МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
Горьковский инженерно-строительный институт
имени В.П.Чкалова

КИСЕЛЕВ Валентин Николаевич

На правах рукописи

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ И НАКЛОННЫХ РЁБЕР НА ИЗГИБНУЮ И КРУТИЛЬНУЮ ЖЁСТКОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

/Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции/

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Горький
1974

МЦ № 32624 20/XI-74г., зак. № 282, тир. 200, ГИСИ,
Краснофлотская, 65.

Грандиозные перспективы развития строительства в СССР, намеченные XXIУ съездом КПСС, требуют для своей реализации разработки методов проектирования экономичных строительных конструкций и, в частности, металлических конструкций. Этот вопрос приобретает особое значение в свете предусматриваемого этим же постановлением задач экономии дефицитных строительных материалов и, прежде всего, строительных сталей. Снижение расхода стали оказывается возможным в результате использования факторов технического прогресса, основными из которых являются:

а/ внедрение стали повышенной и высокой прочности,

б/ применение экономичных прокатных, холодноформовочных и сварных профилей,

в/ создание новых, прогрессивных конструктивных форм.

Однако, нужно иметь ввиду, что стали повышенной и высокой прочности, обладая значительным пределом текучести и, в связи с этим, рядом других положительных свойств, в то же время имеют некоторые особенности, осложняющие и затрудняющие их практическое применение в строительстве. Одна из этих особенностей заключается в том, что вопрос, связанный с обеспечением общей устойчивости конструкции, как известно, для сталей высокой прочности менее благоприятно и выгодно, чем при обычных малоуглеродистых и низколигированных сталях. При этом следует заметить, что тонкостенные конструкции из сталей высокой прочности /а также и малоуглеродистых/, работающие на скручивающую нагрузку, требуют при существующих условиях проектирования назначения относительно больших геометрических размеров плоских элементов, исходя из необходимости обеспечения общей устойчивости и увеличения крутильной жёсткости стержня. В связи с этим, наряду с использованием факторов технического прогресса, требуется внедрение в практику строительства новых конструкций, обладающих повышенной жёсткостью и несущей способностью.

Анализ расхода стали и трудоёмкости изготовления показывает на преимущества укрепления тонкостенных балок,

работающих на изгиб с кручением, "противокрутильными связями"[x] перед способом утолщения полос, составляющих этот стержень.

Применение подкреплённых стержней ставит задачу дальнейшего развития существующих и разработку новых методов расчета, позволяющих решить проблему определения их действительной несущей способности и деформативности.

В реферируемой работе излагаются результаты теоретического исследования стержня открытого профиля с наклонными рёбрами жёсткости, работающего на изгиб и кручение связанных с решением следующих задач:

1) разработки общего метода расчёта тонкостенных призматических стержней открытого профиля с наклонными рёбрами жёсткости различного типа и геометрии, работающих на скручивающую нагрузку;

2) исследования влияния такого рода "противокрутильных связей" на изменение жёсткости чистого кручения и изгибной жёсткости тонкостенного стержня;

3) исследования влияния расстановки наклонных рёбер жёсткости по длине стержня, геометрических характеристик как самого стержня так и связей, угла наклона последних с продольной осью стержня и т.д. на деформативность, общую устойчивость и несущую способность подкреплённого тонкостенного стержня;

4) экспериментальным путём выявления действительного характера работы такого рода стержней на плоский изгиб и кручение.

В первых разделах автореферата излагается сущность диссертации, а в последнем разделе приводится структура ее и даются пояснения о распределении материала по главам.

---

x/ Под "противокрутильной связью" понимается здесь всякое конструктивное устройство, при постановке которого по длине тонкостенного стержня, происходит стеснение депланации поперечных сечений и вследствии этого достигается существенное увеличение крутильной жесткости /поперечные планки, решётка, трубочки, наклонные рёбра жёсткости и т.д./.

I. МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПОДКРЕПЛЁННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ НА ПЛОСКИЙ ИЗГИБ И КРУЧЕНИЕ

В диссертации дается обзор основных работ по исследованию тонкостенных призматических стержней открытого профиля с "противокрутильными связями", который показывает, что:

1. тонкостенные призматические стержни открытого профиля /швеллер, двутавр, коробчатое сечение, ⌐- образное сечение и т.д./ обладают относительно малой жёсткостью чистого кручения;

2. существуют методы, с помощью которых можно значительно повысить GJ_d, а следовательно и общую устойчивость такого рода стержней. /У В.И.Реута рассматривался случай подкрепления тонкостенных стержней, когда жёсткость чистого кручения увеличивается в 300 раз[x]/;

3. с точки зрения увеличения крутильной жёсткости подкреплённый стержень занимает некоторое промежуточное положение между стержнями с открытым профилем и стержнями с замкнутым контуром поперечного сечения;

4. современная теория в данном направлении содержит недостаточное количество работ. Кроме того, все реферируемые в данной диссертации работы рассматривают только определённый тип "противокрутильных и противоизгибных связей" и нет общего метода расчета;

5. не исследованы до сегодняшнего времени такие важные вопросы, как расстановка наклонных рёбер жёсткости по длине исследуемого стержня, влияние углов наклона рёбер к продольной оси стержня и выбор геометрии их с учётом наибольшей эффективности в смысле повышения жёсткости чистого кручения.

---

x) Реут В.И., Пространственная устойчивость некоторых типов плоских ферм. Изв. А.Н.СССР, ОТН, №9, 1956.

II. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТОНКОСТЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С РАЗЛИЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ НАКЛОННЫХ РЁБЕР ЖЁСТКОСТИ

Рассматривается двутавровый стержень несимметричного поперечного сечения с " t " числом наклонённых под углом α_{pi} к продольной оси листовых диафрагм с толщиной δ_{pi} и загружений согласно рис.Ia. Необходимо отметить, что из рассматриваемого здесь конкретного случая с очевидностью будет следовать возможность повторения подобных рассуждений для любого другого случая при расчёте такого типа стержней.

Полагается, что опорные закрепления стержня не превращают его в механизм в отношении кручения. Внешний крутящий момент $M_{кр}$ будет вызывать в поперечных сечениях стержня скручивающие моменты M_x, эпюра которых по длине стержня приведена на рис.Ia.

В каждом поперечном сечении часть $\bar{M}_x$ полного скручивающего момента M_x воспринимается за счёт касательных напряжений чистого кручения $\tau_{кр}$, а вторая часть, равная $M_x - \bar{M}_x = M_\omega$ и статически эквивалентная паре сил $X_j(x)$, лежащих в плоскостях поясов и являющихся для последних перерезывающими силами, будет вызывать изгиб поясов в их плоскостях.

