

## ПОДАТЛИВОСТЬ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ

*Мухин А.В., Зинкевич И.В., Головки Л.Г., Лебедь В.А.*

В настоящее время в практике строительства существенное место занимают полноразборные здания с использованием стальных конструкций максимальной заводской готовности с применением холодногнутых профилей, которые позволяют снизить расход металла по сравнению с горячекатаными профилями, повысить эксплуатационную надежность и снизить трудоёмкость изготовления и монтажа, тем самым сократить сроки и снизить стоимость строительства.

Экономия металла в конструкциях с применением прямоугольных труб в большей части достигается за счёт рациональной концентрации материала в профиле и отсутствия в узловых соединениях фасонки. Элементы в узлах соединяются на сварке. К достоинствам прямоугольных труб следует отнести также благоприятные статические характеристики сечений, повышенные физико-механические характеристики материала вследствие холодного гнутья, значительная коррозионная стойкость, благоприятные монтажные характеристики и высокая эстетичность, благодаря прямоугольной форме сечений. Явные недостатки заключаются в повышенной стоимости вследствие передела листа, ограничения в использовании больших толщин листа и сталей повышенной прочности, концентрация напряжений в узловых соединениях.

В настоящее время в Республике Беларусь и России выпускается широкая номенклатура замкнутых гнутосварных профилей с толщинами стенок от 3 до 14 мм [1]. В Беларуси подобные профили и конструкции выпускаются в Молодечно на заводе металлических конструкций с толщинами стенок от 3 до 8 мм.

Однако, не смотря на преимущества рамных конструкций из данных профилей, внедрение таких конструкций ограничено. При использовании для каркасов зданий рамных систем возникает проблема, связанная с податливостью узловых соединений, жёсткостью которых меняется в процессе нагружения каркаса здания. Поэтому в настоящее время весьма актуально создание метода, позволившего определить податливость, оптимального алгоритма и программного продукта для расчёта подобных конструкций с учётом изменения податливости узловых соединений в процессе нагружения, поскольку действующие на сегодняшний день нормы совершенно не учитывают данное явление. Исследование работы стальных конструкций с применением замкнутых гнутосварных профилей выполнялись также и сотрудниками кафедры СК в рамках ГБ 97/607 [2], [3].

В настоящее время существуют методики и ряд исследований напряжённо-деформированного состояния узлов рамных систем, проводившихся в различных странах. Сложностью в определении напряжённо-деформированного состояния узла является учёт особенности работы тонкостенного профиля со сложным напряжённым состоянием и с нелинейной работой материала в локальных областях, а также с особен-

ностями самих узловых соединений. Было проведено большое количество экспериментально-теоретических исследований с целью получения удовлетворительных методик расчёта. Теоретическое решение напряжённо-деформированного состояния узлов весьма сложно. Суть большинства методов расчёта заключается в сочетании экспериментальных данных для конкретных узлов с теоретическими предпосылками различной степени приближения. Основным методом при решении подобных задач—метод предельного равновесия. Однако недостаток его в том, что принимается искусственная схема разрушения узла, которая не отвечает её действительной картине. Кроме того метод предельного равновесия не позволяет определить перемещения, соответствующие определённой стадии податливости узла, изменяющейся в процессе нагружения.

Исходя из экспериментальных и теоретических исследований, выделяют три основных этапа в работе узла рамы в процессе нагружения. На первом этапе узел работает упруго. Второй связан с локальным развитием пластики. На третьем этапе происходит развитие шарнира пластичности в узле.

Объектом наблюдения в рамных конструкциях, как было сказано выше, являются бесфасоночные узловые соединения (узлы с примыканием к грани профиля одного или нескольких стержневых элементов). Данные узлы применяются в конструкциях ферм, сквозных колонн, каркасах одноэтажных и многоэтажных зданий. По очертанию они подразделяются на Т-, У-, К-образные и крестообразные. Узлы образуются как соединением прямоугольных труб, так и соединением прямоугольных труб и двутавров. Следует также отметить, что при проектировании стальных рам рациональным является комбинирование двутавровых ригелей и колонн из прямоугольных труб.

