

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-273-3-12-16>

УДК 621.763

## ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЯ «КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ» У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ COMSOL MULTIPHYSICS

Мелконов Г.Л.

### USING THE MODULE «COMPOSITE MATERIALS» IN THE SOFTWARE PACKAGE COMSOL MULTIPHYSICS

Melkonov H.L.

*У роботі проаналізовано питання щодо використання композитних матеріалів в різних галузях промисловості. Широке використання композитних матеріалів пов'язано з можливістю формувати електричні та механічні характеристики таких матеріалів шляхом підбору їх якісного і кількісного складу, форми частинок компонентів, геометрії взаємного розміщення (зв'язності) компонентів. В залежності від зв'язності компонентів можливі три основних ефекти взаємодії їх властивостей: ефект суми, ефект комбінації та ефект добутку, що дозволяє не лише підсилювати або послаблювати у композитному матеріалі властивості його компонентів, але і отримувати принципово нові властивості, яких не мають компоненти композиту. Однак розрахунок таких структур є складною задачею, яка вимагає дуже високої кваліфікації розробника і великих затрат часу та обчислювальних ресурсів. Тому дана робота направлена на вирішення важливої технічної проблеми за допомогою використання сучасного програмного комплексу COMSOL Multiphysics, та створення адаптованого до інженерного використання системного підходу до розробки композитних компонентів для різних галузей промисловості. У статті розглядаються питання запровадження використання модуля «Композитні матеріали» для розрахунку складних інженерних задач. Пропонується алгоритм розрахунку композитних матеріалів в програмному комплексі COMSOL Multiphysics та впровадження цього алгоритму для розрахунку різних типів задач. При використанні модуля «Композитні матеріали» використовуючи спільно з іншими модулями програмного забезпечення COMSOL у розрахункових моделях є можливість врахувати процеси теплопередачі, електромагнетизму, гідродинаміки та акустики, все це можна зробити в єдиному середовищі для чисельного моделювання. В роботі показана можливість використання інтерфейсу різних інтерфейсів, в тому числі і інтерфейсу Shell, що розширюються за допомогою моделі матеріалу Layered Linear Elastic Material, яка обчислює властивості гомогенізованого матеріалу всього композиту та вирішує лише для серединної площини.*

**Ключові слова:** композитні матеріали, мікротекстуровані композити, макротекстуровані композити, вимірювання параметрів матеріалів.

**Вступ.** Потреба космічної, авіаційної, суднобудівної та інших наукомістких галузей промисловості у композиційних матеріалах постійно зростає, а особливо в Китаї та США. Але одночасно підвищуються й вимоги до термінів розробки нових матеріалів, застосування та адаптації технологій і, в результаті, задоволення цієї потреби. Вирішення цих завдань лежить у впровадженні сучасних засобів моделювання на всіх стадіях виготовлення продукції [1-2].

**Постановка проблеми.** Композити є матеріалами, що складаються з двох або більше за компоненти з властивостями, що істотно розрізняються. Оскільки вони відрізняються високими значеннями питомої міцності, жорсткості, а також технологічністю, композиційні матеріали знайшли широке застосування при виготовленні різних конструкцій.

Завдяки підвищеній міцності і малій вазі в порівнянні з традиційними матеріалами композити знаходять широке застосування в самих різних областях. Сучасна промисловість вимагає розвитку таких характеристик композитних матеріалів, як чутливість, керованість, передбачуваність і комунікативність, завдяки яким стає можливим виробництво так званих "розумних" композитів. Для створення найбільш ефективних і надійних композитних матеріалів потрібне ретельне вивчення їх поведінки в процесі експлуатації.

Розробка виробів з композиційних матеріалів традиційно є складним інженерним завданням. Для її успішного вирішення необхідно розрахувати оптимальні характеристики самого матеріалу, які залежатимуть від числа шарів композиту, напряму і послідовності їх укладання [2].

**Метою роботи є аналіз підвищення енергоефективності промислових підприємств. Результати дослідження.** Одним з варіантів класифікації композитів є класифікація за типом компонентів, а саме матриці і армуючих волокон. За типом ма-

теріалу матриці композити діляться на наступні категорії:

- композити з полімерною матрицею(РМС);
- композити з металевою матрицею(ММС);
- композити з керамічною матрицею(СМС);
- композити з вуглецевою і графітовою матрицею(CGMC).