Для получения основной системы исследуемый стержень расчленяется на ряд составляющих его полос и рассматривается работа каждой из этих полос самостоятельно. В данном случае произведено расчленение двутавровой балки на три полосы: стенку и два пояса (рис.Iб). Для правомерности самостоятельного рассмотрения работы каждой из этих полос прикладываются к их смежным кромкам некоторые усилия взаимодействия, заменяющие влияние отброшенных частей. Касательные усилия чистого кручения, приводящие к распределённым по поперечному сечению парам, не вызовут по линии разреза стенки и пояса /верхнего или нижнего/ каких-либо результирующих усилий, лежащих в серединных плоскостях полос; они вызовут лишь моменты, изгибающие

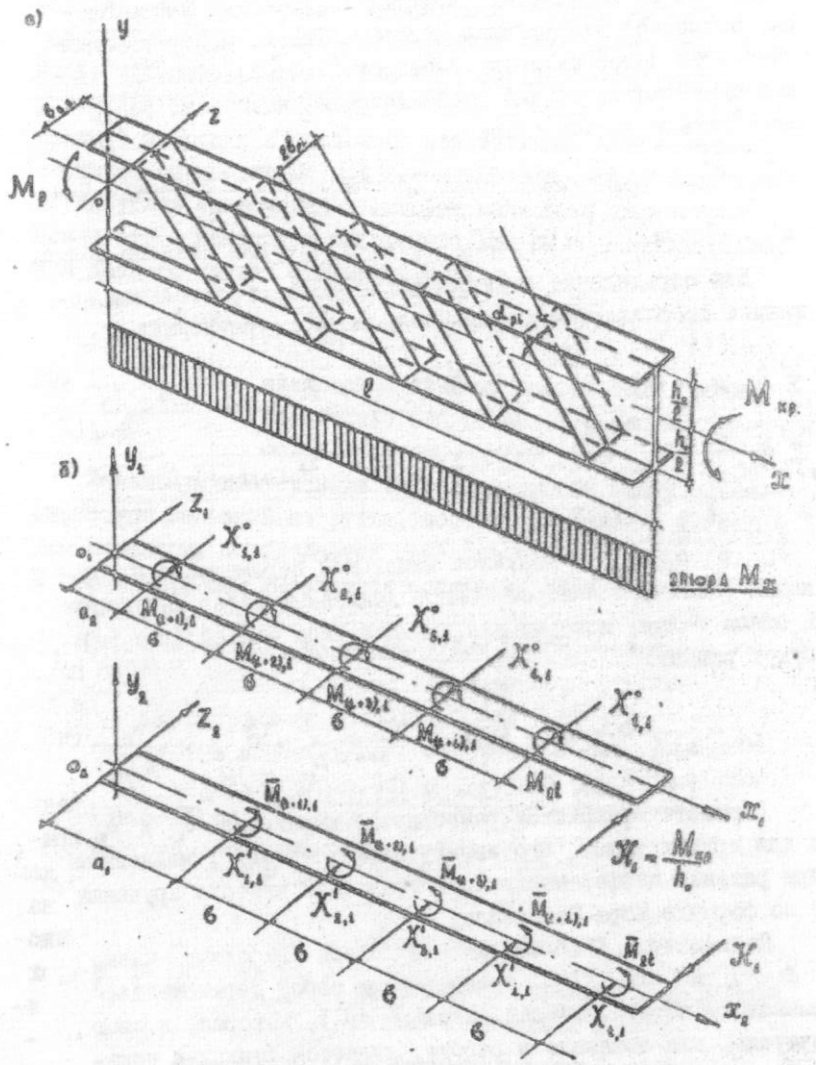


Рис. I

полосы из их плоскостей, которые в работе не учитываются. Последнее утверждение основывается на игнорировании жёсткости полос из своих плоскостей. За основные неизвестные принимаются усилия взаимодействия наклонных рёбер жёсткости и поясов стержня:

$x^{\circ}_{1,n}, x^{\circ}_{2,n}, x^{\circ}_{3,n}, \ldots, x^{\circ}_{i,n}, M_{(i+1),n}, \ldots, M_{2i,n}$ – для верхнего пояса и

$x^{'}_{1,n}, x^{'}_{2,n}, x^{'}_{3,n}, \ldots, x^{'}_{i,n}, \bar{M}_{(i+1),n}, \ldots, \bar{M}_{2i,n}$ – для нижнего пояса.

Для определения этих усилий методом строительной механики составляется две системы из $2i$ уравнений:

$$\sum_{k=1}^{i-1} \delta_{i,k} \cdot x_k + (\delta_{i,i} + \bar{\delta}_{i,i}) \cdot x_i + \sum_{k=i+1}^{2i} \delta_{i,k} \cdot x_k + \Delta_{i,p,X(x)} = 0$$

$$\sum_{k=1}^{2i-1} \delta_{2i,k} \cdot x_k + (\delta_{2i,2i} + \bar{\delta}_{2i,2i}) \cdot x_{2i} + \sum_{k=2i+1}^{2i} \delta_{2i,k} \cdot x_k + \Delta_{2i,p,X(x)} = 0 \qquad /I/.$$

где $i = 1, 2, 3, \ldots, i$,

$\delta_{i,i}$ и $\bar{\delta}_{2i,2i}$ – взаимное единичное перемещение и взаимный единичный поворот концов наклонных рёбер жёсткости и пояса балки, которые для данного типа связей (рис.Ia) будут равны:

$$\delta_{i,i} = \frac{h_o^3}{3 E J_{x\,pi} \cdot \sin^3 \alpha_{pi}} + \mu \frac{h_o}{G F_{pi} \cdot \sin \alpha_{pi}}, \quad \bar{\delta}_{2i,2i} = \frac{h_o}{G J_{d\,pi}}.$$

В работе приводятся развернутые выражения $\delta_{i,i}$ и $\bar{\delta}_{2i,2i}$ и для других типов "противокрутильных связей", найденные при решении дифференциального уравнения чистого кручения и по формуле Мора-Максвелла.

Поскольку в /I./ для каждой полосы свободные члены $\Delta_{i,p,X(x)}$ и $\Delta_{2i,p,X(x)}$ представляют собой перемещения, вызванные перерезывающей силой $X_j(x)$, которая, в свою очередь, как показано в работе, является функцией неизвестных усилий взаимодействия, то задача является нелинейной /точечнолинейная/. Для решения её используется метод итераций. В качестве некоторого исходного приближения $X^{(0)}$, которое может выбираться, вообще говоря, произвольно, принимается решение /I./, полученное при

условии, что касательные напряжения чистого кручения равны нулю. При следующих итерациях учитывается жёсткость чистого кручения, для чего определяется функция углов закручивания и мера депланации стержня от действия внешней нагрузки и найденных неизвестных. Вышеназванные величины определяются при решении дифференциального уравнения углов закручивания методом начальных параметров. После этого находится перерезывающая сила в поясах балки. Для данного случая она имеет вид:

$$X_j(x) = -\frac{1}{h_o}\left[A_j \operatorname{sh}\kappa x + B_j \operatorname{ch}\kappa x + C_j \operatorname{ch}\kappa(\ell - x)\right]$$

где A_j, B_j и C_j являются функциями неизвестных усилий взаимодействия поясов и наклонных рёбер жёсткости.

