

---

УДК 629.7.023

## **Напряженное состояние композиционной панели в зоне отверстия**

А.И. Ендогур, В.А. Кравцов

### **Аннотация**

В статье представлена зависимость концентрации напряжений на контуре отверстия в полимерном композиционном материале от геометрических параметров ряда отверстий.

### **Ключевые слова**

полимерный композиционный материал; отверстие; концентрация напряжений; метод конечных элементов.

Изделия из слоистых полимерных композиционных материалов (КМ) в зависимости от конкретной проектно-инженерной задачи по технологическим, массовым, прочностным, жесткостным характеристикам могут значительно превосходить панели из металлических материалов. Поэтому панели из слоистых КМ находят всё более широкое применение в составе конструкций. Вместе с этим растет актуальность расчетных методов, применяемых как в анализе результатов проектирования, так и при формировании программ материальных испытаний.

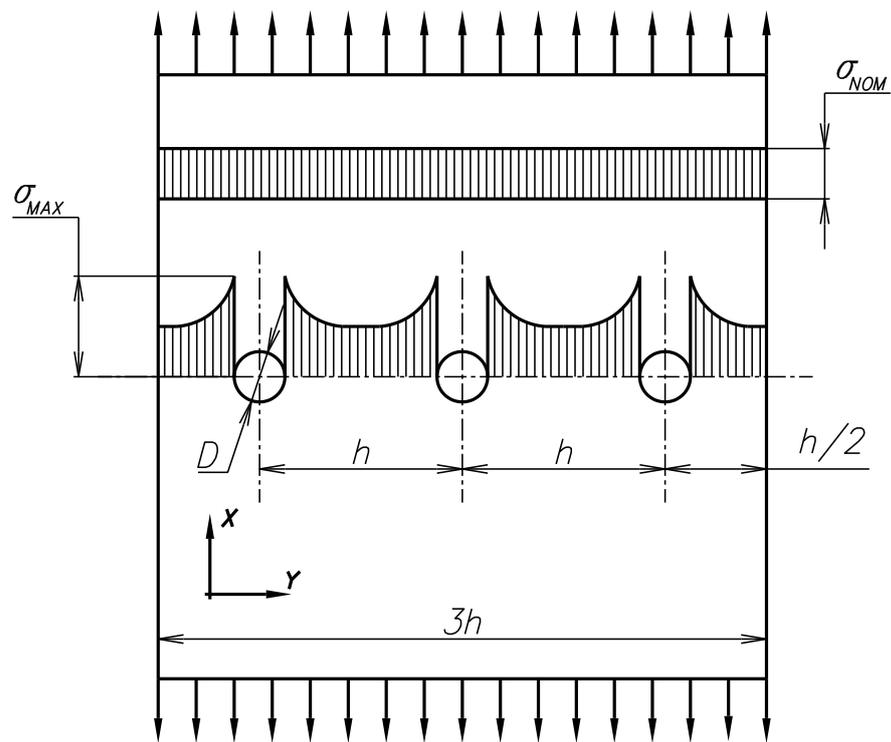
Для оценки напряженно-деформированного состояния композиционного пакета определяют напряжения в каждом слое КМ-изделия посредством основных соотношений макромеханики КМ [1] или с использованием специальных программных средств, расчеты в которых также восходят к основным соотношениям макромеханики.

Особенности распределения жесткостей в слоистом КМ, а также отсутствие пластических деформаций в материале обуславливают значительную неоднородность напряженного состояния КМ-изделий в зонах с крепежными и другими отверстиями [2]. Для панели из слоистого КМ с отверстием значения наибольших напряжения достигают на контуре отверстия. Возрастание напряжений в слое на контуре отверстия практически может быть описано посредством коэффициента концентрации.

*Коэффициент концентрации напряжений* – отношение максимального напряжения в слое в зоне отверстия  $\sigma_{МАКС}$  к напряжению, вычисленному в предположении отсутствия отверстия  $\sigma_{НОМ}$  (рис.1).

Для нахождения коэффициента концентрации, как правило, производится ряд специальных материальных испытаний и расчетно-модельных работ с целью определения величины коэффициента и зависимости коэффициента от геометрических параметров детали [2].

