

Б24.014  
М 34

ЦНИИпроектстальконструкция

**МАТЕРИАЛЫ  
ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ  
КОНСТРУКЦИЯМ**

Выпуск 19



МОСКВА 1977

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СВАРНОГО РАМНОГО УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕГО РАСЧЕТУ

Одно из неперемных условий эффективного использования стали в металлических каркасах зданий и сооружений — применение наиболее рациональных, простых в изготовлении и монтаже и достаточно надежных конструкций узловых соединений, в частности рамных узлов крепления балок.

Из всего разнообразия типов рамных узлов крепления балок наибольшее распространение у нас в стране получили рамные сварные узлы на горизонтальных и вертикальных накладках.

Рассмотрим узел крепления балки к колонне двуглавового сечения со стороны полки колонны (рис. 1). В этом узле верхняя растянутая горизонтальная накладка приваривается к колонне стыковым монтажным швом на подкладке или с подваркой корня, чем обеспечивается наибольшая возможная прочность шва. К полке балки эта накладка приваривается фланговыми швами, выполненными на монтаже в нижнем положении, для чего накладка в пределах полки балки имеет меньшую ширину, чем полка. Нижняя сжатая горизонтальная накладка приваривается к колонне заводским стыковым швом, к нижней полке балки — фланговыми монтажными швами, выполняемыми в нижнем положении, для чего накладка назначается шире полки балки или в полке балки предусматриваются скосы. Стенка балки прикрепляется к колонне с помощью двух вертикальных накладок минимальной ширины. Одна из вертикальных накладок приваривается к полке колонны заводскими угловыми швами с обеих сторон или швом встык, другая вертикальная накладка приваривается монтажным швом встык. Швы встык выполняются с полным приваром с разделкой кромок.

Рамный сварной узел рассматриваемого типа, несмотря на его широкое применение, изучен недостаточно. Известные рекомендации по расчету рамных узлов [3, 5] исходят из условия их упругой работы;

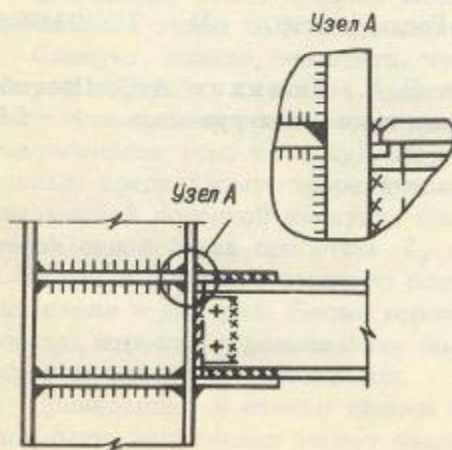


Рис. 1. Рамный узел крепления балки к колонне



эксперименты же показывают, что пластические деформации в рамных узлах появляются уже в начальных стадиях загрузки. Не выявлена работа стенки и полок колонны, поясных швов, нет указаний по расчету вертикальных накладок, нет ясности в вопросах, касающихся жесткости рамных узлов, и др.

Раннее развитие пластических деформаций в элементах узла, способность его приспособляться к росту нагрузок, в результате чего видоизменяется напряженное состояние в элементах, не позволяют при исследовании работы узла и создании методики его расчета пользоваться "классическим" математическим аппаратом теории упругости и теории пластичности. Для этой цели воспользуемся статическим методом теории предельного равновесия [2] в соответствии с материалами экспериментальных исследований ЦНИИпроектстальконструкции 1969-1971 гг.

Рассмотрим рамный узел одностороннего крепления и его расчетную схему в предельном равновесии. Примем, что реакция балки  $Q$  воспринимается только вертикальными накладками. Поскольку стенка колонны в узловых зонах, как правило, сильно напряжена скалывающими напряжениями, целесообразно (в отличие от рекомендаций упругого расчета) заземлением накладок в колонну в предельном состоянии пренебречь. В этом случае работа рамного узла в предельном состоянии может быть представлена по схеме на рис. 2.

Если  $M_{оп}$  и  $Q$  — соответственно опорный момент и реакция балки в сечении по грани колонны, то усилия в элементах узла, согласно этой схеме, будут равны:

в сечении горизонтальных накладок

$$N_H = \frac{M_{оп}}{H},$$

где  $H$  — расстояние между серединами накладок;

в сечении вертикальных накладок у грани колонны —  $Q$ ;

в сечении вертикальных накладок у швов крепления их к стенке балки —  $Q$  и  $M = Qa$ .

Рассмотрим работу элементов узла.