Используя дифференциальные зависимости между интенсивностью сплошной нагрузки, поперечной силой и изгибающим моментом, определяются грузовые члены системы /I./. В общем виде они выражаются следующим образом:

$$\Delta_{i,p,X(x)} = \sum^{1(i)} \int \frac{\bar{M}_i \left\{ S\left[M_x - \ell J_d \frac{d\theta(x)}{dx}\right] dx + D_j \right\}}{h_o \cdot E J_y} dx + \mu \sum^{1(i)} \int \frac{\bar{Q}_i \left[M_x - \ell J_d \frac{d\theta(x)}{dx}\right]}{h_o G F} dx,$$

$$\Delta_{(i+i),p,X(x)} = \sum^{1(i+i)} \int \frac{\bar{M}_{(i+i)} \left\{ S\left[M_x - \ell J_d \frac{d\theta(x)}{dx}\right] dx + D_j \right\}}{h_o \cdot E J_y} dx + \mu \sum^{1(i+i)} \int \frac{\bar{Q}_{(i+i)} \left[M_x - \ell J_d \frac{d\theta(x)}{dx}\right]}{h_o \cdot G F} dx.$$

где M_x – полный скручивающий момент,

$\bar{Q}_i, (\bar{Q}_{i+i})$, $\bar{M}_i, (\bar{M}_{i+i})$ – единичная поперечная сила и единичный изгибающий момент,

D_j – постоянная интегрирования, зависящая от граничных условий стержня.

В работе приводятся развернутые выражения перерезывающей силы и свободных членов системы /I./ для различных типов "противокрутильных связей" и граничных условий стержня.

Решением системы /I./ находятся неизвестные усилия взаимодействия, которые уточняются каждым последующим этапом. Такие последовательные решения проводятся до тех пор, пока результаты последующего и предыдущего этапов будут отличаться не более, чем на величину заданной погрешности. Дальнейший расчёт балки с наклонными рёбрами жёсткости выполняется двояко:

а/ по соответствующим выражениям В.З.Власова как стержня без "противокрутильных связей" на действие внешних закручивающих нагрузок и найденных усилий взаимодействия;

б/ по соответствующим выражениям В.З.Власова как стержня с открытым профилем на действие внешних закручивающих нагрузок, но с учётом коэффициента увеличения крутильной жёсткости стержня и с последующим уточнением изгибно-крутильных факторов: a_x, a_y, EJ_ω, ℓJ_d, EJ_y, $k\ell$ и т.д.

В работе рассматривается вопрос влияния жёсткости стержня при чистом кручении на величину нормальных напряжений при изгибе и кручении. Приводится таблица, в которой дана ошибка в процентах в определении Φ_ω для различных способов закрепления стержня, действующей на него нагрузки и произведения упруго-изгибной характеристики сечения на пролёт в пределах от I до 5, если принять жёсткость чистого кручения равной нулю. Данные исследования позволяют установить, что величиной ℓJ_d почти во всех строительных конструкциях пренебрегать нельзя, поэтому далее строится алгоритм для нахождения $\Delta_{i,p,X(x)}$ и $\Delta_{(i+1),p,X(x)}$ системы /I./ для двутавровых балок несимметричного и симметричного поперечного сечения. Дается интерпретация данной задачи с позиций функционального анализа. При счёте на ЭЦВМ функции свободных членов представляются в виде интегральной подстановки. В качестве примера на рис.2 приведены графики изменения величин $\theta(x)$ и $\ell J_d \theta'(x)$ фахверкового прогона, расчитанного по предложенной методике и по теории В.З.Власова. Из сравнения этих графиков видно, что наибольшее расхождение +I2,2% наблюдается на концах прогона. Однако, относительная разница быстро уменьшается и при $x = \frac{1}{8}\ell$ составляет +5,7%, а в середине пролёта +0,7%.

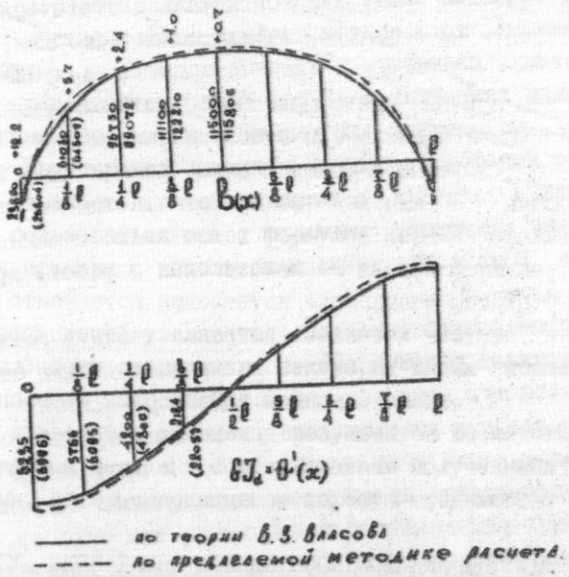


Рис. 2

III. ВЛИЯНИЕ НАКЛОННЫХ РЁБЕР НА ВЕЛИЧИНУ КРУТИЛЬНОЙ ЖЁСТКОСТИ СТЕРЖНЯ

В работе разрабатывается алгоритм определения коэффициента увеличения жёсткости чистого кручения m и осуществляется его численная реализация на ЭЦВМ типа БЭСМ-4 и М-222. При этом, исходя из известной зависимости:

$$\frac{[\ell J_d]}{\ell J_d} = \frac{\theta^{\circ}_{x=\kappa,p}}{\theta_{x=\kappa,p,\Sigma M_{i,n}}} = m \gg 1 ,$$

получены общие формулы, с помощью которых можно определить коэффициент увеличения ℓJ_d при различных границ-

ных условиях стержня и различных видах внешней закручивающей нагрузки, и которые, в сочетании с другими данными, позволяют производить расчёт подкреплённых призматических стержней. Для определения m применяется пятичленная формула Мора-Максвелла. Так как тонкостенные стержни являются системами континуально статически неопределимыми, то в каждом сечении такого стержня, кроме неизвестных, связанных с лишними опорными закреплениями и наличием замкнутых контуров /или "противокрутильных связей"/, вследствии положенной в основу расчёта его гипотезы о недеформируемости контура, имеется одна лишняя неизвестная величина, а именно: один из силовых или кинематических факторов, связанных с явлением стеснённого кручения. В качестве таких неизвестных в работе принимаются B_ω и M_z.

Автором разрабатывается программа расчёта подкреплённых наклонными рёбрами жёсткости призматических стержней на скручивающую нагрузку, по которой проводятся численные исследования коэффициента увеличения крутильной жёсткости как функции угла наклона рёбер к продольной оси балки, расстановки их по длине исследуемого стержня, геометрических размеров как самой балки, так и рёбер. Все вышеназванные данные для двутавровых балок приводятся в работе в табличной и графической формах. В качестве примера на рисунках 3 ÷ 7 построены графики изменения m по длине стержня, расстановки рёбер по пролёту /для консольной балки/ и угла наклона последних к продольной оси OX. Из исследования видно, что увеличение размеров поясов двутавровой балки /все остальные размеры, включая и размеры рёбер, остаются постоянными/ приводит к уменьшению m, а увеличение площади ребра - к увеличению. Например, если $f_{ребра}$ увеличивается в 2,5 раза, то значение вышеназванного коэффициента уменьшается в I,48 раза. В то же время увеличение толщины "противокрутильной связи" на 80% приводит к увеличению m на 39,I%. Однако наибольший эффект в отношении увеличения EJ_ω получается, если увеличить площадь наклонных рёбер жёсткости изме-

