

90
На правах рукописи

УДК 621.981.1

Чередниченко Александр Всеволодович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ
ПРОФИЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ**

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва

2002

2002

227

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре «Технологии обработки давлением».

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
профессор Кондратенко В.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
Власов Ал.В.;
кандидат технических наук,
доцент Константинов В.Ф.

Ведущая организация

ОАО «НИИТАвтопром»

1600085
Чередниченко А.В.
Разработка методики
проектирования и
исследование процесса гибки
тонколистовых профилей п...
0-00

003 г. в 14³⁰ часов на заседании
в Московском государственном
на по адресу:

1600085

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

печ

зког

г Семенов В.И.

заказ № 2г
г. Н.Э. Баумана

Актуальность работы.

За последние годы в России значительно увеличилось количество возведенных ангарообразных строительных сооружений различного назначения и потребность в дальнейшем строительстве таких объектов не снижается.

В России большая часть «ангаров» изготавливается с несущим каркасом из труб или металлопроката, который потом накрывается кровлей, состоящей из отдельных листов, соединяемых между собой обычным способом. Сроки сооружения таких ангаров довольно значительны и достигают нескольких месяцев, не говоря о том, что требуются большие трудозатраты для установки каркаса и сборки кровли. Поэтому, в последние годы в строительной индустрии наметились две тенденции:

1. Широкое использование гнутых профилей из тонколистовых материалов, используемых в качестве несущих конструкций, в сочетании с деревянными или пластиковыми элементами вместо горячекатаных профилей.

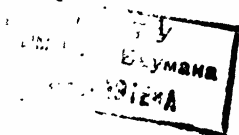
2. Применение для изготовления ангарообразных сооружений изогнутых листовых профилей большой жесткости, совмещающих в себе функции кровли и несущей конструкции.

Это позволило перейти к строительству бескаркасных сооружений различного целевого назначения (ангары, склады, хранилища, жилье и т.д.), резко сократить материалоемкость сооружаемых объектов и в несколько раз повысить темпы строительства.

Такие бескаркасные сооружения образуют особый класс строительных конструкций, которому присущи свои специфические принципы проектирования, изготовления, строительства и эксплуатации. Он возник на стыке между обычным строительством и серийным машиностроительным производством.

Особенностью процесса строительства бескаркасных сооружений является то, что изготовление составляющих элементов и монтаж всего здания производится на стройплощадке, т.е. все оборудование по возведению и сборке сооружения является мобильным. Возможно также создание многослойных ангаров, состоящих из 2-х ангаров разного радиуса с заливаемым между ними утеплителем типа пенополиуретана или засыпаемым твердым утеплителем.

Такие быстровозводимые сооружения особенно необходимы во время стихийных бедствий, катастроф, боевых действий, когда требуется много помещений под жилье, госпитали, склады, ангары для техники, а их строительство ведется в экстремальных условиях при дефиците времени. Сроки возведения одного ангара составляют от нескольких часов до нескольких дней, в зависимости от размера сооружения.



В связи с этим актуально создание технологии и отечественного оборудования, которые должны отвечать следующим требованиям: работать на отечественном металле, изготавливать широкую гамму изделий, иметь низкую себестоимость готовых изделий, обеспечивать возможность изготовления ангаров в кратчайшие сроки и в любом доступном месте.

Цель работы. Разработка способа гибки тонкостенных профилей, позволяющего получить качественную изогнутую деталь, и методики проектирования технологического процесса гибки таких тонкостенных профилей, учитывающей возможное гофро- и складкообразование в результате местной потери устойчивости отдельных элементов профиля, на основе численного моделирования процесса гибки.

В соответствии с поставленной целью работы были сформулированы **задачи исследования:**

1. Разработать методику определения оптимальных размеров поперечного сечения тонкостенного профиля, обеспечивающую минимальный расход материала, по критерию максимально покрываемой данным профилем площади с учетом внешних нагрузок, действующих на него.
2. Разработать методику проектирования технологических процессов получения изогнутых тонкостенных профилей, учитывающую упрочнение материала во время формоизменения, возможную потерю устойчивости элементов профиля, приводящую к гофро- и складкообразованию, пружинение готовой детали, реальное взаимодействие между деформируемой деталью и инструментом.
3. Экспериментально и теоретически исследовать возможность получения качественного гладкого изогнутого профиля при гибке на трехвалковой гибочной машине с тремя жесткими валками и на двухвалковой гибочной машине с одним жестким валком и одним валком, облицованным эластичной средой.
4. Исследовать возможность получения качественного гладкого изогнутого профиля на основе предложенной методики проектирования технологических процессов формообразования изогнутых тонкостенных профилей при других конструкциях двухвалковых гибочных машин компьютерным моделированием.
5. Определить при получении изогнутого профиля методом гибки-формовки влияние глубины внедрения формовочных валков, наносящих гофры на донную часть тонкостенного профиля трапециидального поперечного сечения, и формовочных валков, наносящих гофры на боковые полки профиля, на качество и получаемый радиус изгиба готовой панели.

