

УДК 539.374.519.8

## КЭ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

П. В. Соловьев<sup>1</sup>, А. В. Ахмедьянов<sup>2</sup>, А. Н. Ермоленко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>paulnightingale@mail.ru, <sup>2</sup>mr.versatile77@mail.ru, <sup>3</sup>tolja@inbox.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

*Поступила в редакцию 17.11.2023*

**Аннотация.** В статье приводятся результаты теоретического, конечно-элементного и экспериментального определения упругих и прочностных свойств композиционных материалов (КМ) на основе металлической матрицы. В качестве рассматриваемого материала используется однонаправленный углемагний. Конечно-элементное моделирование проведено в линейной и нелинейной постановке. Проанализировано влияние поверхностных дефектов углеродного волокна на прочность композита в целом. Результаты исследования показали необходимость учета микрогеометрических параметров структуры и поверхностных дефектов армирующих волокон при определении прочностных свойств композитов на металлической матрице. В результате исследований получена новая методика моделирования КМ, позволяющая получать уточненные механические характеристики композитов на этапе проектных расчетов.

**Ключевые слова:** металлическая матрица, композит, микромодель, упругие характеристики, поверхностные дефекты, однонаправленный углемагний.

### ВВЕДЕНИЕ

Применение композиционных материалов в наукоемких отраслях современного производства (авиастроении, автомобилестроении, ракетно-космической промышленности и т.д.) позволяет все дальше увеличивать удельные параметры проектируемых конструкций и, как следствие, их эффективность. Например, использование композиционных материалов в фюзеляже самолета Boeing-787 (массовая доля свыше 55%) позволило снизить расход топлива на 15–20%. В то же время проектировать изделия из композитов на порядок сложнее вследствие таких особенностей КМ, как анизотропия их упругих и прочностных свойств, низкие прочность и жесткость при поперечном растяжении/сжатии и сдвиге, а также из-за существенного влияния разнообразных технологических факторов на конечные эксплуатационные свойства композита. Особенно сильно это влияние сказывается на композитах с металлической матрицей вследствие высокой реакционной способности матричного материала по отношению к армирующему.

На этапе проектных расчетов свойства композитной конструкции определяются исходя из свойств однонаправленного слоя, которые, в свою очередь, определяются по известным аналитическим зависимостям [1,2]. Данные аналитические выражения с высокой точностью предсказывают упругие и прочностные свойства композитов в продольном направлении и позволяют получать достаточную для инженерных задач точность в поперечном направлении. Для композитов на полимерной матрице эти методики получили широкое распространение, т.к.

при формировании таких композитов не происходит повреждения волокон вследствие относительно невысоких температур формования (обычно не более 200 °С), а также практически нулевой реакционной способности связующего по отношению к армирующему материалу.

При микромеханическом определении характеристик композитов на металлической матрице на основе механических свойств их компонентов влияние технологических факторов, а также пластичности материала матрицы столь велико, что делает необходимым введение в эти аналитические зависимости поправочных коэффициентов, характеризующих микрогеометрические параметры представительного элемента композита. Оценить влияние этих микрогеометрических параметров в настоящее время можно благодаря широким возможностям конечно-элементного моделирования.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данного исследования является анализ значений упругих и прочностных характеристик композитного углеалюминия, вычисленных аналитически, определенных на основе конечно-элементного моделирования и полученных в результате экспериментальных исследований, а также установление влияния поверхностных дефектов волокна на прочность однонаправленного композита.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Аналитическое определение основных упругих и прочностных свойств однонаправленного углеалюминия на основе механических свойств его компонентов;
2. Конечно-элементное моделирование бездефектного углеалюминиевого композита под действием растягивающих напряжений в линейной постановке;
3. Сравнение результатов аналитического определения и конечно-элементного моделирования с экспериментально полученными данными;
4. Конечно-элементное моделирование углеалюминиевого композита под действием растягивающих напряжений в линейной постановке с заданными микрогеометрическими параметрами;
5. Конечно-элементное моделирование бездефектного углеалюминиевого композита под действием растягивающих напряжений в нелинейной постановке.

### МАТЕРИАЛЫ

В данной работе были использованы характеристики КМ на основе углеродного волокна и алюминиевого сплава. Характеристики каждого компонента представлены далее.

Механические характеристики углеродного волокна УМТ49-12К-ЕР:

- плотность,  $\rho_v$ , г/см<sup>3</sup> – 1,78;
- прочность на растяжение,  $\bar{\sigma}_{v1}^+$ , МПа – 4900;
- модуль упругости вдоль волокон,  $E_{v1}$ , ГПа – 260;
- модуль упругости поперек волокон,  $E_{v2}$ , ГПа – 8;
- коэффициент Пуассона,  $\nu_{v12}$  – 0,15;
- коэффициент термического расширения вдоль волокон,  $\alpha_{v1}$  – ( $-0,7 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>);
- коэффициент термического расширения поперек волокон,  $\alpha_{v2}$  –  $4,5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>;
- предельное удлинение при растяжении,  $\bar{\varepsilon}_{v1}^+$ , % – 1,8;
- диаметр отдельного волокна,  $d_v$ , мкм – 7;
- условный диаметр пучка волокон,  $d_{п}$ , мм – 0,7.

Механические характеристики алюминиевого сплава АМг6:

- плотность,  $\rho_m$ , г/см<sup>3</sup> – 2,64;
- условный предел текучести,  $\sigma_{0,2}$ , МПа – 260;

- прочность на растяжение,  $\bar{\sigma}_m^+$ , МПа – 360;
- модуль упругости,  $E_m$ , ГПа – 71;
- коэффициент Пуассона,  $\nu_m$  – 0,33;
- коэффициент термического расширения,  $\alpha_m$  – ( $23 \times 10^{-6}$  град $^{-1}$ );
- предельное удлинение при растяжении,  $\bar{\varepsilon}_m^+$ , % – 15.

Коэффициент объемного содержания волокон  $\Psi_v$  был принят равным 0,6.

#### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕАЛЮМИНИЯ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Упругие и прочностные свойства однонаправленного композита при проектном расчете определяются по известным аналитическим зависимостям метода смесей, а также с учетом влияния формы волокон на поперечные и сдвиговые прочность и жесткость [1,2].

В таблице 1 представлены физико-механические характеристики однонаправленного слоя данного КМ. Расчеты были проведены по указанным выше формулам.