Вертикальные накладки и угловые швы их крепления к стенке балки испытывают усилия  $Q$  и  $M = Qa$ . Их рассчитывают по сечению вертикальных угловых швов по формуле (1), полученной по методике расчета, разработанной для сварных узлов разрезных балок [6]. Толщина накладок принимается равной  $h_w$  (высоте катета угловых швов):

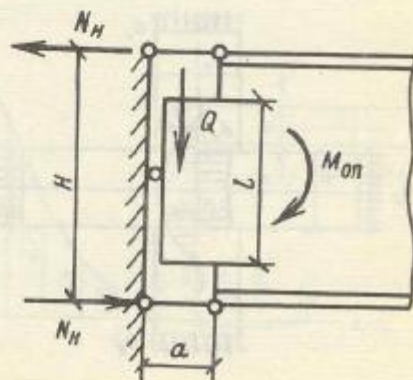


Рис. 2. Расчетная схема рамного узла



$$\frac{0,8 M_{np.ш} Q_{np.ш}}{\sqrt{M_{np.ш}^2 + (Q_{np.ш} Q)^2}} \approx Q, \quad (1)$$

где  $Q_{np.ш} = R_y^{cb} 1,4 h_{ш}$ ;  $M_{np.ш} = \frac{R_y^{cb}}{0,817} 1,3 \frac{1,4 h_{ш} l^2}{6}$ ;  
 0,8 - коэффициент условий работы.

Горизонтальные накладки, растянутая и сжатая, и швы их крепления к колонне и балке рассчитывают на одинаковые по абсолютному значению усилия  $N_H$ . В расчетных сечениях эти накладки испытывают два вида воздействий: растяжение или сжатие и поперечный изгиб, обусловленный вертикальными деформациями вертикальных накладок и швов их крепления. Поперечный изгиб горизонтальных накладок можно не учитывать, поскольку вертикальные деформации ограничены и на наиболее опасном участке - корне стыкового шва растянутой накладки - создают напряжения сжатия. Напряжения растяжения и сжатия в горизонтальных накладках распределяются по ширине накладок неравномерно. Однако, как показывают результаты экспериментального исследования накладок различной конфигурации, эта неравномерность не превышает 20% и в соответствии с принятой методикой расчета также может не учитываться. Расчетное сопротивление растянутого стыкового шва крепления горизонтальной накладки следует принимать с коэффициентом 0,85, так как на монтаже невозможно обеспечить повышенный способ контроля качества шва.

Полка колонны в зоне крепления растянутой горизонтальной накладки рамного узла находится в сложно-напряженном состоянии; она сжата в продольном и растянута в поперечном направлении. Напряжения  $\sigma_y$  в направлении толщины полки близки напряжениям в сварном стыковом шве крепления растянутой накладки и могут составлять до 85% расчетного сопротивления. В этом случае наступление текучести в рассматриваемой зоне может произойти при весьма малых продольных нормальных напряжениях  $\sigma_x$  в полке колонны. Действительно, согласно условию пластичности Генки - Мизесса,

$$\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 \leq R^2, \quad \text{или} \\
\sigma_x^2 + \sigma_x 0,85 R + (0,85 R)^2 \leq R^2 \quad (2)$$

Отсюда получим  $\sigma_x \leq 0,26 R$ .

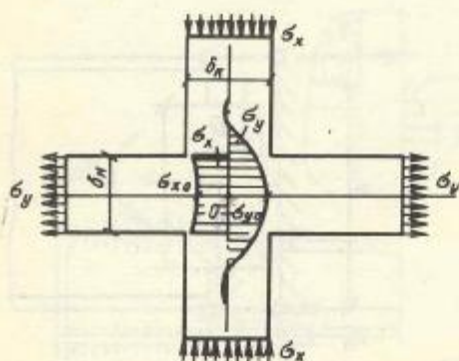


Рис. 3. Напряженное состояние в полке колонны в месте крепления растянутой горизонтальной накладки



Согласно исследованиям [1, 4], а также испытаниям, проведенным в ЦНИИпроектстальконструкции, толстолистовая сталь обладает пониженными механическими свойствами в направлении толщины; данные статических испытаний на гладких образцах показывают некоторое снижение предела текучести и временного сопротивления.

Таким образом, если предположить, что рассматриваемый участок полки может работать только в упругой стадии, то его несущая способность исчерпывается при весьма малых сжимающих напряжениях в полке колонны  $\sigma_x$ , не превышающих 0,26  $\sigma$ .

Однако многолетний опыт использования рамных сварных узлов на накладках показывает, что рамные узлы обладают значительной несущей способностью и разрушения полки в зоне крепления растянутой накладки не происходит даже при весьма больших напряжениях  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Это объясняется следующими причинами: рассматриваемая зона вследствие малых размеров в состоянии работать далеко за пределом упругости, в зоне самоупрочнения; напряжения  $\sigma_y$  в средней и наиболее опасной плоскости полки колонны ниже, чем в накладке, за счет включения в работу участка полки, более широкого, чем толщина накладки (рис. 3).

