задает величину необходимого давления для натяжения полосы производится предварительное профилирование и контроль работы установки. Оптимальный режим профилирования модуль-панелей рассчитывают в зависимости от их геометрических параметров и механических характеристик материала. Методика расчета приведена в разделе 4.

Система программного управления может обеспечивать выполнения необходимых операций для изготовления модуль-панелей в автоматизированном режиме.

Вначале на установке формируются корпусные модуль-панели, затем после переналадки и установки блоков роликов соответствующей формы изготавливают корпусные модуль панели необходимой кривизны для кормовой и носовой оконечностей судна. На рабочем столе модуль-панели подвергаются контролю, необходимой обработке и поступают на построечное место. Модуль-панели другой конструкции изготавливают после замены технологической оснастки.

После предварительного профилирования профиль для повышения точности подвергается на установке дополнительно фиксирующей растяжке при небольшом увеличении силы растяжения. При фиксированной нагрузке могут производиться на профиле дополнительные технологические операции приварки деталей, вырезки небольших отверстий и пр.

Для изготовления модуль-панелей из высокопрочных малопластичных материалов целесообразно производить местный нагрев заготовки перед профилирующими роликами пламенем газовой горелки или токами высокой

частоты. В результате нагрева повышается пластичность материала и возникают более благоприятные условия деформирования. Для модуль-панелей из алюминиевых сплавов при их формообразовании возможно применение соответствующей термомеханической обработки.

Следует отметить, что на профилирующей установке возможна продольная порезка полосы с предварительным растяжением для получения заготовок другой ширины. Для этого устанавливается блок роликов с дисковыми ножницами. Можно из полосовой заготовки изготавливать одновременно несколько профилей с последующей продольной порезкой.

На типовом построечном месте для малых судов имеется опорно-транспортное устройство, стапельные леса, подъемно-транспортное оборудование. Опорно-транспортное устройство состоит из судовозных тележек, киль-блоков, опорных балок. Судно собирается последовательно из конструктивных и функциональных модулей. Предварительно из модуль-панелей и унифицированных деталей формируются плоскостные секции днища, палубы, бортов, поперечных переборок. Используется автоматизированные сварочные агрегаты. Производится агрегатно-модульный монтаж механизмов и оборудования.

Представленный гибкий технологический комплекс позволяет производить модульное проектирование и постройку малотоннажных судов, отличающихся меньшей металлоемкостью, низкой себестоимостью постройки, современным внешним видом, повышенными эксплуатационными и технологическими характеристиками.

Поточная линия может использоваться для изготовления многих деталей судовых конструкций средне и крупнотоннажных судов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая технология и соответствующее технологическое оборудование для изготовления длинномерных тонкостенных высокоточных профильных деталей формирующих судовые модульные конструкции.

Для определения энергосиловых параметров технологического процесса профилирования решена задача упругопластического изгиба с продольным растяжением полосы. Полученные аналитические зависимости величин изгибающего момента и пружинения показывают, что при действии продольного растяжения изгибающий момент и пружинение уменьшаются.

Полученные аналитические зависимости для определения работы внутренних сил при изгибе растянутой полосы, свидетельствуют, что энергозатраты при ее деформировании меньше, чем при простом изгибе.

Экспериментальные исследования влияния продольных напряжений растяжения на упругопластический изгиб плоских образцов показали достаточную достоверность полученных теоретических решений и возможность их использования для расчетов параметров технологического процесса профилирования.

Изложена методика и алгоритм расчета параметров, необходимых для проектирования и настройки профилирующего оборудования.

Для изготовления судовых профильных деталей разной конфигурации разработаны технологические схемы гибки с продольным растяжением, которые позволяют изготавливать тонкостенные профили повышенной точности и жесткости, рифленые и перфорированные профили, профили с криволинейными гофрами, со сложной продольной кривизной, а также профили из малопластичных материалов.

