

Разработка рамных узлов стальных конструкций с учетом пластических деформаций

Н.А. Трастьян¹, Н.В. Линьков²

¹ООО "СтальПроект",

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Аннотация: Рассматривается возможность использования европейских норм, руководств и пособий для расчета элементов рамных узлов конструкций стальных каркасов по критериям, которые не нашли на сегодняшний день отражения в российских нормативных документах. Численными методами произведен анализ несущей способности рамных узлов при различных комбинациях продольных усилий и изгибающих моментов. Рассматривается образование в элементах рамных узлов стальных конструкций остаточных пластических деформаций. Расчет узлов выполнялся по нормам EN и РФ, а так же с применением программного комплекса «ANSYS». Выполнен сравнительный анализ результатов расчета по европейским и российским нормам. Ставится вопрос о необходимости дальнейших численных исследований работы стальных рамных узлов, в том числе с проведением натурных испытаний, а так же выработки новых методик расчета рамных узлов с учетом пластических деформаций.

Ключевые слова: европейские нормы расчета стальных элементов, узлы рамных конструкций, несущая способность, пластические деформации, усталостная живучесть, малоцикловые расчетные нагрузки, полная расчетная нагрузка, перераспределение внутренних усилий, податливость жестких узлов.

Сталь обладает разнообразными свойствами и определенными специфическими особенностями, которые требуется учитывать, для того что извлекать максимальное число преимуществ от ее применения в строительной отрасли. Это определяет в целом проект сооружения – характер конструкции каркаса. В связи со строительством таких объектов-гигантов, как Ямал СПГ и Амурский ГПЗ, на фоне проектирования и возведения малоэтажных зданий с применением стальных конструкций [1], возникает необходимость развития методов расчета рамных узлов стальных каркасов, выполненных по рамной и рамно-связевой схеме с применением опыта, полученного международной практикой в стальном строительстве [2], в т.ч. применение упрощенных конструкций стальных узлов в любом сочетании сечений сопрягаемых колонн и балок. Применение полужестких узлов при расчете рам и связанное с этим перераспределение внутренних усилий в

элементах каркаса приводит к снижению веса всего металлокаркаса на 12-14% [3] за счет учета податливости жестких узлов.

Цель исследования состояла в применении европейских норм и руководств [4, 5] для расчета конструктивных элементов рамных узлов по критериям, не отраженным в российских нормативных документах. Выполнен расчет узлов и проведен сравнительный анализ результатов расчета по европейским и российским нормам и руководствам. Численными методами в программном комплексе ANSYS проведен поиск зон риска и неиспользованных резервов несущей способности рамных узлов при различных комбинациях продольных усилий и изгибающих моментов, в частности получены значения остаточных пластических деформаций в узлах. Ведется поиск и выработка практических рекомендаций для применения серии рамных узлов как для европейской, так и для российской практики стального строительства. Рассмотрено образование в элементах рамных узлов остаточных пластических деформаций. Пластическая работа полужестких узлов имеет крайне важное значение и рассмотрена в ряде отечественных [6, 7] и зарубежных исследований [8, 9].