Рассмотрим работу в предельном состоянии участка полки колонны в месте примыкания растянутой накладки. За начальный момент разрушения примем разрушение среднего слоя полки колонны в месте возникновения максимальных напряжений, т.е. на уровне середины растянутых накладок (см. рис. 3).

Напряжения  $\sigma_{y0}$  у начала разрушения определим в предположении упругой работы материала. При развитии пластических деформаций увеличивается зона включения в работу материала полки колонны и в связи с этим уменьшается  $\sigma_y$  в точке О. Следовательно, принятое допущение способствует увеличению запаса прочности.

Чтобы найти значения  $\sigma_{y0}$ , воспользуемся решением М. Файлона и А. Кокера [7]. На рис. 4 изображена эпюра напряжений  $\sigma_y$ , увеличенных в  $\delta_K$  раз, по средней линии полосы шириной  $c = 1$  и толщиной  $\delta_K$ , нагруженной взаимно-противоположными сосредоточенными единичными силами. Эта эпюра одновременно может служить линией влияния напряжений  $\sigma_{y0}$  в точке О этой полосы, увеличенных в  $\delta_K$  раз. Отношение напряжения в точке О к номинальному напряжению  $\sigma_y$  может быть получено интегрированием этой линии влияния на участке  $-0,5 \delta_K / \delta_K$ ;

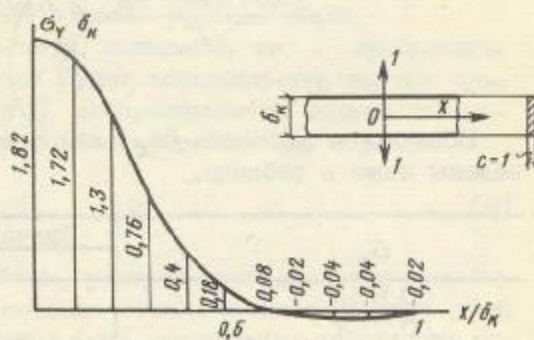


Рис. 4. Приведенная эпюра напряжений  $\sigma_y$  по средней линии полосы, нагруженной взаимно-противоположными сосредоточенными единичными силами



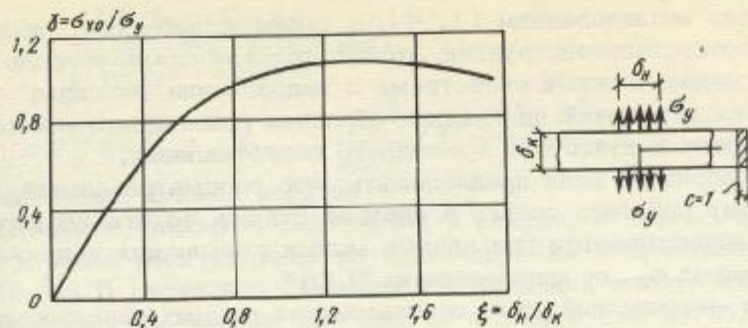


Рис. 5. График зависимости  $\gamma = \sigma_{y0} / \sigma_y$  от отношения  $\xi = \delta_H / \delta_K$

+0,5  $\delta_H / \delta_K$ . На рис. 5 изображен график зависимости  $\gamma = \sigma_{y0} / \sigma_y$  от отношения  $\xi = \delta_H / \delta_K$ . Согласно этому графику, при  $\delta_H \geq \delta_K$  напряжение  $\sigma_{y0}$  практически равно номинальному  $\sigma_y$ .

Определим максимально возможные напряжения в стыковом шве растянутой накладки рамного узла, используя условия разрушения Мора:

$$\sigma_{y0} + K\sigma_x \leq \sigma_{\delta,p}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\delta,p} = K\sigma_{\delta}$  — временное сопротивление растяжению в направлении вдоль толщины;  $\sigma_{\delta}$  — временное сопротивление.

Подставив соответствующие значения напряжений в условие (3), получим предельные значения напряжений в горизонтальных планках  $\sigma_y$  и в полке колонны  $\sigma_x$ :

$$\gamma\sigma_y + K\sigma_x \leq K\sigma_{\delta}.$$

Отсюда

$$\sigma_y \leq \frac{K(\sigma_{\delta} - \sigma_x)}{\gamma}; \quad \sigma_x \leq \frac{K\sigma_{\delta} - \gamma\sigma_y}{K}. \quad (4)$$

Значения  $\gamma$  определяем по графику (см. рис. 5).

