

УДК 531

***ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ
ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ОТ
ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ И СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ ОДНООСНОМ
РАСТЯЖЕНИИ***

Поздеев А.В.

студент,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Зарифуллин Е.Н.

студент,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Аннотация

Целью исследования является получение и сравнение коэффициента концентрации напряжений вблизи границы фаз при одноосном нагружении поперек направления армирования композиционных материалов в двух случаях: 1) Изменяется связующее, но наполнитель и геометрия композита остаются без изменений. 2) Изменяется объемная доля, но наполнитель и связующее остаются постоянными. В качестве наполнителя используется стекловолокно ЛК–5, а в качестве связующего - полимерные матрицы: ЭДТ–10, ВС–2526к, ЭНФБ. В результате сравнения полученных коэффициентов концентрации напряжений наблюдается следующее: 1) Чем меньше расхождения между упругими свойствами волокна и матрицы, тем меньше коэффициент концентрации напряжений вблизи границы фаз. 2) Чем меньше объемная доля волокна, тем меньше коэффициент концентрации напряжений вблизи границы фаз.

Ключевые слова: напряжения, волокнистый композиционный материал, одноосное растяжение, стекловолокно, эпоксидная матрица, коэффициент концентрации напряжений, объемная доля.

THE DEPENDENCE OF THE STRESS CONCENTRATION COEFFICIENT OF A UNI-DIRECTIONAL COMPOSITE MATERIAL ON THE CHANGE IN THE VOLUME FRACTION AND THE BINDER UNDER UNIAXIAL TENSION

Pozdeev A.V.

student,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Zarifullin E.N.

student,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation

The aim of the study is to obtain and compare the stress concentration coefficient near the phase boundary under uniaxial loading across the direction of reinforcement of composite materials in two cases: 1) The binder changes, but the filler and the geometry of the composite remain unchanged. 2) The volume fraction changes, but the filler and binder remain constant. Glass fiber LK–5 is used as a filler, and polymer matrices are used as a binder: EDT–10, VS–2526k, ENFB. As a result of comparing the obtained stress concentration coefficients, the following is observed: 1) The smaller the discrepancy between the elastic properties of the fiber and the matrix, the lower the stress concentration coefficient near the phase boundary. 2) The lower the fiber volume fraction, the lower the stress concentration coefficient near the phase boundary.

Key words: stresses, fibrous composite material, uniaxial tension, glass fiber, epoxy matrix, stress concentration factor, volume fraction.

Композиционный материал - материал, состоящий из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих, и связующих их матрицы), различающихся по своему составу и разделенных выраженной границей [1]. Композиционные материалы на сегодняшний день находят широкое применение в различных отраслях современного машиностроения и техники. В композитах конструкционного назначения армирующий элемент обычно обеспечивают высокие механические и упругие характеристики (прочность и жесткость), а матрица обеспечивает совместную работу армирующих элементов. Микро-неоднородность композиционного материала, обусловленная различием упругих свойств связующего и наполнителя, является причиной повышения напряжений около границы раздела фаз. Такое явление называется концентрацией напряжений. Анализ разрушений изделий показывает, что подавляющее большинство поломок, образование хрупких, усталостных трещин и других причин потери несущей способности возникают, как правило, вблизи этих концентраторов.

В данной статье определена зависимость коэффициента концентрации напряжений композиционных материалов для двух случаев. В первом случае с одинаковым наполнителем, но с разным связующим. Во втором случае с одинаковым наполнителем и связующим, но с разной объемной долей. В качестве наполнителя используется стекловолокно ЛК-5, а в качестве связующего - полимерные матрицы ЭДТ-10, ВС-2526к, ЭНФБ.

Для определения коэффициента концентрации напряжений рассмотрим постановку краевой задачи линейной теории упругости: деформации связаны с перемещениями геометрическими соотношениями Коши, напряжения связаны

с деформациями законом Гука, выполняются уравнения равновесия, массовые силы отсутствуют:

$$\varepsilon_{ij}(r) = \frac{1}{2} [u_{i,j}(r) + u_{j,i}(r)]$$

$$\sigma_{ij}(r) = C_{ijkl}(r) \varepsilon_{kl}(r)$$

$$\sigma_{ij,j} = 0$$

Для более наглядного представления закона Гука воспользуемся нотацией Фойгта:

$$\{\sigma_{ij}(r)\} = [C(r)]\{\varepsilon(r)\}$$

Для определения коэффициента рассмотрим постановку краевой задачи линейной теории упругости: деформации связаны с перемещениями геометрическими соотношениями Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

Граничные условия:

$$u_i|_{\Gamma_i} = u_0$$

Волокно – анизотропное, матрица – изотропная.