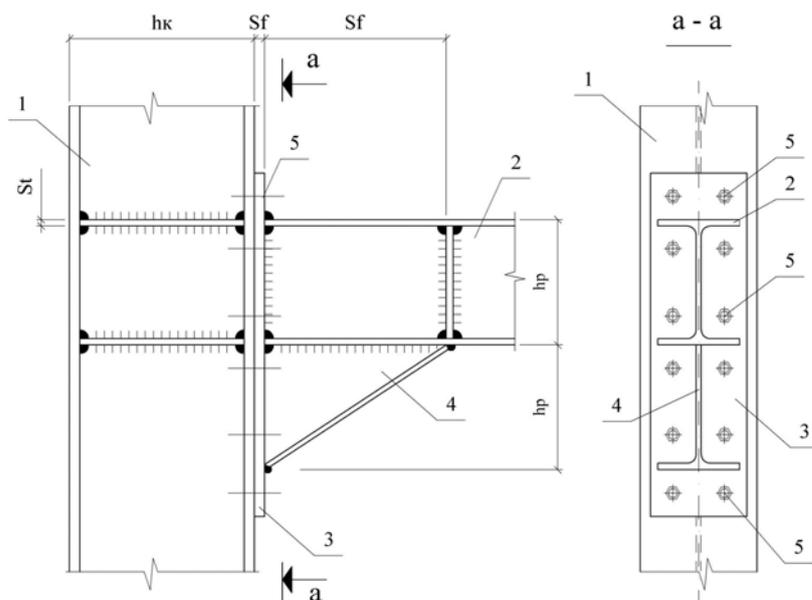


Рис. 1. Рамный узел из европейской практики

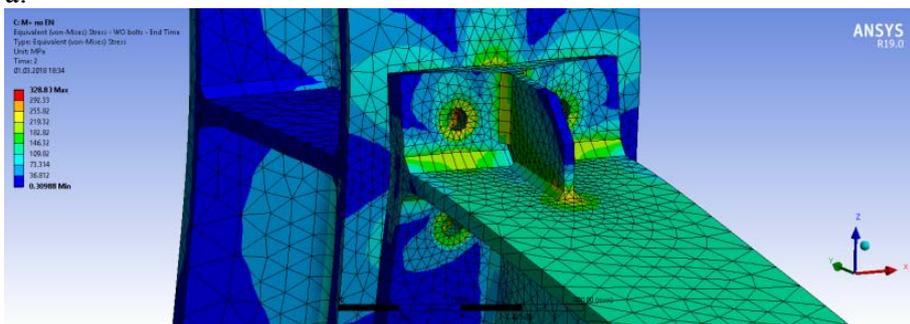
Были выполнены аналитическим по Европейским и Российским нормам и численным в программном комплексе ANSYS методами расчет рамного узла по схеме, представленной на рис. 1 при следующих типоразмерах основных элементов: ригель – двутавр 80Ш2, колонна – двутавр 40К3 по СТО АСЧМ 20-93, болты - М27 сталь 40Х, с преднапряжением $P_b = 244$ кН. Для обеспечения достоверности результатов расчета узлов в программном комплексе ANSYS были приняты: фактические диаграммы растяжения материала для стали С345 на основании инженерной диаграммы растяжения, приведенной в СП16.13330.2017; для высокопрочных болтов и сварочного материала были применены билинейные диаграммы расширения стали с упрочнением. Коэффициент трения принят $\mu=0,3$.

Вычисления, выполненные по нормативным документам показали, что расчетная несущая способность рамного узла [10], определенная по по нормам Российской федерации составила $M_{рф}=1093$ кН*м, по Еврокодам - $M_E=1492$ кН*м, т.е. на 36% больше. Данный результат объясняется допущением локальных пластических деформаций в 5% (EN 1993-1-5 приложение С параграф С.8 примечание 1). Под максимально допустимой для российских норм нагрузкой локальные пластические деформации не превышают условного предела упругости с остаточными деформациями $\varepsilon=0,2\%$. Это показывает, что несущая способность рамных узлов в европейских нормах увеличена за счет условного снижения усталостной живучести. Данный факт требует более подробного обоснования и выявления необходимого и достаточного уровня усталостной живучести стальных рамных узлов, т.к. остаточные деформации 5% могут привести во многих случаях к ускоренному разрушению узла даже при малоцикловых расчетных нагрузках.

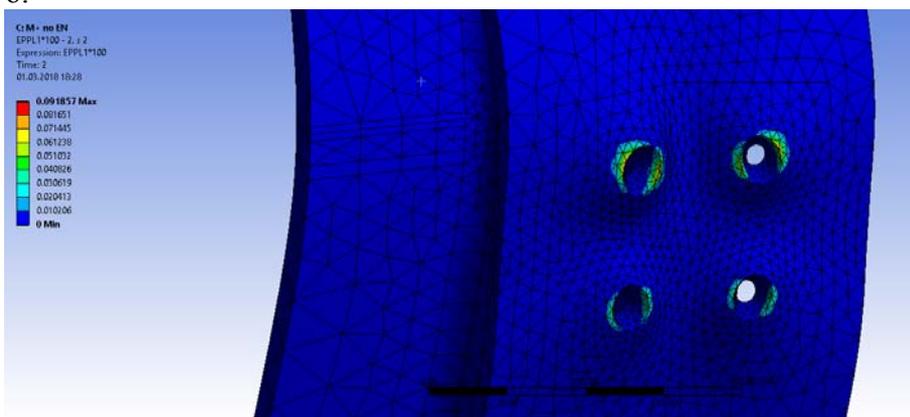
Вычисления, выполненные в программном комплексе ANSYS (рис. 2) показывают, что в рамном узле имеется значительный резерв несущей

способности, который может быть выявлен за счет применения фактических диаграмм деформации металла. Результаты показывают, что при нагрузке, допускаемой отечественными нормами при $M=1093$ кН*м, остаточные деформации составляют $\varepsilon = 0,089\%$ для пластин и $0,027\%$ для болтов. При нагрузке, допускаемой еврокодами при $M=1492$ кН*м, остаточные деформации составляют $\varepsilon = 0,092\%$ для пластин и $0,029\%$ для болтов.

а.



б.



в.