Если принять  $K = 0,8$ , а  $\sigma_{\delta} = 0,85/R = 1,56(0,85 - \text{коэффициент однородности})$ , что справедливо для стали марки ВСт3, то предельное напряжение в стыковом шве растянутых накладок узла можно определить по формуле

$$\sigma_y \leq \frac{0,8(1,56R - \sigma_x)}{\gamma} \leq \frac{1,25R - 0,8\sigma_x}{\gamma} \leq 0,85R. \quad (5)$$

Возможные значения  $[\sigma_x]$  для стали марки ВСт.3 при  $K = 0,8$  приведены ниже в таблице.

$\sigma_y$	Значения $[\sigma_x]$ при $\gamma$ , равном	
	1	0,8
0,85 R	0,5 R	0,71 R
0,7 R	0,69 R	0,86 R



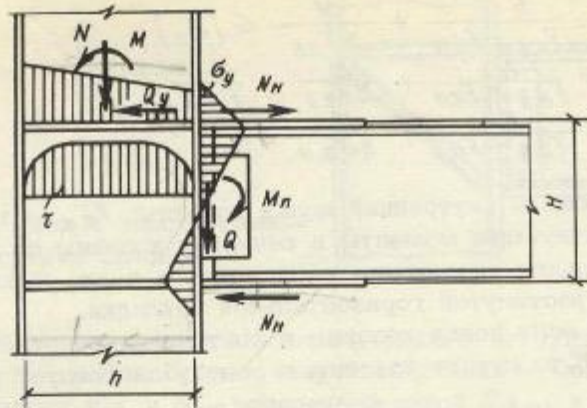


Рис. 6. Схема напряженного состояния стенки колонны в зоне узла

Стенка колонны в зоне рамного узла при одностороннем креплении ригеля находится в сложном напряженном состоянии (рис. 6). Она испытывает нормальные напряжения  $\sigma_x$  от сжимающей силы  $N$ , изгибающего момента  $M$  в колонне и реакции ригеля  $Q$ , нормальные напряжения  $\sigma_y$  от момента в ригеле, передаваемого с горизонтальных и вертикальных накладок узла, а также скальвающие напряжения  $\tau$  от поперечной силы  $Q_y$  в зоне узла.

$$Q_y = \frac{M_{оп}}{H} - Q_y^b, \quad \text{V} \quad (6)$$

где  $Q_y^b$  — поперечная сила в колонне выше узла.

Испытания показывают, что в этих условиях стенка рано вступает в упругопластическую стадию работы. Однако несущая способность ее в предельном состоянии остается высокой. Согласно работе [5], стенку колонны в пределах узла рекомендуется проверять по формуле

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2} \leq R, \quad (7)$$

где  $\sigma_x$  — нормальное напряжение в стенке колонны;  $\tau$  — скальвающее напряжение.

По этой формуле, как показывают результаты испытания, получают завышенные значения толщины стенки колонны в зоне узла, что приводит к неоправданным усложнениям конструкции колонны — устройству утолщенных вставок в стенках колонны в зонах рамных узлов.

Исходя из принятой методики расчета, полагаем, что в предельном состоянии стенка колонны в зоне узла будет воспринимать только поперечную силу  $Q_y$ , а усилия  $N, M$  и  $Q$  воспринимаются только полками колонны. Стенку колонны в этом случае проверяют по формуле

$$\tau = \frac{Q_y}{0,8 F_{CT}} \leq R_{CP}, \quad (8)$$

где 0,8 — коэффициент условия работы, учитывающий развитие пластических деформаций;  $F_{CT}$  — площадь сечения стенки колонны в зоне узла.

При расчете полок колонны должны быть обеспечены следующие условия:



$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{N}{F_{п.в} + F_{п.н}} + \frac{M}{h F_{п.в}} \leq [\sigma_x]; \\ \sigma &= \frac{N}{F_{п.в} + F_{п.н}} + \frac{M}{h F_{п.в}} + \frac{Q}{F_{п.в}} \leq R; \\ \sigma &= \frac{N}{F_{п.в} + F_{п.н}} + \frac{M}{h F_{п.н}} \leq R, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $F_{п.в}$  — площадь внутренней полки колонны;  $F_{п.н}$  — то же, наружной;  $M$  — соответствующие моменты в сечениях колонны со своими знаками;  $[\sigma_x]$  — предельное сжимающее напряжение в полке колонны в зоне, прилегающей к растянутой горизонтальной накладке.

В случае, если полки колонны в состоянии воспринять только часть усилий  $N$  и  $M$ , то стенку колонны в зоне узла следует рассчитывать по формуле

$$\frac{N_{ст}^2}{N_{пр.ст}^2} + \frac{Q_y^2}{Q_{пр.ст}^2} + \frac{M_{ст}^2}{M_{пр.ст}^2} \leq 1, \quad (10)$$

где  $N_{ст}$  и  $M_{ст}$  — доля нормальных усилий, приходящихся на стенку колонны;  $N_{пр.ст} = R F_{ст}$ ;  $Q_{пр.ст} = R_{ср} F_{ст}$ ;  $M_{пр.ст} = R \frac{H^2 \delta_{ст}}{4}$ .

