

# АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КРОНШТЕЙНА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ САЙДИНГОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

*В.Б. Порошин, П.С. Дружинин*

## ANALYSIS OF THE LIMIT STATE OF MOUNTING BRACKETS FOR METAL SIDING PANELS

*V.B. Poroshin, P.S. Druzhinin*

В результате выполненного методом конечных элементов расчетного исследования процесса деформирования монтажного кронштейна для крепления сайдинговых панелей и металлической кровли получены предельные по критериям начала пластического течения материала и достижения предельного равновесия значения весовой и ветровой нагрузок. На основе анализа кинетики напряженно-деформированного состояния предложен новый вариант конструкции, обладающий более высокой несущей способностью и в то же время менее трудоемкий в изготовлении.

*Ключевые слова:* монтажный кронштейн, весовая и ветровая нагрузки, метод конечных элементов, концентрация напряжений, пластическое течение материала, состояние предельного равновесия.

The deformation of the mounting bracket for metal siding panels and flexible metal roofing is considered by the finite element method. We obtain the limiting values of the weight and wind load by criteria of the start of material plastic flow and of limiting equilibrium state. On the basis of the analysis of kinetics of strain stress state a new variant of the structure, which has a high load capacity and less labor intensive, is given.

*Keywords:* mounting bracket, the weight and wind loads, finite element method, stress concentration, plastic flow of material, the state of limiting equilibrium.

П-образный кронштейн – одна из деталей, которые массово применяются в строительном производстве. Он используется в качестве промежуточного элемента между стеной, гидро- и теплоизоляцией и П-образным профилем, к которому непосредственно крепятся фасадная облицовка сайдингом или металлическая кровля (рис. 1).

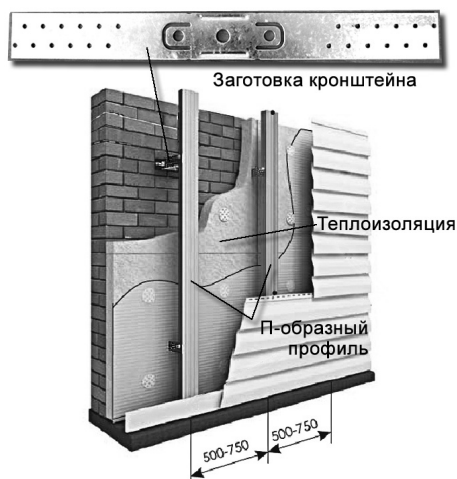


Рис. 1. Расположение кронштейнов при монтаже сайдинговых панелей и внешний вид заготовки

Кронштейн изготавливают путем вырубki из полос или листов малоуглеродистой оцинкованной стали различной толщины; при этом основным критерием выбора материала обычно является его цена. В практике строительного производства используются различные варианты исполнения кронштейна, отличающиеся длиной (150, 200 и 250 мм) элементов, перпендикулярных опоре – стене или стропилам (назовем их «плечи»).

Расчетная схема исследуемой конструкции очевидна и проста – статически определяемая плоскопространственная рама, нагруженная силой веса  $Q$  панелей перпендикулярно плоскости рамы и силой давления ветра  $F$ , действующей в ее плоскости (рис. 2).

Практический интерес представляет определение предельных нагрузок  $Q_T$ ,  $Q_0$  и  $(Q_T + F)$ ,  $(Q_0 + F)$ , отвечающих соответственно началу пластического течения материала в отдельных локальных зонах и образованию пластического шарнира, когда система превращается в механизм. Рассматривали два варианта нагружения: только лишь силой веса  $Q$  и совместное  $(Q + F)$  действие весовой и ветровой нагрузок.

В первом приближении эта задача может быть решена методами сопротивления материалов, од-

## Строительные конструкции

нако такой подход не позволяет учесть концентрацию напряжений при неупругой работе материала и специфический механизм утраты работоспособности, связанный с депланированием «плеча». В связи с этим было предпринято более корректное расчетное исследование, в котором конструкция и процесс нагружения моделировали методом конечных элементов с реализацией в пакете ANSYS.

Объект расчета представляет собой кронштейн с длиной плеча 150 мм, вырубленный из стального листа толщиной 1,2 мм с пределом текучести материала  $\sigma_T = 300$  МПа, что приблизительно соответствует малоуглеродистой стали Ст6 [1].

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

- материал обладает диаграммой деформирования тела Прандтля – Райса (идеальный упруго-пластичный); в этом случае возможная погрешность, связанная с упрочнением материала, будет соответствовать ошибке «в запас»;

- с учетом симметрии конструкции достаточно рассмотреть лишь половину кронштейна;

- в силу особенностей монтажа и подкрепляющего действия теплоизоляции маловероятна общая потеря работоспособности системы кронштейнов путем ее «складывания» вдоль стены в связи с действием боковой ветровой нагрузки, а также общая потеря устойчивости плеч как системы стержней.