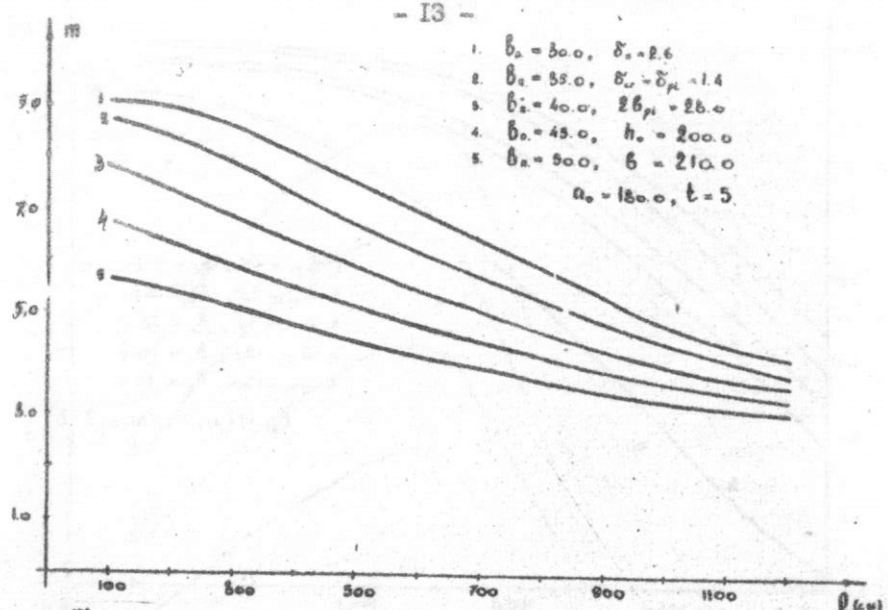


Рис. 3

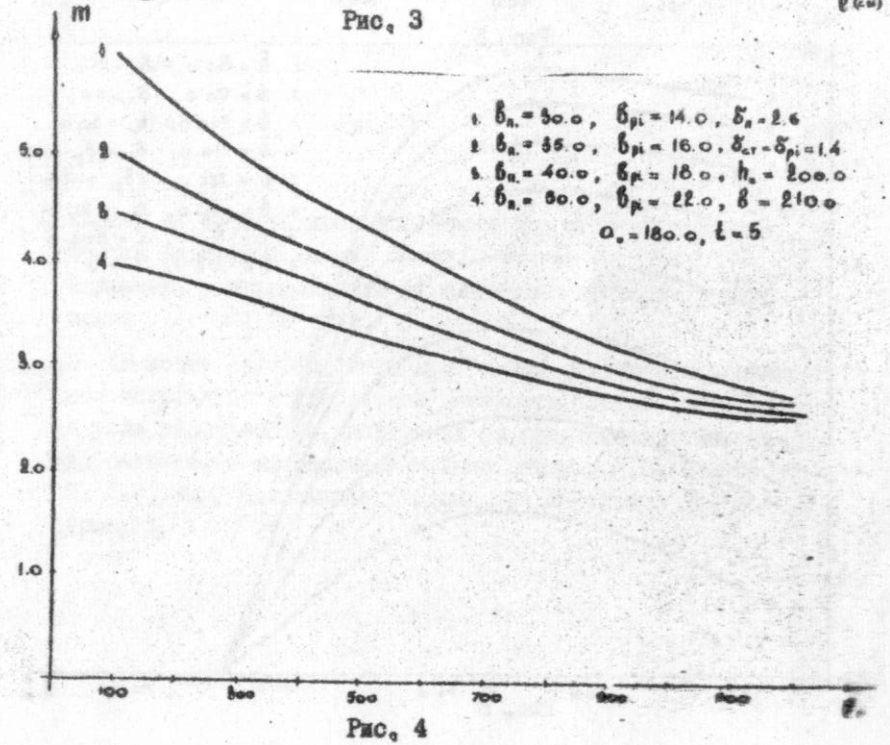


Рис. 4

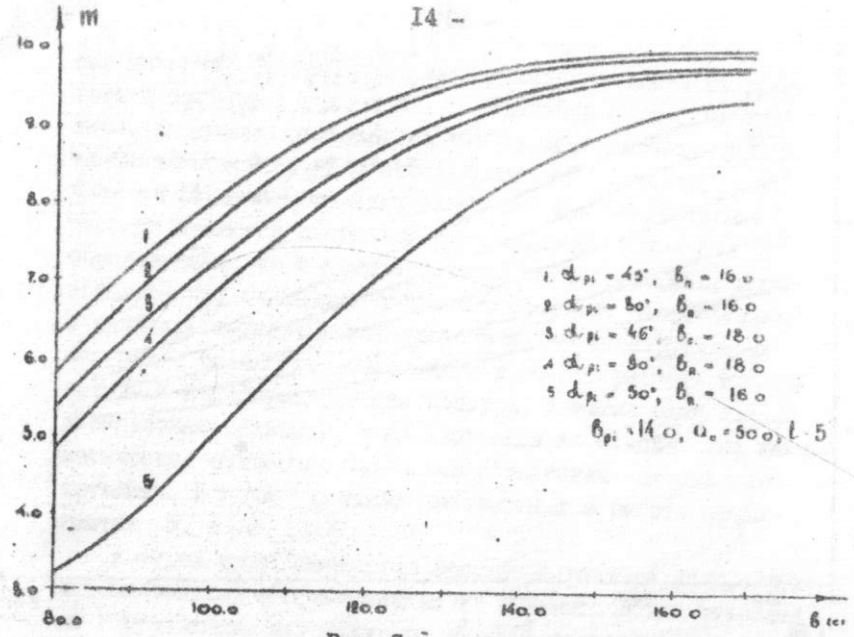


Рис. 5

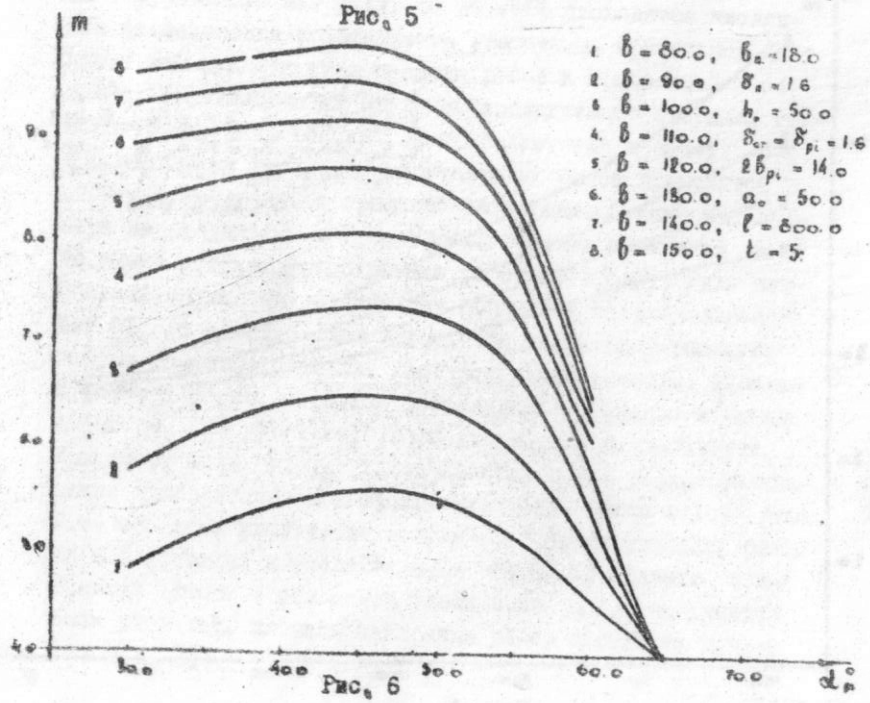


Рис. 6

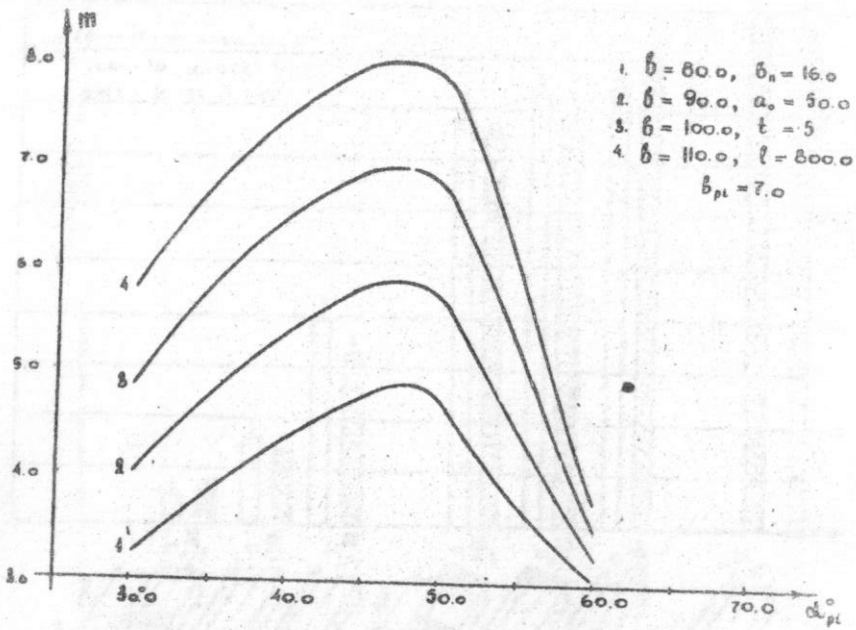


Рис. 7

нением их ширины, хотя последняя при этом ограничена сверху размерами поясов балки: $2\delta_{pi} \leq \delta_n - \delta_{cr}$. Например, уменьшение его ширины вдвое приводит к уменьшению m в I,75 раза.

