

УДК 661.666:620

О. В. МИРОНЮК, В. А. ДУДКО, Д. В. БАКЛАН, К. О. СМОЛЬНИЧЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕНЕРГІЄЮ ПОВЕРХНІ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ ТА МІЦНІСТЮ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ЇХ ОСНОВІ

При конструюванні композиційних матеріалів є важливим прогнозування міцності матеріалу, що можна зробити за допомогою вивчення взаємозв'язку між силою адгезії та параметрами міцності. У роботі оцінено вплив термічної активації на значення поверхневої енергії вуглецевих волокон. Визначено вплив добавок: поверхнево-активної речовини ЕФКА 3299 та тетраетоксисилану на значення поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці. За моделлю Оуенса-Вендта розраховано значення кутів змочування поверхні наповнювача матрицею та співвіднесені з механічною міцністю композицій.

Ключові слова: вуглецеве волокно, поверхнева енергія, модель Оуенса-Вендта, адгезія композиційних матеріалів.

Для конструирования композиционных материалов важным является прогнозирование его прочности, что можно сделать с помощью изучения связи между силой адгезии и параметрами прочности. В работе оценено влияние термической активации на значение поверхностной энергии углеродного волокна. Изучено влияние добавок: поверхностно-активного вещества ЕФКА 3299 и тетраэтоксисилана на значение поверхностной энергии фенолформальдегидной матрицы. С помощью модели Оуенса-Вендта рассчитаны значения углов смачивания поверхности наполнителя матрицей и соотнесены с прочностью композиций.

Ключевые слова: углеродное волокно, поверхностная энергия, модель Оуенса-Вендта, адгезия композиционных материалов.

For design of composite materials, it is important to predict its mechanical properties, which can be done by studying the relationship between the strength of adhesion, which can be found by experimental measuring of surface energy, and mechanical properties of the material. Nowadays relationships between these two parameters are still a field of debates. In this work we tried to clarify this question by analyzing the effect of additives that reduce wetting angle on the mechanical properties of the composite. The effect of thermal activation on the surface energy of a carbon fiber was estimated. The effect of additives the surface-active substances ЕФКА 3299 and tetraethoxysilane on the surface energy of the phenol-formaldehyde matrix was studied. Using the Owens/Wendt model, the values of the wetting angles of the filler surface by a matrix are calculated and correlated with the strength of the compositions.

Keywords: carbon fiber, surface energy, Owens-Wendt model, adhesion of composite materials.

Вступ. Композити армовані волокнами швидко зростаюча індустрія і є частиною революції в сучасних матеріалах розроблених в 80-х і 90-х років.

Існують численні приклади армованих матеріалів:

1. Композити армовані вуглецевими волокнами, які міцніші та легші за сталь. Що добре підходить для аерокосмічної, автомобільної та спортивної галузей [1].

2. Композити армовані скляним волокном використовуються там, де потрібний жорсткий, легкий та корозійно стійкий матеріал [2].

3. Органічні волокна, такі як арамідне волокно Кевлар 49 (полі-п-фенілентерефталамід) зазвичай використовуються в якості армуючого матеріалу в гумовій матриці, щоб покращити механічні властивості шин або в епоксидної матриці, щоб зробити високоміцні пластмаси [3].

4. Деревина, волокниста суміш целюлози, лігніну та інших полімерних матеріалів, є «природним» композитним матеріалом, який часто комбінують зі смолою, щоб зробити з фанери або картон [4].

5. Керамічні волокна, такі як оксид алюмінію або карбід кремнію, які використовуються в якості армуючого матеріалу в композитах з металічною матрицею (алюміній або титан) для виготовлення конструкційних матеріалів з низької щільності [5].

Основна характеристика будь-якого композитного матеріалу – це сила міжфазного зв'язку. Основні властивості композиту, такі як міжшарове зрушення і міцність на вигин може бути досягнута шляхом регулювання міцності міжфазного зв'язку. Тому, адгезія на межі поділу волокно-матриця є критичною властивістю композиту, яка повинна бути визначена.