Швы крепления стенки к поясам испытывают на длине  $H$  усилие  $T$  от пары сил, образующих поперечную силу  $Q_y$  в зоне узла  $T = Q_y H / h$ , где  $h$  — ширина стенки колонны.

Швы крепления стенки к наружной полке рассчитывают на это усилие в предположении равномерной передачи его по длине шва. На швы крепления стенки к внутренней полке колонны кроме сдвигающего усилия  $T$  может действовать момент от вертикальных накладок. Как указывалось, в предельном состоянии стенки этот момент может быть равен нулю. Однако для обеспечения работы узла по указанной схеме (см. рис. 6) следует швы крепления стенки к внутренней полке колонны в зоне узла назначать равнопрочными стенке или с учетом момента  $M = Q_y H$ .

Горизонтальные ребра колонны назначают того же сечения, что и горизонтальные накладки ригеля, и их крепление к стенке колонны рассчитывают на усилие  $N_H$ . При этом длина швов принимается не более  $l_{ш} = 60 h$  шва.

Степень податливости рамного узла определяется в основном степенью податливости стенки колонны в зоне узла. При упругой работе угол поворота узла за счет податливости его элементов может быть определен по формуле  $\varphi = Q / F_{ст} G$ . При развитии пластических деформаций в стенке колонны податливость узла резко возрастает, отчего снижается приведенная жесткость ригелей и, кроме того, это заметно сказывается на распределении усилий в раме. Начало текучести стенки колонны и, следовательно, узла характеризуется условием

$$\frac{N_{ст}^2}{N_{ст.пр}^2} + \frac{Q_{ст.т}^2}{Q_{ст.пр}^2} + \frac{M_{ст}^2}{M_{ст.пр}^2} = 1, \quad (11)$$

где  $N_{ст}$  и  $M_{ст}$  — доля усилий, приходящихся на стенку колонны в предположении упругой работы;

$$N_{ст} = N F_{ст} / F; \quad M_{ст} = M I_{ст} / I.$$



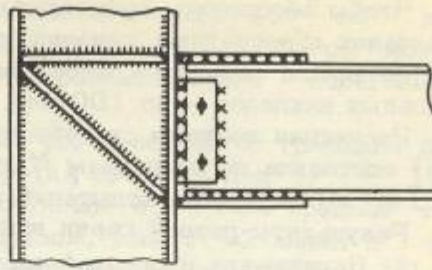


Рис. 7. Рамный узел с диагональными ребрами по стенке колонны

Из условия (11) можно найти поперечную силу  $Q_{ст.т}$ , при которой начнется текучесть стенки. Полная текучесть стенки — момент полного вытеснения усилий  $N_{ст}$  и  $M_{ст}$  поперечной силой  $Q_{ст.пр}$  и развитие от нее в стенке пластических деформаций:

$$Q_{ст.пр} = R_{сп} F_{ст}.$$

Для повышения жесткости рамного узла и усиления стенки колонны (в зоне узла) предлагается узел с диагональными ребрами по стенке колонны (рис. 7). Испытания показали его достаточную надежность и высокую жесткость до момента разрушения. Для уточнения действительной работы рамных узлов рассматриваемого типа и корректировки существующей методики их расчета в ЦНИИпроектстальконструкции были проведены две серии экспериментальных исследований.

Первая серия. Испытывали два вида (УР-1 и УР-2) типовых рамных узлов сварных балок сечением  $2 \times 200 \times 12 + 246 \times 8$  из стали Вст. 3. Работу колонны не рассматривали. В качестве стойки было использовано сечение  $2 \times 240 \times 30 + 340 \times 20$ , усиленное ребрами жесткости. Испытания проводили на консольных образцах длиной (от места приложения силы до грани стойки) около 1,1 м. Узлы УР-1 и УР-2 имели следующее различие: узел УР-1 с прямоугольными горизонтальными и вертикальными накладками; в узле УР-2 накладка нижнего пояса трапециевидная, полки верхнего пояса срезаны "на клин", накладка вертикальная идентична УР-1.