Геометрическая модель объекта была построена средствами пакета AutoCad и затем импортирована в пакет ANSYS. Разбиение полученной таким образом модели было выполнено с помощью конечных элементов SHELL 181 оболочечного типа с шестью степенями свободы, отвечающими перемещениям вдоль трех координатных осей и поворотам вокруг них, размером 1 мм со сгущением сетки в областях, где прогнозировалось начало пластического течения, а также в зонах концентрации напряжений (рис. 2).

Граничные условия полагались симметричными на линии пересечения вертикальной плоскости симметрии кронштейна с плоскостью его как рамы. Возле отверстия под крепежный элемент запрещались все перемещения – линейные и угловые. Поскольку крайнее сечение плеча, в котором приложены нагрузки, прикреплено к более жесткому П-образному профилю (см. рис. 1), точкам этого сечения были запрещены перемещения вдоль оси  $x$ , а также повороты вокруг оси  $y$ .

Приложение весовой нагрузки  $Q$  в крайнем сечении плеча осуществляли шагами по 1 Н (ньютону) от нуля до 50 Н·с. Что касается ветровой нагрузки, то согласно СНиП 2.01.07–85 [2] для Челябинского региона она составляет в среднем 300 Па, что с учетом шага установки кронштейнов соответствует силе  $F \cong 15$  Н, приложенной к каждому плечу. В расчетах эту силу принимали постоянно действующей, после чего шагами прикладывали весовую нагрузку вплоть до наступления предельного состояния (начала пластического течения или наступления предельного равновесия).

На рис. 3, 4 показаны поля эквивалентного (по III теории прочности) напряжения для обоих предельных состояний (внизу помещены шкалы диапазонов значений напряжения в Па (паскалях)); к сожалению, данное издание не позволяет привести эти иллюстрации в цвете, что значительно повысило бы наглядность полученных результатов.

Как и следовало ожидать, пластическое течение начинается в зоне концентрации напряжений, в месте перехода плеча кронштейна в основание (рис. 3) (как известно, этот эффект формулами сопротивления материалов не отражается, с их помощью можно учесть повышение напряжений лишь за счет ослабления сечения). Расчеты методом конечных элементов, выполненные в предположении идеальной упругой работы материала, позволили оценить величину теоретического ко-

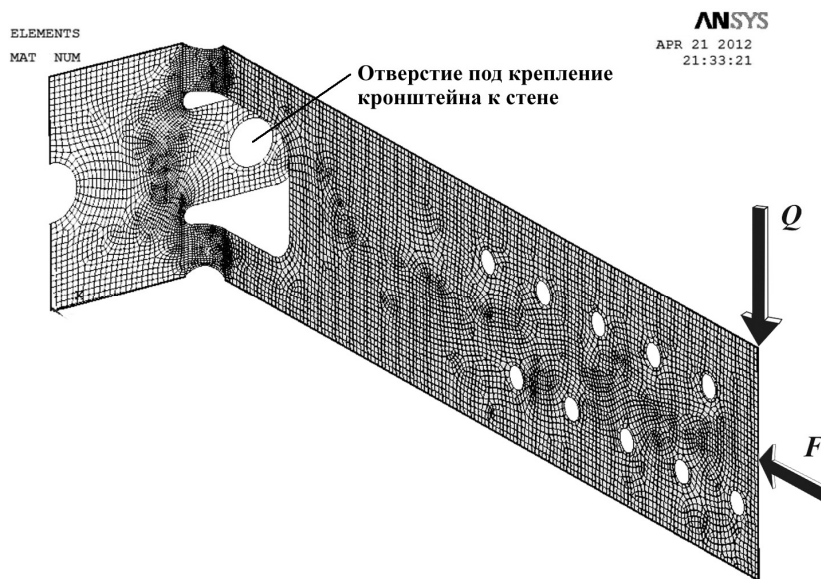


Рис. 2. Расчетная схема кронштейна и ее конечно-элементная модель

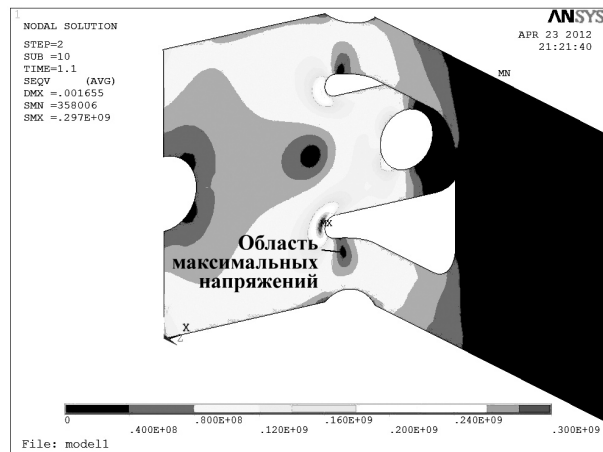


Рис. 3. Поле эквивалентного напряжения в плоскости кронштейна с учетом ветровой нагрузки (начало пластического течения)

