

05.23.01

А 615

Государственный комитет СССР по народному образованию
Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

АМЕНД ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 624.014.2:693.814

РАЗРАБОТКА ЭКОНОМИЧНЫХ БЕЗЗАЩЕЧНЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИ
ДЕФОРМИРУЕМОЙ СТЕНКОЙ

05.23.01 "Строительные конструкции
здания и сооружения"

А Т О Р Е Б Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
1989

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте
им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук
профессор Клыков Н.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор Бирюлев В.В.,
кандидат технических наук
доцент Сушенцев Б.М.

Ведущая организация: институт ЦНИИПроектстальконструкции
им. Н.П. Мельникова.

Заседания диссертации состоится 24 января в 10 часов
на заседании специализированного совета К 0531305 при Челябинском
политехническом институте им. Ленинского комсомола по адресу:
454080, г. Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76, ЧПИ,
ученый совет.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке института.

Вами отозваны на автореферат в двух экземплярах, заверенных
гербовой печатью, просим выслать по указанному адресу.

Автореферат разослан 21 декабря 1989

Ученый секретарь
специализированного
совета кандидат
технических наук
доцент

Г.В. Трегулов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность темы. Важнейшей задачей повышения эффективности капиталовложений является снижение материоемкости, стоимости и трудоемкости капитального строительства. Большую часть общего объема возводимых сооружений составляют металлоконструкции разрезных двутавровых балок. Одним из путей уменьшения их материоемкости является беззатяжечное предварительное напряжение, которое производится посредством деформирования частей сечения относительно друг друга с последующим объединением в единое целое. Известные решения преднапряженных таким образом балок позволяют получить значительную экономию металла, но это сопровождается применением дорогостоящих высокопрочных сталей, и экономия стоимости конструкции несущественна.

Одним из направлений дальнейшего совершенствования беззатяжечных преднапряженных балок является их эксплуатация в упруго-пластической стадии. Ранее это глубоко не изучалось, хотя в ряде случаев позволяет отказаться от высокопрочной стали и наряду с экономией металла получить и экономию стоимости.

Таким образом, изучение упруго-пластически деформируемых беззатяжечных преднапряженных балок является актуальной задачей.

Диссертация выполнена в соответствии с подпрограммой 0.55.16Ц "Разработать и внедрить новые эффективные строительные конструкции высокой заводской готовности" (раздел 02.03.03.03.СII) целевой комплексной программы Госстроя СССР О.Ц.03I и координационным планом ИЭС им. Патона Е.О. Академии наук УССР.

Целью работы являлась разработка экономичных беззатяжечных предварительно напряженных двутавровых балок, работающих в упруго-пластической стадии.

Научная новизна работы заключается в установленных закономерностях распределения температур при сварке тонкостенных тавровых соединений и влияния сварки на напряженно-деформированное состояние беззатяжечных предварительно напряженных балок, а также в обосновании возможности развития пластических деформаций в растянутой части стенки таких конструкций.

Практическая ценность работы состоит в разработанных уточненных методах расчета напряженно-деформированного состояния беззатяжечных преднапряженных балок с упруго-пластически деформируемой стенкой и температурных полей при их изготовлении, что позво-

ляет проектировать и эффективно применять подобные балки в качестве несущих конструкций производственных зданий. Методика расчета напряженно-деформированного состояния двутавровых стержней с учетом влияния сварки поясных швов может быть с успехом использована также и при проектировании обычных конструкций.

Внедрение результатов. Разработанная в диссертации методика расчета напряженно-деформированного состояния использовалась на Канском заводе легких металлоконструкций при внедрении операции инфракрасного нагрева гибких стенок ригелей и прогонов типовых зданий "Канск" для назначения минимально необходимой температуры нагрева. Годовой экономический эффект от внедрения составил 57 тысяч рублей.

На защиту выносятся:

- конструкции упругопластически деформируемых балок с предварительно сжатым верхним поясом и балок с предварительно растянутой стенкой;
- инженерный способ расчета температурных полей при сварке тонкостенных тавровых соединений;
- методика расчета напряженно-деформированного состояния беззатяжечных предварительно напряженных балок с учетом влияния сварки поясных швов, реализованная в виде ЭВМ-программы;
- рекомендации по расчету прочности, устойчивости и деформативности беззатяжечных преднапряженных балок.