С целью поиска зависимости коэффициента концентрации напряжений от параметров ряда отверстий был произведен анализ группы конструктивно-подобных образцов панелей из слоистого ПКМ с рядом отверстий, размещенным перпендикулярно направлению нагружения (рис.1). Анализ производился методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе PATRAN+NASTRAN\_MSC [3]. Напряженное состояние – плоское (образец плоский, все силы действуют строго в плоскости образца). Напряжения в монослое – эквивалентные критериальные, рассчитанные по критерию Мизеса-Хилла [1,2].



*Рис.1. Схема образца, рассчитываемого МКЭ с целью определения напряжений в слоях и коэффициента концентрации.*

При анализе рассматривались образцы, в которых присутствовали слои с направлениями укладки  $\{0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ\}$  по отношению к направлению нагружения. В каждом

образце имелись слои всех указанных направлений в различных соотношениях. Рассматривались образцы из различных ортотропных материалов – от высокомодульного углепластика до стеклоткани. Все слои в каждом образце были из одного материала (комбинации материалов не рассматривались).

Наибольшие напряжения на контуре отверстия получены для слоя с направлением  $0^\circ$ , поэтому рассмотрение концентрации напряжений (только) в этом слое достаточно для оценки прочности образца в целом.

В результате произведенных работ были получены зависимости коэффициента концентрации напряжений на контуре отверстия от параметров  $D$ ,  $h$ .

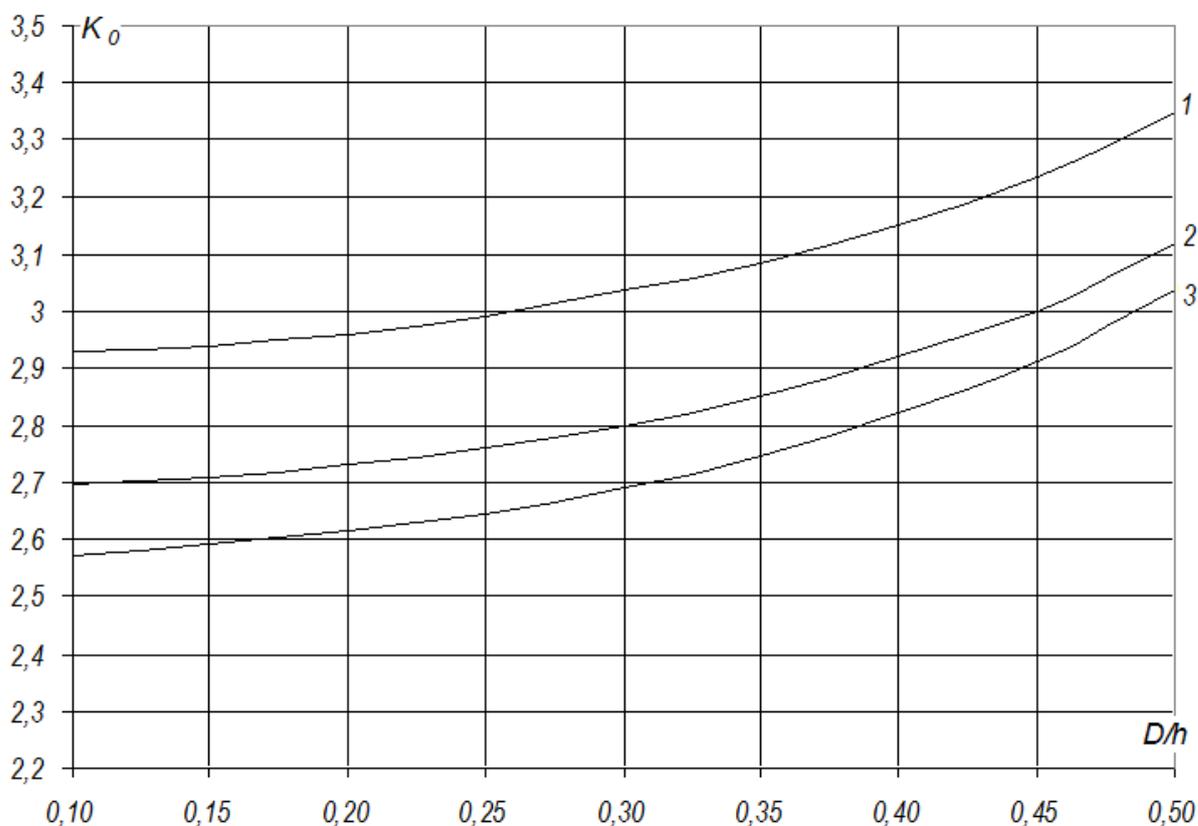


Рис.2. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от геометрических параметров образца.