На сегодняшний день нет единого критерия разрушения таких узлов. В литературных источниках, как правило, рассматриваются три возможных вида разрушения: первое - разрушение узла, то есть разрушение полки или стенок пояса; второе - местное разрушение примыкающего элемента в окрестности узла; третье - разрушение по сварному шву (прочность сварных швов, как правило, обеспечивается отдельно так, чтобы разрушение по сварным швам не происходило). За критерий разрушения таких узлов целесообразным кажется принятие максимума нагрузки. Однако, воспользовавшись терминологией I. Ligocki и J. Szlendak [4], [5] введших понятия “мягкие” узлы ( $\beta \leq 0,9$ ) и “жесткие” узлы ( $\beta \rightarrow 1$ ), для “мягких” узлов ( $\beta \ll 1$ ) до достижения максимума нагрузки имеют место очень большие пластические деформации пояса, а для “жестких” узлов ( $\beta \rightarrow 1$ ) обычно перед достижением максимума нагрузки возникают трещины в зоне нагрева металла при сварке. Таким образом, характер деформирования и разрушения этих узлов существенно различается. Следует также отметить, что на данный момент нет простых методов для предсказания разрушающей нагрузки. Причем теоретический анализ работы таких узлов должен учитывать изменение геометрических параметров во время процесса нагружения, механическое упрочнение, мембранный эффект и другие факторы. Таким критерием может быть принят произвольно принятый максимальный угол поворота или максимальное перемещение нагруженного пояса, как было

предложено в статье Mouty [6]. Однако возникает проблема в предсказании предельной нагрузки по такому критерию. По этой причине этот критерий оказался слишком сложным для практического применения.

За критерии разрушения с недавнего времени была принята нагрузка, соответствующая образованию шарнира пластичности. Однако нет единого мнения, как определять разрушающую нагрузку. Kanatani предложил принять за предельную нагрузку, при которой жесткость узла становится равной одной третьей начальной жесткости. Это определение имеет недостаток в силу отличия работы “мягких” и “жестких” узлов. Наиболее приемлемым выглядит предложение Manga [7]. Он определил максимальную пластическую нагрузку для узлов, нагруженных изгибающим моментом, как нагрузку, связанную с максимумом кривизны экспериментальной кривой “момент - поворот”. Подобное определение выглядит наиболее приемлемым по сравнению с описанными выше. Между тем и данный критерий не гарантирует приемлемый резерв безопасности для каждого узла.

Необходимо также отметить, что при статическом расчете рам следует четко различать типы узловых соединений ригелей со стойками, которые могут быть шарнирными, жесткими, податливыми. Шарнирное узловое соединение не должно передавать изгибающих моментов, которые бы существенно влияли на работу рамы. Жесткое узловое соединение должно быть таково, чтобы его деформация не изменяла бы распределение усилий в элементах рамы более чем на 5 процентов. Податливое узловое соединение должно передавать момент в узле в соответствии с зависимостью « момент – угол поворота » в узле. Статический расчет рам при наличии жестких и шарнирных узлов можно выполнять по существующим программам. Рамы с податливыми узлами необходимо рассчитывать по специальным программам. При нелинейной зависимости « момент – угол поворота » программы должны использовать итерационные процессы.

Возникает необходимость в классификации узловых соединений. Узел рамы можно считать шарнирным, если выполняется условие  $S < 0.5EJ/L$ , где:  $S$  – секущий модуль кривой « момент – угол поворота » при расчетном значении момента;  $EJ/L$  – погонная жесткость ригеля.

Для определения вида узлового соединения необходимо экспериментально или теоретически получить кривые зависимости « момент – угол поворота » и сопоставить их с графиками, приведенными ниже, которые справедливы при соотношении погонных жесткостей ригеля и стойки более 0.1 [8].

$$\bar{m} = \frac{M}{M_{pl}}; \quad \bar{\phi} = \frac{EI\phi}{M_{pl}l};$$

$M$  - момент в узле;  $M_{pl}$  - предельный пластический момент в узле;  $\phi$  - угол поворота в узле,  $EI$  - жесткость ригеля,  $l$  - пролет ригеля.

При проектировании рамных конструкций из замкнутых профилей с целью еще большей экономии металла, в местах, подверженных большим напряжениям, ведущим к потере несущей способности из-за выхода из строя стенок профилей, как по длине

элементов-стоек, так и в узлах, было предложено заполнять прямоугольные трубы бетоном. Однако, из-за недостаточно высокого сцепления бетона на обычных цементах со стенками профилей происходит отрыв металлической оболочки от бетонного ядра. Происходит это явление вследствие усадки бетона во времени, а так же в процессе работы самого трубобетона [9]. Как вариант решения данной проблемы был предложен к использованию бетон на самоупрочающихся цементах. Однако при использовании трубобетонных элементов конструкций на самоупрочающихся цементах возникает проблема, связанная с определением несущей способности таких элементов, что вызвано недостатком экспериментальных данных по этому вопросу и отсутствием удовлетворительных теоретических разработок в данной сфере.