Таблица 1

#### Физико-механические характеристики

Упругие характеристики однонаправленного композита		
Характеристика	Значения	Единицы измерения
$E_1$	184,4	ГПа
$E_2$	28,1	ГПа
$G_{12}$	16,8	ГПа
$\nu_{12}$	0,222	
$\nu_{21}$	0,034	
Прочностные характеристики однонаправленного композита		
$\bar{\sigma}_1^+$	3,440	ГПа
$\bar{\sigma}_1^-$	760	МПа
$\bar{\sigma}_2^+$	234	МПа
$\bar{\sigma}_2^-$	247	МПа
$\bar{\tau}_{12}$	111	МПа
Термоупругие характеристики однонаправленного композита		
$\alpha_1$	3,0	$\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
$\alpha_2$	14,7	$\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
Прочие характеристики		
$\rho$	2,124	г/см $^3$

#### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗДЕФЕКТНОГО УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Для моделирования элементарной ячейки композита были проанализированы следующие модели (рис. 1), и была выбрана модель шестиугольной формы (рис. 1г). Данная модель хороша тем, что вокруг центрального волокна напряженно-деформированное состояние наиболее близко к реальному, т.к. учитывается воздействие соседних волокон.

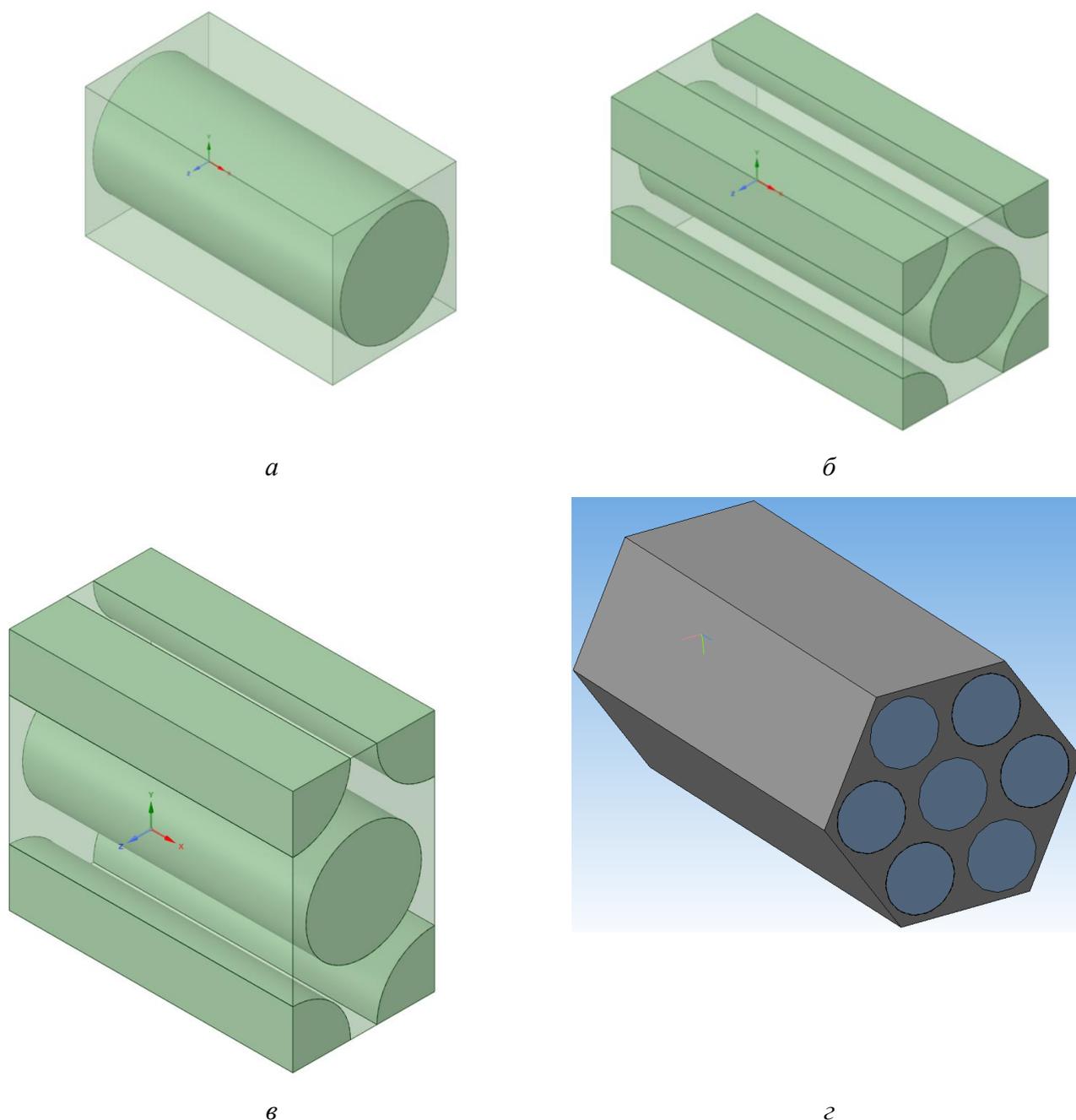


Рис. 1. Модели представительного элемента КМ

Моделирование представительных элементов композита производилось в программном комплексе ANSYS Workbench с использованием модуля ANSYS Mechanical.

Модуль упругости в направлении волокон представительного элемента определялся при нагрузке, не превышающей 25% от разрушающей и составил  $E_1=180,2$  ГПа, что отличается от аналитически определенного на 2,4%.