Методы исследований. Численное моделирование процессов гибки проведено методом конечных элементов с использованием соответствующих математических моделей в программном комплексе LS-Dyna.

Натурные эксперименты проводились на специально созданной экспериментальной установке, позволяющей гнуть тонколистовые профили повышенной жесткости по двум схемам гибки: трехвалковой гибочной машине со всеми жесткими валками и двухвалковой гибочной машине с одним жестким валком и другим валком, облицованным эластичным покрытием, в лаборатории кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в НИИТАвтопроме.

Научную новизну имеют следующие результаты:

- методика проектирования технологических процессов гибки тонколистовых профилей повышенной жесткости, учитывающая возможное гофро- и складкообразование в результате местной потери устойчивости отдельных элементов профиля, упругопластические свойства листового материала, контактное взаимодействие инструмента с заготовкой, и позволяющая изготавливать изогнутые детали заданных геометрических размеров при отсутствии признаков брака деформационного характера;
- результаты натурных и численных экспериментов, показывающие, что при гибке тонкостенных профилей повышенной жесткости на двухвалковых гибочных машинах с одним жестким валком и другим валком, облицованным эластичным покрытием, гофрообразование может происходить не только в зоне сжатия профиля, но также и в зоне растяжения;
- методика определения оптимальных геометрических размеров поперечного сечения тонкостенного профиля по критерию максимально накрываемой этим профилем площади, учитывающая внешние нагрузки, действующие на готовую деталь, и позволяющая выдавать техническое задание на проектирование технологического процесса гибки данного профиля.

Практическую значимость имеют следующие результаты:

- создана математическая модель процесса изгиба тонколистовых профилей повышенной жесткости, учитывающая свойства материала тонколистового профиля и его взаимодействие как с жестким инструментом, так и одновременно с жестким и эластичным инструментами, позволяющая делать вывод о качестве изогнутой детали: отсутствие признаков брака деформационного характера (неконтролируемых гофров, складок, разрывов), и полностью определять размеры и напряженно-деформированное состояние готовой детали;
- на основании проведенных натурных и численных экспериментов показана необходимость нанесения заданных гофров на поверхности прямого тонколистового профиля повышенной жесткости корытообразного поперечного сечения для получения из него изогнутой детали;
- выявлено влияние глубины внедрения формовочных валков, наносящих гофры на боковые полки тонкостенного профиля повышенной жесткости

при гибке-формовке профиля, и установлена оптимальная величина этого внедрения, при которой получается качественная изогнутая деталь; показано, что разработанная методика проектирования технологических процессов гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости позволяет получать детали заданных геометрических размеров, выдавать техническое задание на проектирование гибочного инструмента и выбирать мощность привода оборудования, необходимого для осуществления данного процесса гибки.

Апробация работы. Основные положения и материалы работы доложены и обсуждены на IV Научной сессии «Проблемы повышения эффективности технологических процессов в заготовительных производствах» (г. Москва, 1998), Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» (г. Москва, 1998), на научных семинарах кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 3 печатные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 54 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 195 наименований.

Автор защищает:

- методику проектирования технологических процессов гибки тонколистовых профилей повышенной жесткости, учитывающую возможное гофро- и складкообразование в результате местной потери устойчивости отдельных элементов профиля, упругопластические свойства листового материала, контактное взаимодействие инструмента с заготовкой, и позволяющую изготавливать изогнутые детали заданных геометрических размеров при отсутствии признаков брака деформационного характера;
- математическую модель процесса изгиба тонколистовых профилей повышенной жесткости, учитывающую свойства материала тонколистового профиля и его взаимодействие с инструментом и позволяющую делать вывод о качестве изогнутой детали по отсутствию признаков брака деформационного характера (неконтролируемых гофров, складок, разрывов) и полностью определять размеры и напряженно-деформированное состояние готовой детали;
- методику определения оптимальных геометрических размеров поперечного сечения тонкостенного профиля по критерию максимально покрываемой этим профилем площади, учитывающую внешние нагрузки, действующие на готовую деталь, и позволяющую выдавать техническое задание на проектирование технологического процесса гибки данного профиля;