Характеристики матриц приведены ниже (таблице 1).

Таблица 1 – Характеристики матриц [3;5;6]

Название	ЭДТ-10	ВС-2526к	ЭНФБ
Модуль Юнга, ГПа (E)	2,9	3,5	4
Коэффициент Пуассона(V)	0,356	0,392	0,426

Матрица жесткости стекловолокна ЛК-5 [7]:

$$C = \begin{pmatrix} 74.611 & 16.437 & 16.437 & 0 & 0 & 0 \\ 16.437 & 74.611 & 16.437 & 0 & 0 & 0 \\ 16.437 & 16.437 & 74.611 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 28.982 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 28.982 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 28.982 \end{pmatrix}, \text{ГПа}$$

Между волокном и матрицей предполагается условие идеального контакта, где Γ_{mf} межфазная граница:

$$u_i^m |_{\Gamma_{mf}} = u_i^f |_{\Gamma_{mf}}$$

1) Для первого случая, где одинаковый наполнитель, но разное связующее:

Будем рассматривать четверть ячейки однонаправленного волокнистого композиционного материала, где 1 – матрица, а 2 – волокно (рис.1):

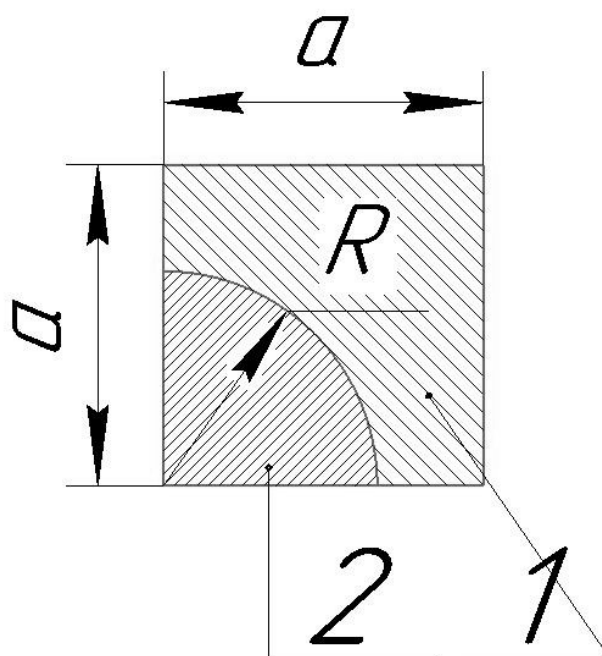


Рис.1 – Четверть ячейки КМ (авторская разработка)

При объемной доле волокна $\nu_f=0.35$ и стороне четверти ячейки $a=10$ мкм, радиус волокна R будет равен:

$$R = \frac{4 * v_f * a^2}{\pi} = \frac{4 * 0.35 * 10^2}{3.14} = 6.68 \text{ мкм}$$

Прикладываем растягивающие напряжения $\sigma = 20$ МПа по оси z (рис.2):

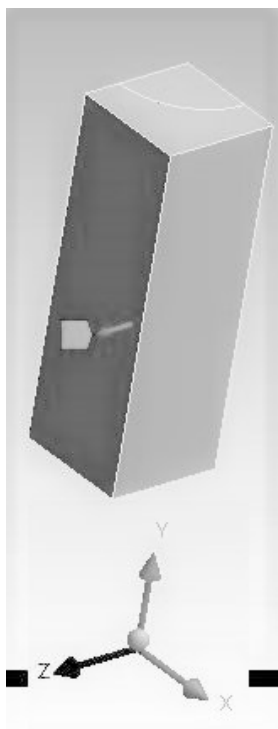


Рис.2 – Прикладывание растягивающего напряжения (авторская разработка)

На грани YZ задаем нулевые перемещения вдоль оси X (рис.3):