Анализ разрушения композита в линейной постановке задачи базируется на предпосылке, что разрушение начинается, как только эквивалентные напряжения (1) в матрице достигают предела текучести. Данная предпосылка обосновывается тем, что с началом пластического течения матрицы волокна начинают нагружаться неравномерно и имеет место их стадийное разрушение.

$$\sigma_{\text{эkv}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Картина распределения эквивалентных напряжений и коэффициентов запаса прочности (2) в матрице при разрушающей нагрузке представлена на рис. 2.

$$SF = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{ЭКВ}}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

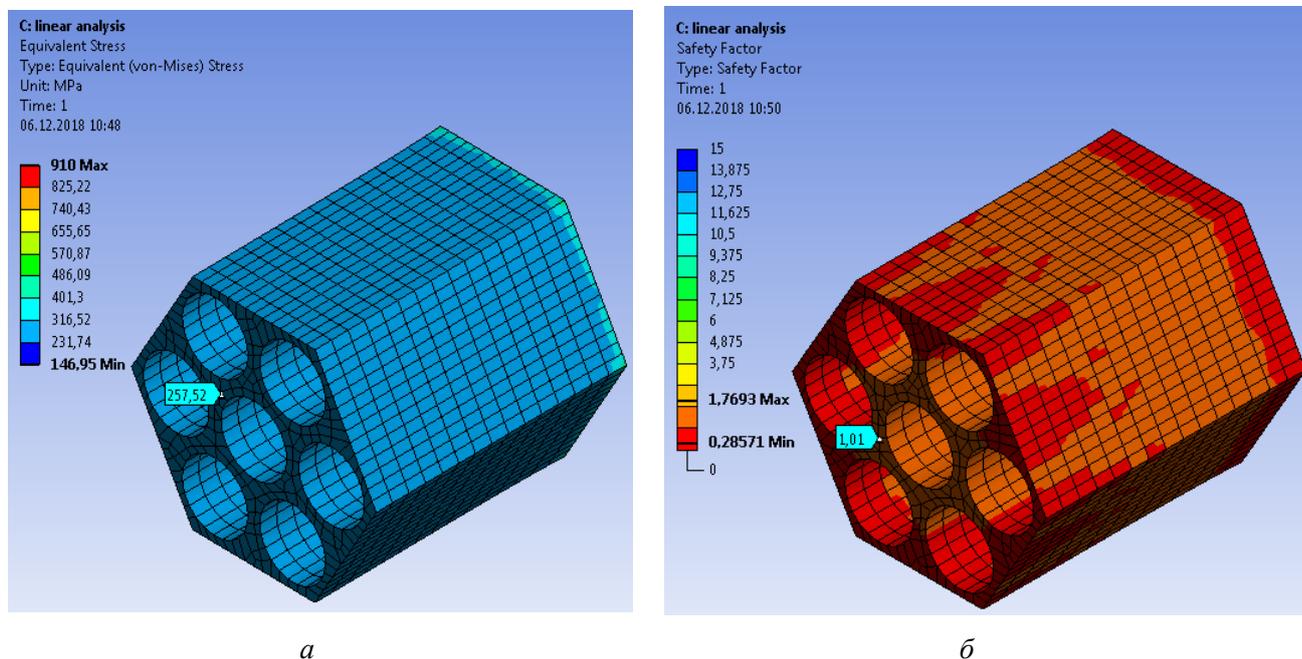


Рис. 2. Распределения эквивалентных напряжений (а) и коэффициентов запаса прочности (б)

Нормальные напряжения в волокнах вдоль главной продольной оси упругости на данном этапе нагружения распределены по радиусу волокна практически равномерно и равны  $\sigma_{1B}=940\dots950$  МПа (рис. 3).

Средние напряжения разрушения композита в этом случае составляют  $\bar{\sigma}^+=680$  МПа.

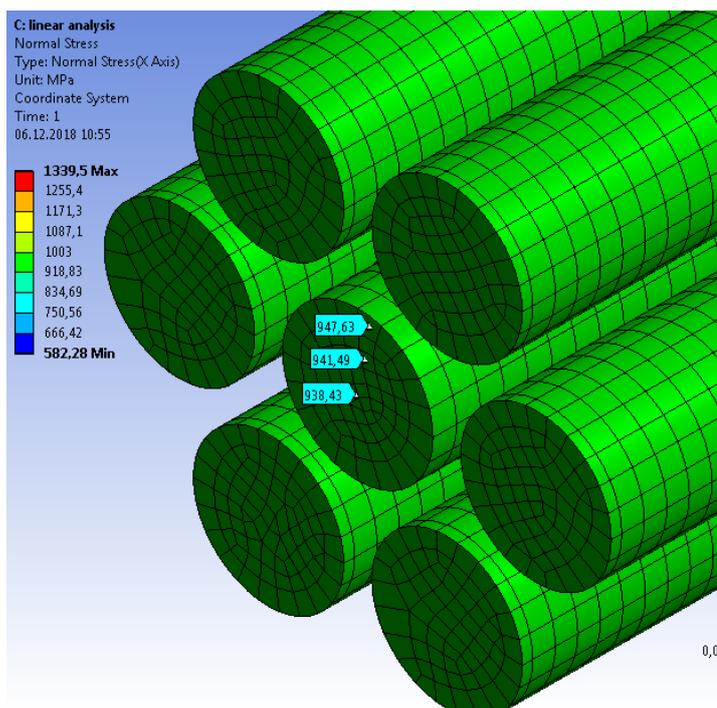


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений в волокнах вдоль главной продольной оси упругости

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ПОЛУЧЕННЫМИ ДАННЫМИ**

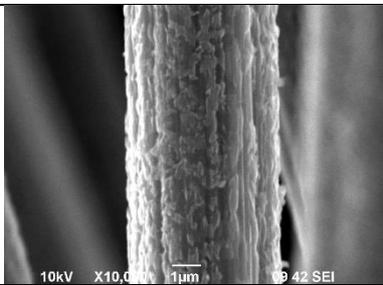
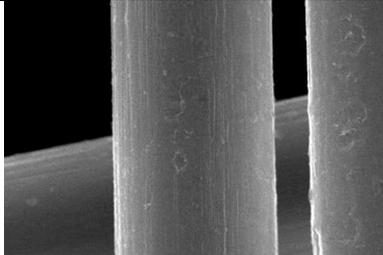
Механические испытания на трехточечный изгиб были проведены по схеме, приближенной к ГОСТ Р 56810-2015 [4–6]. Форма поперечного сечения проволоки была принята эллипсоидной, величины прочности были получены по формуле (для эллипсоидных цилиндров).

Сопоставление результатов механических испытаний на изгиб с данными конечно-элементного моделирования является корректным и правомерным, т.к. при изгибе разрушение в зоне растянутых волокон происходит также от растягивающих напряжений, также как и в представительном элементе, рассмотренном выше.