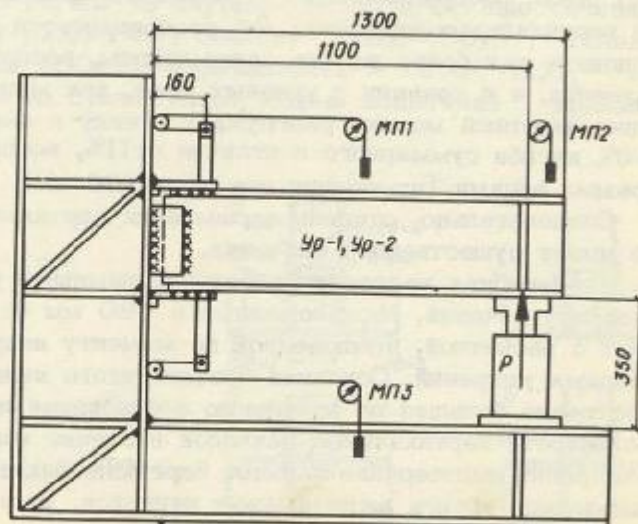


Рис. 8. Схема испытания образцов первой серии



Чтобы обеспечить возможность тензометрирования горизонтальных накладок в расчетных сечениях рабочая длина накладок (от грани стойки до начала фланговых швов) была увеличена до 70, ширина вертикальных накладок — до 100 мм.

Расчетная несущая способность узлов (по принятой методике расчета) составила по накладкам  $M = 175$ , по сечению ригеля —  $M = 140$  кН·м. Схема испытаний показана на рис. 8.

Результаты первой серии испытаний рамных узлов следующие:

1. Напряжения в средней части накладок сжатого пояса в узлах УР-1 превышают номинальные на 19, в узлах УР-2 на 26%. Можно считать распределение напряжений по ширине накладок достаточно равномерным; в обоих узлах накладки претерпевают изгиб в вертикальной плоскости как следствие деформаций сдвига вертикальных накладок и швов от действия поперечной силы.

2. В накладках растянутого (верхнего) пояса обоих типов узлов усилия переходят на полки балок по линейному закону. Однако распределение напряжений по ширине расчетного сечения различно: в узле УР-1 перенапряжения практически отсутствуют (прямоугольные накладки), в узле УР-2 перенапряжения по оси накладок составляют 18% (трапециевидная накладка).

Растянутые накладки, так же как и сжатые, испытывают существенный изгиб в вертикальной плоскости. Так, учитывая сдвиговые деформации вертикальных накладок и швов и пренебрегая сопротивлением горизонтальных накладок сдвигу, при  $P = 160$  кН получаем вертикальное смещение  $1,07 \cdot 10^{-2}$  см; дополнительное напряжение (при  $l_H = 10$  см) 80 ( $\delta_H = 1,2$  см) и 134 МПа ( $\delta_H = 2$  см). Эти величины близки к полученным при испытаниях (с учетом расположения точек измерения).

Хотя эти напряжения (как было отмечено выше) являются следствием ограниченных деформаций и не опасны, следует по возможности уменьшать ширину вертикальных накладок.

3. Вертикальные накладки и стенки балок напряжены (напряжениям соответствуют характерные треугольные эпюры), при этом имеются следующие особенности. Нормальные напряжения в стенке, около угловых швов, распределены по  $S$ -образной кривой [6]. Местный момент на вертикальных накладках  $Qa$  распределяется так, что в сечении у колонны, как более жестко защемленном, воспринимается 75% этого момента, а в сечении у угловых швов, как менее жестком, — 25%. Здесь местный момент разгружает стенку и она воспринимает только 3-6% изгиба суммарного в отличие от 11%, воспринимаемых внеузловыми зонами (измерения при  $P = 160$  кН).

Следовательно, степень защемления вертикальных накладок в колонне имеет существенное значение.

4. Изгибная жесткость ригелей с рамными узлами, измеренная по повороту сечений, расположенных в 480 мм от стойки, хорошо совпадает с расчетной, вычисленной по моменту инерции ригеля без учета узловых уширений. Основная причина этого явления — по-видимому, существенно большая по сравнению с основным металлом ригеля деформативность вертикальных накладок и стенки колонны в зоне узла. Измерения подтвердили наличие вертикальных смещений узловых зон вследствие сдвига вертикальных накладок, швов и стенки колонны. На



расстоянии 70 мм от стойки смещение составило  $2,5 \cdot 10^{-2}$  см при  $P = 160$  кН (отличие от вычисленной величины  $1,07 \cdot 10^{-2}$  см может быть объяснено неучтенными в расчете дополнительными сдвиговыми явлениями).

5. Упругопластическая работа узлов, определенная по графикам общих деформаций (прогибов, углов поворота), началась при  $P = 190$  (УР-1) и  $P = 220$  кН (УР-2), что составило 90 и 96% предела текучести материала накладок. Таким образом, узел УР-2 имеет в целом более благоприятное внутреннее распределение усилий, чем УР-1. Однако первые местные пластические деформации (главным образом в полках ригелей, у начала швов) отмечены уже при  $P = 120 \dots 160$  кН, т.е. ниже расчетных нагрузок. Напряжения в расчетных сечениях балок при всех загрузках несколько превышали напряжения в накладках. Разрушение произошло из-за образования пластического шарнира при  $P = 330 \dots 340$  кН, или свыше 200% расчетной нагрузки, что является характерным для конструкций подобного типа.