Сформулированы технические требования к оборудованию для изготовления судовых тонкостенных профилей. Приведены конструкции экспериментальной и опытно-промышленной установок для производства тонкостенных профилей из заготовок шириной соответственно 100 и 200 мм.

На основе проведенных исследований получены защищенные патентами новые технические решения, которые позволяют расширить технологические возможности профилировочного оборудования.

Разработан на основе представленной технологии гибкий технологический комплекс для модульного проектирования и постройки конкурентоспособных малотоннажных судов. Приведена поточная линия с применением профилирующей растяжной установки для изготовления универсальных профильных деталей, что позволяет создавать менее металлоемкие судовые конструкции с более рациональной формой. Профилирующая растяжная установка является новым универсальным средством технологического оснащения судостроительных заводов при постройке малотоннажных судов, а также может использоваться для изготовления деталей конструкций средне и крупнотоннажных судов.

Технология профилирования гибкой с продольным растяжением является универсальной, энергосберегающей и применима для модульной постройки малотоннажных судов, отвечающих требованиям современного судостроения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новошицкий А. В. Технология изготовления тонкостенных профильных элементов судовых конструкций гибкой с продольным растяжением [Текст] : монография / А. В. Новошицкий. – Николаев : издательство Швеца В. М., 2017. – 152 с.
2. Технология корпусостроительных работ: учебник [Текст] / А. С. Рашковский, А. В. Щедролюсов, А. М. Фарионов, Н. В. Цыкало, В. Н. Перов, С. Н. Слижевский; под общ. ред. проф. А. С. Рашковского. – Николаев: НУК, 2018. – 516 с.
3. Модульная постройка судов [Текст] / Л. Ц. Адлерштейн, Г. В. Бавыкин, А. А. Мильто [и др.]. – Л. : Судостроение, 1983. – 320 с.
4. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков [Текст] : монография / А. С. Рашковский, Н. Г. Слуцкий, В. Н. Коннов [и др.] ; под ред. А. С. Рашковского. – Николаев : НУК ; РАЛ-полиграфия, 2008. – 614 с.
5. Корчевская Н. М. Бескаркасные системы зашивки судовых помещений в зарубежном судостроении [Текст] / Н. М. Корчевская, А. С. Рашковский // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2000. – № 4 (370). – С. 17–26.
6. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання [Текст] : навч. посіб. / В. В. Квасницький. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – 437 с.
7. Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов [Текст] / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. И. Павловский [и др.] // Автоматическая сварка. – 1989. – № 10. – С. 9.
8. Рашковский А. С. Направления совершенствования организации и управления судостроительными предприятиями [Текст] / А. С. Рашковский, Н. П. Романчук // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 1. – С. 81–87.
9. Куклин О. С. Освоение передовых технологий формообразования элементов корпусных конструкций [Текст] / О. С. Куклин, В. М. Левшаков, В. И. Попов // Судостроение. – 2004. – № 5. – С. 97–99.

10. Шуньгин В. Ю. Технология и режимы ротационно-локальной гибки листовых заготовок [Текст] / В. Ю. Шуньгин // Судостроение. – 2002. – № 4. – С. 51–54.
11. Сипилин П. М. Обработка корпусной стали [Текст] / П. М. Сипилин, И. В. Зефиров. – Л. : Судостроение, 1972. – 256 с.
12. Шабаршин В. П. Современные средства технологического оснащения корпусообрабатывающих цехов [Текст] / В. П. Шабаршин, И. Г. Ширшов, О. С. Куклин. – Л. : Ритм, 1985. – 132 с.
13. Куклин О. С. Правка профилей из корпусных сталей и легких сплавов [Текст] / О. С. Куклин. – Л. : Ритм, 1980. – 102 с.
14. Мошнин Е. Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах [Текст] / Е. Н. Мошнин. – М. : Машгиз, 1959. – 360 с.
15. Мошнин Е. Н. Гибка и правка на ротационных машинах [Текст] / Е. Н. Мошнин. – М. : Машиностроение, 1967. – 272 с.
16. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
17. Давыдов В. И. Производство гнутых тонкостенных профилей [Текст] / В. И. Давыдов, М. П. Максаков. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1959. – 300 с.
18. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки [Текст] / М. И. Лысов. – М. : Машиностроение, 1966. – 236 с.
19. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования [Текст] / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Металлургия, 1980. – 288 с.
20. Прогрессивные технологические процессы гибки листовых заготовок [Текст] / С. И. Вдовин, Д. В. Голенков, В. А. Жердов, С. В. Семин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – № 1. – С. 19–21.
21. Филимонов С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры [Текст] / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 246 с.