За формою армування композитних матеріалів можна розділити на волокнисті, ниткоподібні і зміцнені частками. Композити мають безліч переваг, які вигідно відрізняють їх від звичайних металів. Основні переваги:

- висока питома міцність(на одиницю маси);
- висока втомна довговічність і корозійна стійкість;
- підвищена стійкість до фрикційного зносу;
- низькі значення коефіцієнтів теплопровідності і теплового розширення;
- можливість створювати матеріали із заданими властивостями.

Проте використання деяких композитних матеріалів зв'язане і з певними складнощами. Це висока вартість виробництва, ускладнена переробка і утилізація, проблеми при з'єднанні різнорідних матеріалів, а також відмінності в міцностних характеристиках. Крім того, оскільки композитні матеріали, як правило, мають анізотропні властивості, чисельний аналіз процесів в таких матеріалах теж може виявитися непростим завданням.

Перелічені вище переваги композитів привели до широкого застосування цих матеріалів в різних галузях, а саме:

- авіаційна промисловість (наприклад, виготовлення крил і фюзеляжів літаків);
- в військово-промисловому комплексі (виробництво танків і підводних човнів);
- відновлювальна енергетика (лопаті вітряних генераторів);
- будівництво (двері, панелі, рами, мости);
- хімічні технології(виготовлення посудин високого тиску, резервуарів і сховищ, трубопроводів і реакторів)
- машинобудування і транспорт (велосипеди, деталі автомобілів);
- кораблебудування і залізничний транспорт (корпуси човнів, деталі вагонів і локомотивів);
- споживчі і спортивні товари (тенісні ракетки і рукояті ключок для гольфу);
- електроніка (розподільні стойки і лінії зв'язку);
- ортопедичне пристосування;
- захисне спорядження.

На сьогодні широке поширення отримали волокнисті матеріали. Це полімерні композити, які, як правило, складаються з волокон, що надають матеріалу міцність, і зв'язуючої матриці або смоли, яка скріплює волокна і передає на них навантаження. У кожному шарі матеріалу волокна орієнтовані певним чином. Власне, сам композитний матеріал,

який можна використати в якості конструкційного, формується з декількох таких шарів. У волокнистих матеріалах, вживаних в промисловості, використовуються волокна з вуглецю, скла, арамида або базальту. Два найдоступніші і широко застосовувані матеріали - це углепластик і склопластик, який також називають скловолокном. Композитний шаруватий матеріал, або ламінат – це є два і більше накладених один на одного однонапрямлених шарів з однаковим або таким, що розрізняється напрямом волокон відносно опорного напрямку. Шари можуть бути зроблені з одного або різних матеріалів, а товщина шарів теж може бути різною. Послідовність розташування шарів визначається напрямом волокон в кожному шарі відносно головної осі системи координат ламінату.

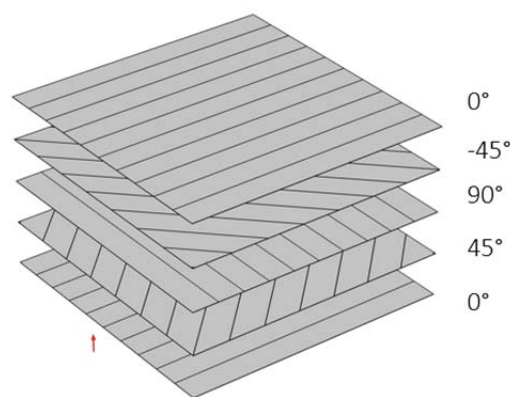


Рис. 1. Послідовність розташування шарів (0/45/90/45/0) в асиметричному збалансованому ламінаті

Залежно від послідовності розташування шарів ламінати можна розділити на наступні категорії:

- багатошаровий ламінат, в якому волокна орієнтовані під гострим кутом (наприклад, 45/30/-45/-30);
- багатошаровий ламінат з перпендикулярним напрямом волокон(наприклад, 0/90/0/90);
- збалансований ламінат (наприклад, 0/45/90/-45);
- симетричний ламінат (наприклад, 45/30/30/45);
- асиметричний ламінат(наприклад, 45/30/-30/-45).