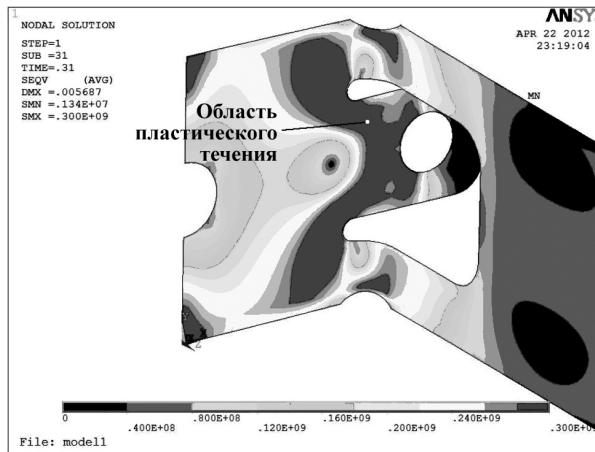


Рис. 4. Поле эквивалентного напряжения в плоскости кронштейна с учетом ветровой нагрузки (состояние предельного равновесия)

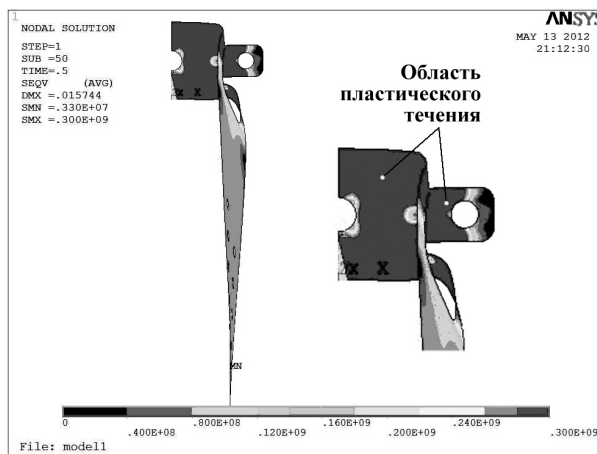


Рис. 5. Схема деформации сечений плеча кронштейна с учетом ветровой нагрузки (состояние предельного равновесия)

коэффициента концентрации в этой области –  $k_T = 2,5 \dots 2,6$  (в качестве номинального принято нормальное напряжение изгиба, рассчитанное по формулам сопротивления материалов). Соответствующая весовая нагрузка в отсутствии ветровой оказалась совсем небольшой –  $Q_T = 12$  Н. Состояние же предельного равновесия (рис. 4) было достигнуто при нагрузке  $Q_0 = 31$  Н (примерно 6,2 кг на кронштейн в целом), при этом вертикальное перемещение концов плеч составило 5,5 мм (рис. 5). Учет ветровой нагрузки повлек за собой снижение предельной (по обоим критериям –  $(Q_T + F)$ ,  $(Q_0 + F)$ ) силы  $Q$  не более чем на 8 %.

В ходе расчетов была также обнаружена специфическая особенность поведения рассматриваемой конструкции: закручивание плеч кронштейна, приводящая к деформации сечений из плоскости плеча, что, в свою очередь, существенно снижает его жесткость (см. рис. 5). Этот механизм также не может быть выявлен методами сопротивления материалов.

Таким образом, анализ исходной конструкции кронштейна и его работы показал, что вырубка крепления для болтов из несущих плеч – неудачное

конструктивное решение: оно ослабляет опасное сечения и создает дополнительные зоны концентрации. С учетом этих недостатков был предложен иной, более простой, вариант кронштейна (рис. 6).

Сопоставление результатов расчетов (рис. 3, 4, 7) свидетельствует, что в модифицированной конструкции изменилось положение зоны, в которой начинается пластическое течение материала – она переместилась в элемент кронштейна, соединяющего плечи (около отверстия под крепежный винт) (рис. 7, а). Развиваясь по мере роста нагрузки, эта зона постепенно охватывает большую часть соединительного элемента, что соответствует состоянию предельного равновесия (рис. 7, б). Такая ситуация выглядит предпочтительнее с точки зрения работоспособности объекта. Вместе с тем, грузоподъемность этого варианта по критерию начала пластического течения увеличивается примерно на 10 %, а по критерию наступления предельного равновесия – на 30 %.