В конце третьей главы приводятся результаты сравнения коэффициента увеличения жёсткости чистого кручения и угла закручивания, найденных по предлагаемой методике расчёта, с экспериментальными данными Д.В.Бычкова и H. *Herlela*. Наибольшее расхождение составило 9,7% (рис.8).

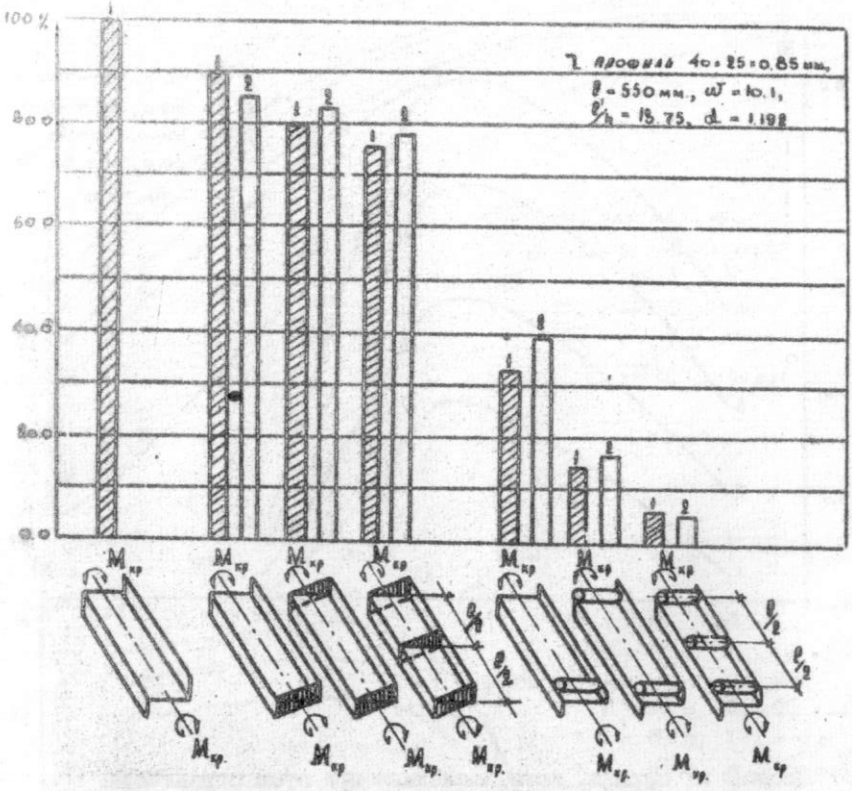
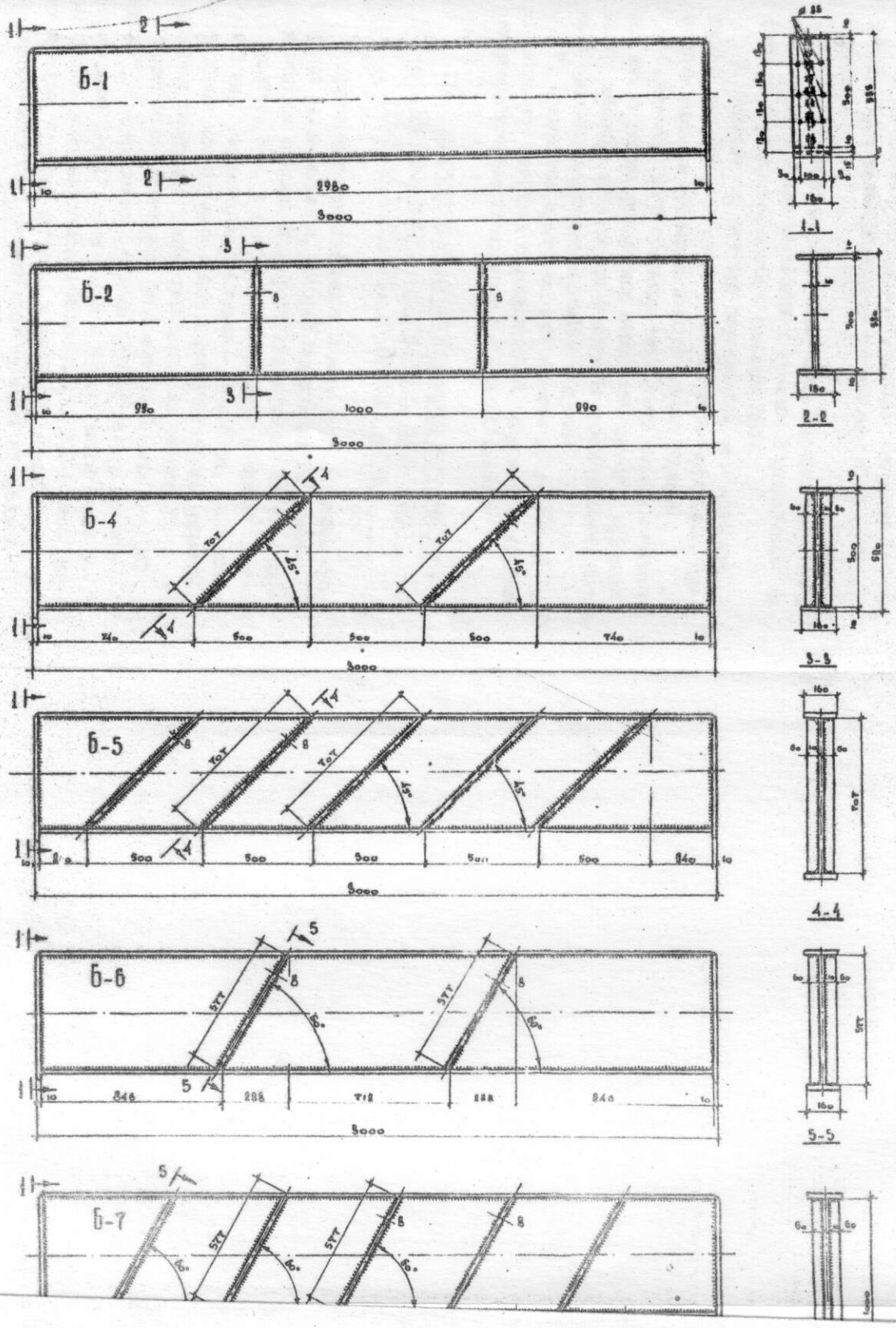