22. Колганов И.М. Разработка и внедрение прогрессивных технологий изготовления волочением-прокаткой профилей и гофров повышенной жесткости из листовых авиационных материалов [Текст] : автореферат диссертации на соискание научной степени д-ра технических наук : спец. 05.03.05 “Технологии и машины обработки давлением” / И.М. Колганов – Самара, 2007. – 35 с.
23. А. с. 1724406 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Устройство для угловой гибки коробчатых изделий из тонколистового материала [Текст] / В. А. Новошицкий, В. И. Миронов, И.А. Ковалев. (СССР). – № 4264067/27 ; заявл. 16.06.1987 ; опубл. 07.04.1992, Бюл. № 13.
24. Филимонов В. И. Автоматизированная линия изготовления С-образного профиля методом стесненного изгиба [Текст] / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Вестник Ул-ГТУ. Сер. Машиностроение, строительство. – 1998. – № 2. – С. 50–55.
25. Пат. US 5058410 США, МПК В 21 В 45/02; В 21 В 3/02. Method and apparatus fo producing thin wire, rod, tube, and profiles, from steels and alloys with low deformability, particularly hardenable steel [Text] / Hans Losch ; Boehler Gesellschaft m.b.H.. – № US 7/323395 ; заявл. 14.03.1989 ; опубл. 22.10.1991, Том 11321. – № 4.
26. А. с. 917403 СССР. Устройство для гибки листов с нагревом [Текст] / В. И. Миронов, В. А. Новошицкий, В. С. Михайлов, В. М. Заикин, Б. В. Смирнов, В. И. Матвеев, В. А. Лавриненко, А. А. Трапезенко (СССР). – № 3008887/27 ; заявл. 28.11.1980 ; опубл. 01.12.1981.
27. Пат. 297577 Германия, МКИ5 В 21 D 5/01. Гибочный инструмент, в частности для изготовления деталей U-образного профиля с прецизионно прямыми углами [Текст] ; опубл. 16.01.92, Бюл. № 3.
28. Formgebung mit Laserstahlung [Text] / König Wilfried, Weck Manfred, Herfurth Hans-Joachim, Ostendrap Heinrich, Zaboklicki Adam K. // VDI-Zeitschrift. – 1993. – 135, № 4. – S. 14–17.
29. Пат. US 5031440 США, МКИ 5 В 21 D 5/06. Apparatus for forming long plate member [Text] / Enami Toshiaki; Enami Seiki Mfg., Co., Ltd. – № US 7/479405 ;

заявл. 13.02.90 ; опубл. 16.07.91 ; приоритет 15.02.89, № 1 – 35673 (Япония).
– НКИ 72/414.