- результаты натурных и численных экспериментов, показывающие необходимость нанесения заданных гофров на поверхности прямого тонколистового профиля повышенной жесткости корытообразного поперечного сечения для получения из него изогнутой детали;
- результаты численных экспериментов по гибке-формовке тонкостенного профиля повышенной жесткости трапециидального поперечного сечения, выявившие влияние основных технологических параметров гибочного устройства на качественные и количественные характеристики получаемой готовой изогнутой детали.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и сформулирована ее цель.

В первой главе проведен анализ литературных источников, посвященных вопросу получения изогнутых тонкостенных деталей рассматриваемых сечений.

В результате проведенного исследования установлено, что основным фактором, влияющим на получение качественного изогнутого тонкостенного профиля, является потеря устойчивости элементов профиля, находящихся в сжатой зоне, приводящая к недопустимому гофро- и складкообразованию. Поэтому, для устранения этого явления используют специальные приемы: или наложение дополнительных растягивающих напряжений, например при гибке с растяжением, или применение специальных конструктивных элементов, выполненных обычно из эластичной среды, которые накладывая дополнительное внешнее давление, затрудняют тем самым процесс гофро- и складкообразования. Также применяется специальное нанесение управляемых гофров на определенные участки профиля, как в методе гибки-формовки, в результате чего исключается недопустимое гофрообразование. Но существующие методики анализа потери устойчивости или основаны на значительных упрощающих положениях, или требуют проведения дорогостоящих экспериментальных исследований в условиях, максимально приближенных к реальному процессу формоизменения.

При определении энергосиловых параметров процесса получения изогнутых тонкостенных деталей большинство исследователей рассматривают профиль как балку, изгибаемую на определенный радиус, что не описывает весь реальный механизм деформирования, при котором возможны повороты и сдвиги различных сечений профиля. Также практически не учитывается взаимодействие деформируемой детали с инструментом, а в случае элас-

тичного инструмента не учитывается его реальное объемное напряженно-деформированное состояние.

Данный анализ также показал, что в настоящее время отсутствует методика определения оптимального поперечного сечения тонкостенного профиля, учитывающая реальные внешние нагрузки, действующие на строительные сооружения.

В соответствии с поставленной целью работы были сформулированы указанные выше задачи исследования.

Во второй главе разработана методика определения оптимальных размеров как прямого, так и изогнутого тонкостенного профиля трапециевидального сечения, а именно угла подгибки полки α и отношения ширины стенки к периметру всего поперечного сечения профиля η . Данные величины зависят только от безразмерного коэффициента нагружения K , содержащего в себе информацию о конструкции (рис.1):

$$K = 12 \frac{M_{\max}^*}{[\sigma] \delta p},$$

где $M_{\max}^*$ – максимальный погонный момент, действующий в сечении строительной панели, $[\sigma]$ – допустимое напряжение для материала данной конструкции, p – исходный периметр поперечного сечения профиля, δ – толщина листовой заготовки.

В третьей главе разработана методика моделирования процесса гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости на основе численного решения методом конечных элементов уравнений движения сплошной среды, уравнений моментной теории оболочек и упругопластического течения материала с уравнением энергетического условия пластичности.

Исходная тонколистовая заготовка разбивается на четырехугольные оболочечные конечные элементы, так как треугольные конечные элементы вследствие своей избыточной жесткости могут приводить к появлению ложных сдвиговых, а также и мембранных напряжений, вызывающих большие погрешности в вычислениях. На первых этапах применяются оболочечные элементы Belytschko-Wong-Chiang, для обработки которых используется локальная система координат, связанная с самим конечным элементом, а деформации рассматриваются как малые. На последнем, окончательном, этапе моделирования используется оболочечные элементы Hughes-Liu, являющиеся дегенерированными трехмерными элементами сплошной среды, причем в них рассматриваются конечные деформации.

В основе всех этих элементов лежит гипотеза плоской нормали Миндлина, учитывающая сдвиговые деформации, которые возникают при гибке профиля при появлении гофро- и складкообразования. Оба этих оболочечных элемента учитывают перемещения и повороты элемента как жесткого

целого и исключают эти перемещения из расчета деформаций. Для каждого элемента используется сокращенная схема интегрирования по площади с одной точкой интегрирования, находящейся в центре элемента. Но, так как при моделировании задается реальная толщина тонколистового профиля, то по толщине элемента берутся 5 точек интегрирования, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга.