Часто межа поділу може бути сконструйована за допомогою модифікації поверхні волокна для оптимізації адгезії між матрицею та волокном. Поверхнева енергія армуючого волокна є мірою адгезивних властивостей поверхні волокон, які можуть бути використані для прогнозування адгезії на межі поділу волокно-матриця.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У високо наповнених композиційних матеріалах майже весь об'єм можна вважати перебуваючим у стані міжфазної взаємодії між наповнювачем та матрицею [6]. Через це дуже важливим для механічних властивостей композитів є сила міжфазного зв'язку та адгезивної взаємодії. Але значення фундаментальної адгезії розрахованої теоретично за допомогою термодинаміки дуже відрізняються від значень практичної адгезії, або по іншому сили адгезії, що безпосередньо впливає на міцність зв'язку між матрицею та наповнювачем.

Традиційно для опису адгезивного розриву використовується рівняння Дюпре:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}, \quad (1)$$

Для практичних розрахунків більш уживана техніка з використання змочування твердої поверхні. Для розрахунку роботи адгезії в цьому випадку використовується рівняння Дюпре-Юнга:

$$W_a = \gamma_1 (1 + \cos\theta), \quad (2)$$

© О. В. Миронюк, В. А. Дудко, Д. В. Баклан, К. О. Смольниченко. 2016

Але окрім цієї складової при розрахунку загальної роботи адгезивного розриву вводять дисипативну складову Ψ , що включає в себе роботу, що витрачається на пластичну та в'язкоеластичну деформацію. [7]

Тоді загальне рівняння буде мати вигляд:

$$W_p = W_A + \Psi, \quad (3)$$

де відношення дисипативної енергії до роботи адгезії $\Psi \gg W_A$.

Як підтвердження в роботі [8], розрахована робота адгезії за рівнянням 1 склала приблизно 120 мДж/м², але практично отримана енергія розриву склала $2 \cdot 10^9$ мДж/м², тобто на 7 порядків.

У роботі [9], зазначається, що метод розрахунку роботи адгезії на основі кута змочування показує погані результати через те, що не враховується донорно-акцепторна взаємодія. Та для покращення результатів розрахунку використовується додатково вплив кислотно-основної взаємодії між поверхнями наповнювачу та матриці.

Хоча у роботі [10], був показаний вплив між змочуванням наповнювача за допомогою тестової рідини (ДМСО) та механічними властивостями композиту. Тому кореляція між поверхневою енергією складових композиційного матеріалу, їх адгезивної міцності та механічних параметрів композиту досі залишаються не встановленими.

Ціль та задачі дослідження. Проведені дослідження ставили за мету дослідити взаємозв'язок між значенням поверхневої енергії волокнистого наповнювача та комплексними параметрами механічної міцності композицій на його основі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Встановити значення та покомпонентний розподіл поверхневої енергії волокнистого наповнювача та фенолформальдегідної матриці;
2. Оцінити вплив термічної активації на значення поверхневої енергії вуглецевих волокон, визначити вплив добавок: поверхнево-активної речовини та тетраетоксисилану на значення поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці;
3. Використовуючи модель Оуенса-Вендта, спрогнозувати значення кутів змочування поверхні наповнювача матрицею;
4. Встановити механічну міцність композицій та визначити її кореляцію зі спрогнозованими значеннями

кутів змочування на межі поділу фаз полімернаповнювач.

Матеріали та методи дослідження впливу зміни поверхневої енергії волокнистих наповнювачів та полімерної матриці на механічну міцність композицій. Композиції були виготовлені на основі фенолформальдегідної смоли резольного типу та вуглецевого волокна отриманого шляхом піролізу вторинної сировини (Англія). В якості модифікаторів використовувались тетраетоксисилан (BASF, Німеччина), ЕФКА 3299 (BASF, Німеччина). Як розчинник використовувався ізопропіловий спирт Sigma-Aldrich (США).

Для термоактивації поверхні вуглецевого волокна його піддавали термічній обробці у муфельній печі (SNOL 8,2/1100, Росія) при температурі 700 °С протягом 30 хвилин.