На основании результатов, полученных в диссертации, решена актуальная задача снижения приведенных затрат на изготовление беззатяжечных предварительно напряженных балок.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научных конференциях Челябинского политехнического института в 1985...88 гг.; IX и X научно-технических конференциях молодых специалистов Всесоюзного объединения "Союзметаллостройпроект" в гг. Йданове (1985 г.) и Магнитогорске (1987 г.); Всесоюзной конференции "Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве" (Челябинск, 1986); VI Всесоюзной конференции "Экспериментальные исследования инженерных сооружений" (Новополоцк, 1986); региональном научно-техническом семинаре "Современное состояние и перспективы применения стальных предварительно напряженных конструкций в строительстве" (Челябинск, 1986); Всесоюзном научно-техническом совещании "Экспе-

риментальные исследования и испытания строительных металлоконструкций" (Львов, 1987); IV Украинской республиканской научно-технической конференции по металлическим конструкциям (Симферополь, 1988). Доклад по диссертации был сделан на заседании кафедры строительных конструкций Уральского политехнического института им. С.М.Кирова и на заседании секции экспериментальных исследований института ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, получено авторское свидетельство и три положительных решения на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов по работе, списка использованной литературы из 81 наименования и приложения, изложена на 81 странице машинописного текста, содержит 20 таблиц и 45 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Постановка задач исследования

Исследование новых конструктивных форм беззатяжечных преднапряженных балок, их напряженно-деформированного состояния и оптимизации сечения посвящены работы А.А.Акимова, М.И.Беккермана, Е.И.Белени, В.В.Бирюлева, Е.И.Вайнштейна, В.М.Вахуркина, Ю.В.Гайдарова, И.Г.Гордина, В.Г.Дубовика, А.А.Зенина, Я.Карчевский, И.Г.Клинова, С.И.Клинова, Н.Б.Козымина, В.А.Крачуга, В.И.Лабзенко, И.В.Левитанского, М.Лубиньски, Б.И.Мазо, И.И.Набокова, И.К.Погадаева, Э.А.Рывкина, М.Тохачека, П.Ференчика, В.И.Шимановского, В.Ф.Яресько. Анализ основных способов изготовления рассматриваемых перечисленными авторами конструкций показал, что значительное преимущество перед другими имеет способ преднапряжения путем теплового удлинения напрягаемых элементов, так как он технологичен, позволяет совместить операции предварительного напряжения, сборки, сварки поясных швов и правки грибовидности полок, а также повысить величину преднапряжения (в этом случае удлинение напрягаемого элемента не ограничивается деформацией, соответствующей пределу текучести материала).

Будем продольного удлинения элементов сечения с помощью нагрева можно реализовать четыре основных способа беззатяжечного

преднапряжения двутавровых балок: а) растяжение нижнего пояса; б) растяжение стенки; в) сжатие верхнего пояса (нагрев стенки и нижнего пояса на одинаковую температуру); г) сжатие верхнего пояса и растяжение нижнего (нагрев стенки на температуру T и нижнего пояса на температуру $2T$). Пластическое деформирование металла рассматривается в известных публикациях только при преднапряжении по двум из этих способов: в балках с предварительно растянутым нижним поясом и в балках с предварительно сжатым верхним и растянутым нижним поясами. При этом пластические деформации допускаются в сжатой зоне стенки, что требует увеличения ее толщины из-за опасности местной потери устойчивости.

При замене обычных двутавровых балок на преднапряженные экономия металла достигает 38 %, тогда как экономия стоимости конструкции значительно меньше и исчисляется несколькими процентами. Объясняется это тем, что экономический эффект достигается за счет рационального использования дорогостоящей высокопрочной стали. Развитие пластических деформаций в известных работах недлжащим образом не исследовано, хотя это могло бы дать существенную экономию стоимости.

Также представляется важным оценить влияние сварки на напряженно-деформированное состояние беззатяжечных преднапряженных балок. До сих пор это, как правило, глубоко не изучалось, хотя сжимающие остаточные сварочные напряжения могут привести к местной потере устойчивости стенки, так как подобные конструкции часто тонкостенные.