Результаты испытаний [4] показали, что средняя прочность полученных образцов углеалюминиевой композитной проволоки составила 510 МПа, разброс экспериментальных данных составил ±160 МПа (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты исследований**

Предел прочности при изгибе $\bar{\sigma}_f$ , МПа	Извлеченные волокна [4]
315	
1446	

Для всех образцов наблюдалась взаимосвязь прочности с характером разрушения [4,5]. Образцы, обладающие большей прочностью, имеют более рельефную поверхность разрушения, что указывает на высокий уровень диссипации энергии трещины. Подобный характер разрушения более свойственен керамическим композитам со «слабыми» границами между волокном и матрицей. Поверхность разрушения наименее прочного образца, напротив, практически плоская, то есть разрушение материала происходит хрупко. Наблюдаемое явление связано с образованием карбида алюминия  $Al_4C_3$  на границе «матрица/волокно».

Исследование поверхности волокна после извлечения из композита показало, что в результате взаимодействия с жидким алюминием на поверхности волокна появляется множество мелких дефектов в виде эрозионных ямок, происходит деградация поверхности волокна [4].

Полученные результаты указывают на то, что величина прочности композита зависит от деградации поверхности волокон. Можно предположить, что дефекты поверхности волокна являются концентраторами напряжений, наличие которых приводит к меньшей диссипации энергии трещины. Трещина легче распространяется внутри материала, и прочность композита снижается [4,5].

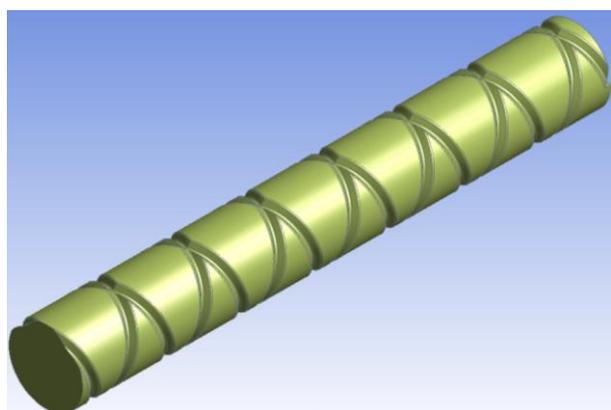
Сравнение результатов аналитического определения, конечно-элементного моделирования прочностных характеристик углеалюминиевого композита с экспериментальными данными представлено в табл. 3.

	Аналитическое определение	Конечно-элементное определение	Экспериментальное определение
Предел прочности композита $\bar{\sigma}^+$ , МПа	3440	680	510

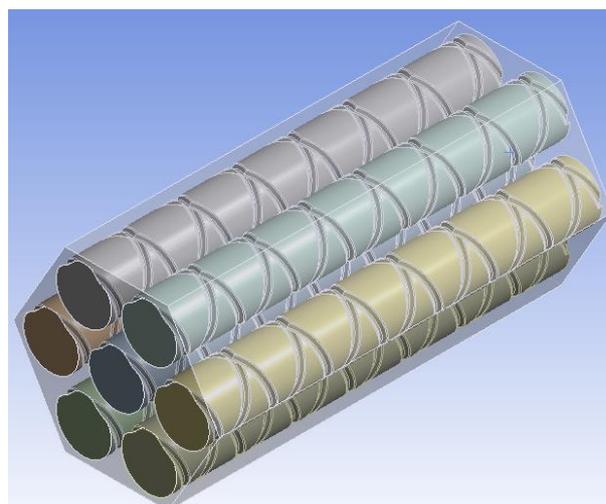
Из табл. 3. видно, что аналитическое определение дает сильно завышенный результат. Это связано с тем, что при проектном расчете не были учтены технологические коэффициенты  $\beta_{в1}^+$  и  $\beta_{м1}^+$ , зависящие от параметров формования композита, которые как раз должны быть определены на основе экспериментальных исследований. Результаты конечно-элементного моделирования существенно ближе к экспериментальным данным, однако различие все равно составляет 25%. Это может быть объяснено тем, что при конечно-элементном моделировании не учитывалась концентрация напряжений по границе «волокно/матрица», имеющая место вследствие неровной поверхности волокон.

#### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ С ЗАДАННЫМИ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

На основе анализа микрофотографий деградированных волокон для оценки прочности углеалюминиевого КМ с учетом концентрации напряжений по границе «волокно/матрица» была предложена модель с дефектами по поверхности раздела композита (рис. 4). Внесение дефекта было осуществлено двумя противоположно направленными спиральными канавками глубиной по 0,5 мкм.