Чисельний аналіз багатошарових композитів може виявитися досить складним завданням із-за істотних відмінностей геометричних розмірів волокон, шарів і ламінатів. Тому повноцінний аналіз таких матеріалів, як правило, виконується в два етапи на двох різних масштабах: проводиться мікромеханічний і макромеханічний аналіз [3-4].

На першому етапі був змодельований репрезентативний осередок матеріалу, що складається з волокон, скріплених матрицею. В результаті цього аналізу були розраховані усереднені властивості осередку матеріалу.

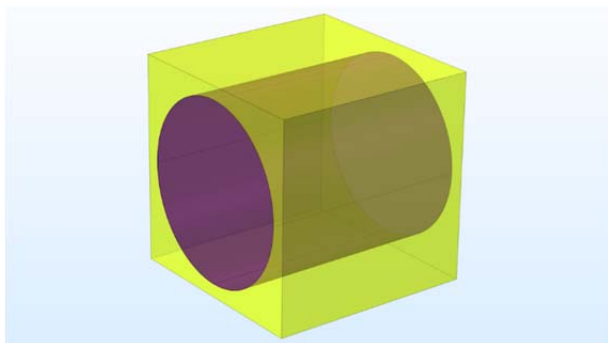


Рис. 2. Репрезентативний осередок волокнистого матеріалу, в якому об'ємна доля волокна складає 60%

Отримані результати зв'язуються з тривимірною твердотілою геометричною моделлю репрезентативного осередку, що містить волокна і матрицю, а в налаштуваннях вузла були задані властивості матеріалів.

В основі розрахунку лежить метод репрезентативного об'ємного елемента (RVE) [1]. Аналіз проводився для шести варіантів навантаження, і за його результатами були розраховані усереднені властивості волокнистого матеріалу. Приклад реалізації цього підходу представлений в моделі мікромеханічного аналізу циліндра з композитного матеріалу.

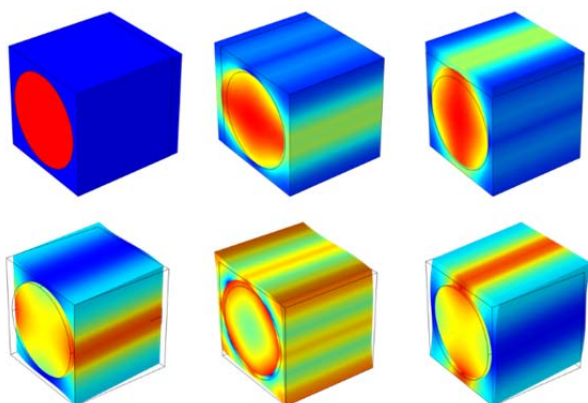


Рис. 3. Розподіл еквівалентної напруги по Мізесу і деформація репрезентативного осередку для шести варіантів навантаження

На наступному етапі було виконано моделювання багатошарового ламінату. В якості вхідних даних були використані усереднені властивості матеріалу, розраховані в результаті мікромеханічного аналізу. На цьому етапі моделюється напружено-деформований стан ламінату при різних навантаженнях [5].

До складу модуля "Композитні матеріали" включений спеціальний тип матеріалу, реалізований у вигляді вузла Layered Material, в налаштуваннях якого задані необхідні властивості ламінату (рис.5).

Далі була обрана модель для розрахунку багатошарового композиту, спираючись на емпіричне правило, яке свідчить, що модель можна вибрати, орієнтуючись на аспектно-відношення композиту,

яке визначається відношенням характерної довжини композитного об'єкту до його товщини [5].