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать следующие задачи исследования, отвечающие поставленной в работе цели:

- предложить эффективные конструкции беззатяжечных предварительно напряженных балок, работающих в упругопластической стадии;
- разработать методику расчета температурных полей и напряженно-деформированного состояния в стержнях двутаврового сечения при совместном воздействии предварительного нагрева и сварки и при последующем нагружении;
- выполнить экспериментальную проверку теоретических результатов;
- разработать рекомендации по подбору сечения и расчету прочности, устойчивости и деформативности преднапряженных балок.

2. Эффективность беззатяжечных преднапряженных балок с упругопластической стадией работы

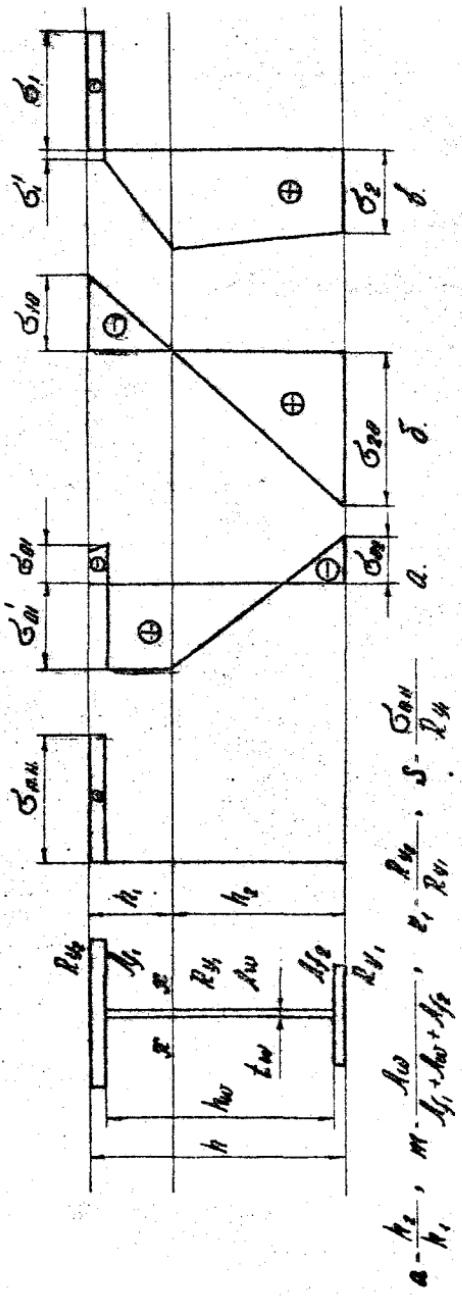
С целью определения эффективности упругопластически работающих беззатяжечных преднапряженных конструкций рассматривали развитие пластических деформаций на той или иной стадии работы балок с предварительно сжатым верхним поясом и балок с предварительно растянутой стенкой (то есть тех, в которых раньше это не изучалось).

Проведенный анализ показал, что в балках с предварительно сжатым верхним поясом допускать пластические деформации наиболее эффективно на стадии предварительного напряжения. При этом, если задать такую величину преднапряжения (то есть предварительного нагрева стенки и нижнего пояса), чтобы после сборосварки стержня стенка выше центра тяжести сечения была растянута пластически, то после приложения максимальной внешней нагрузки напряжения ниже центра тяжести будут приближаться к расчетному сопротивлению при упругой работе всех элементов сечения (рис. I). При определенных соотношениях геометрических размеров вся стенка оказывается растянутой, что дает возможность значительно увеличить ее гибкость по сравнению с обычными балками и получить экономию стали.

В балках с предварительно растянутой стенкой эффективнее допускать пластические деформации на стадии работы под нагрузкой. В этом случае стенка балки выполняется не из высокопрочной стали, как в известных ранее решениях, а из обычной. При приложении внешней нагрузки в нижней части стенки на высоте δh развиваются пластические деформации, пояс работает упруго (рис. 2). После снятия нагрузки эпюра предварительных напряжений $\sigma_{\text{бл}}^{\text{пн}}$ (рис. 2, а) трансформируется в эпюру $\sigma_{\text{бл}}$ (рис. 2, д). При последующих нагрузлениях балка работает упруго и эпюры $\sigma_{\text{бл}}$ и $\sigma_{\text{ст}}$ не изменяются.