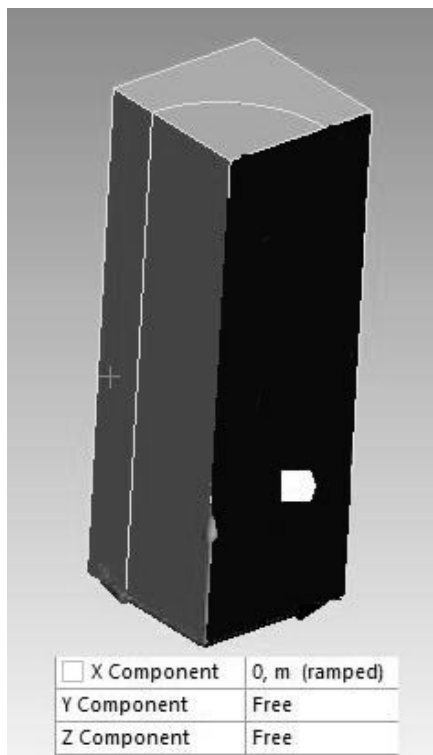


Рис.3 – Граничные условия на грани YZ (авторская разработка)

На грани XY задаем нулевые перемещения вдоль оси Z (рис.4):

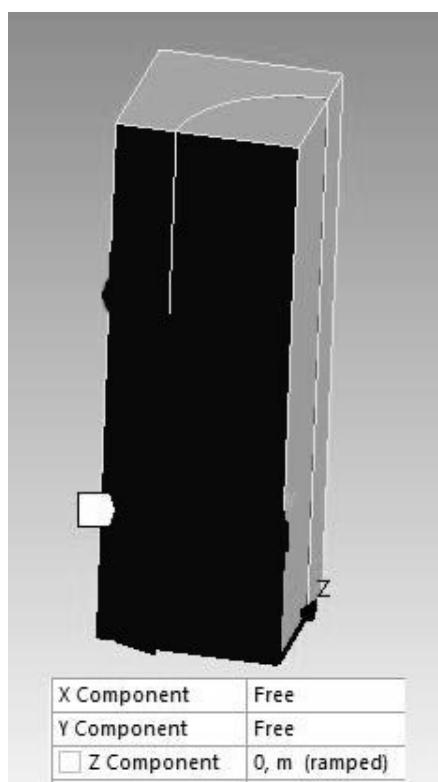


Рис.4 – Граничные условия на грани XY (авторская разработка)

На двух гранях XZ задаем нулевые перемещения вдоль оси Y (рис.5):

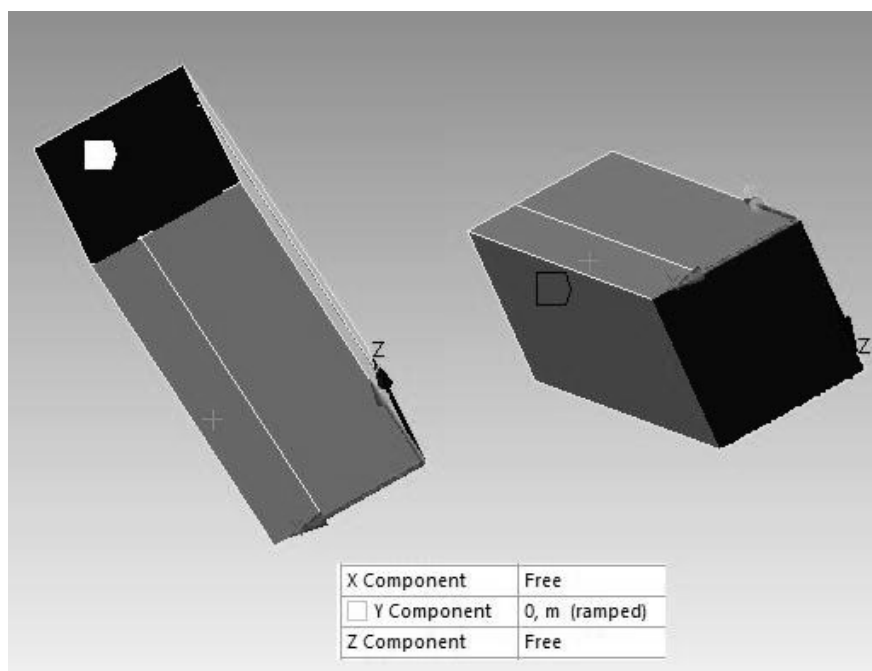


Рис.5 – Граничные условия на гранях XZ (авторская разработка)

В результате выполненного расчета в системе конечно-элементного анализа ANSYS получены поля напряжений и деформаций для композита с матрицей ЭДТ–10 (рис.6):