Рис. 8

На основе проведенного теоретического исследования, изложенного в реферируемой работе, были сделаны следующие выводы:

I. в работе разработан метод расчёта тонкостенных призматических стержней открытого профиля с различным типом наклонных рёбер жёсткости и произвольном их расположении по длине стержня, работающих на действие произвольной скручивающей нагрузки;

2. в зависимости от метода определения неизвестных усилий взаимодействия смежных полос предлагается приближённый и точный способы решения задачи. При этом приво-


Б-1
2980
3000
1-1
Б-2
950
1000
990
3000
2-2
Б-4
45°
740
500
3000
3-3
Б-5
45°
3000
4-4
Б-6
60°
846
288
712
3000
5-5
Б-7
60°

дится погрешность в определении σ_ω при приближённом способе расчёта для сечений с различными изгибно-крутильными характеристиками;

3. разработан алгоритм определения коэффициента увеличения крутильной жёсткости подкреплённых тонкостенных стержней;

4. предлагается общая блок-схема расчёта стержней с наклонными рёбрами жёсткости и численная реализация на примере двутавровой балки с помощью ЭЦВМ;

5. отмечается, что при определении m наиболее удобно пользоваться общей формулой Мора-Маковелла. Приводятся примеры с использованием данной формулы;

6. отмечается недостаток численного метода определения коэффициента увеличения жёсткости чистого кручения подкреплённого стержня при некоторых видах внешней нагрузки и способов закрепления концов стержня;

7. приводятся сравнения результатов исследований по предлагаемой методике с результатами полученными другими авторами, которые показывают хорошую сходимость.

IУ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУТАВРОВЫХ СВАРНЫХ БАЛОК, ПОДКРЕПЛЁННЫХ НАКЛОННЫМИ РЁБРАМИ ЖЁСТКОСТИ, НА ПЛОСКИЙ ИЗГИБ

Теоретические исследования такого типа стержней проверялись экспериментом, который проводился на двенадцати моделях сварных однопролётных шарнирно опёртых балках пролётом 3 м. с размером поперечного сечения: стенка - 500xI0 мм, горизонтальные листы - I60xI0 мм. Расстановка по длине исследуемых балок и геометрические размеры наклонных рёбер жёсткости приводятся на рисунке 9.

Балки были изготовлены из стали ВМ.Ст.3пс. по ГОСТ 380-60*, сварка поясов, стенки и рёбер велась вручную электродами Э-42А с толщиной шва 8 мм. Каждая балка испытывалась в горизонтальном положении на 200-тонном гидравлическом прессе. Нагрузка в виде сосредоточенной силы P передавалась по середине пролёта через квадратный

штамп на сжатый пояс балки. Загружение проводилось только в упругой стадии, по этой причине максимальная нагрузка создавала в опасных сечениях /под силой/ напряжения равные 0,6 ÷ 0,7 σ_m /предела текучести/. Предел текучести и другие характеристики материала μ и ℓ /коэффициент Пуассона и модуль упругости первого рода/ были найдены опытным путём на 60 плоских образцах.

Во время экспериментальных исследований балок проводились замеры продольных деформаций поясов и наклонных рёбер, для чего использовались проволочные тензорезисторы с базой 20 мм, установленные в семи сечениях на поясах /6 тензорезисторов в каждом сечении/ и на рёбрах. Прогибы балок и смещения верхнего и нижнего поясов из плоскости ХОУ замерялись индикаторами часового типа, которые также устанавливались в семи сечениях по длине балки /4 индикатора в каждом сечении/. Исходя из теории ошибок были определены средние значения коэффициента изменения изгибной жёсткости и нормальных напряжений в поясах и рёбрах. В качестве примера в таблице I приводятся вышеназванные величины для сечения под грузом.

Таблица I

№№	Тип балки	Б-I	Б-2	Б-4	Б-5	Б-6	Б-7	Б-8	Б-II	Б-I2
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
I	γ	I.00	I.00	I.095	I.I45	I.088	I.052	I.043	I.054	I.030
2	σ_x	2I60	-	I943	I635	I946	I743	2000	I740	2064

Все результаты экспериментальных исследований подкреплённых стержней на плоский изгиб в реферируемой работе приводятся на 20 рисунках и в 2I таблице.

Согласно проведённому экспериментальному исследованию такого типа стержней на плоский изгиб делаются следующие выводы:

I. за счёт постановки вышеназванных "противоизгибных связей" увеличивается изгибная жёсткость подкреплённых стержней. Прогибы, в зависимости от геометрии наклонного ребра, в середине пролёта могут быть уменьшены на I,3 - I4,5%;

2. нормальные напряжения σ_x в опасном сечении /под грузом могут быть снижены на 4,4 - 24,3%, при увеличении общего веса конструкции на I,8 - I3,3%;

3. наибольший эффект в отношении снижения нормальных напряжений в опасных сечениях балки наблюдается при постановке крестообразных рёбер жёсткости.

У. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ПОДКРЕПЛЁННЫХ НАКЛОННЫМИ РЁБРАМИ ЖЁСТКОСТИ, НА СКРУЧИВАЮЩУЮ НАГРУЗКУ

Экоперимента льные исследования проводились на тех же двенадцати образцах на специальной установке, разработанной автором. Балки устанавливались в горизонтальное положение; один конец их, зажатый в 200-тонном прессе, закреплялся неподвижно, для чего вертикально прикладывалась нагрузка 75 тонн. Весьма важной конструктивной деталью при испытании являлась специальная опорная часть, с помощью которой уменьшались возможные перемещения как в плоскости наибольшей, так и в плоскости наименьшей жёсткости. Для этого к опорной части каждой балки приваривались пластины /500х200х30 мм/ с 4 отверстиями ϕ 25 мм. В оголовках пресса /нижнем и верхнем/ устанавливались 4 штыря ϕ 24мм, длиной 30 мм, которые при защемлении входили в отверстия пластин. Для усиления опорного узла к ребру приваривалась пластина δ = 20 мм.