В той и другой балке развиваются пластические деформации, и построить эпюры напряжений так же, как в упругоработавших балках, невозможно. Для этого использовали статические условия равновесия на стадии преднапряжения ($\sum N = 0$, $\sum M_x = 0$) и работы под нагрузкой ($\sum N = 0$, $\sum M_x = M$). Записывая эти уравнения, выражая их через безразмерные параметры a, m, γ, k, f (см. рис. I и 2) и преобразуя полученные соотношения, а также ограничивая напряжения расчетным сопротивлением стали соответствующих элемен-

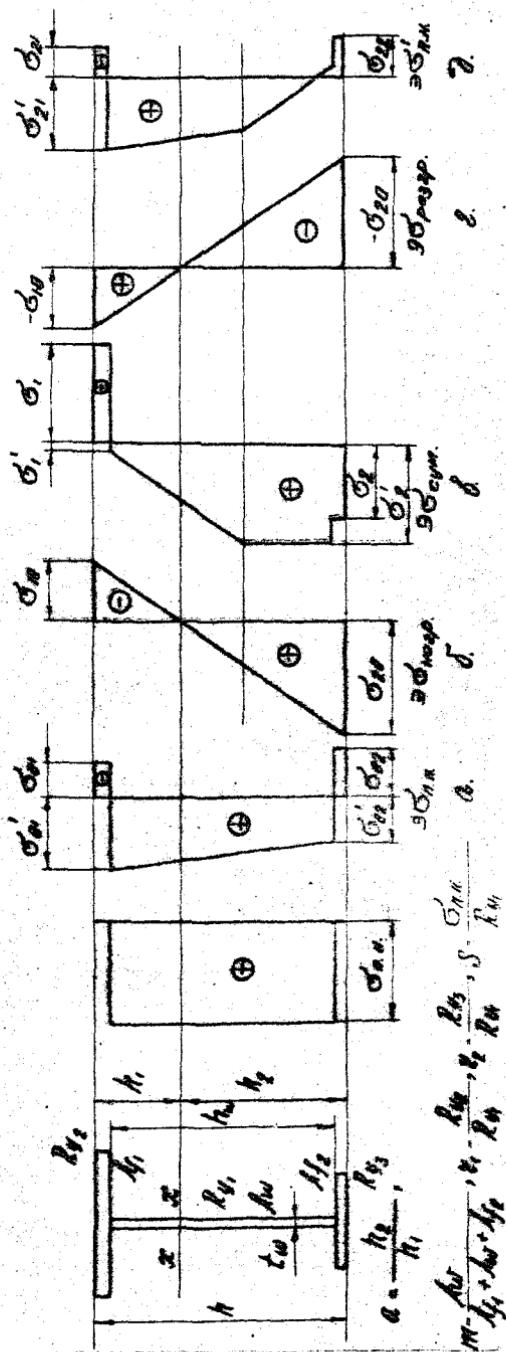
Напряженное состояние балки с предварительно сжатым верхним поясом



σ_0' - эпюра предварительных напряжений; σ - суммарная эпюра напряжений от внешней нагрузки; e - расстояние от центральной оси до точки действия внешней нагрузки

Рис. I

Напряженное состояние балки с предварительно растянутой стенкой



а - эпюра предварительных напряжений; б - эпюра напряжений от нагрузки;
в - суммарная эпюра напряжений; г - эпюра напряжений от разгрузки (одинаковая эпюра б); д - эпюра предварительных напряжений после разгрузки балки

Рис. 2

тов, находили выражения для требуемой площади сечения в виде:

$$A_{tp} = B \sqrt{\frac{M^2}{R_y^2 K}}, \quad (I)$$

где B – сложная функция от безразмерных параметров сечения (своя для каждого вида преднатяженных балок), M – расчетный изгибающий момент, R_y – расчетное сопротивление материала стенки, K – ее гибкость. Зная выражение для коэффициента B , на ЭВМ находили параметры наиболее рациональных сечений и составляли таблицы таких параметров для обеих балок. Критерием при этом служили приведенные затраты. Экономия последних в случае замены обычных сварных двутавровых балок составляет 20...25 %, а при замене типовых тонкостенных балок – 8...9 %.