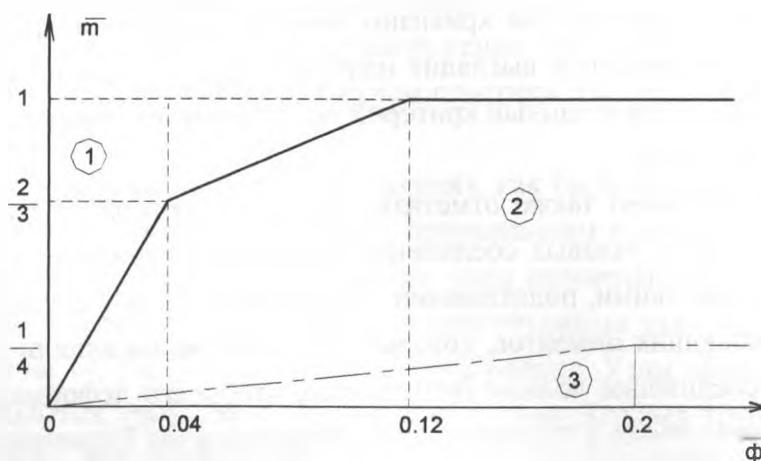


Рис. 1. Рамные системы: 1 - жесткие узлы; 2 - податливые узлы; 3 - шарнирные узлы.

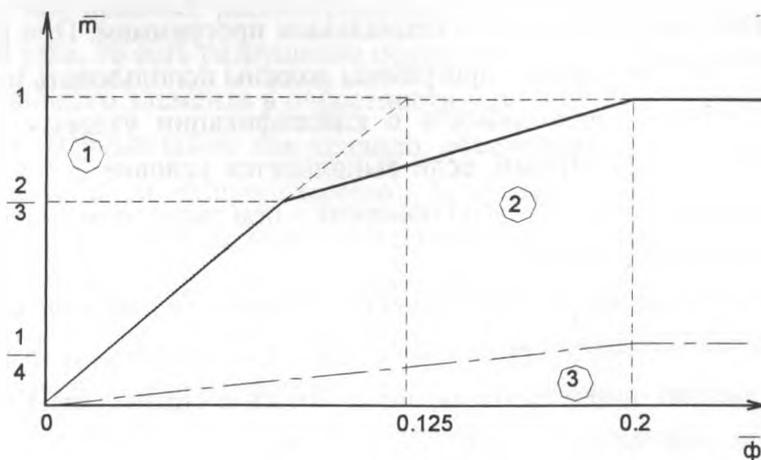


Рис. 2. Рамно-связевые системы: 1 - жесткие узлы; 2 - податливые узлы; 3 - шарнирные узлы.

Таким образом, решение проблемы податливости узловых соединений из прямоугольных труб на данный момент является весьма актуальным. Результаты экспериментальных исследований и теоретических разработок в данной области существенно до-

полнили бы имеющиеся и разрабатываемые в настоящее время нормативные документы. Что в итоге позволило бы получить значительный экономический эффект при проектировании металлических конструкций.

### Литература

1. Руководство по проектированию стальных конструкций из гнутосварных замкнутых профилей. ЦНИИПроектстальконструкция. М. 1978. 43с.
2. Отчёт по НИР 97/607 «Разработка метода расчёта и программного обеспечения для проектирования стальных конструкций с применением замкнутых гнутосварных профилей с учётом податливости узловых соединений при нагружении». - Мухин А.В. , Зинкевич И.И. , Головкин Л.Г. , Черноиван Н.В. , Лебедь В.А. - Брест 1997. - 63с.
4. Определение податливости узловых соединений из прямоугольных труб. - Мухин А.В. , Зинкевич И.И.—Металлостроительство—96 (Состояние и перспективы развития) : Международная конференция. Сборник трудов , т2, Донецк - Макеевка - 1996. - 132с.
5. Szlendak J., Ligocki I. Strength of T-joints of type RR-I in rectangular hollow section frames. - Staveb. Cas. - 1989, N37, p. 175-189.
6. Szlendak, M. Broniewicz. Sztywnosc wezlow spawanych typu T z rur prostokatnych. - Брест - 1995.
7. Mouty J. Calcue descharges ultimes des assemblages saundes de profils creux et rectangulares. - Construction Metallique. - 1976, N2, s. 37-58.
8. Mang F., Bucak O., Wolfmuller F. Bemessungsverfahren fur T-Knoten aus Rechteck-Hohlprofilen, Forschungsbericht N82, der Studiengesellschaft fur Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e. V., Dusseldorf, 1981.
9. Brodka J., Kozlowski A., Sztwnosc i nosnosc wenzlow podatnych.- Bialystok 1996 Rzeszow. p.322.
10. Прочность трубобетона. – Под ред. Лукша Л.К.-- Мн. : « Высшэйшая школа », 1977.—95 с.
11. Инструкция по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций . СН 511-78. Госстрой СССР.- М.: Стройиздат, - 1979. - 59с.
12. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. 94с.
13. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln fur den Hochbau Deutsche fassung ENV 1993-1-1.