Нагрузка в виде сосредоточенной силы через шарнирную опору передавалась ступенями с шагом I00 кг на консоль, прикреплённую 6 болтами ϕ 24 мм к свободному концу балки. Нагрузочное устройство - реверсивный электродвигатель с редуктором, установленный на рельсовый путь и перемещающийся с помощью двух других электродвигателей вдоль оси испытываемой конструкции и перпендикулярно ей, обеспечивало заданное направление силы в ходе испытания. Ве-

личина скручивающей нагрузки регистрировалась с помощью динамометра системы Токаря с пределами измерений 100 ÷ 3000 кг.

В шести сечениях образца /50 см друг от друга/ были установлены по два прогибомера, с помощью которых измерялись вертикальные перемещения точек каждого из рассматриваемых сечений. Во время испытания балок с помощью тензорезисторов проводились замеры продольных деформаций на поясах и рёбрах.

Целью исследования было определение влияния наклонных ребер на крутильную жёсткость и нормальные напряжения в сечениях тонкостенного призматического стержня. Влияние рёбер на стержня характеризовалось величиной коэффициента увеличения крутильной жёсткости, который определялся в данном случае двумя способами.

Первый основывался на игнорировании касательных напряжений чистого кручения. Тогда искомая жёсткость чистого кручения равна: $|GJ_d| = \frac{\Delta M_{кр}}{\theta'(x)}$,

где $\Delta M_{кр}$ – приращение закручивающего момента,

$\theta'(x)$ – относительный угол закручивания, определяемый из выражения:

$$\theta'(x) = \frac{f}{b \cdot d} .$$

Прогибомеры в каждом сечении устанавливались не ближе чем на 120 см друг от друга, чтобы свести к минимуму влияние возможного изгиба исследуемого элемента в плоскости его наименьшей жёсткости. Результаты сравнения m_1 и m_2 приводятся в таблице 2.

Таблица 2

№№ балок	J_d,	m_2	m_1	Δ
	$см^4$	–	–	%
Б-1	42,3	1,00	–	–
Б-2	53,4	1,26	1,13	- 11,5
Б-4	111,5	2,64	2,395	- 10,25
Б-5	180,9	4,28	3,853	- 11,1
Б-6	63,4	1,50	1,32	- 13,65
Б-7	72,8	1,72	1,42	- 21,1
Б-8	83,4	1,97	1,49	- 32,2
Б-11	135,5	3,20	2,835	- 12,9
Б-12	58,4	1,38	1,108	- 23,0

Из сравнения результатов /табл.2/ видно, что игнорирование касательными напряжениями, меняющимися по толщине стенки по закону кососимметричной треугольной эпюры, приводит к завышению крутильной жёсткости стержня с наклонными рёбрами на 10-30%.

При втором способе /наиболее точном/ для определения GJ_d использовалось отношение угла закручивания стержня с рёбрами к углу закручивания стержня без рёбер. Тангенс угла закручивания сечения определялся по формуле:

$$tg\,\alpha = \frac{a + b}{\ell} ,$$

где a и b – взятые по абсолютной величине перемещения концов стержня, на которых установлены прогибомеры.

Сопоставление коэффициента увеличения жёсткости чистого кручения, полученного экспериментальным и теоретическим путём, приводится в таблице 3. Результаты сравнения показывают хорошую сходимость /за исключением Б-12/ теоре-

Таблица 3

№№ балок		Номер сечения /считая от свободного конца/					
		1	2	3	4	5	6
Б-2	Теоретические данные	I,I30	I,2I6	I,424	I,720	I,880	I,900
	Экспериментальные данные	I,I02	I,I93	I,427	I,765	I,664	I,945
	Δ	-2,54%	-I,92%	0,20%	2,55%	-I2,95%	2,32%
Б-4	Теоретические данные	2,395	2,56I	2,763	3,I38	4,602	4,730
	Экспериментальные данные	2,460	2,768	2,83I	3,042	4,376	2,880
	Δ	2,72%	7,47%	2,4%	-3,I6%	-5,I7%	64,2%
Б-5	Теоретические данные	3,853	4,664	5,623	7,767	I0,203	26,833
	Экспериментальные данные	3,927	4,968	5,5I6	7,I35	9,038	24,646
	Δ	I,93%	6,2%	-I,94%	-9,27%	-I2,90%	8,85%
Б-6	Теоретические данные	I,320	I,375	I,502	I,685	I,805	2,202
	Экспериментальные данные	I,260	I,338	I,470	I,622	2,023	2,272
	Δ	-4,85%	-2,82%	-2,I8%	-3,88%	4,05%	3,08%
Б-7	Теоретические данные	I,420	I,540	I,726	I,963	2,300	3,4I4
	Экспериментальные данные	I,35I	I,567	I,670	I,864	2,356	3,669
	Δ	-5,85%	I,72%	-3,36%	-5,32%	2,38%	7,00%

Продолжение табл. 3

№№ балок		Номер сечения /считая от свободного конца/					
		I	2	3	4	5	6
Б-8	Теоретические данные	I,490	I,653	I,900	2,365	2,525	2,644
	Экспериментальные данные	I,542	I,867	I,942	2,285	2,334	2,570
	Δ	3,49%	II,50%	2,I9%	-3,50%	-8,20%	-2,88%
Б-II	Теоретические данные	2,835	3,I07	3,464	3,958	4,535	4,887
	Экспериментальные данные	2,994	3,258	3,709	4,035	4,463	4,650
	Δ	5,32%	4,65%	6,45%	I,9I%	I,6I%	-5,I%
Б-I2	Теоретические данные	I,I08	I,I23	I,I53	I,273	I,403	I,685
	Экспериментальные данные	I,227	I,250	I,423	I,492	I,7I8	I,388
	Δ	9,70%	I0,50%	I9%	I4,70%	I8,35%	-2I,40%

тических и экспериментальных данных. Наличие погрешности /9,70 ÷ 21,40%/ в определении m для Б-12 объясняется тем, что прогибомеры для последней балки были установлены на верхнем поясе, который, в силу частичного защемления наклонными рёбрами, установленными не по всей высоте балки, получил меньшую деформацию по сравнению с нижним поясом, тогда как теоретически рассматривалась совместная работа обоих поясов и стенки.

Найденные в результате исследования нормальные напряжения раскладываются на четыре составляющие: σ_0 – от растяжения /сжатия/, σ_x и σ_y – изгиба балки в двух плоскостях x_0y и y_0z, σ_ω – стеснённого кручения. Для этого в каждом исследуемом сечении стержня и для каждой ступени внешней нагрузки решается система 6 линейных уравнений с 4 неизвестными по способу наименьших квадратов.

Все результаты экспериментального исследования подкреплённых стержней на скручивающую нагрузку приводятся в работе на 2 рисунках и в 22 таблицах.