Экономический эффект в предложенных конструкциях достигается главным образом за счет увеличения гибкости стенки при сохранении ее местной устойчивости (стенки обеих балок преимущественно растянуты). Пластические деформации допускаются только в растянутой части стенки преднатяженных балок. В результате этого: а) зона пластического деформирования ограничена упругоработающими поясами и остальной частью сечения, и прогиб балки увеличивается не так значительно, как если бы пластические деформации распространялись и на пояса; б) верхний пояс работает упруго, и его местная устойчивость сохраняется; в) местная устойчивость стенки также сохраняется даже при больших значениях ее гибкости.

Использование упругопластической стадии работы позволяет в балках с предварительно сжатым верхним поясом получить более выгодную для этих конструкций энору предварительных напряжений (это показывает сравнение значений коэффициента B с аналогичными значениями для упругоработающих балок), а в балках с растянутой стенкой отказаться от выполнения последней из высокопрочной стали.

На беззатяжечные предварительно напряженные балки с упругопластически деформируемой стенкой или на способы их изготовления в ходе работы над диссертацией получено авторское свидетельство и три положительных решения на изобретение.

Таким образом, на первом этапе работы предложены экономичные беззатяжечные двутавровые балки с упругопластически деформируемой стенкой и получены таблицы безразмерных параметров их рациональных сечений. На следующем этапе исследовали напряженно-

деформированное состояние подобных конструкций с учетом влияния сварки поясных швов.

3. Исследование напряженно-деформированного состояния при совместном действии предварительного нагрева и сварочных источников тепла и последующем нагружении

Формирование напряженно-деформированного состояния при изготавлении преднапряженных балок зависит от характера термических циклов и распределения температур по сечению, причем от точности определения последних в большой степени зависит и точность вычисления напряжений. В связи с этим на первом этапе исследования разрабатывали метод расчета температурных полей, образующихся в результате совместного действия предварительного нагрева и сварочных источников тепла.

Расчет температур при сварке тонкостенных тавровых соединений по известным формулам дает большую погрешность. Происходит это в силу того, что эффективную мощность сварочной дуги распределяют между элементами соединения пропорционально их толщинам, и температура в полке в любой момент времени получается во много раз больше температуры в стенке , что противоречит экспериментальным данным. В диссертации предложено уточнить подобные расчеты с помощью коэффициента распределения эффективной мощности сварочной дуги между стенкой и полкой K , который аппроксимируется в виде полинома:

$$K = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3 + A_4 \tilde{t} + A_5 \tilde{t}^2 + A_6 Z^3 + A_7 XZ + A_8 X\tilde{t}^2 + A_9 X^2 Z, \quad (2)$$

где $X = \tau V_{cb}$, $\tilde{t} = t_\omega / t_f$, τ - время прошедшее после пересечения дугой плоскости, в которой расположена рассматриваемая точка; V_{cb} - скорость сварки, t_ω и t_f - толщина стенки и полки. Таким образом, при расчете сварочных температур с учетом коэффициента K распределение эффективной мощности сварочной дуги изменяется по мере ее движения относительно рассматриваемого сечения и зависит от соотношения толщин стенки и полки. Для определения коэффициентов полинома $A_0 \dots A_9$ по методу конечных разностей вычисляли температурные поля при сварке двадцати пяти тонкостенных тавров с различными параметрами сечения и результаты такого расчета обрабатывали с помощью метода наименьших квад-

ратов. При этом выбирали неявную разностную схему, вычисление температур проводили способом итераций, в качестве граничного условия использовали выражение для удельного потока теплоты к границе между стенкой и полкой (в момент сварки сварочное тепло делилось поровну между стенкой и полкой, а в последующие моменты времени считалось, что между ними происходит теплообмен).

Экспериментальную проверку разработанной методики проводили при сварке шести тавров со стенкой 4 мм и полкой 9 мм. Результаты показали хорошее совпадение температур, рассчитанных с учетом коэффициента К, и экспериментальных данных.