Для описания поведения металлического листа выбрана модель упругопластического тела с линейным кинематическим упрочнением, которая позволяет также учитывать эффект Баушингера, что может потребоваться для расчета окончательных геометрических характеристик готовой детали после пружинения.

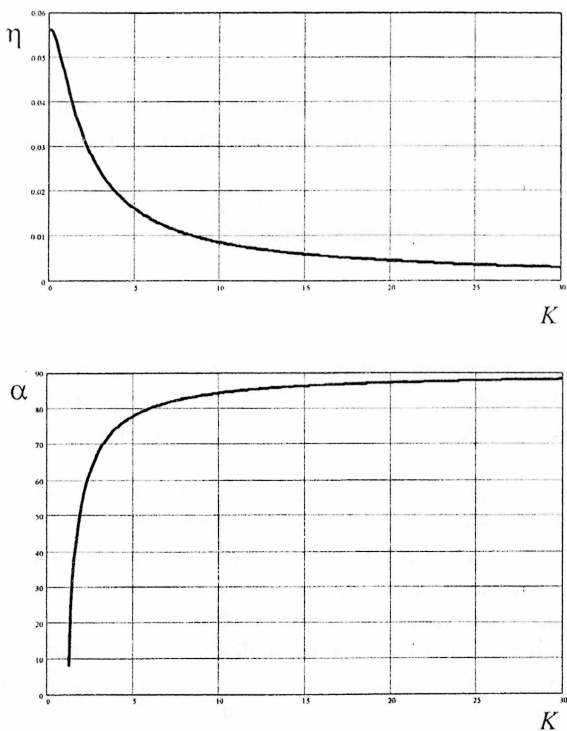


Рис. 1. Зависимость оптимального отношения ширины стенки к периметру всего профиля η и оптимального угла подгибки полки α (град) трапецидального профиля от коэффициента нагружения K

При кинематическом упрочнении радиус поверхности нагружения остается постоянным и равным σ_s – начальному напряжению текучести данного материала, а центр ее вместе с самой поверхностью перемещается в направлении пластической деформации. Условие пластичности Мизеса записывается в следующем виде:

$$\frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \frac{\sigma_s^2}{3} = 0,$$

где $\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij}$ – текущий радиус поверхности нагружения, s_{ij} – компоненты девиатора напряжений, α_{ij} – координаты центра новой поверхности текучести.

Материал рассматривается гипотетическим, и поэтому напряжения можно явно проинтегрировать по времени:

$$\sigma_{ij}(t + dt) = \sigma_{ij}(t) + \dot{\sigma}_{ij}(t) dt,$$

откуда производная по времени тензора напряжений Коши $\dot{\sigma}_{ij}(t)$ будет определяться с учетом вращения тела как жесткого целого следующими уравнениями:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^{\nabla} + \sigma_{ik} \omega_{kj} + \sigma_{jk} \omega_{ki},$$

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl},$$

где ω_{ij} – тензор завихренности, σ_{ij}^{∇} – тензор скоростей напряжений Яумана, а ϵ_{ij} – тензор скоростей деформаций, матрица C_{ijkl} , являющаяся тензором четвертого порядка, это матрица, зависящая от напряжений, и связывающая напряжения и деформации (в упругой области это матрица упругих констант).

Жесткий инструмент разбивается на оболочечные элементы Belytschko-Tsay, как самые простые, и для его описания используется модель материала как абсолютно жесткого тела. Из-за того, что такая конечно-элементная модель не деформируется, а только перемещается и вращается как жесткое целое, значительно сокращается время на ее обработку.

Полиуретановые детали (эластичный слой на жестких валках) разбиваются на шестигранные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы. Так как полиуретан является фактически абсолютно несжимаемым телом, то применение полной схемы интегрирования по объему приводит к блокировке изгибных деформаций в конечных элементах. Чтобы избежать этой блокировки, в вычислениях используется среднее гидростатическое давление по всему элементу, для чего применяется упрощенная схема интегрирования по объему конечного элемента с одной точкой интегрирования, находящейся в его центре.