Приготування композиції відбувалося шляхом розчинення смоли у розчиннику, після чого додавалися ТЕОС та ЕФКА 3299 та перемішувалися. Волокно змочували у вакуумній камері та витримували при тиску -0.5 бар, протягом 15 хвилин для видалення пухирців повітря з поверхні і покращення якості змочування волокна. Суміш висушували протягом 12 годин у сушильній шафі СНОЛ 24/200 (Росія) при температурі 70 °С до вологості 3–5 %. Після цього із матеріалу формували зразки у вигляді балок з квадратним перерізом 1,65 см та довжиною 15 см. Формування відбувалось у гідравлічному пресі ДЕ 2428.01 (Росія) з тиском у 5 тон, при температурі 120 °С протягом 30 хвилин.

Випробування на згин проводилися за ГОСТ 4648-2014 (Пластмассы. Метод испытання на статический изгиб). Випробування на стиснення проводилися за ГОСТ 4651-2014 (Пластмассы. Метод испытання на сжатие).

Оцінка поверхневої енергії методом Оуенса-Вендта розглянуто у [11]. Експериментально метод Вільгельмі детально описаний в [12].

Результати дослідження впливу зміни поверхневої енергії волокнистих наповнювачів та полімерної матриці на механічну міцність композицій. Для опису розподілу компонентів поверхневої енергії в роботі було використано модель Оуенса-Вендта, оскільки об'єкти, що розглядаються можна віднести до середньополярних речовин, не схильних до вираженої кислотно-основної взаємодії. У відповідності до цього, використовуючи метод Вільгельмі, визначено вплив термічної активації на поверхневу енергію вуглецевого волокна (табл. 1).

Таблиця 1 – Розподіл поверхневої енергії вуглецевого волокна

Матеріал	σ , мН/м	σ^D , мН/м	σ^P , мН/м
Необроблене волокно	41,8	21,5	20,3
Активоване волокно	43,8	20,9	22,9

Збільшення полярної компоненти поверхневої енергії після термічної активації пов'язано з підвищенням вмісту киснев-вмісних активних центрів на поверхні вуглецевого волокна. Невеликий ступінь цього збільшення зумовлений відносною інертністю матеріалу.

Розподіл поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці (ФФ) та вплив на цей розподіл добавки поверхнево-активної речовини (ЕФКА 3299) та тетраетоксисилану (ТЕОС) визначено із застосуванням методу сидячої краплі (табл. 2).

Таблиця 2 – Розподіл поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці

Матеріал	σ_s , мН/м	σ_s^D , мН/м	σ_s^P , мН/м
ФФ	49,20	22,47	26,43
ФФ + ЕФКА 3299	36,94	31,92	5,02
ФФ + ТЕОС + ЕФКА 3299	49,95	22,28	27,67

Полярна компонента поверхневої енергії фенолформальдегідної смоли є достатньо високою і порівняна з цією компонентою вуглецевого волокна. При введенні поверхнево-активної речовини відбувається значне зниження загального значення енергії поверхні за рахунок зменшення саме цієї компоненти внаслідок концентрації та орієнтації в поверхневих шарах молекул цього модифікатора. Введення ТЕОС в систему значно підвищує її полярність.

Для характеристики взаємодії в системі наповнювач-матриця було розраховано значення косинусів кутів змочування поверхні вуглецевого волокна фенолформа-

льдегідним полімером (табл. 3) за модифікованим рівнянням Оуенса-Вендта (1):

$$\cos\theta = \frac{2}{\sigma_m} \left(\sqrt{\sigma_m^D \times \sigma_n^D} + \sqrt{\sigma_m^P \times \sigma_n^P} \right) - 1, \quad (1)$$

де σ_m – поверхнева енергія матриці; σ_m^D – її дисперсна компонента; σ_m^P – її полярна компонента; σ_n^D – дисперсна компонента поверхневої енергії наповнювача; σ_n^P – її полярна компонента.

Таблиця 3 – Розрахункові значення кутів змочування для систем наповнювач-матриця.

Матриця	Кут змочування, град.	
	Необроблене волокно	Активоване волокно
ФФ	33	27
ФФ + ЕФКА 3299	15	12
ФФ + ТЕОС + ЕФКА 3299	34	29

Введення в систему змочувача, як видно з табл. 3, відповідно до моделі повинне значно підвищити взаємодію на межі розподілу фаз і, таким чином, енергію адгезії матриці до поверхні вуглецевого волокна. Присутність ТЕОС в системі нівелює цей вплив поверхнево-активної речовини.