Учёт ветровой нагрузки привел к аналогичному, что и в исходном варианте, результату – к снижению предельной весовой нагрузки примерно на 8 %.

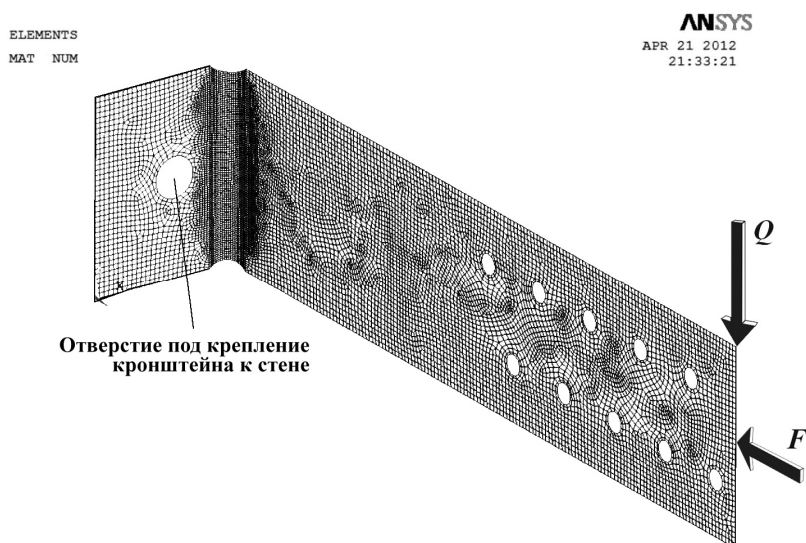


Рис. 6. Расчетная схема модифицированного кронштейна и его конечно-элементная модель

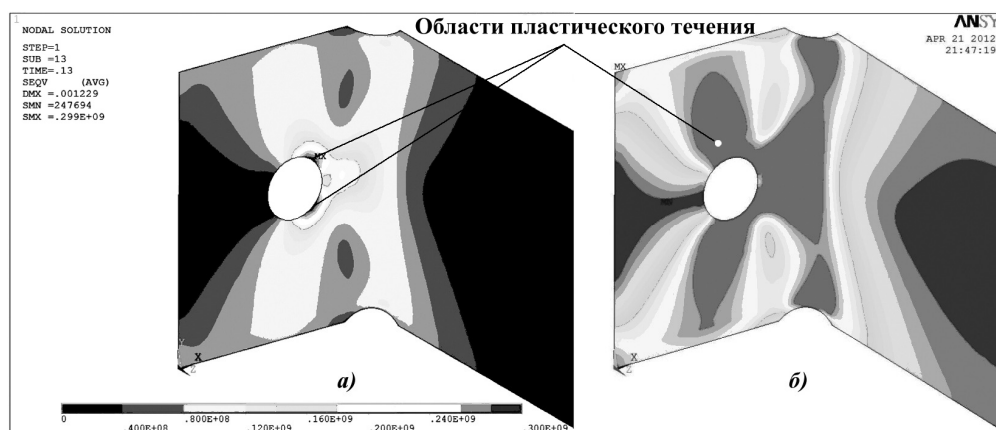


Рис. 7. Поля эквивалентного напряжения с учетом ветровой нагрузки в кронштейне новой конструкции: а – начало пластического течения; б – состояние предельного равновесия

## Выводы

1. Построена конечно-элементная модель монтажного кронштейна, позволяющая производить более корректные (и более точные) по сравнению с методами сопротивления материалов расчеты напряженно-деформированного состояния объекта, в том числе, с учетом концентрации напряжений при неупругой работе материала и специфического механизма утраты работоспособности. Модель может быть легко модифицирована для любого конструктивного исполнения кронштейна.

2. С помощью построенной и реализованной в пакете ANSYS модели проанализирован процесс деформирования объекта и получены предельные по критериям начала пластического течения материала и достижения предельного равновесия значения весовой и ветровой нагрузок.

3. Выявлен специфический механизм потери работоспособности конструкции, связанный помимо изгиба с кручением плеч кронштейна, их деформацией и, как следствие, значительным снижением ее жесткости.

4. Установлено, что учет ветровой нагрузки приводит к не слишком заметному (около 8 %) снижению предельной нагрузки как по критерию начала пластического течения, так и по критерию предельного равновесия.

5. Предложен новый вариант конструкции, обладающий более высокой несущей способностью (на 30% по критерию предельного равновесия) и, в то же время, менее трудоемкий в изготовлении, таким образом, благодаря повышению грузоподъемности при неизменной нагрузке может быть увеличен шаг установки кронштейнов.

## Литература

1. Сталь и сплавы. Марочник: справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

2. Строительные нормы и правила: Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07–85. – М.: Госстрой СССР, 1988.

Поступила в редакцию 5 июня 2012 г.