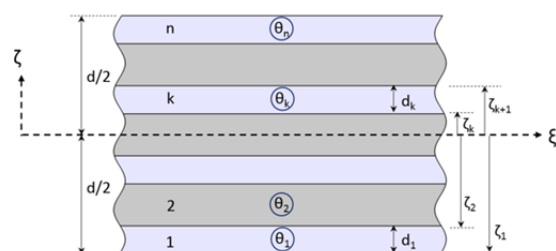


Рис. 4. Схема поперечного перерізу багатошарового композиту з вказівкою товщина і напрям волокон кожного шару

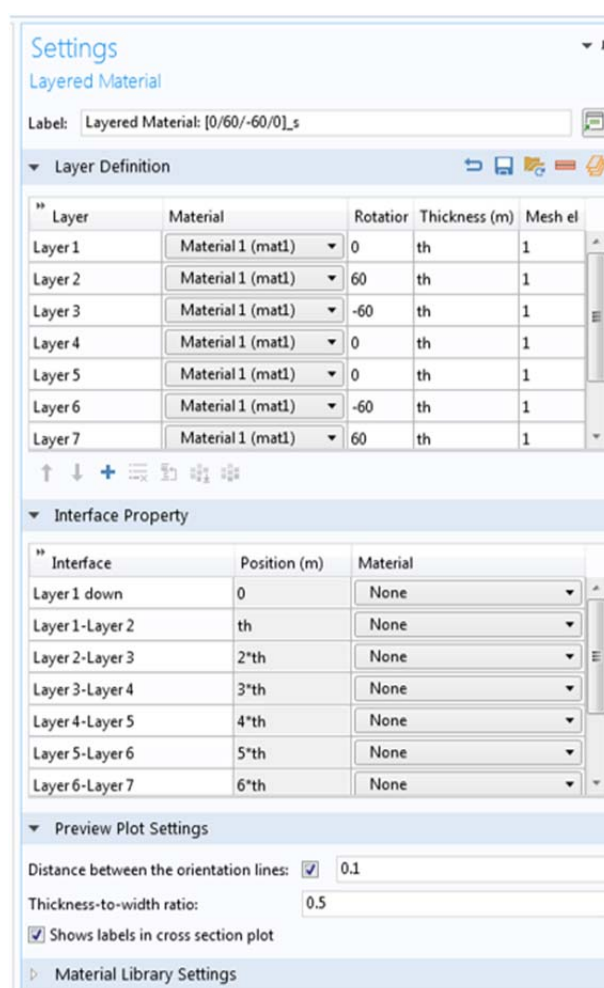


Рис. 5. Налаштування вузла Layered Material для досліджуваного композитного матеріалу

Використовуючи інтерфейс Layered Shell використовувалися функції форми різного порядку для дискретизації рівнянь у базовій площині і по товщині. Використання квадратично-лінійних елементів Лагранжа дозволяє отримати результати розрахунку швидше, тоді як застосування квадратично-кубичні елементи підвищує точність розрахунку переміщень по товщині матеріалу.

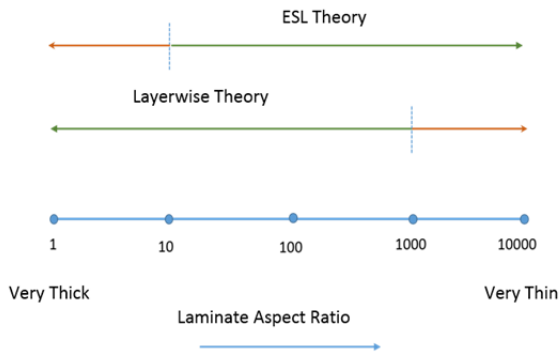


Рис. 6. Область застосовності моделей композитних матеріалів залежно від аспектного відношення

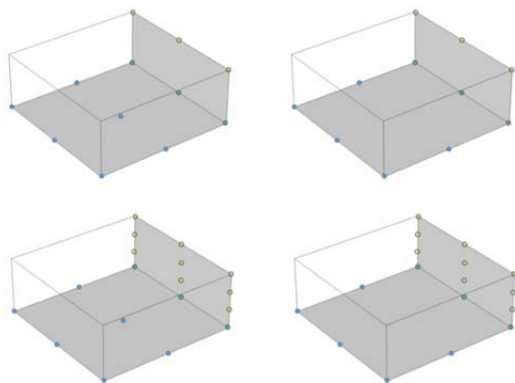


Рис. 7. Чотири типи елементів змішаного порядку, використовуваних для дискретизації рівнянь в інтерфейсі Layered Shell

Інтерфейс Layered Shell дозволяє моделювати деформацію оболонок, що складаються з декількох сполучених по торцях багат шарових оболонок. Для сполучення матеріалів використовується вузол Continuity, в якому реалізована умова безперервності. Ця функція дозволяє моделювати з'єднання матеріалів, що складаються з різної кількості шарів.