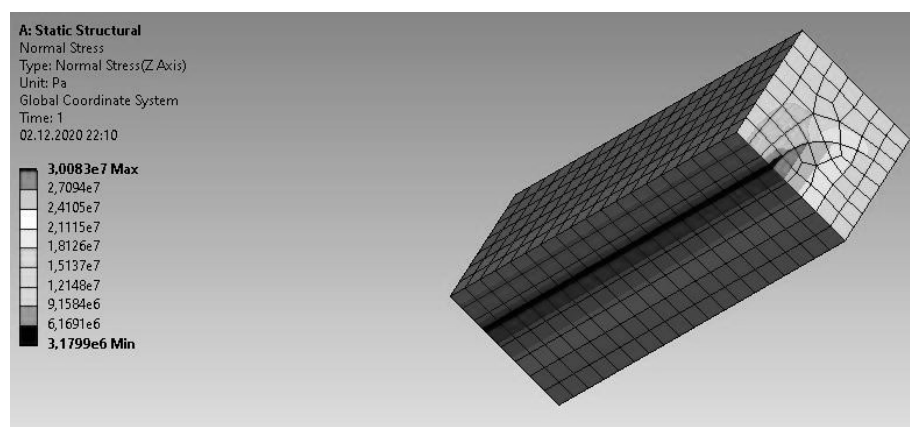


Рис.6 – Поле напряжений композита с матрицей ЭДТ–10 (авторская разработка)

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 30,083$ МПа. Оно действует вблизи раздела фаз. Коэффициент концентрации напряжений K равен отношению

максимальных напряжений к номинальным [2]. Для номинального значения используем приложенные растягивающие напряжения $\sigma = 20$ МПа.

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = \frac{30,083}{20} = 1,504 \text{ (матрица ЭДТ – 10)}$$

Поле напряжений композита с матрицей ВС-2526к (рис.7):

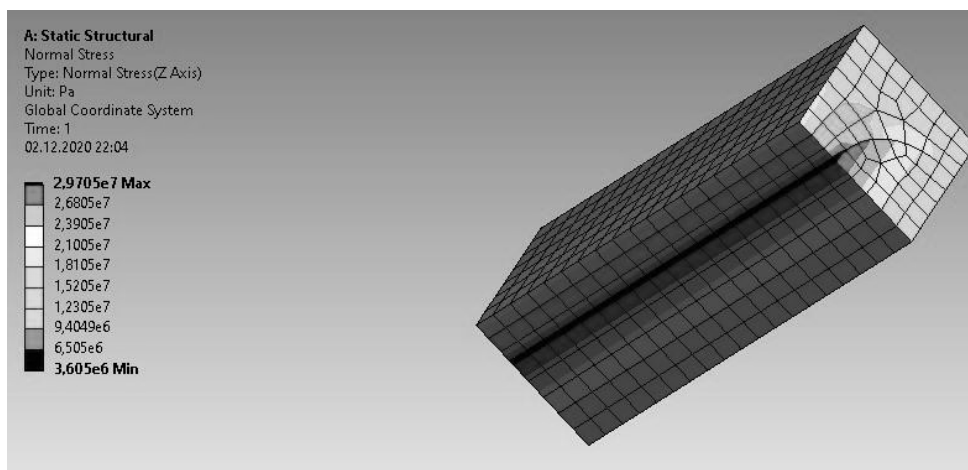


Рис.7 – Поле напряжений композита с матрицей ВС-2526к (авторская разработка)

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 29,705$ МПа.

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = \frac{29,705}{20} = 1,485 \text{ (матрица ВС – 2526к)}$$

Поле напряжений композита с матрицей ЭНФБ (рис.8):

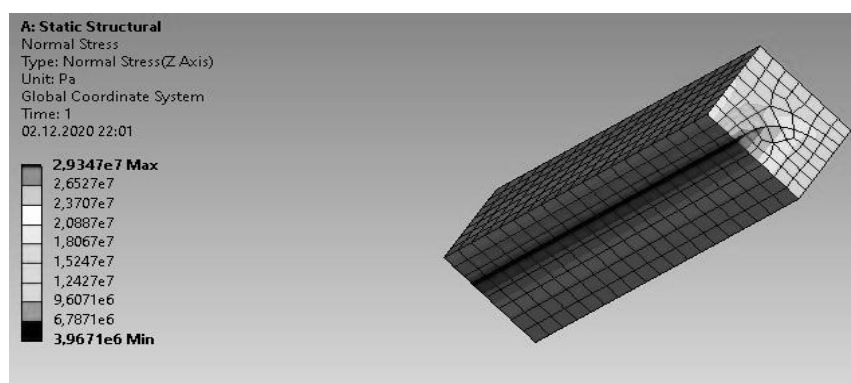


Рис.8 – Поле напряжений композита с матрицей ЭНФБ (авторская разработка)

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 29,347$ МПа

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = \frac{29,347}{20} = 1,467 \text{ (матрица ЭНФБ)}$$

Ниже приведена сводная таблица результатов (таблица 2).