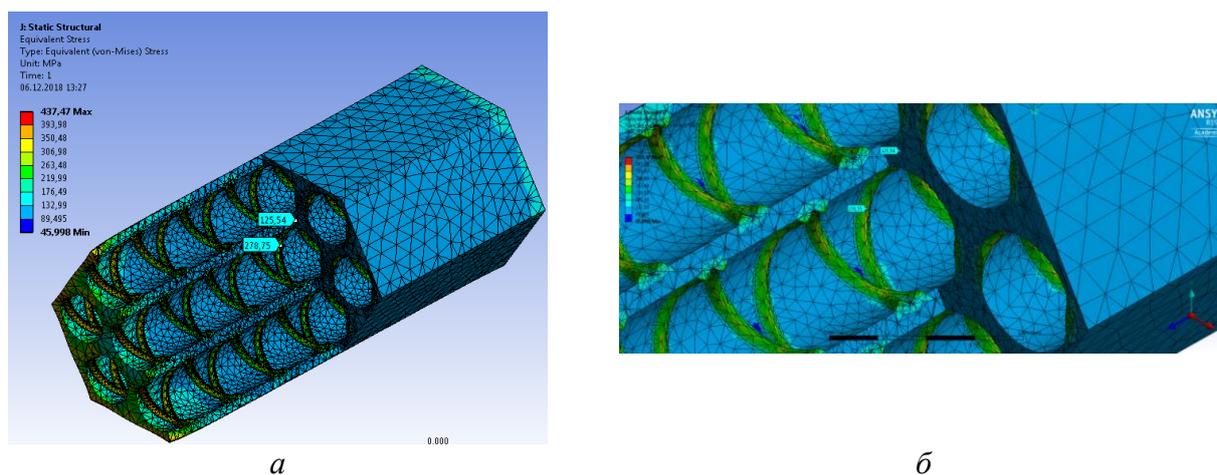
а



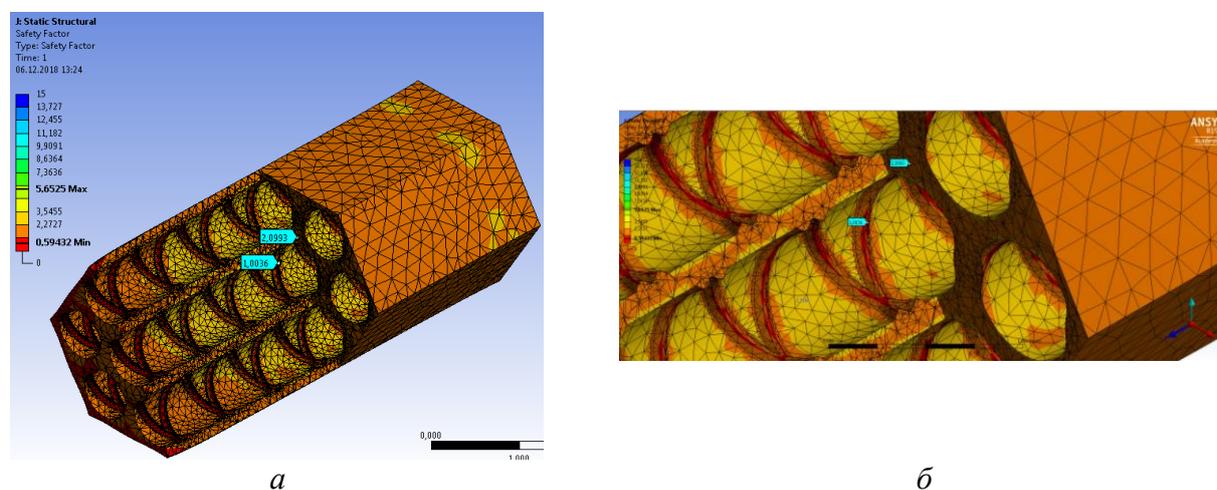
б

Рис. 4. Модель волокна (а) и представительного элемента композита с наличием дефектов по поверхности раздела «волокно/матрица» (б)

Модуль упругости в направлении волокон представительного элемента с дефектами также определялся при нагрузке, не превышающей 25% от разрушающей, и составил  $E_l=172,8$  ГПа, что отличается от определенного на бездефектной модели на 4,3%.



**Рис. 5.** Распределение эквивалентных напряжений в матричном материале с дефектами по поверхности раздела:  
*а – общий вид, б – увеличенное место концентрации напряжений*



**Рис. 6.** Распределение коэффициентов запаса прочности в матричном материале с дефектами по поверхности раздела:  
*а – общий вид, б – увеличенное место концентрации напряжений*

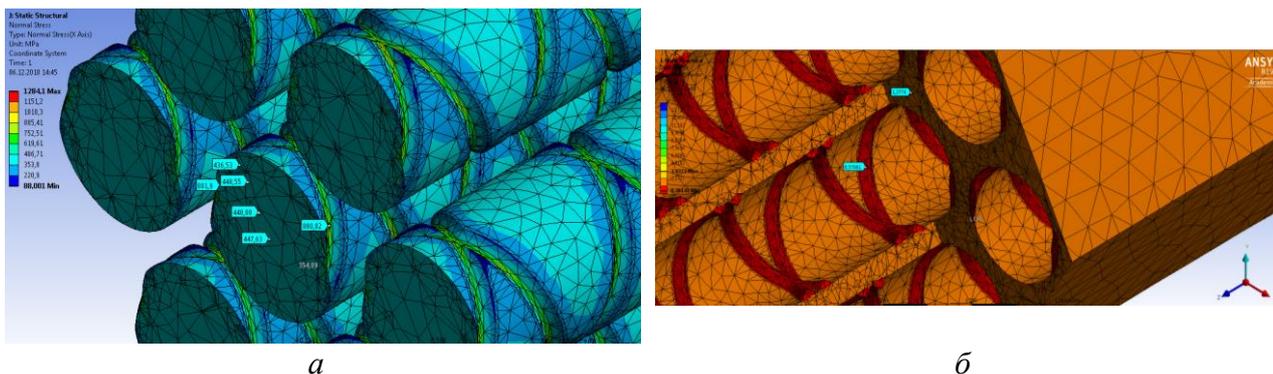
Из рис. 6, 7 видно, что на поверхности раздела имеет место существенная концентрация напряжений (коэффициент концентрации напряжений  $K_{\alpha, m}=2,2$ ).

В волокне также имеет место существенная концентрация напряжений ( $K_{\alpha, m}=2$ ), средние нормальные напряжения в волокне  $\sigma_{1B}=440$  МПа, максимальные напряжения в концентраторах  $\sigma_{1B}^{max}=880$  МПа (рис. 8,а). На рис. 8,б представлено распределение коэффициентов запаса прочности, соответствующее гарантированному разрушению композита.

Картина распределения эквивалентных напряжений и коэффициентов запаса прочности в матрице при разрушающей нагрузке представлена на рис. 7.

В целом средние напряжения начала разрушения композита в этом случае составляют порядка  $\bar{\sigma}^+=311$  МПа, полное разрушение композита наступает при средних напряжениях порядка  $\bar{\sigma}^+=500$  МПа.

Таким образом, с помощью вычислительного эксперимента подтверждено влияние состояния поверхности раздела на величину концентрации напряжений в композите и, как следствие, на его прочность.



**Рис. 7.** Распределение нормальных напряжений в волокнах вдоль главной продольной оси упругости в композите с дефектами на поверхности раздела (*а*) и распределение коэффициентов запаса прочности в матричном материале с дефектами по поверхности раздела при дальнейшем развитии разрушения (*б*)

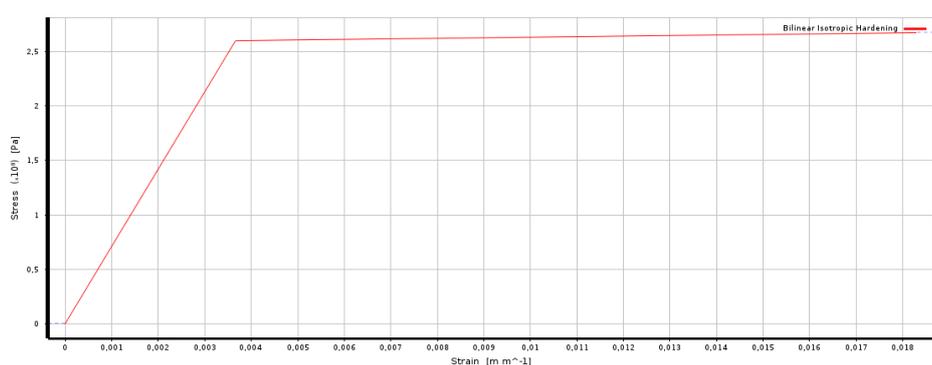
### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗДЕФЕКТНОГО УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Для дальнейшего изучения механизмов разрушения однонаправленного композита на основе пластичной матрицы рассматривается решение задачи, аналогичной пункту 5, но в нелинейной постановке. В этом случае связь между напряжениями и деформациями не подчиняется закону Гука.