Для моделирования полиуретана используется модель несжимаемого гиперупругого тела Муни-Ривлина, вводящая функцию плотности энергии деформации

$$W(I_1, I_2, I_3) = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + C\left(\frac{1}{I_3^2} - 1\right) + D(I_3 - 1)^2,$$

где A, B, C, D – коэффициенты модели, а I_1, I_2, I_3 – первый, второй и, соответственно, третий инварианты тензора конечных деформаций Грина-Сен-Венана L_{ij} .

Данная модель описывает объемное напряженно-деформированное состояние полиуретана, возникающее при использовании его для гибки листовых и профильных деталей, так как на величины самих напряжений и деформаций не накладывается никаких ограничений, и они могут быть сколь угодно большие.

Для описания контактного взаимодействия между деформируемой деталью и различными инструментами предварительно выбираются и задаются следующие контактные пары: жесткий валок – металлический профиль, жесткий валок – эластичный валок, металлический профиль – эластичный валок, для обработки которых используется контактный алгоритм, основанный на методе штрафов.

Для описания трения используется закон Кулона:

$$F_t = \mu F_n,$$

где F_t – касательная сила трения в контакте, F_n – нормальная сила в контакте, μ – коэффициент трения. Если $F_t > F_t^{\max}$, то сила трения берется наименьшей из этих двух величин.

Так как используется явная схема интегрирования по времени, которая является условно устойчивой, то шаг по времени Δt выбирается из условия устойчивости данной схемы

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit},$$

где критическое приращение времени Δt_{crit} зависит от характеристического размера наименьшего элемента во всей КЭ модели.

В четвертой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости (рис. 2) на трехвалковой гибочной машине со всеми жесткими валками и двухвалковой гибочной машине с одним жестким валком и одним валком, облицованным полиуретаном (рис. 3).

Для экспериментального исследования были изготовлены тонкостенные профили корытообразного поперечного сечения из металлической лены

ты трех типов: 1) консервной жести ХЛЖК из низкоуглеродистой стали 08кп толщиной 0,32 мм по ГОСТ 13345-85, 2) алюминиевой консервной ленты из сплава АМг 2, толщиной 0,29 мм, 3) алюминиевой ленты из сплава 8111, толщиной 0,21 мм.

Как эксперимент, так и численный анализ показали наличие при гибке по трехвалковой схеме поперечных гофров, которые образуются в зоне сжатия при гибке профиля в арку, в зоне же растяжения, находящейся в нижней, куполообразной части поперечного сечения профиля, гофры отсутствуют.

Для проведения численного моделирования гибки профилей на двухвалковой гибочной машине для полиуретана марки СКУ-ПФЛ были определены константы закона Муни-Ривлина. Как эксперименты, так и численное моделирование показали наличие поперечных гофров не только в зоне сжатия, но также и в зоне растяжения профилей, что можно объяснить переформовкой за счет действия упругой среды (рис. 4). Также наблюдается большая переформовка металла в районе замковых частей профиля, которые находятся в зоне сжатия и воспринимают самые большие продольные сжимающие напряжения не получая одновременно достаточно жесткой поддержки от эластичной оболочки.

Сравнение экспериментальных данных и данных численного моделирования по гибке тонкостенных профилей корытообразного поперечного сечения из различных материалов показало высокую достоверность предложенных математических моделей, лежащих в основе методики моделирования процессов гибки. Численное моделирование достоверно предсказывает место образования гофров, а расхождение геометрических характеристик этих гофров находится в пределах 15...20% при использовании только жесткого инструмента и 17...27% при совместном использовании как жесткого, так и эластичного инструментов.

Также по данной методике моделирования были проведены исследования гибки тонкостенных профилей из стали 08кп корытообразного и трапециидального поперечных сечений при других вариантах двухвалковых гибочных машин с одним валком, облицованным полиуретаном. На основании проведенных исследований показана необходимость нанесения заданных гофров на поверхности прямого тонколистового профиля повышенной жесткости корытообразного поперечного сечения для получения из него изогнутой детали, пригодной для использования в быстровозводимых сооружениях, при различных конструктивных схемах валковых гибочных машин.

В пятой главе приведены результаты исследования процесса гибки-формовки тонкостенных профилей повышенной жесткости и разработана методика проектирования технологического процесса гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости на основе численного моделирования процесса гибки.