Таблица 2. Сводная таблица результатов

Матрица	Коэффициент концентрации напряжений, K
ЭДТ-10	1,504
ВС-2526к	1,485
ЭНФБ	1,467

2) Для второго случая, где меняется только объемная доля:

В качестве наполнителя выступает стекловолокно ЛК-5, а связующим является ЭДТ-10.

Не изменяя размеры четверти ячейки, зададим три различных радиуса, тем самым получим три композита с различной объемной долей:

$$R_1 = \frac{11}{15} a; R_2 = \frac{8}{15} a; R_3 = \frac{5}{15} a$$

Соответственно объемная доля равна:

$$v_f^{(1)} = \frac{\pi R_1^2 h}{4 a^2 h} = \frac{\pi R_1^2 h}{4 a^2 h} = \frac{\pi \frac{11^2}{15} a^2 h}{4 a^2 h} = \frac{\pi \frac{11^2}{15}}{4} = 0,4221;$$

$$v_f^{(2)} = \frac{\pi \frac{8^2}{15}}{4} = 0,2232;$$

$$v_f^{(3)} = \frac{\pi \frac{5^2}{15}}{4} = 0,0872$$

Прикладываем растягивающие напряжения $\sigma = 10$ МПа по оси x (рис.9):

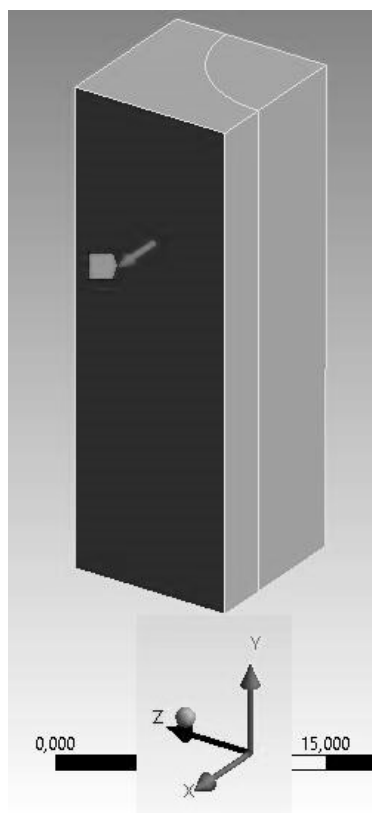


Рис.9 – Прикладывание растягивающего напряжения (авторская разработка)

Граничные условия в перемещениях остаются прежними.

Получаем поле напряжений для четверти ячейки при $v_f^{(1)} = 0,4221$ (рис.10):

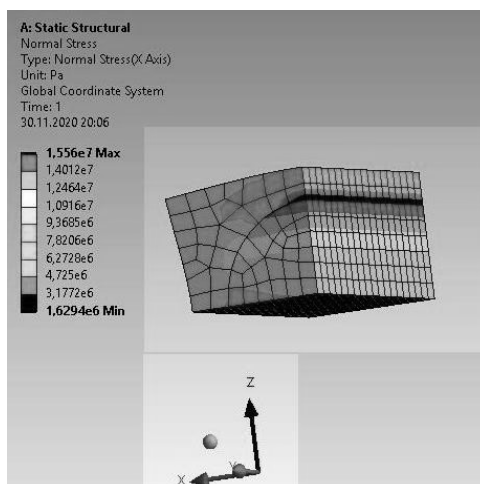


Рис.10 – Поле напряжений композита при $v_f^{(1)} = 0,4221$ (авторская разработка)

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 15,560$ МПа.