Проводить нелинейный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) рекомендуется только после проведения линейного анализа, т.к. необходимо знать уровень нагрузок (или деформаций), действующих на материал. В случае произвольного задания нагрузок может иметь место существенно развитое пластическое течение материала матрицы, в результате чего решение задачи будет либо затруднено, либо вовсе не получено, т.к. механизм решения задачи итерационный, и сходимость при существенном превышении деформаций не может быть реализована.

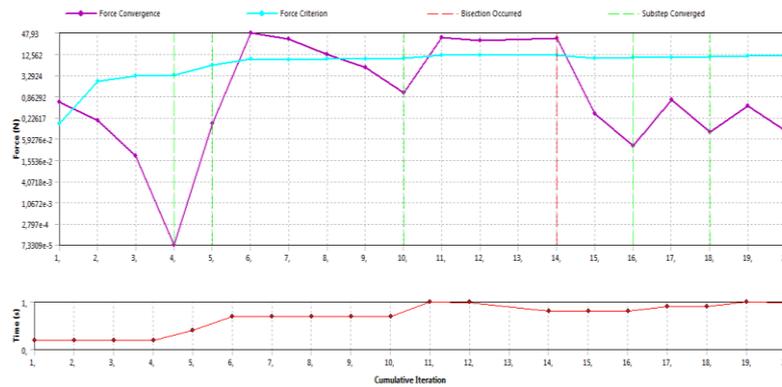
В расчете учитывается нелинейность только лишь матричного материала, волокна остаются линейно-упругими во всем диапазоне нагрузок.

В качестве первичной модели поведения нелинейного материала матрицы используется билинейная модель упрочнения изотропного материала (Bilinear Isotropic Hardening) (рис. 8).



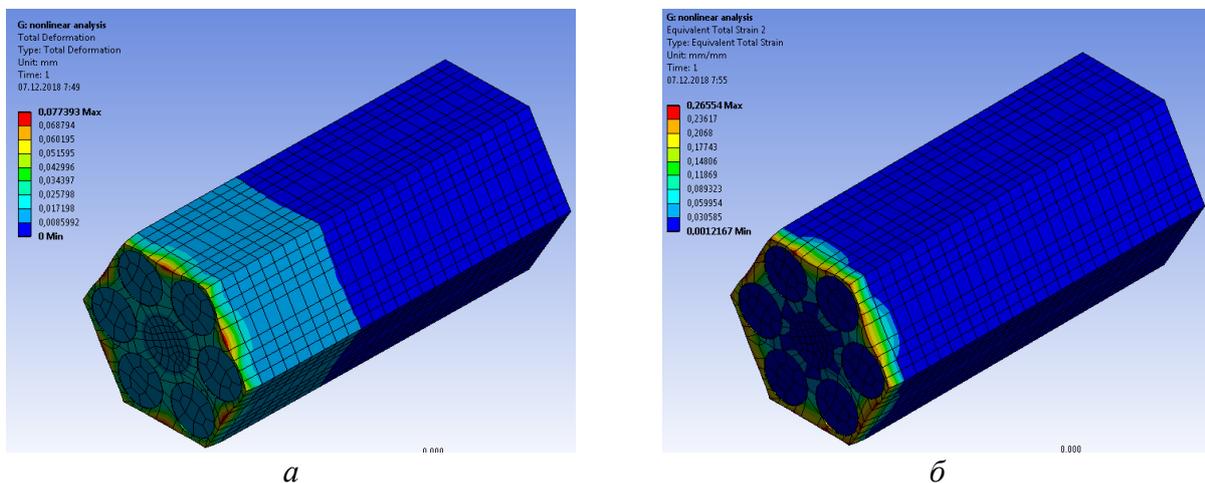
**Рис. 8.** График зависимости напряжений от деформаций в билинейной модели упрочнения изотропного материала

График сходимости решения нелинейной задачи при нагрузках, соответствующих разрушению композита при решении линейной задачи, представлен на рис. 9.

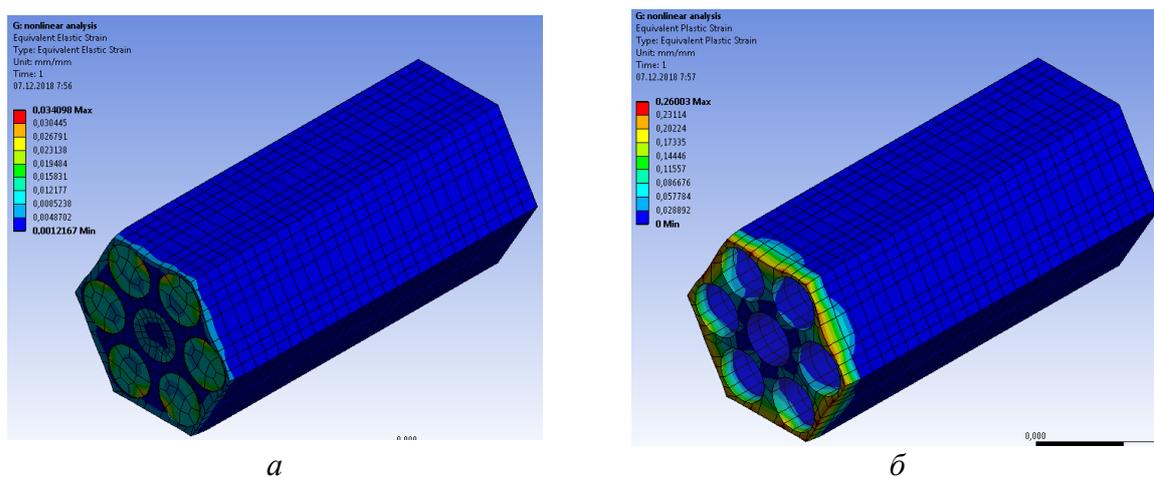


**Рис. 9.** График зависимости напряжений от деформаций в билинейной модели упрочнения изотропного материала

На рис. 10–13 представлено соответственно распределение полных абсолютных и относительных деформаций, упругих и пластических относительных деформаций, эквивалентных напряжений и коэффициентов запаса прочности в матрице, а также распределение нормальных напряжений в армирующих волокнах.