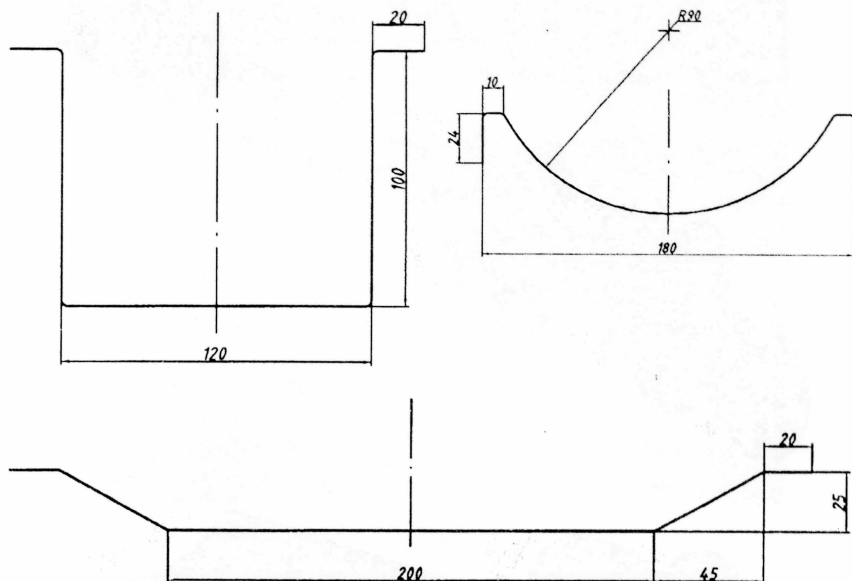


Рис. 2. Тонкостенные профили повышенной жесткости, использованные в исследованиях

Проведенное исследование влияния глубины внедрения формовочных валков, наносящих гофры на боковые полки тонкостенного профиля повышенной жесткости, выявило оптимальную величину внедрения, при которой глубина гофров возрастает от нуля у замковой части профиля до наибольшего значения у донной части профиля, что полностью устраняет неконтролируемое гофрообразование, приводящее к изготовлению некачественной детали (рис. 5).

Проведенное исследование влияния глубины внедрения формовочных валков, наносящих гофры на донную часть профиля (стенку), на радиус получаемой изогнутой панели позволяет определять технологические параметры гибочного устройства, т.е. его способность изготавливать изогнутые панели в диапазоне заданных техническим заданием радиусов.

На основе проведенных исследований создана методика проектирования технологических процессов гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости, позволяющая давать заключение о качественных и количественных характеристиках изготавливаемых деталей и выдавать техниче-

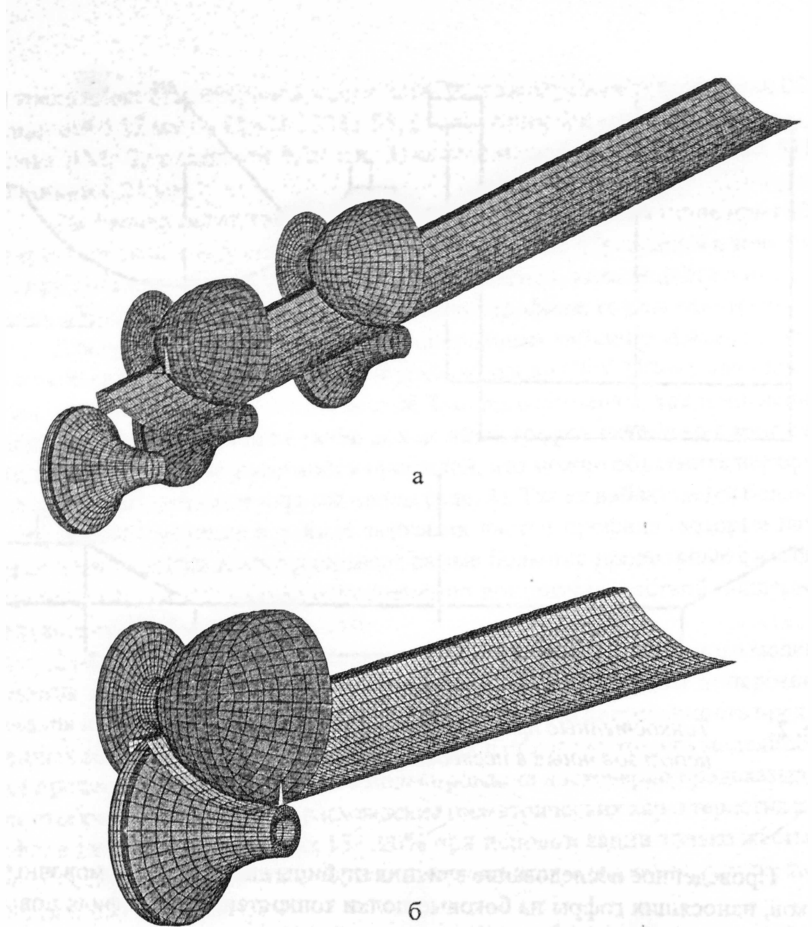
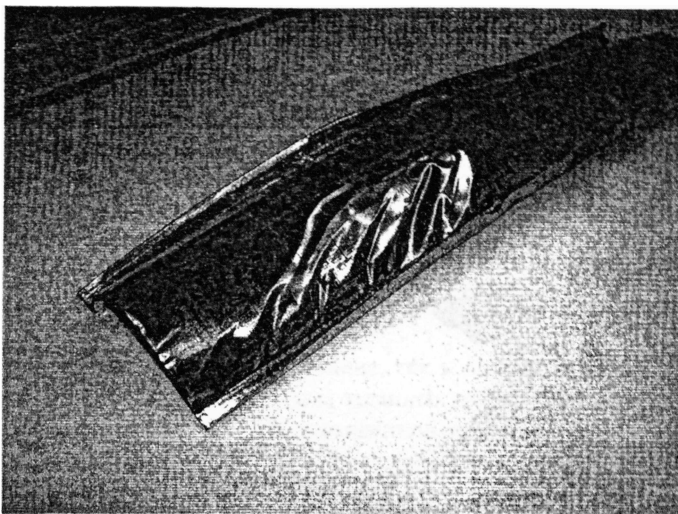