На рис.2 представлены результаты расчетов для материала КМКУ-4 с соотношениями слоев: 1–  $\{0^\circ_{70\%}, \pm 45^\circ_{10\%}, 90^\circ_{20\%}\}$ , 2–  $\{0^\circ_{40\%}, \pm 45^\circ_{40\%}, 90^\circ_{20\%}\}$ , 3–  $\{0^\circ_{20\%}, \pm 45^\circ_{60\%}, 90^\circ_{20\%}\}$ . Подобные зависимости получены для различных материалов монослоя и схем укладки слоев в многослойном пакете КМ. Численный анализ результатов позволил получить математическое описание концентрации напряжения, применимое для всех рассчитанных вариантов.

Концентрация напряжений в композиционном материале с отверстиями может быть найдена по формулам

$$K_0 = K_\Gamma \cdot K_K$$

$$K_\Gamma = 1/(1 - D/h)$$

$$K_K = \left(\frac{D}{h}\right)^2 - A\left(\frac{D}{h}\right) + A$$

Здесь  $K_\Gamma$  – коэффициент, характеризующий увеличение напряжений, связанное с геометрическим уменьшением рабочего сечения композиционного пакета в зоне отверстий (отношение площади сечения в предположении отсутствия отверстия к площади сечения с учетом отверстия).

$K_K$  – собственно концентрация напряжений в зоне отверстия, обусловленная изменением сечения (в результате наличия отверстия) и свойствами материала.

$A$  – теоретическое значение концентрации напряжений при  $D/h=0$  (образец с шириной  $h=\infty$  с одним отверстием). Коэффициент  $A$  в представленных формулах является единственным параметром, характеризующим свойства материала в заданном направлении и позволяющим рассчитывать значение коэффициента концентрации для различных геометрических величин  $D, h$ . (Для результатов расчетов, представленных на рис.2, значения коэффициентов:  $A_1 = 2,931, A_2 = 2,7, A_3 = 2,572$ )

Дополнительные расчеты для образцов с направлениями укладки слоев, отличными от  $\{0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ\}$ , показали применимость найденных соотношений для слоев с направлениями  $0-30^\circ$  по отношению к направлению нагружения.

Отклонение результатов расчетов по предложенным формулам и результатов расчетов МКЭ составило менее 3%. При подтверждении материальными испытаниями найденные соотношения будут иметь три следствия, которые могут быть использованы в доопытном анализе проектируемой конструкции, а также способствовать сокращению перечня конструктивно-подобных образцов для материальных испытаний:

1) концентрация напряжений на контуре пустого отверстия характеризуется единственным параметром, который является свойством композиционного материала в рассматриваемом направлении;

2) для вычисления концентрации напряжений в зоне ряда отверстий с любым значением  $D/h$  достаточно иметь значение концентрации напряжения для одного варианта расположения отверстий в заданном направлении;

3) в процессе проведения материальных испытаний возможно установление связи между величиной параметра  $A$  в материальном изделии и в КЭ-расчете конструктивно-подобного образца. Это расширит применимость методов доопытного анализа в инженерной практике.

### **Библиографический список.**

1. В.В. Васильев. Механика конструкций из композиционных материалов.// Москва, . «Машиностроение», 1988 г.
2. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов.// Москва, изд. Физико-математической литературы, 1983 г.
3. Технологии виртуальной разработки конструкций из композиционных материалов. Обзорная статья технического эксперта MSC Software Corporation Слезкина Д.В. MSC Software Corporation, 2009 г.

Ендогур Аскольд Иванович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.  
МАИ, Волоколамское ш., Москва, 4, А-80, ГСП-3, 125993;  
тел: 8-916-4921031, e-mail: nio1@mai.ru

Кравцов Владимир Александрович, инженер ОАО «Компания Сухой» ОКБ.  
Москва, Поликарпова, 23б, 123007;  
тел: 8-916-802-77-36, e-mail: vakravtsov@yandex.ru