**Рис. 10.** Распределение полных абсолютных деформаций и полных относительных деформаций при решении нелинейной задачи



**Рис. 11.** Распределение упругих относительных деформаций и пластических относительных деформаций при решении нелинейной задачи

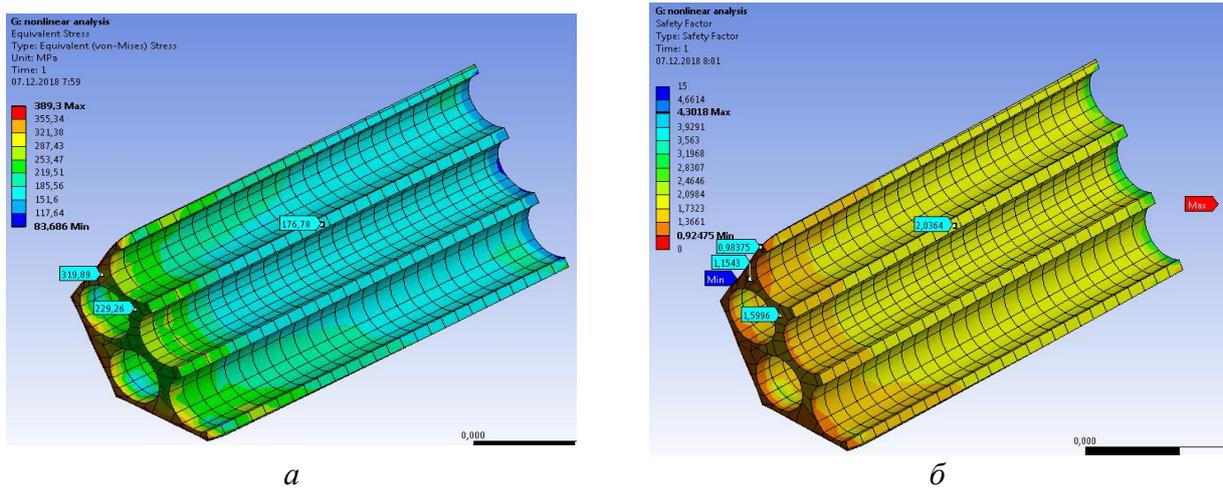


Рис. 12. Распределение эквивалентных напряжений (а) и коэффициентов запаса прочности (б) при решении нелинейной задачи

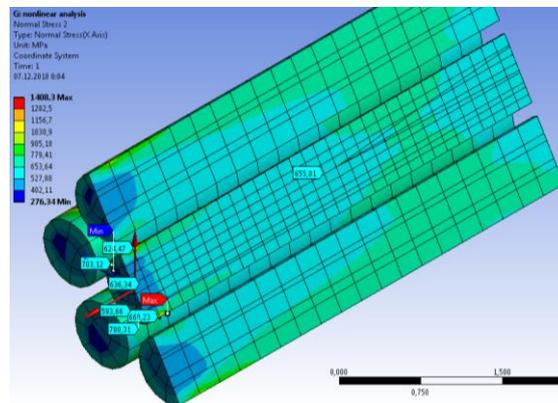


Рис. 13. Распределение нормальных напряжений вдоль волокон при решении нелинейной задачи

Из рис. 11–13 видно, что имеет место пластическое течение матрицы в месте приложения граничных условий (в частности, нагрузки). Вся пластическая деформация локализуется в этой области, при этом в расчетной области (в середине представительного элемента) получить пластические деформации не удалось.

Дальнейшее увеличение нагрузки в 1,5 раза также показало, что локализация пластических деформаций сохраняется в месте приложения нагрузки, в результате чего затруднено получение достоверной картины деформирования углеалюминиевого композита с учетом пластических деформаций матрицы. На рис. 14 и 15 показаны график сходимости решения нелинейной задачи при увеличении нагрузки в 1,5 раза относительно разрушающей нагрузки для линейной задачи и распределение пластических деформаций по матрице в данном случае нагружения.

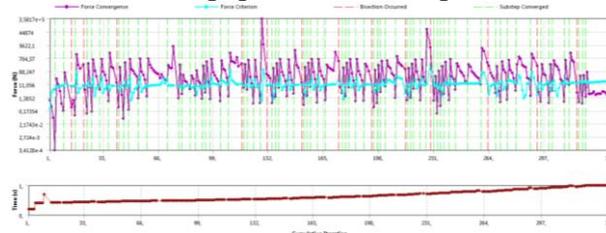


Рис. 14. График сходимости решения нелинейной задачи при увеличении нагрузки в 1,5 раза относительно разрушающей нагрузки для линейной задачи

## ВЫВОДЫ

В ходе исследования были получены аналитические, конечно-элементные и экспериментальные характеристики прочности композита на основе углеродных волокон и алюминиевой матрицы. Анализ результатов показал следующее:

- аналитическое и конечно-элементное определение модуля упругости композита дало практически полностью совпадающие результаты (расхождение 2,4%); сам модуль упругости по конечно-элементной модели (КЭМ) составил  $E_I=180,2$  ГПа;

- влияние дефектов волокон (поверхности раздела) на величину продольного модуля упругости невелико (4,3 %);

- без внесения корректирующих технологических коэффициентов  $\beta_{bl}^+$  и  $\beta_{ml}^+$ , зависящих от параметров формования композита, в формулы для аналитического определения продольной прочности композита имеет место существенное завышение прочностных характеристик КМ;

- конечно-элементное и экспериментальное определение прочности композита показало, что без учета дефектов поверхности раздела прочность по КЭМ в среднем на 25% завышена относительно реальной (680 МПа и 510 МПа соответственно);