На следующем этапе разрабатывали методику расчета напряженно-деформированного состояния беззатяжечных преднапряженных балок с учетом влияния сварки поясных швов. При этом использовали метод конечных элементов, для чего балку разбивали на прямоугольные элементы с двумя степенями свободы в каждом узле. Шаг разбивочной сетки по поперечному сечению был выбран переменным, более мелким у сварного шва. Температурную нагрузку определяли от совместного действия предварительного нагрева и сварочных источников тепла с учетом коэффициента распределения эффективной мощности сварочной дуги. Сборка системы уравнений осуществлялась с помощью матрицы индексов, причем вычисление общей матрицы жесткости конструкции производилось с ее построчным уплотнением. Решение системы уравнений выполнялось по способу Гаусса-Банахевича, использование которого позволяло быстро находить неизвестные перемещения для большого числа правых частей, так как прямой ход решения в этом случае выполнялся лишь один (первый) раз. Вычисление напряжений в упругопластической области осуществлялось по методу упругих решений (дополнительных нагрузок).

Изложенная методика реализована в виде оригинальной ЭВМ-программы "BEAM", текст которой приводится в приложении к диссертации. По этой программе производится вычисление деформаций (ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy}), интенсивности пластической деформации $\dot{\epsilon}_{ip}$, напряжений (σ_x , σ_y , τ_{xy}) в каждом конечном элементе, на которые разбивается балка, а также определяется общий прогиб конструкции на всех стадиях ее работы.

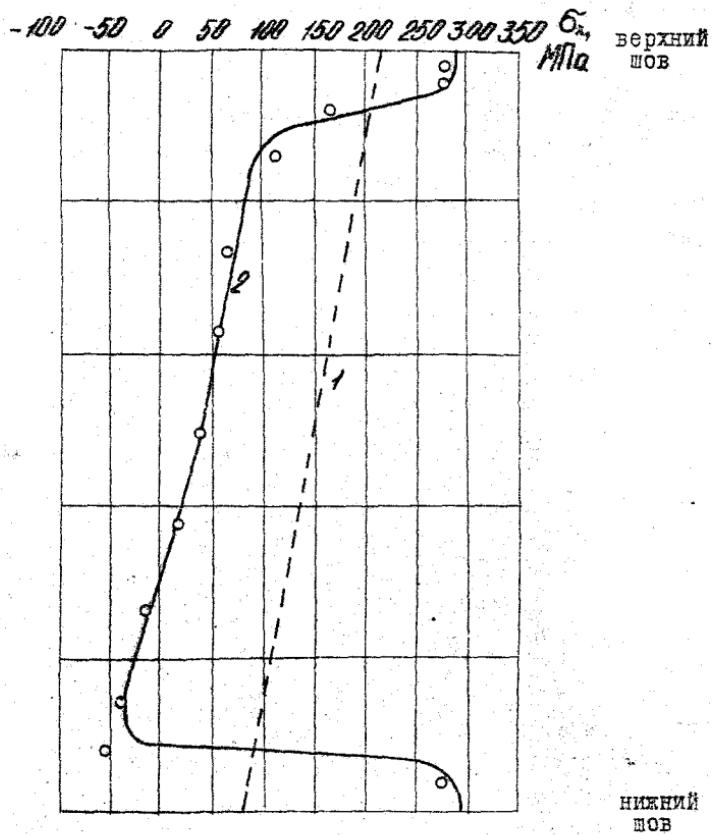
Экспериментальное исследование напряжено-деформированного состояния проводили на метровых тавровых и десяти шестиметровых двутавровых балках, изготовленных соответственно в лабораторных условиях и в цехе автосварки Челябинского ЗМК. При этом