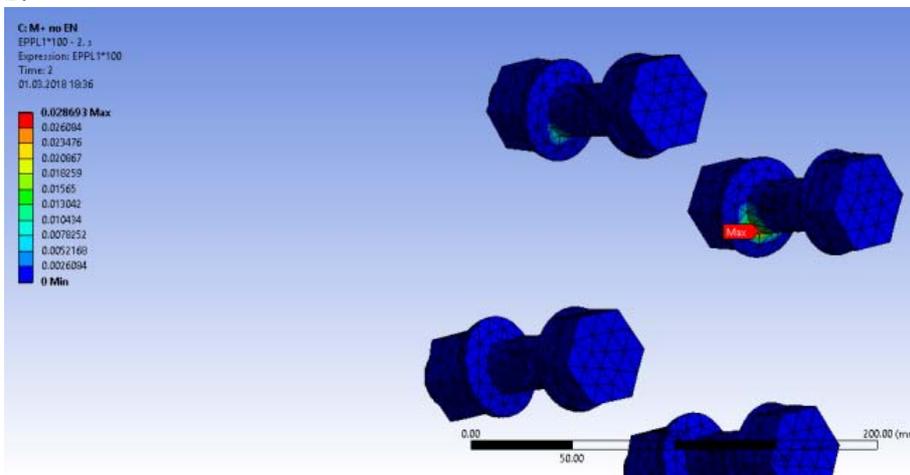


Рис. 2. Результаты расчета рамного узла на нагрузку $M_y = 1492$ кН*м 6

программном комплексе ANSYS:

а) Общие эквивалентные напряжения в элементах узла; б) Остаточные пластические деформации в полке колонны, в) Остаточные пластические деформации в высокопрочных болта

На основании выполненных расчетов сделаны следующие выводы.

1. Расчеты в программном комплексе ANSYS с учетом фактических диаграмм работы металла элементов и соединений показывают значительные отличия от результатов, полученных с применением диаграмм растяжения стали по Прандтлю и билинейных с упрочнением для основного и сварочного материала.

2. Требуются дальнейшие численные исследования выявленных резервов в работе стальных рамных узлов и натурные испытания для определения фактической работы и выработки новых методик расчета рамных узлов с учетом пластических деформаций.

3. Необходим учет усталостной живучести стальных рамных узлов, что связано с вероятностью возникновения полных расчетных нагрузок за проектный срок эксплуатации.

Литература

1. Туснин А. Р., Варакин П. А. Типовой стальной каркас пятиэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 45-49.

2. Harrell T.J., Pinon J.P., Shane C.D. State College, Pennsylvania, 2016. pp.12-28.

3. Бесалаев Н.А. Проектирование многоэтажных зданий с металлическим каркасом для повышения их сопротивления прогрессирующему обрушению // Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5316.

4. BS EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures. Design of joints. BSI, 2005. 133 p.
5. Joints in Steel Construction. Moment-resisting Joints to Eurocode 3. Steel Construction Institute. 2013. 163 p.
6. Туснина В.М. Податливые соединения стальных балок с колоннами // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5(73). С. 25–39.
7. Гранкина Д.В., Иванов Н.В., Современные конструктивные решения высотных зданий на примере строительства Лахта Центра // Инженерный вестник Дона, 2018 №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5290.
8. Harrell T. J., Pinon J. P., Shane C. D. Building enclosure design for modular construction. 3rd Residential building design and construction conference (March 2-3, 2016). State College, Pennsylvania, pp. 12-28.
9. Наарю, Jaakko & Heinisuo, M. (2010). Minimum cost steel beam using semi-rigid joints. Journal of Structural Mechanics. 43. pp.1-11.
10. Харт Ф., Хенн В., Зонтаг Х. Атлас стальных конструкций. Многоэтажные здания. М.: Стройиздат, 1977. 351 с.

References

1. Tusnin A. R.. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo № 10. 2018 pp. 45-49.
 2. Harrell T.J., Pinon J.P., Shane C.D. State College, Pennsylvania, 2016. pp.12-28.
 3. Besalaev N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5316.
 4. BS EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures. Design of joints. BSI, 2005. 133 p.
 5. Joints in Steel Construction. Moment-resisting Joints to Eurocode 3. Steel Construction Institute. 2013. 163 p.
-



6. Tusnina V.M. Podatlivye soedinenija stal'nyh balok s kolonnami. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2017. № 5 (73). pp. 25–39.
7. D.V. Grankina, N.V. Ivanov. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5290.
8. Harrell T.J., Pinon J.P., Shane C.D. State College, Pennsylvania, 2016. pp.12-28.
9. Haapio, Jaakko & Heinisuo, M. (2010). Minimum cost steel beam using semi-rigid joints. Journal of Structural Mechanics. 43. pp.1-11.
10. Hart F., Henn V., Sontag H. Atlas stal'nyh konstrukcij. Mnogoehtazhnye zdaniya. [Atlas of steel structures. High-rise buildings]. M.: stroiizdat, 1977. 351 p.