

УДК 539.3

© 1992 г. А. Р. БУРЛАЧЕНКО, М. И. ГОФМАН,
Б. А. ОБОДОВСКИЙ, Л. Б. ОБОДОВСКИЙ, А. З. ШТЕРНШИС

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ БАЙОНЕТНОГО ТИПА

В данной работе проведено исследование напряженного состояния байонетного соединения и определены зоны максимальной концентрации напряжений. Для адекватного описания соединения необходимо применить существенно трехмерную постановку задачи. Задача решена эффективным численным методом теории упругости — методом граничных интегральных уравнений. Аппроксимация граничной поверхности области выполнялась путем представления ее в виде совокупности криволинейных четырехугольников-восьмиточечников. На основании описанного алгоритма в реализованной программе для ЭВМ выполнен расчет конкретного соединения. Даны эпюры эквивалентных напряжений по контурам меридиональных сечений и в зоне максимальной концентрации напряжений.

1. Разъемные соединения байонетного типа широко применяются в различных машиностроительных конструкциях, энергетическом и химическом оборудовании. На фиг. 1 представлена схема такого соединения.

При разработке ответственных силовых конструкций важно подробное исследование напряженно-деформированного состояния, в особенности в зонах концентрации напряжений. Применяемые в практике проектирования методики расчета на прочность байонетных соединений основаны на использовании упрощенных расчетных схем сопротивления материалов и некоторых эмпирических зависимостях, поэтому такие расчеты не позволяют достаточно адекватно оценить напряженное состояние конструкции и коэффициенты концентрации напряжений. Существенное повышение точности расчетов и создание тем самым предпосылок для разработки оптимальных конструкций возможно при решении задачи в трехмерной постановке при использовании численных методов теории упругости.

Ниже для исследования напряженно-деформированного состояния байонетных соединений был применен метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) [1]. Решающим преимуществом этого метода по отношению к другим численным методам теории упругости является снижение на единицу размерности решаемой задачи за счет редукции разрешающих уравнений на границу рассматриваемой области.

При использовании метода ГИУ решение второй основной задачи теории упругости (при заданной на граничной поверхности нагрузке) сводится к решению сингулярного интегрального уравнения

$$U_i(x) - \int_S G_{2ij}(x, y) U_j(y) dS(y) = \int_S G_{ij}(x, y) f_j(y) dS(y) \quad (1.1)$$

где S — граничная поверхность области, U_i — компоненты вектора перемещения на S , G_{2ij} — ядро интегрального уравнения, G_{ij} — матрица Кельвина — Сомильяна, f_i — компоненты вектора напряжений на S .

В работе [2] был разработан алгоритм решения уравнения (1.1) методом последовательных приближений с использованием регулярной подстановки сингулярного интеграла. При этом решение уравнения (1.1) представляется в виде ряда

$$U = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n U_{(n)} \quad (1.2)$$

Подставляя (1.2) в (1.1) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях, можно получить рекуррентное соотношение для U :

$$U_{(n)i}(x) = \int_S G_{2ij}(x, y) U_{(n-1)j}(y) dS(y) \quad (1.3)$$

Регулярное представление для входящего в (1.3) сингулярного интеграла получается путем понижения особенности с использованием обобщенной теоремы Гаусса. При этом формула (1.3) приобретает вид

$$U_{(n)i}(x) = -U_{(n-1)i}(x) + \int_S G_{2ij}(x, y) \{U_{(n-1)j}(y) - U_{(n-1)j}(x)\} dS(y) \quad (1.4)$$

причем

$$U_{(0)i}(x) = \int_S G_{ij}(x, y) f_j(y) dS(y) \quad (1.5)$$

После определения перемещений U_i напряжения на граничной поверхности S вычисляются путем численного дифференцирования перемещений и использования закона Гука. Так как для подавляющего большинства практических задач определяющим является напряженное состояние на границе области, этим, как правило, и заканчивается решение.

Описанный выше метод был реализован в виде универсального алгоритма решения трехмерной задачи теории упругости.

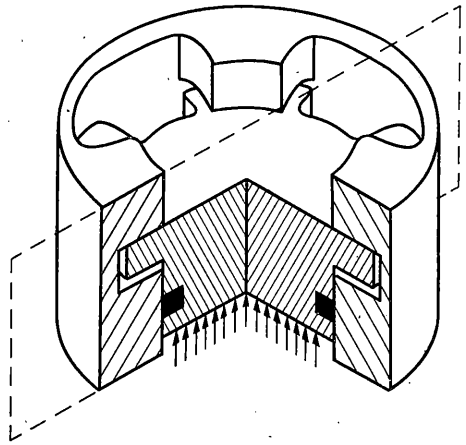
2. Аппроксимация граничной поверхности области выполнялась путем представления ее в виде совокупности криволинейных четырехугольников. Каждый из этих четырехугольников отображается на квадрат в локальных криволинейных координатах с помощью функции формы. В программе были использованы четырехугольники-восьмиточечники и соответственно функции формы Сирендинова семейства второго порядка.