30. Закиров И. М. Гибка на валах с эластичным покрытием [Текст] / И. М. Закиров, М. И. Лысов ; под ред. М. И. Лысова. – М. : Машиностроение, 1985. – 144 с.
31. А. с. 1738427 СССР, МКИ В 21 D 13/02. Устройство для гофрирования листового материала [Текст] / А. М. Влялько, В. А. Новошицкий (СССР). – № 4795513/27 ; заявл. 26.02.1990 ; опубл. 07.06.1992, Бюл. № 21.
32. Чудин В. Н. Изгиб с растяжением элементов корпусных конструкций [Текст] / В. Н. Чудин // КШП. ОМД. – 2001. – № 6. – С. 3–7.
33. Пат. US 5086636 США, МКИ В 21 D 11/02. Stretch-forming machine [Text] / Jean-Paul Huet; ACB, Paris, FR. – № US 7/628027; заявл. 17.12.1990 ; опубл. 11.02.1992, Том 1135. – № 2.
34. А. с. 653000 СССР, МКИ В 21 D 5/00. Способ изготовления гнутых профилей [Текст] / В. А. Новошицкий, В. Н. Цымбалюк (СССР). – № 2140607 ; заявл. 02.06.1975 ; опубл. 25.03.1979, Бюл. № 11.
35. А. с. 929274 СССР, МКИЗ В 21 D 5/00. Способ изготовления гнутых профилей [Текст] / В. А. Новошицкий, В. Н. Цымбалюк (СССР). – № 2645791/25-27 ; заявл. 17.07.1978 ; опубл. 23.05.1982, Бюл. № 19.
36. Соловьев С. Н. Основы технологии судового машиностроения [Текст] / С. Н. Соловьев. – Л. : Судостроение, 1983. – 360 с.
37. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды [Текст] : учебник / А. А. Ильюшин. – М. : Изд-во МГУ, 1990. – 310 с.
38. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] : учеб. для студ. вузов / Н. Н. Малинин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.
39. Ренне И. П. Пластический изгиб листовой заготовки. Изменение толщины заготовки при чистом изгибе [Текст] / И. П. Ренне. – М. : ГТМЛ, 1950. – 327 с.
40. Хилл Р. Математическая теория пластичности [Текст] / Р. Хилл. – М. : ГИТТЛ, 1956. – 408 с.

41. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию [Текст] / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
42. Можаровский Н. С. Приложение методов теории пластичности и ползучести к решению инженерных задач машиностроения. Теория пластичности и ползучести в инженерном деле [Текст] : в 2 ч. / Н. С. Можаровский. – К. : Выща школа, – 1991. – Ч. 1. – 263 с.
43. Воропаев А. А. Точность формообразования листовых деталей при гибке с растяжением [Текст] / А. А. Воропаев, С. С. Одинг // Судостроительная промышленность. Сер. Судоверфь. Технология и организация производства. – 1986. – Вып. 2. – С. 9–17.
44. Суслов В. П. Строительная механика корабля и основы теории упругости [Текст] / В. П. Суслов, Ю. П. Кочанов, В. Н. Спихтаренко. – Л. : Судостроение, 1972. – 720 с.
45. Білобран Б. С. Пружнопластичний стан труби з нерівномірною товщиною стінки при комбінованому навантаженні [Текст] / Б. С. Білобран, О. Б. Кінаш // Проблеми прочності. – 2002. – № 2. – С. 110–120.
46. Соловьев С. Н. Упругопластический изгиб полосы с продольным растяжением [Текст] / С. Н. Соловьев, А. В. Новошицкий // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2001. – № 2 (374). – С. 91–96.
47. Новошицкий А. В. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы с учетом упрочнения материала [Текст] / А. В. Новошицкий // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – № 5 (391). – С. 81–87.
48. Новошицкий А. В. Пружно-пластичний згин штаби з поздовжнім розтягом [Текст] / А. В. Новошицкий // Машинознавство. – Л. : Кінпатрі ЛТД, 2003. – № 12 (78). – С. 14–16.
49. Новошицкий А. В. Пружно-пластичний згин штаби з поздовжнім розтягом [Текст] / А. В. Новошицкий // 6-й міжнар. симпозіум укр. інженерів-механіків у Львові, 21–23 травня 2003 р. : тези доп. – Л. : Кінпатрі ЛТД, 2003. – С. 39–40.