Встановлено, що діаметр досліджених вуглецевих волокон (рис. 1) складає 8 мкм., середня довжина – 12 мм.

Склад дослідних композицій, які були використані для визначення механічної міцності наведено в табл. 4.

Результати визначення міцності композицій на згин та стиснення (табл. 5) вказують на їх підвищення при активації поверхні волокна, введенні поверхнево-активної речовини до складу композиції та введення ТЕОС до складу композиції.

Слід зауважити, що при активації поверхні вуглецевого волокна та при введенні змочувача між прогнозованою зміною значення кута змочування та по-

казниками міцності існує кореляція, яка, однак не зберігається при введенні ТЕОС в композицію.

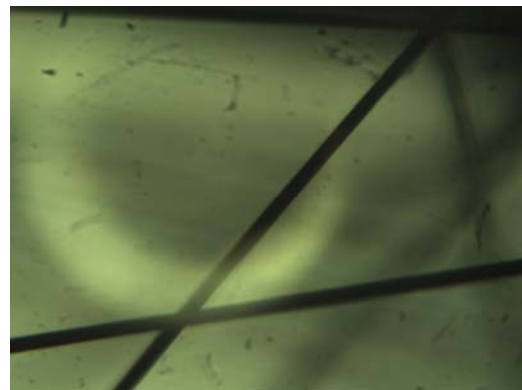


Рис. 1 – Вуглецеві волокна. Збільшення в 400 разів

Таблиця 4 – Склад дослідних композицій

№ п/п	Вміст компонентів, мас. %				
	Волокно необр.	Волокно акт.	ФФ смола	ТЕОС	ЕФКА 3299
1	37,0	–	63,0	–	–
2	–	37,0	63,0	–	–
3	–	36,6	62,0	–	1,4
4	–	34,8	59,0	4,8	1,4

Таблиця 5 – Механічні показники композицій

№ п/п	Міцність на згин, МПа	Міцність на стиснення, МПа
1	30	26
2	38	24
3	57	36
4	75	50

Обговорення результатів впливу зміни поверхневої енергії волокнистих наповнювачів та полімерної матриці на механічну міцність композицій

Одержані в ході дослідження взаємозв'язку між значеннями механічної міцності та кутом змочування на межі поділу фаз результати підтверджують очікуване підвищення міцності при зміні поверхневих енергій компонентів системи. Це відбувається у випадку термічної активації поверхні волокна, яка супроводжується гідрофілізацією (табл. 1) і підтверджується зростанням полярної компоненти поверхневої енергії. Слід зазначити, що в системі, яка розглядається, ступінь гідрофілізації є незначним. Введення поверхнево-активної речовини практично в 2 рази знижує кут змочування поверхні наповнювача полімерною матрицею, що визначає зростання механічних показників композиту на 50 % від початкової величини (табл. 5). В той же час, додавання до композиту тетраетоксисилану, виходячи з розрахунків за моделлю, повинне було призвести до падіння міцності матеріалу. Але на практиці має місце підвищення цього показника додатково на 30 %.

Останній факт може знайти такі найбільш ймовірні пояснення:

1. Тетраетоксисилан вступає в хімічну взаємодію з гідрофілізованою поверхнею вуглецевого волокна, формуючи значно більш міцний зв'язок з нею, ніж це дозволяє зробити ван-дер-ваальсівська взаємодія.

2. Тетраетоксисилан приймає участь в процесах поліконденсації фенолформальдегідної смоли, що призводить до зміни механічних властивостей (модуль еластичності, деформаційна пластичність) матриці.

Перше припущення підтверджується результатами [13] з модифікації поверхні вуглецевого волокна тетраетоксисиланом. В цьому випадку в системі спостерігається утворення хімічного зв'язку, і вона виключається з ряду об'єктів, які розглядаються теорією Оуенса-Вендта.

Наявність хімічної взаємодії між гідроксильними групами фенол-формальдегідної смоли та тетраетоксисиланом показана в роботі [14]. Зазначається, що в ході одержання фенол-формальдегідного полімеру та його поліконденсації відбуваються складні перетворення ТЕОС, зокрема утворюються хімічно зв'язані з матрицею нанорозмірні конденсаційні частинки SiO_2 , які вочевидь змінюють такі механічні характеристики матриці як модуль еластичності та пластичність.