во всех тавровых балках и в двух двутавровых разрушающим методом определяли начальное напряженное состояние, для чего их разрезали ручной ножовкой в двух и трех поперечных сечениях, предварительно наклеив тензорезисторы типа КФ-5. Отсчеты снимали с помощью измерителя деформаций ИДШ-1 до разрезания и после, по их разности вычисляли деформации и напряжения. Начальное напряженное состояние предварительно растянутой стенки одной из двутавровых балок показано на рис. 3. Оставшиеся семь двутавровых балок испытывали на действие статической нагрузки. При этом в каждой из балок по программе "BEAM" было определено исходное напряженно-деформированное состояние и его изменение при нагружении балки и последующей разгрузке. При испытаниях же контролировали по тензорезисторам приращение деформаций в двух поперечных сечениях и с помощью прогибомеров - прогибы; все балки доводились до такого состояния, при котором они не воспринимали увеличение внешней нагрузки. Результаты испытания подтвердили, что сжимающие сварочные напряжения могут вызывать и вызывают местную потерю устойчивости гибкой стенки беззатяжечных преднапряженных балок (сварочные напряжения в стенке уменьшали предварительные на 100...130 МПа - см. рис. 3), для предотвращения чего в диссертации рекомендуется увеличить температуру предварительного нагрева стенки на 30...40 °С. Это обеспечит местную устойчивость стенки, приблизит начальное напряженное состояние к идеализированным эпюрам предварительных напряжений (рис. 1, а и 2, а) и позволит использовать таблицы параметров рациональных сечений, полученные на первом этапе работы. При испытании экспериментальных балок их предельная нагрузка с увеличением температуры нагрева стенки повышалась даже при развитии значительных пластических деформаций в ее нижней части. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния по программе "BEAM" и его экспериментального определения хорошо совпадали между собой.

4. Практическое использование результатов работы

В диссертации даны общие рекомендации по подбору сечения и расчету беззатяжечных преднапряженных балок с упруго-пластически деформируемой стенкой, основанные на полученных в работе таблицах безразмерных параметров наиболее рациональных сечений и на методике расчета напряженно-деформированного состояния с учетом влияния сварки по программе "BEAM". Показано,

Теоретические начальные продольные напряжения в предварительно растянутой стенке сечением 500x3 мм /предварительный нагрев стенки на 120⁰C, нижнего пояса на 45⁰C/ и их экспериментальное значение



1 - предварительные напряжения, определенные без учета сварочных напряжений; 2 - начальные напряжения, рассчитанные по программе "BEAM" от совместного действия предварительного нагрева и сварочных источников тепла; точками показано экспериментальное значение напряжений.

Рис. 3

что подобные конструкции эффективно использовать в качестве строильных балок, двенадцатиметровых прогонов покрытия, балок перекрытия рабочих площадок и т.д. Экономия приведенных затрат при замене решетчатых или типовых тонкостенных конструкций на преднапряженные составит 8...15 %.

Разработанная в диссертации методика расчета напряженно-деформированного состояния использовалась на Канском заводе легких металлоконструкций при внедрении операции инфракрасного нагрева гибких стенок ригелей и прогонов типовых зданий "Канск" для назначения минимально необходимой температуры нагрева. Годовой экономический эффект от внедрения составил 57 тысяч рублей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны беззатяжечные преднапряженные балки, в растянутой части стенки которых развиваются пластические деформации, и найдены параметры их рациональных сечений. Указанные конструкции при замене обычных двутавровых балок с гибкостью стенки 100 позволяют получить экономию приведенных затрат до 20...25 %, что значительно больше чем в случае применения известных беззатяжечных преднапряженных балок.

2. Установлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния беззатяжечных преднапряженных балок и разработана методика его оценки с учетом влияния сварки поясных швов, что позволяет существенно повысить надежность расчета подобных конструкций, так как сварочные напряжения могут вызвать местную потерю устойчивости стенки.

3. Разработана уточненная методика расчета температурных полей при сварке тавровых соединений, позволяющая учесть влияние тонкостенности.

4. Установлено, что для снижения отрицательного влияния сварки на несущую способность беззатяжечных преднапряженных балок расчетную температуру предварительного нагрева стенки необходимо увеличивать на 30...40 °С.

5. Экспериментально подтверждено, что предельная нагрузка на беззатяжечные преднапряженные балки с увеличением температуры нагрева их стенки до максимально допустимого значения повышается за счет обеспечения ее местной устойчивости и что развитие ограниченных пластических деформаций в растянутой части

стенки балок не оказывает существенного отрицательного влияния на их прочность, устойчивость и деформативность.

6. Разработаны рекомендации по подбору сечения и расчету прочности, устойчивости и деформативности беззатяжечных преднапряженных балок с упругопластически деформируемой стенкой и обоснована эффективность их применения в качестве несущих конструкций производственных зданий.