50. Новошицкий А. В. Упругопластический изгиб с продольным растяжением полосы из материала со степенным упрочнением [Текст] / А. В. Новошицкий // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 4 (415). – С. 94–100.
51. Новошицкий А. В. Работа при упругопластическом изгибе полосы с продольным растяжением [Текст] / А. В. Новошицкий // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2008. – № 5 (422). – С. 60–65.
52. Соловьев С. Н. Энергосберегающая технология изготовления элементов тонкостенных конструкций судового оборудования [Текст] / С. Н. Соловьев, А. В. Новошицкий // Сучасні проблеми суднової енергетики : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. студ., асп., молодих вчених та молодих спеціалістів, 20–21 листопада 2003 р. : тези доп. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – С. 177–178.
53. Соловьев С. Н. Экспериментальное исследование технологии изготовления судовых тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением [Текст] / С. Н. Соловьев, А. В. Новошицкий // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 1 (430). – С. 57–64.
54. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент [Текст] : стандарт. – Введ.01.01.1986. – 16 с.
55. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний [Текст] : справочник / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
56. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [Текст] : стандарт. – Введ. 01.10.2008.– М. : Стандартиформ, 2008. – 7 с.
57. Новошицкий А. В. Изготовление тонкостенных профилей гибкой с продольным растяжением [Текст] / А. В. Новошицкий // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – № 3 (389). – С. 81–86.
58. Новошицкий А. В. Методика расчета параметров технологии профилирования гибкой с продольным растяжением [Текст] /

- А. В. Новошицкий // Суднова енергетика: стан та проблеми : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. студ., асп., молодих вчених та спеціалістів, 19–20 жовтня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2005. – С. 172–173.
59. Новошицкий А. В. Алгоритм расчета параметров технологического процесса изготовления профилей гибкой с продольным растяжением [Текст] / А. В. Новошицкий // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 25–26 жовтня : тези допов. – Миколаїв: НУК, 2011. – С.96–97.
60. Новошицкий А. В. Технология изготовления тонкостенных профильных элементов судовых конструкций [Текст] / А. В. Новошицкий // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2010. – № 2 (431). – С. 45–52.
61. Новошицкий А. В. Технология изготовления тонкостенных гнутых элементов теплообменных аппаратов ГТУ гибкой с продольным растяжением [Текст] / А. В. Новошицкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/5 (40). – С. 42–45.
62. Новошицкий А. В. Технология изготовления профильных элементов кузовов автомобилей гибкой с продольным растяжением [Текст] / А. В. Новошицкий, В.А. Новошицкий // Вісник Харківського Національного автомобільно-дорожнього університету. Збірник наукових праць – Харків: ХНАДУ, 2016. – № 74. – С. 83–87.
63. Декл. пат. 44451А Україна, МПК7 В 21 D 5/00, В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення гнутих профілів [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 2001031674 ; заявл. 12.03.01 ; опубл. 15.02.02, Бюл. № 2.
64. Пат. 79279 Україна, МПК (2006) В 21 D 5/00, В 21 D 11/20 (2007.01), В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення гнутих профілів з поздовжніми криволінійними гофрами [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 20041008666 ; заявл. 25.10.04 ; опубл. 11.06.07, Бюл. № 8.
65. Пат. 79280 Україна, МПК (2006) В 21 D 5/00, В 21 D 11/20 (2007.01), В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення гнутих профілів із складною поздовжньою