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = \frac{15,560}{10} = 1,556$$

Поле напряжений для четверти ячейки при $v_f^{(2)} = 0,2232$ (рис.11):

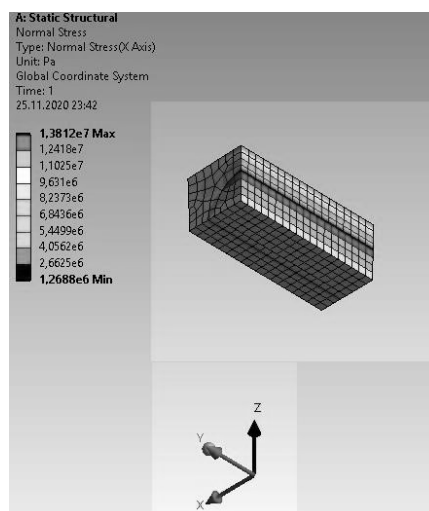


Рис.11 – Поле напряжений композита при $v_f^{(2)} = 0,2232$ (авторская разработка)

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 13,812$ МПа.

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = \frac{13,812}{10} = 1,381$$

Поле напряжений для четверти ячейки при $v_f^{(3)} = 0,0872$ (рис.12):

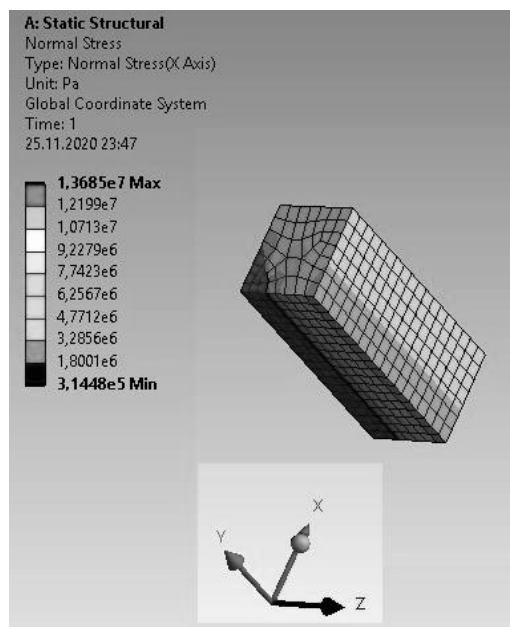


Рис.12 – Поле напряжений композита при $v_f^{(2)} = 0,0872$ (авторская разработка)

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 13,685$ МПа

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = \frac{13,685}{10} = 1,369$$

Ниже приведена сводная таблица результатов (таблица 3).

Таблица 3. Сводная таблица результатов

Объемная доля v_f	Коэффициент концентрации напряжений, K
0,4221	1,504
0,2232	1,485
0,0872	1,467

В результате выполненного исследования был вычислен и сравнен коэффициент концентрации напряжений композитов с одинаковым наполнителем и одинаковой геометрией, но с различным связующим. На основании этих результатов можно сказать, что чем меньше расхождения между упругими свойствами волокна и матрицы, тем меньше коэффициент концентрации напряжений. Во втором случае, при уменьшении объемной доли волокна, уменьшаются максимальные напряжения и коэффициент концентрации напряжений, при чем, как видно из таблицы, чем больше мы уменьшаем объемную долю, тем медленнее уменьшается коэффициент концентрации напряжений.

Работа выполнена в рамках НИРС [4].

Библиографический список:

1. Бабушкин А.В. Функциональные и конструкционные углепластиковые и полимерные композиционные материалы/ А.В. Бабушкин// Материалы междисциплинарного курса МДК 11 - 2017. - С.4-5
2. Биргер И. А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.
3. Композиционные материалы: Справочник/В. В. Васильев, К63 В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.; Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с; ил. ISBN 5-217-01113-0
4. Методические указания по проведению научно-исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» / сост. Е.Ю. Макарова, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 40 с

5. Влияние тканых волокнистых наполнителей различных типов на свойства отвержденного связующего ВС-2526К/ Р. Р. Мухаметов, А. П. Петрова, С. А. Пономаренко, К. Р. Ахмадиева, Б. Ф. Павлюк// Электронный научно-технический журнал «Труды ВИАМ». —2018.- №3-С.28-36
6. Семенова Е. Г. - С30 Основы моделирования и диагностики антенных устройств бортовых комплексов: Монография. СПб.: Политехника, 2003. 186 с.: ил. ISBN 5–7325–0765–5
7. Синев Л.С. Расчет коэффициентных напряжений в соединениях кремния со стеклом/Л.С Синев, В.Т. Рябов// Нано- и Микросистемная техника. - 2014. - №9. – С. 32-37

Оригинальность 84%