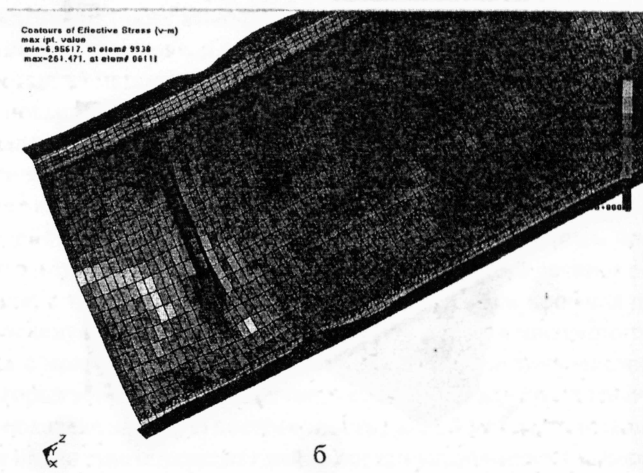
Рис. 3. *Модели экспериментальной установки в виде:*
а) трехвалковой гибочной машины; б) двухвалковой гибочной
машины с одним валиком, покрытым полиуретаном

кое задание на проектирование гибочного инструмента и выбора привода соответствующей мощности, необходимых для осуществления данного процесса гибки.

В заключении сформулирована научная новизна данной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту и сделаны выводы по всей работе.



а



б

Рис. 4. Панели из консервной жести толщиной 0,32 мм, изогнутые на двухвалковой гибочной машине:
 а) натурный эксперимент; б) численное моделирование

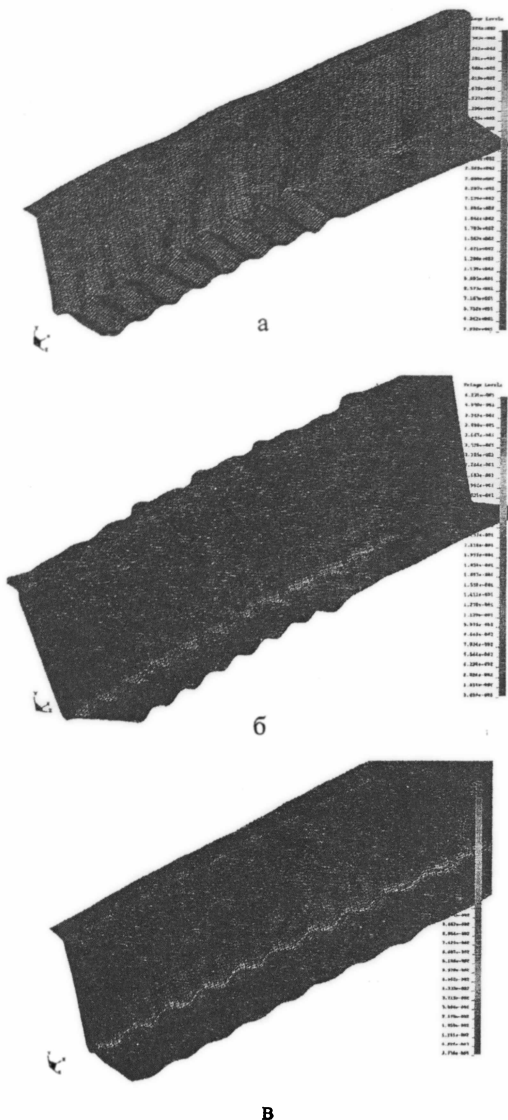


Рис. 5.