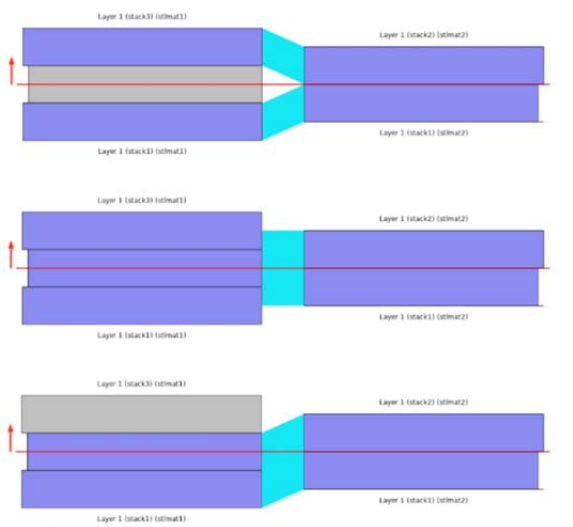


Рис. 8. Три варіанти налаштування умови безперервності для моделювання з'єднання композитів

Матеріали кожного окремого шару можуть мати нелінійні властивості (наприклад, в'язкопружності, повзучості і в'язкопластичності).

З допомогою тип графіки Layered Material Slice візуалізовано зміна різних величин по товщині багат шарового матеріалу. Вибрана одна точка на поверхні геометричної моделі, з використанням набору даних Cut Point.

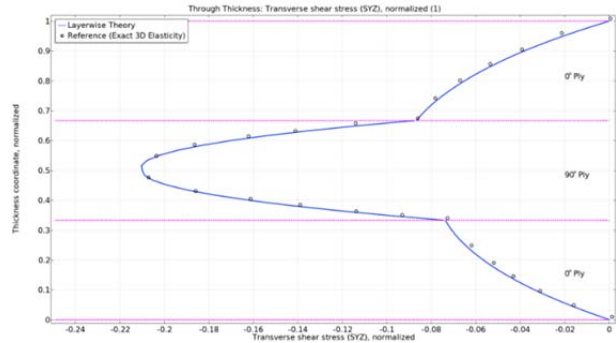


Рис. 9. Зміна зсувної напруги по товщині в одній точці багат шарового композиту

Останньою стадією у виробництві композиційних деталей є випробування готових конструкцій з перевіркою їх міцностних і експлуатаційних властивостей.

У програмному комплексі COMSOL Multiphysics реалізована можливість проведення усіх необхідних статичних і динамічних тестів отриманих композитних виробів. Можна прогнозувати як руйнування усього матеріалу в цілому, так і окремих його шарів, наприклад для виявлення дельмінації [6-7].

Окрім цього існує можливість визначення життєвого циклу виробу в умовах його експлуатації, аналогічних стандартним. Це дозволяє оцінити експлуатаційні властивості готового виробу.

**Висновки.** Виробництво виробів з композиційних матеріалів - складний багатоступінчастий процес. Якість і експлуатаційні характеристики отриманого виробу залежать від кожної стадії їх виготовлення - від правильного вибору вживаних матеріалів волокон, типів плетіння і єднальної речовини до параметрів процесів викладення або формування, просочення або автоклавування. Нині відбувається інтенсивний розвиток виробництва нових композитних деталей.

У зв'язку з підвищенням стандартів якості і вимог до експлуатаційних властивостей і збільшення життєвого циклу виробів, а також заміни металевих деталей композитними потрібно застосування усе більш складних по структурі і кількості шарів матеріалів, великих по габаритах і різноманітних по геометрії деталей. Слід враховувати, що і самі основи композиційних матеріалів стають усе більш складними по будові.