Очевидно, що факт значних розбіжностей експериментальних результатів та теоретично прогнозованих покладає межі застосованості теорії Оуенса-Вендта для оцінки міжфазної взаємодії в полімерних композиціях. Вони полягають у виключенні з розгляду тих систем, в яких відбуваються хімічні перетворення складників при компаундуванні.

Залежність між міцністю композицій на згин та стиснення і розрахунковими кутами змочування має кореляційний характер і може порівнюватися в різних композиціях тільки при умові збереження постійних механічних параметрів матриці та волокон. Це призводить до висунення додаткових вимог по відношенню до модифікаторів, ефективність яких досліджується: вони повинні бути хімічно інертними по відношенню до реак-

ційних груп олігомерів; вони не повинні змінювати надмолекулярну структуру полімеру або пластифікувати матрицю.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Встановлено, що поверхнева енергія вуглецевого волокна становить 41,8 мН/м, дисперсна компонента складає 21,5 мН/м, а полярна – 20,3 мДж/м²; поверхнева енергія отвердженої фенол-формальдегідної матриці – 49,2 мН/м а дисперсна та полярна компоненти – 22,5 та 26,4 мН/м відповідно.

2. Визначено, що термічна активація незначно підвищує полярну компоненту поверхневої енергії вуглецевого волокна (до 23,0 мН/м). Введення змочувача в цілому знижує поверхневу енергію фенолформальдегідної смоли до 37 мН/м за рахунок зниження полярної її компоненти до 5 мН/м. Введення тетраетоксисилану в матрицю значно підвищує її поверхневу енергію за рахунок збільшення полярної компоненти до 27 мН/м.

3. З використанням моделі Оуенса-Вендта спрогнозовано значення кутів змочування поверхні волокнистого наповнювача полімерною матрицею. В залежності від складу композиції, вони знаходяться в межах від 12 (для системи на основі активованого волокна і матриці, модифікованої змочувачем) до 34 градусів (для системи на основі неактивованого волокна та матриці модифікованої змочувачем та тетраетоксисиланом).

4. Встановлено, що механічна міцність композицій при додаванні до їх складу змочувача підвищується на 50 %, а при введенні тетраетоксисилану – практично в 2 рази. Останнє вказує на незастосовуваність моделі Оуенса-Вендта до систем, в яких має місце міжкомпонентна хімічна взаємодія. При прогнозуванні впливу добавок, взаємодія яких відбувається лише на рівні ван-дер-ваальсівських сил, модель дозволяє одержати кореляцію між розрахунковими результатами та експериментальними даними.

Список літератури:

1. Composite Materials in the Airbus A380 – From History to Future [Electronic resource]. – Available at: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/paper-1695.pdf>
2. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Electronic resource]. – Available at: <http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/14023180.pdf>
3. Magat E. E. Fibers from Extended Chain Aromatic Polyamides, New Fibers and Their Composites [Text] / E. E. Magat // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1980. – № 294 (1411). – P. 463–472. doi: [10.1098/rsta.1980.0055](https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0055)
4. Caroline, B. Green Composites: Polymer Composites and the Environment [Text] / Baillie Caroline. – CRC Press, 2005. – 308 p.
5. Ceramic Fibers and Coatings: Advanced Materials for the Twenty-First Century [Text] / National Research Council // The National Academies Press. – 1998. – 112 p. doi: [10.17226/6042](https://doi.org/10.17226/6042)
6. Irzhak, V. I. Structural aspects of polymer network formation upon curing of oligomer systems [Text] / V. I. Irzhak, S. M. Mezhevikovskii // Russian Chemical Reviews. – 2008. – № 78 (2). – P. 165–194. doi: [10.1070/rc2009v078n02abeh003896](https://doi.org/10.1070/rc2009v078n02abeh003896)
7. Bascom, W. D. The surface properties of carbon fibers and their adhesion to organic polymers [Text] / W. D. Bascom, L. T. Drzal // Hercules aerospace co magna UT. – 1987.
8. Bascom, W. D. Fracture Markings on Stress-corroded Epoxy/Aluminum Butt Joints [Text] / W. D. Bascom, S. T. Gadomski, C. M. Henderson, R. L. Jones // The Journal of