7. Полученные в диссертации результаты использовались на Канском заводе легких металлоконструкций при внедрении операции инфракрасного нагрева гибких стенок ригелей и прогонов типовых зданий "Канск". Годовой экономический эффект от внедрения составил 57 тысяч рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Аменд В.А., Вайнштейн Е.И., Козьмин Н.Б. Исследование влияния предварительного удлинения стенки на напряженное состояние околоводной зоны тавровых соединений // Экспериментальные исследования инженерных сооружений: Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции, май 1986.- Новополоцк, 1986.- С.6.

2. Аменд В.А., Вайнштейн Е.И., Икрин В.А., Кравцов Ю.И. Использование механизма образования внутренних напряжений в сварных балках для повышения их несущей способности // Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве: Тезисы докладов Всесоюзной науч.-техн. конф., сентябрь 1986.- Челябинск, 1986.- С. 237-239.

3. Аменд В.А., Вайнштейн Е.И., Дубовик В.Г. Предварительно напряженные беззатяжечные балки с растянутой стенкой // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям: Техническое обозрение.- Челябинск: ЧИИ, 1987.- С. 48-52.

4. Вайнштейн Е.И., Аменд В.А., Дубовик В.Г., Долганов Я.В. Сравнительная оценка экспериментальных способов определения исходного напряженного состояния беззатяжечных предварительно напряженных балок // Экспериментальные исследования и испытания строительных металлоконструкций: Тезисы докладов Всесоюзного науч.-техн. совещания, 1987.- Львов, 1987.- С. 86-87.

5. Дубовик В.Г., Вайнштейн Е.И., Аменд В.А. Предварительно напряженные балки заводского изготовления // Развитие, совершенствование и реконструкция специальных сварных стальных конструкций зданий и сооружений: Тезисы докладов IV Украинской республи-

канской научн.-техн.конференции по металлическим конструкциям,
октябрь 1988.- Киев, 1988.- Сб.2.- С. 54.

6. Аменд В.А., Вайнштейн Е.И. Беззатяжечные предварительно
напряженные двутавровые балки с пластической стадией работы стен-
ки // Промышленное строительство.- 1988.- № II.- С. 16.

7. Аменд В.А., Вайнштейн Е.И., Березкин А.П., Плотицин А.В.
Тавровые балки с предварительно растянутой стенкой // Облегчен-
ные металлические и деревянные конструкции: Межвузовский сбор-
ник.- Казань: КХТИ, 1988.- С. 30-34.

8. А.с. I458527 СССР, МКИ Е 04 с 3/10 Двутавровая стальная
предварительно напряженная тонкостенная балка /Аменд В.А., Вайн-
штейн Е.И. (СССР) № 4Г76295/31-33; Заявл. 06.01.87; Опубл. 15.02.
89, Бюл. № 6.

9. Положительное решение ВНИИГЭ по заявке № 4376772/31-33
(022725), МКИ Е 04 с 3/10. Двутавровая предварительно напряженная
тонкостенная балка /Аменд В.А., Вайнштейн Е.И. (СССР). Заявл.
10.02.88.

10. Положительное решение ВНИИГЭ по заявке № 4423365/31-33
(047636), МКИ Е 04 с 3/10. Способ предварительного напряжения
двутавровой балки /Аменд В.А., Вайнштейн Е.И. (СССР). Заявл.
31.03.88.

II. Положительное решение ВНИИГЭ по заявке № 4376769/23-33
(022735), МКИ Е 04 с 3/10. Способ предварительного напряжения
балки таврового сечения /Вайнштейн Е.И., Аменд В.А., Дубович В.Г.
(СССР). Заявл. 10.02.88.

Личный вклад автора. В работах 3, 6, 8, 9, 10 автором обос-
нована возможность использования развития пластических деформа-
ций в растянутой части стеки беззатяжечных предварительно нап-
ряженных балок, предложены конструкции таких балок и найдены па-
раметры их рациональных сечений. В работах 1, 2, 4, 7 оценено
влияние сварки на напряженно-деформированное состояние предизапре-
женных конструкций и проведено экспериментальное определение ос-
таточных напряжений. В работах 7, II автором предложен двутавро-
вую балку с предварительно скатым верхним поясом и упругопласти-
чески деформируемой стенкой преобразовать в тавровую, передав
функции нижнего пояса гофру, который выполняется в нижней части
стеки тавра. В работе 5 совместно с соавторами предложены пути
дальнейшего развития беззатяжечных предизапряженных конструкций.

С.Бес