Аналогичное исследование проводили в 1955 г. [3], когда испытывали рамные узлы примыкания ригелей из двутавра № 36а к колонне из блослов сечением 300х300 мм. Схема испытаний аналогична приведенной на рис. 8.

В этих испытаниях не ставили задачи выявить вертикальные сдвиговые смещения узлов относительно граней колонны. Жесткость узлов определяли по углу поворота осей ригелей на расстоянии 200 мм от грани колонны. Она оказалась высокой (хотя с каким-либо расчетом ее не сравнивали).

Отмечено, что в основании горизонтальных накладок (имеющих уширение у грани колонны) распределение напряжений близко к равномерному в упругой стадии, а при переходе в упругопластическую стадию в центре накладок деформации (напряжения) резко возрастают. Также отмечено, что вертикальные накладки работают на дополнительный момент как элементы, жестко защемленные в колонне и балке. Предельная нагрузка на узлы превысила 2 расчетные нагрузки, вычисленные при  $R = 2,10$  МПа, и 2,7 нагрузки, вычисленные при  $[6] = 160$  МПа.

Вторая серия. Испытывали четыре вида (рис. 9) односторонних рамных узлов крепления ригеля из двутавра № 36 к колонне сечением  $2 \times 250 \times 12 + 400 \times 8$  (для узлов РУ-4 сечение стенки  $400 \times 6$ ); сечение горизонтальных накладок  $200 \times 12$ , вертикальных —  $100 \times 6$  (х2); все накладки прямоугольные из стали ВСт.3. Схема испытаний показана на рис. 10.

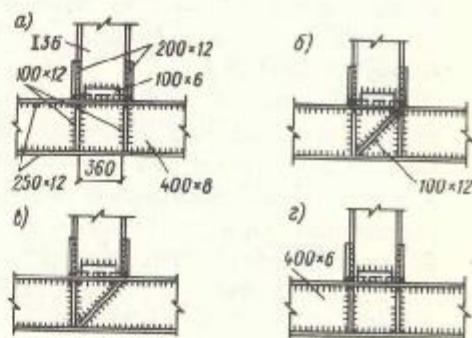


Рис. 9. Образцы узлов второй серии исследования  
 виды узлов: а - РУ-1; б - РУ-2;  
 в - РУ-3; г - РУ-4



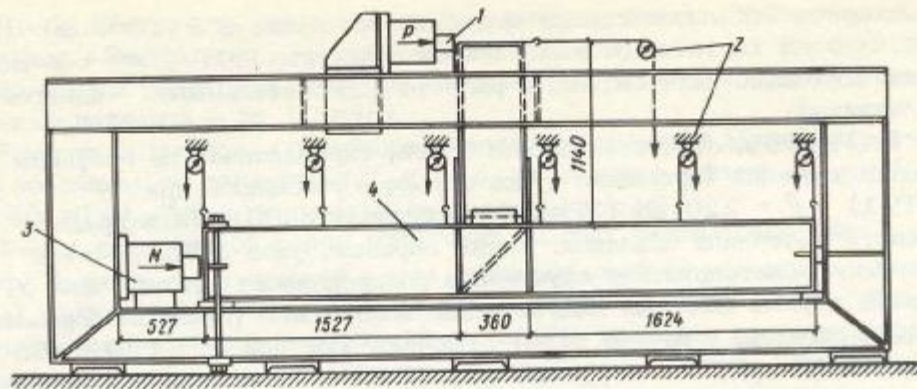


Рис. 10. Схема испытания образцов узлов второй серии исследования

1 - домкрат 50 т; 2 - прогибомеры; 3 - домкрат 100 т;  
4 - рамный узел

Результаты второй серии испытаний рамных узлов

1. Распределение усилий по длине горизонтальных накладок равномерное; в расчетном сечении накладок середина напряжена больше, чем края, что частично объясняется поперечным изгибом от сдвига. Сдвиги специально не измеряли.

2. Ребра жесткости стенок колонн узлов РУ-1 и РУ-4 воспринимают значительную часть усилия от накладок (не менее 80%) и передают их стенке по линейному закону (они убывают практически до нуля у противоположных полок колонн). Диагональные ребра жесткости узлов РУ-2 и РУ-3 воспринимают 40-45% поперечной силы и напряжены равномерно по всей длине (в предельном состоянии доля поперечной силы, приходящаяся на диагональные ребра, возрастает).

3. Полки колонн в узловых зонах напряжены равномерно. Эпюры моментов и в значительной степени продольных сил в пределах узлов изменяются по законам, близким к линейным.