Основные выводы экспериментального исследования двутавровых балок с наклонными рёбрами жёсткости на скручивающую нагрузку:

1. в результате постановки наклонных рёбер жёсткости по длине тонкостенного стержня увеличивается жёсткость чистого кручения последнего;

2. повышение крутильной жёсткости стержня приводит к уменьшению углов закручивания его сечений и повышению общей устойчивости и несущей способности. Например, дополнительный вес балок в процессе постановки вышеназванных связей составил 1,89 /Б-12/ – 13,32 /Б-5/% от веса неподкреплённых балок, тогда как угол закручивания уменьшился на 25 – 400%;

3. коэффициент увеличения крутильной жёсткости m не постоянен по длине стержня и зависит от числа наклонных рёбер, расстановки их по длине стержня, угла наклона рёбер к продольной оси балки. Именно: с увеличением числа связей – m возрастает /Б-4, $m = 2,46$ и Б-5, $m = 3,93$/, с увеличением угла наклона и при α_{pi}, близ-

ком к 90^0, – резко падает /Б-5, $m = 3,93$ и Б-7, $m = 1,35$/;

4. наибольший эффект, в отношении увеличения GJ_d тонкостенных стержней, имеет место при постановке рёбер по схеме Б-11 /увеличение веса балки за счёт вышеназванных рёбер на 5,35% приводит к увеличению жёсткости на 300%/;

5. наличие наклонных рёбер жёсткости приводит к уменьшению нормальных секториальных напряжений σ_ω и заставляет стержень, нагруженный скручивающей нагрузкой, работать, в основном, только на изгиб в горизонтальной плоскости;

6. сравнение значений m, полученных экопериментальным и теоретическим путями, показало хорошую сходимость результатов /кроме Б-12/ при точном методе расчёта подкреплённых стержней и удовлетворительную – при приближённом.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе дается исторический обзор исследований подкреплённых стержней открытого профиля, работающих на изгиб и кручение. Кратко излагаются основные методы расчёта такого типа стержней. Принимаются основные предпосылки и обосновывается метод исследования.

Во второй главе разрабатывается метод расчёта тонкостенных призматических стержней открытого профиля с наклонными рёбрами жёсткости. Для иллюстрации изложенного метода расчёта в конце главы приводится пример, где сравниваются результаты, полученные в данной работе, с результатами исследований В.З.Власова.

В третьей главе приводится алгоритм определения коэффициента увеличения крутильной жёсткости и осуществляется его численная реализация на ЭЦВМ. В конце главы даются примеры сравнения данных, полученных автором, с данными Д.В.Бычкова и Х.Хертеля.

В четвертой главе излагается методика и приводятся результаты экспериментального исследования влияния нак-

лонных рёбер на изгибную жёсткость и нормальные напряжения двутавровых металлических балок на плоский изгиб.

Пятая глава посвящается экспериментальному исследованию влияния наклонных рёбер на крутильную жёсткость и секториальные напряжения вышеназванных балок при кручении. В конце главы приводятся результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных.

В конце диссертации даются основные выводы по работе, список литературы и приложения.

ВЫВОДЫ

I. Так как тонкостенные стержни открытого профиля по сравнению со стержнями закрытого поперечного сечения обладают низкой крутильной жёсткостью, то изгибно-крутильная критическая сила такого вида стержней в упругой стадии работы существенно меньше Эйлеровых сил / $N_{кр.x}$ и $N_{кр.y}$ /, а дополнительные секториальные напряжения от кручения достигают весьма больших величин. Поэтому при проектировании конструкций из тонкостенных призматических стержней, работающих на скручивающую нагрузку, необходимо усилять данные стержни "противокрутильными связями" типа наклонных рёбер жёсткости.

2. Наличие наклонных рёбер жёсткости незначительно оказывается на изменение нормальных напряжений и жёсткости стержня при изгибе его в вертикальной плоскости, но сильно изменяет работу его на кручение. Стержень приближается по характеру работы к типу профилей с замкнутым контуром /особенно при наклонных рёбрах в виде тавриков и крестообразных/. "Противокрутильные связи" препятствуют кручению стержня и заставляют его работать на изгиб в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Поэтому при расчёте подкреплённых стержней необходимо учитывать влияние "противокрутильных связей" по предлагаемой методике, причём в зависимости от величины характеристического числа «ℓ задача решается двояко, т.е. с учётом или без учёта касательных напряжений чистого кручения $\tau_{кр}$.

3. Так как задача расчёта такого типа стержней на

кручение в общем виде сложна и трудно составить общую программу для ЭЦВМ, по которой можно было бы расчитывать подкреплённый стержень с произвольным типом и числом наклонных рёбер жёсткости, произвольного поперечного сечения, имеющего любые граничные условия и загруженного произвольной нагрузкой, то приходится программировать /о ручном счёте не может быть и речи/ конкретный стержень с конкретными условиями. Для этой цели можно использовать общую логическую схему, разработанную автором. Последовательность расчёта по данной схеме следующая:

а/ при заданных геометрических размерах самого стержня и наклонных рёбер жёсткости, при известном характере и величине внешней нагрузки, составляются и решаются любым способом канонические уравнения метода сил /метода перемещений/;

б/ уточняются коэффициенты матрицы столбца грузовых членов вышеназванной системы и повторяется решение последней+/;

в/ фиксируется сходимость метода последовательных приближений с заданной точностью+/;

г/ производится основной расчёт по общим выражениям В.З.Власова на внешнюю нагрузку и найденные неизвестные или же расчёт с учётом приведённой жёсткости чистого кручения.

4. При проектировании тонкостенных призматических стержней с "противокрутильными связями", наиболее выгодными, с точки зрения увеличения жёсткости чистого кручения, являются крестообразные рёбра жёсткости, установленные с обоих сторон стенки балки под углом $40^{\circ} \div 50^{\circ}$ к продольной оси.

5. Исследование влияния положения наклонного ребра по длине стержня показало, что наибольшее разгружающее действие ребра на стержень имеет место в том случае, когда рёбра устанавливаются равномерно по всей длине.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

+/ пункт б/ и в/ опускается, если расчёт ведётся без учёта касательных напряжений чистого кручения.

I. Киселёв В.Н. К расчёту стальных балок со стенками, усиленными наклонными рёбрами жёсткости. Труды ГИСИ им. В.П.Чкалова. "Исследования в области строительства", №64, часть I, Горький, 1973.

2. Киселёв В.Н. О расчёте тонкостенного прямолинейного призматического стержня открытого профиля с "противокрутильными связями" на скручивающую нагрузку. Вторая научная конференция молодых учёных Волго-Вятского региона, секция строительная, Йошкар-Ола, 1973.

3. Киселёв В.Н. Влияние наклонных рёбер жёсткости на увеличение крутильной жёсткости тонкостенного призматического стержня. "Металлические конструкции", Труды ГИСИ им. В.П.Чкалова, вып.67, Горький, 1974.

4. Киселёв В.Н. Об одном вопросе расчёта тонкостенных призматических стержней открытого профиля с противокрутильными связями. "Металлические конструкции", Труды ГИСИ им.В.П.Чкалова, вып.67, Горький, 1974.

Основные положения диссертации докладывались:

I. На научно-технической конференции Горьковского инженерно-строительного института им.В.П.Чкалова в мае, 1973.

2. На межвузовской конференции молодых учёных Волго-Вятского региона в г.Йошкар-Ола, сентябрь, 1973.

3. На научно-технической конференции Горьковского инженерно-строительного института им. В.П.Чкалова в октябре, 1974.