Спостерігається тенденція переходу від стрічкових композиційних матеріалів (1D) до складних матеріалів з (2D) та (3D) плетінням. Пропорційно

складності будови композитів росте і ціна їх виробництва. Таким чином, виробництво композитних виробів за допомогою старого методу проб і помилок сьогодні призводить до дуже великим фінансових проблем, що особливо є критичним в умовах ринку, який динамічно розвивається з тимчасовими витратами.

Запропонований модуль "Композитні матеріали" програмним комплексом COMSOL Multiphysics дозволяє здійснити повний цикл виробництва деталі - від операцій виготовлення основи композиту, попереднього формування, просочення єднальною речовиною до випробувань готового виробу за допомогою моделювання на екрані комп'ютера.

### Л і т е р а т у р а

1. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во МГУ. 1984. 336с
2. Christensen R.M., Lo K.H. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models // J. Mech. Phys. Solids. 1979. V. 27. P. 315-330
3. Мелконов Г.Л. Дослідження процесів віброобробки малозорстких деталей Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2021. № 1 (265)). С. 64-67.
4. Мелконов Г.Л., Мелконова І.В. Особливості моделювання механічних процесів за допомогою методу скінченних елементів в програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2020. № 4 (260)). С. 62-65.
5. COMSOL Multiphysics, Available at: <https://www.comsol.com/>
6. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113
7. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 4, Lublin, Poland. P. 141–147.

### References

1. Pobedrya B.E. Mekhanyka kompozytsyonnykh materyalov. – M.: Yzd-vo MHU. 1984. 336s
2. Christensen R.M., Lo K.H. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models // J. Mech. Phys. Solids. 1979. V. 27. P. 315-330
3. Melkonov H.L. Doslidzhennya protsesiv vibroobrobky malozhorstkykh detaley Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya. 2021. № 1 (265)). S. 64-67.
4. Melkonov H.L., Melkonova I.V. Osoblyvosti modelyuvannya mekhanichnykh protsesiv za dopomohoyu metodu skinchennykh elementiv v prohramnomu seredovyshchi COMSOL MULTIPHYSICS. Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya. 2020. № 4 (260)). S. 62-65.
5. COMSOL Multiphysics, Available at: <https://www.comsol.com/>
6. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/Commission of

Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113

7. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 4, Lublin, Poland. P. 141–147.

### Melkonov H.L. Using the module «Composite materials» in the software package COMSOL Multiphysics

*The Composite Materials Module utilizes specialized layered material technology and provides two approaches that can be used to accurately model composite shells: layerwise theory and equivalent single layer theory. The layerwise approach is suitable for thick to moderately thin composite shells with a limited number of layers. The equivalent single layer theory is suitable for thin to moderately thick shells and can accommodate many layers without significant performance impact. Using these theories, you can optimize the layout and other parameters of a laminate by performing multiscale, multiphysics, and various failure analyses. There are two fundamentally different types of interaction between the mechanics in the laminate and other processes. For physical processes that occur inside the laminate, you can solve for all of the physical phenomena simultaneously, including the couplings between them. In other physical processes, the laminate acts as a boundary for a 3D domain where something important occurs. The paper analyzes the use of composite materials in various industries. Widespread use of composite materials is associated with the ability to form the electrical and mechanical characteristics of such materials by selecting their qualitative and quantitative composition, particle shape of components, the geometry of the mutual arrangement (connectivity) of components. Depending on the connectivity of the components, there are three main effects of the interaction of their properties: the sum effect, the combination effect and the product effect, which allows not only to strengthen or weaken the properties of its components in the composite material, but also to obtain fundamentally new properties. . However, the calculation of such structures is a complex task that requires very high skills of the developer and a lot of time and computing resources. Therefore, this work is aimed at solving an important technical problem through the use of modern software COMSOL Multiphysics, and the creation of adapted to engineering use of a systematic approach to the development of composite components for various industries. The article considers the introduction of the use of the module "Composite Materials" for the calculation of complex engineering problems. An algorithm for calculating composite materials in the COMSOL Multiphysics software package and implementing this algorithm for calculating different types of tasks is proposed.*

**Keywords:** composite materials, microtextured composites, macrotextured composites, material parameters measurements.

**Мелконов Григорій Леонідович** – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), [g.melkonov78@snu.edu.ua](mailto:g.melkonov78@snu.edu.ua)