Детали, получаемые при гибке-формовке: а) с недоформованными поперечными гофрами на боковых полках профиля; б) с переформованными поперечными гофрами на боковых полках профиля; в) качественная деталь с нормально сформованными поперечными гофрами на боковых полках профиля

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработанная методика определения оптимальных геометрических размеров поперечного сечения тонкостенного профиля трапециидального сечения по критерию максимально накрываемой площади с учетом действующих внешних нагрузок (например снежных, ветровых, различных насыпок), позволяет выбирать оптимальные строительные профили, обеспечивающие минимальные затраты металла и времени, необходимых для изготовления быстровозводимых сооружений, и выдавать техническое задание на проектирование технологического процесса гибки этих профилей.
2. Как экспериментальное исследование, так и численное моделирование выявило необходимость нанесения заданных гофров на поверхности прямого тонколистового профиля повышенной жесткости корытообразного поперечного сечения для получения из него изогнутой строительной панели, совмещающей в себе функции несущего элемента и ограждающего покрытия, так как при гибке на трехвалковых гибочных машинах образуются неконтролируемые и нерегулярные гофры в результате потери устойчивости элементов профиля, находящихся в зоне сжатия, а при гибке профиля на двухвалковых гибочных машинах с одним валком, облицованным эластичным покрытием, данные гофры образуются не только в зоне сжатия, но также выходят и в зону растяжения, что объясняется дополнительной формовкой эластичной средой.
3. Разработанная математическая модель процесса гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости учитывает упругопластические свойства материала профиля, как на стадии упругого деформирования и перехода в пластическое состояние с дальнейшим упрочнением, так и при разгрузке с учетом эффекта Баушингера, а также контактное, с учетом трения, взаимодействие профиля как с жестким, так и с эластичным инструментами, что позволяет определять напряженно-деформированное состояние заготовки, а также возможную потерю устойчивости профиля при гибке и его последующее пружинение. Сравнение данных численного моделирования с экспериментальными данными по гибке тонколистовых профилей корытообразного поперечного сечения на валковых гибочных машинах показало высокую достоверность данной математической модели, которая правильно определяет место потери устойчивости элементов профиля, а расхождение в размерах получившихся гофров не превышает 20% для случая деформирования только жесткими инструментами и 27% для случая деформирования с использованием жесткого и эластичного инструмента.

4. Проведенное исследование влияния глубины внедрения формовочных валков, наносящих гофры на боковые полки тонкостенного профиля трапецидального поперечного сечения повышенной жесткости при гибке-формовке профиля, выявило оптимальную величину внедрения, при которой глубина гофров возрастает от нуля у замковой части профиля до наибольшего значения у донной части, что полностью устраняет неконтролируемое гофрообразование, приводящее к изготовлению некачественной детали.
5. Разработанная методика проектирования технологических процессов гибки тонкостенных профилей повышенной жесткости на основе численного моделирования этих процессов позволяет изготавливать детали заданных геометрических размеров при отсутствии признаков брака деформационного характера: складкообразования, неуправляемого гофрообразования, разрыва заготовки, а также выдавать техническое задание на проектирование инструмента и выбирать привод соответствующей мощности для оборудования, необходимого для осуществления данного технологического процесса.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Масликов И.А., Чередниченко А.В. Влияние отжига на угол пружинения тонких листов из сплава АМг-2 // Технология металлов. – 1998. – №2. – С. 9-10.
2. Прогрессивная технология производства элементов строительных конструкций и их сборки методом пластического деформирования / В.Г. Кондратенко, И.А. Масликов, А.В. Чередниченко, М.И. Насупкин // Технология металлов. – 1998. – №2. – С. 15-22.
3. Разработка комплекса мобильного оборудования для производства элементов строительных конструкций / В.Г. Кондратенко, И.А. Масликов, А.В. Чередниченко и др. // Машиностроительные технологии: Сб. тез. докл. ВНТК. – М., 1998. – С. 128.