При этом отображение имеет вид

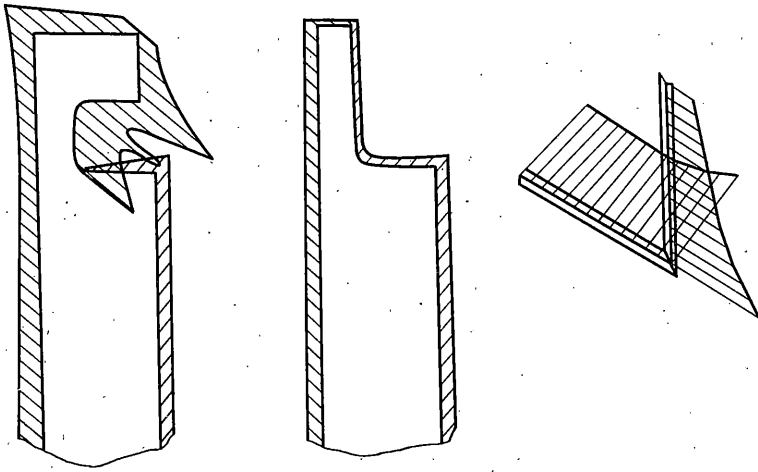
$$X = \sum_{i=1}^8 N_i(u, v) X_i \quad (2.1)$$

где X — текущая координата поверхности, u, v — криволинейные координаты, X_i — координаты узловых точек, N_i — функции формы.

С использованием (2.1) и известных соотношений дифференциальной геометрии вычислялись все необходимые параметры расчетной сетки:



Фиг. 1



Фиг. 2

координаты узлов дискретной модели, проекции вектора нормали к поверхности, площади элементов поверхности. Такой подход дал возможность в значительной степени автоматизировать подготовку исходных данных, так как все параметры дискретной модели в большей части генерировались программой.

При вычислении плотности потенциалов использовались для интерполяции локальные сплайны, а численное интегрирование на каждом из элементов расчетной сетки выполнялось с использованием кубатурных формул, полученных путем перемножения соответствующих квадратур Гаусса. Выбор порядка формулы производился в зависимости от соотношения $L/(x-y)$, где L — максимальный линейный размер элемента, что обеспечило в целом адаптивную кубатурную формулу.

При вычислении суммы ряда (1.2) учитывалось то обстоятельство, что данный ряд с увеличением n стремится к геометрической прогрессии, поэтому для уточнения суммы использовалась формула

$$U = \sum_{i=1}^n U_{(i)} (-1)^i + \frac{U_{(n+1)}}{1+K} \quad (2.2)$$

где K — приближенно определенный знаменатель прогрессии.

3. На основе данного алгоритма была создана программа на языке Фортран для ЕС ЭВМ. Для оперативного анализа напряженно-деформированного состояния байонетного соединения при различных геометрических параметрах был разработан специальный пакет программ, формирующий исходные данные для основной программы метода ГИУ по небольшому числу геометрических параметров соединения. При этом граничная поверхность байонета аппроксимировалась 26 криволинейными четырехугольниками. Приемлемая точность расчета достигалась при разбиении каждого четырехугольника 6×6 (общее число независимых узлов дискретного аналога при этом составило 705).

Усилие заменялось нагрузкой, распределенной по соответствующей поверхности. При постановке задачи имела место некоторая неопределенность краевых условий в месте зацепления затвора байонета. Точное значение контактного давления может быть получено только из решения смешанной (контактной) задачи. Чтобы избежать такой постановки, значительно увеличивающей трудоемкость решения, был проведен численный эксперимент. Рассмотрены два варианта статически эквивалентной нагрузки на контактной поверхности: равномерно распределенное нормальное давление; нормальное давление, распределенное в радиальном направлении по логарифмическому закону (от нуля на внутренней стороне четырехугольника до максимального значения на наружной).

Сопоставление значений максимальных напряжений для первого и второго вариантов задания краевого условия показало, что во втором случае максимальные напряжения выше на 4%. Вместе с тем очевидно, что фактическое распределение контактного давления находится между первым и вторым вариантом нагружения. Поэтому целесообразным представляется задание нагрузки, меняющейся по линейному закону.

На фиг. 2, а, б показаны эпюры эквивалентных напряжений (по теории максимальных касательных напряжений) по контурам меридиональных сечений плоскостями симметрии, соответственной для максимальной и минимальной толщины стенки.

На фиг. 2, в показаны эпюры эквивалентных напряжений вдоль поверхностей скругления, где имеет место максимальная концентрация напряжений.

Как видно из приведенных результатов, имеет место в целом высокий уровень напряжений в зоне выемки, а в месте максимальной концентрации величина напряжений для рассмотренного варианта конструкции в несколько раз превышает предел текучести материала.

Изложенная выше методика позволяет выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния сложных конструкций в трехмерной постановке. Специальные пакеты программ дают возможность легко варьировать геометрические размеры и тем самым исследовать их влияние на уровень поля напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Купрадзе В. Д.* Методы потенциала в теории упругости. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
2. *Паргон В. З., Перлин П. И.* Интегральные уравнения теории упругости. М.: Наука, 1977. 311 с.

Москва

Поступила в редакцию
1.11.1990