- кривизною [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 20041008669 ; заявл. 25.10.04 ; опубл. 11.06.07, Бюл. № 8.
66. Пат. 79278 Україна, МПК (2006) В 21 D 5/00, В 21 D 11/20 (2007.01), В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення рифлених профілів [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 20041008663 ; заявл. 25.10.04 ; опубл. 11.06.07, Бюл. № 8.
67. Декл. пат. 55030А Україна, МПК7 В 21 D 5/00, В 21 D 11/20, В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення гнутих профілів з поздовжньою кривизною [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 2002064966 ; заявл. 17.06.02 ; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.
68. Патент на корисну модель. 82746 Україна, МПК (2013.01) В 21 D 5/00, В 21 D 11/20 (2006.01), В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення гнутих перфорованих профілів [Текст] / О. С. Рашковський, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № u201300570 ; заявл. 17.01.13 ; опубл. 12.08.13, Бюл. № 15.
69. Декл. пат. 43149А Україна, МПК7 В 21 D 5/00, В 21 D 11/20. Розтяжна машина [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 2001031675 ; заявл. 12.03.01 ; опубл. 15.11.01, Бюл. № 10.
70. Декл. пат. 55029А Україна, МПК7 В 21 D 5/00, В 21 D 11/20, В 21 D 53/00. Розтяжна машина [Текст] / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 2002064965 ; заявл. 17.06.02 ; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.
71. Патент на корисну модель. 145415 Україна, МПК (2020.01) В 21 D 5/00, В 21 D 11/20 (2006.01), В 21 D 53/00. Спосіб виготовлення гнутих [Текст] / О. С. Рашковський, А. В. Новошицький ; Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № u202003981 ; заявл. 02.07.20 ; опубл. 10.12.20, Бюл. № 23.

72. Козир Б. Ю. Водний транспорт України в інтеграційних процесах [Текст] / Б.Ю. Козир // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 11–13 жовтня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 15–16.
73. Бурковец С. В. О концепции возрождения судостроения в Украине [Текст] / С. В. Бурковец // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 11–13 жовтня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 19–20.
74. Егоров Г. В. Анализ применимости разработанных современных концептов речных пассажирских судов для линейных перевозок [Текст] / Г. В. Егоров, А. Г. Егоров // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 11–13 жовтня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 76–77.
75. Некрасов В. А. Развитие судоходства по рекам Украины [Текст] / В. А. Некрасов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 95-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, 24–27 вересня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 15–17.
76. Слободян С. О. Обзор малых пассажирских судов прибрежного плавания [Текст] / С. О. Слободян, А. А. Морозов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 95-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, 24–27 вересня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 99–103.
77. Новошицкий А. В. Технология и оборудование для изготовления модульных конструкций малотоннажных судов [Текст] / А. В. Новошицкий // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, 24–25 вересня : тези доп. – Миколаїв : НУК, 2020. – С. 284–289.

Новошицький А.В.

Технологія виготовлення модульних конструкцій малотоннажних суден

У монографії викладена технологія виготовлення тонкостінних профільних елементів суднових конструкцій гнуттям з подовжнім розтягом. Технологія є універсальною, енергозберігаючою і може застосовуватись при модульній побудові малотоннажних суден.

Приведена інженерна методика розрахунку основних енергосилових параметрів технології. Розроблено технологічні схеми гнуття з подовжнім розтягом для одержання гофрованих модуль-панелей, профільних модуль-елементів для корпусних конструкцій, надбудов, суднових приміщень.

Наведено опис гнучкого технологічного комплексу для виготовлення модульних конструкцій малотоннажних суден.

Книга призначена для наукових і інженерно-технічних працівників суднобудівних підприємств, може бути корисна студентам і аспірантам, фахівцям в галузі обробки металів тиском.

Наукове видання

НОВОШИЦЬКИЙ Антон Владимирович

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ МАЛОТОННАЖНЫХ СУДОВ

Монографія

(російською мовою)

Формат 64×90/8. Умовно друкованих аркушів 9,5
Папір офсетний. Друк цифровий. Наклад 100 прим.
Замовлення № 46 від 01.09.2021 р.

Видано та надруковано
ФОП Швець В.М., м. Миколаїв
Свідоцтво видавничої справи:
серія ДК № 5078 від 01.04.2016 р.