4. Стенки колонн по характеру работы в узловых зонах могут быть подразделены на две группы: в узлах РУ-1 и РУ-4 стенки полностью воспринимают поперечную силу; касательные напряжения при нагрузках  $P = 160$  и  $N = 980$  кН в среднем сечении стенок составляют соответственно 120-150 и 140-180 МПа, поперечные нормальные напряжения достигают 120 МПа; в узлах РУ-2 и РУ-3 стенки воспринимают только часть (55-60%) поперечной силы, что сказалось на касательных напряжениях в стенке, составляющих при расчетных нагрузках не более 50-80 МПа.

5. Жесткость узлов оценивали по углу поворота узловой зоны колонны. В узлах без диагональных ребер измеренные углы значительно больше расчетных (вычисленных без учета влияния поперечной силы); в узлах с диагональными ребрами экспериментальные углы близки к расчетным. При увеличении продольных сил в колоннах (что расчетом не учитывалось) углы поворота возрастают.

6. Появление упругопластической работы узлов зависит от конструкции узловой зоны колонн и начинается согласно графикам "усилие



на ригеле — угол поворота узла" при нагрузках: для узлов РУ-1 — 190; РУ-2 — 300; РУ-3 — 350; РУ-4 — 160 кН.

Узлы разрушались при следующих условиях (усилие в колоннах  $N = 980$  кН): узлы без диагональных диафрагм разрушились от больших сдвигов и от потери устойчивости стенок при  $S$ -образном изгибе колонн, предельное усилие на ригеле для РУ-1 — 300, для РУ-4 — 200 кН; узлы с диагональными ребрами разрушились по растянутым стыковым швам; усилия на ригеле составляли 370–380 кН.

Теоретические значения предельной несущей способности узлов, подсчитанные по действительным механическим свойствам материала на основе приведенной выше методики, близки к фактическим значениям, полученным экспериментально.

Таким образом, результаты второй серии испытаний подтверждают правильность предложенной методики расчета рамных узлов рассматриваемого типа. К сожалению, на испытанных образцах не удалось создать значительные сжимающие напряжения в полках колонн в зоне примыкания растянутых накладок и экспериментально проверить принятую методику расчета этого участка полки колонны.

#### Выводы

1. Сварной рамный узел на накладках весьма надежен в эксплуатации. Известные методы расчета узла основаны на предположении упругой работы всех его элементов и учитывают только основные усилия в узле от силовых воздействий со стороны заземленных ригелей. При учете всех силовых факторов в предположении упругой работы узла выявляются зоны текучести в отдельных его элементах уже в начальной стадии нагружения, однако экспериментально-теоретические исследования узла показывают, что при этом несущая способность узла не исчерпывается. Это свидетельствует о том, что узел способен приспосабливаться к силовым воздействиям. По мере нагружения узла опорным моментом в стенке колонны происходит перераспределение напряжений, горизонтальные и вертикальные нормальные напряжения частично "вытесняются" скалывающими напряжениями за счет догрузений полки колонны.

2. Участок полки в зоне примыкания растянутой горизонтальной накладки, сжатый в вертикальном направлении и растянутый в горизонтальном, способен работать далеко за пределом текучести.

3. Предлагаемая методика расчета рамного узла, разработанная на основе статического метода теории предельного равновесия, основана на предположении, что в предельном состоянии все элементы узла способны работать за пределом упругости, а участок полки колонны в зоне примыкания растянутой накладки, находящейся в сложном напряженно-деформированном состоянии, способен испытывать напряжения, близкие к разрушающим, при одновременном действии сжатия в одном направлении и растяжения в другом.

4. Жесткость рамного узла зависит от степени загрузки его и определяется в основном жесткостью стенки колонны.

5. Для повышения жесткости рамного узла и усиления стенки колонны в зоне узла рекомендуется устанавливать диагональные ребра, заменяющие горизонтальные в уровне нижней горизонтальной накладки узла.

### Список литературы

1. Анизотропия механических свойств толстолистовой малоуглеродистой стали. "Промышленное строительство", 1966, № 4. Авт.: В.А. Балдин, М.М. Кобрин, П.Д. Одесский, П.И. Соколовский.
2. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. М., Стройиздат, 1932.
3. Исследование работы рамных конструкций. ЦНИПС. Научное сообщение. М., 1955, вып. 2.
4. Одесский П.Д. Анизотропия механических свойств высокопрочной стали для металлических конструкций. "Металловедение и термическая обработка металлов". 1969, № 5.
5. Стрелецкий Н.С. Стальные конструкции. М., Стройиздат, 1952.
6. Троицкий П.Н., Левитанский И.В. Опорные соединения разрезных балок на вертикальных накладках, приваренных к стенке балки (узлы УНС). "Проектирование металлических конструкций", (ШНИПСК). М., Стройиздат, 1970, вып. 4.
7. Файлон М., Кокер А. Оптический метод исследования напряжений. М., ОНТИ, 1939.