- исследование волокон после извлечения из композита показали, что имеет место различная степень деградации волокон, чем и объясняется существенный разброс механических свойств композитов при испытаниях;

- учет дефектов поверхности раздела показал, что в зависимости от геометрии дефекта имеет место существенная концентрация напряжений в дефектах (коэффициент концентрации напряжений в дефектах выбранного типа составляет  $K_d=2-2,2$ );

- напряжения начала разрушения с учетом дефектов практически совпали с минимальной прочностью, полученной в результате эксперимента (310 МПа и 350 МПа соответственно, расхождение 12%);

- напряжения полного разрушения с учетом дефектов практически совпали со средней экспериментальной прочностью композита (500 МПа и 510 МПа соответственно, расхождение 2%);

- решение нелинейной задачи в вышеуказанной постановке было искажено локализацией пластических деформаций (ПД) в месте приложения нагрузки, требуется изменение геометрии модели для создания локализации ПД в расчетной зоне, а также переход от билинейной модели пластичности к мультилинейной.

В целом в работе получено, что с помощью сочетания аналитического и конечно-элементного метода с внесением соответствующих корректирующих коэффициентов можно прогнозировать упругие и прочностные свойства при проектных расчетах с достаточной для инженерных задач точностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 192 с. [A.M. Skudra, F.Ya. Bulavs, Structural Theory of Reinforced Plastics, (in Russian). Riga: Zinatne, 1978. 192 p.]
2. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы: в 8 т. М.: Мир, 1978. 484 с. [L. Broutman, R. Krock, Composite Materials: in 8 volumes, (in Russian). Moscow: Mir, 1978. 484 p.]
3. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Сильонов В.Ф., Урманов Ф.Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с. [G.A. Molodtsov, V.E. Bitkin, V.F. Sil'онов, F.F. Urmanov, Shape-Stable and Intelligent Structures Made of Composite Materials, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2000. 352 p.]
4. Галышев С.Н., Гомзин А.И., Галлямова Р.Ф., Назаров А.Ю., Варданян Э.Л., Мусин Ф.Ф. О прочности углеалюминиевой композитной проволоки // Композиты и наноструктуры. 2018. Т. 10, №3 (39). С. 129–133. [S.N. Galyshev, A.I. Gomzin, R.F. Gallyamova, A.Yu. Nazarov, E.L. Vardanyan, F.F. Musin, On the strength of carbon-fiber/aluminum-matrix composite wire, (in Russian) // Composites and nanostructures. 2018. V. 10, No. 3 (39). P. 129–133.]
5. Соловьев П.В., Галлямова Р.Ф., Гомзин А.И. Влияние параметров барьерного покрытия на прочность композитов с металлической матрицей // Письма о материалах. 2019. Т.9, №3. С. 360–365. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-3-360-365>. [P.V. Soloviev, R.F. Gallyamova, A.I. Gomzin, The influence of barrier coating parameters on the strength of metal matrix composites, (in Russian) // Letters on Materials. 2019. Vol. 9, No. 3. P. 360–365. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-3-360-365>.]
6. Милейко С.Т., Галышев С.Н., Колчин А.А., Кедров В.В., Шахлевич О.Ф., Никонович М.Ю., Прокопенко Н.А. Угле-титановые композиты: микроструктура, прочность и трещиностойкость // Композиты и наноструктуры. 2019. Т. 11, №4 (44). С.

147–152. [С.Т. Mileiko, S.N. Galyshev, A.A. Kolchin, V.V. Kedrov, O.F. Shakhlevich, M.Yu. Nikonovich, N.A. Prokopenko, Carbon-fibre/titanium matrix composites: microstructure, strength and fracture toughness, (in Russian) // Composites and Nanostructures. 2019. Vol. 11. No. 4 (44). P. 147–152.]

#### ОБ АВТОРАХ

**СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович**, доц. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009), дипл. к.т.н. (УГАТУ, 2016). Исследования в области механики и технологии изготовления изделий из композиционных материалов.

**АХМЕДЬЯНОВ Алексей Венерович**, асп. каф. сопротивления материалов. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2018). Дипл. магистр (УГАТУ, 2020). Исследования в области механики и технологии изготовления изделий из композиционных материалов.

**ЕРМОЛЕНКО Анатолий Николаевич**, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочн. произв-ва (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 2009). Исследования в области механики деформируемого твердого тела.

#### METADATA

**Title:** FE modeling of microgeometric parameters of composites to assess their elastic-strength properties.

**Authors:** P. V. Soloviev<sup>1</sup>, A. V. Akhmedyanov<sup>2</sup>, A. N. Ermolenko<sup>3</sup>

**Affiliation:** Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>paulnighingale@mail.ru, <sup>2</sup>mr.versatile77@mail.ru, <sup>3</sup>tolja@inbox.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 4 (102), pp. 86-98, 2023. **ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).**

**Abstract:** The article presents the results of theoretical, finite-element and experimental determination of the elastic and strength properties of composite materials (CM) based on a metal matrix. The material in question is unidirectional magnesium carbon. Finite element modeling was carried out in linear and nonlinear formulation. The influence of surface defects of carbon fiber on the strength of the composite as a whole is analyzed. The results of the study showed the need to take into account the microgeometric parameters of the structure and surface defects of reinforcing fibers when determining the strength properties of metal matrix composites. As a result of the research, a new technique for modeling CMs was obtained, which makes it possible to obtain refined mechanical characteristics of composites at the stage of design calculations.

**Key words:** metal matrix, composite, micromodel, elastic characteristics, surface defects, unidirectional magnesium carbon.

#### About authors:

**SOLOVIEV Pavel Vladimirovich**, Associate Prof., Dept. of Materials Science and Metals Physics. Dipl. Engineer (USATU, 2009). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2016). Research in area of the mechanics and manufacturing technology of products made of composite materials.

**AKHMEDYANOV Alexey Venerovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of the Strength of Materials. Bachelor's degree (USATU, 2018). Master's degree (USATU, 2020). Research in the area of the mechanics and vibrations of products made of composite materials.

**ERMOLLENKO Anatoly Nikolaevich**, Associate Prof., Dept. of the Strength of Materials. Dipl. Engineer in the technology and equipment for welding production (USATU, 2003). Cand. of Tech. Sci. in the dynamics, strength of machines, devices and equipment (USATU, 2009). Research in the area of the mechanics of deformable solids.