- Adhesion. – 1976. – № 8 (3). – P. 213–222. doi: [10.1080/00218467608075084](https://doi.org/10.1080/00218467608075084)
9. Dutschk, V. “Fundamental” and “practical” adhesion in polymer-fiber systems [Text] / V. Dutschk, E. Pisanova, S. Zhandarov, B. Lauke // *Mechanics of Composite Materials*. – 1998. – № 34 (4). – P. 309–320. doi: [10.1007/bf02257899](https://doi.org/10.1007/bf02257899)
 10. Dillingham, R. G. Surface Energy and Adhesion in Composite-Composite Adhesive Bonds [Text] / R. G. Dillingham, B. R. Oakley // *The Journal of Adhesion*. – 2006. – № 82 (4). – P. 407–426. doi: [10.1080/00218460600683944](https://doi.org/10.1080/00218460600683944)
 11. Миронюк, А. В. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей / А. В. Миронюк, А. В. Придатко, П. В. Сиволопов, В. А. Сви́дєрський // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 1/6 (67). – С. 23–26. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/20797/18938>
 12. Lander, L. M. A systematic comparison of contact angle methods [Text] / L. M. Lander, L. M. Siewierski, W. J. Brittain, E. A. Volger // *Langmuir*. – 1993. – № 9 (8). – P. 2237–2239. doi: [10.1021/la00032a055](https://doi.org/10.1021/la00032a055)
 13. Hoffman, W. P. Characterizing the nano-surface of carbon fibers in order to gain a better understanding of the interfaces they form [Text] / W. P. Hoffman // *Composite Interfaces*. – 1993. – № 1 (1). – P. 15–35. doi: [10.1163/156855493x00293](https://doi.org/10.1163/156855493x00293)
 14. Zuo, X. H. Tribological behavior of phenolic resin composites modified using tetraethyl orthosilicate [Text] / X. H. Zuo, W. Li, Z. L. Yu, F. M. Ma, M. Ruan // *Tribology Transactions*. – 2012. – № 56 (1). – P. 115–120. doi: [10.1080/10402004.2012.732197](https://doi.org/10.1080/10402004.2012.732197)
 4. Caroline, B. (2005). *Green Composites: Polymer Composites and the Environment*. CRC Press., 308.
 5. National Research Council (1998). *Ceramic Fibers and Coatings*. The National Academies Press, 112. doi: [10.17226/6042](https://doi.org/10.17226/6042)
 6. Irzhak, V. I., Mezhevikovskii, S. M. (2009). Structural aspects of polymer network formation upon curing of oligomer systems. *Russian Chemical Reviews*, 78 (2), 165–194. doi: [10.1070/rc2009v078n02abeh003896](https://doi.org/10.1070/rc2009v078n02abeh003896)
 7. Bascom, W. D., Drzal, L. T. (1987). The surface properties of carbon fibers and their adhesion to organic polymers. *Hercules aerospace co magna UT*.
 8. Bascom, W. D., Gadomski, S. T., Henderson, C. M., Jones, R. L. (1976). Fracture Markings on Stress-corroded Epoxy/Aluminum Butt Joints. *The Journal of Adhesion*, 8 (3), 213–222. doi: [10.1080/00218467608075084](https://doi.org/10.1080/00218467608075084)
 9. Dutschk, V., Pisanova, E., Zhandarov, S., Lauke, B. (1998). “Fundamental” and “practical” adhesion in polymer-fiber systems. *Mechanics of Composite Materials*, 34 (4), 309–320. doi: [10.1007/bf02257899](https://doi.org/10.1007/bf02257899)
 10. Dillingham, R. G., Oakley, B. R. (2006). Surface Energy and Adhesion in Composite-Composite Adhesive Bonds. *The Journal of Adhesion*, 82 (4), 407–426. doi: [10.1080/00218460600683944](https://doi.org/10.1080/00218460600683944)
 11. Myronyuk, A. V., Prydatko, A. V., Syvolapov, P. V., Svyderskyi, V. A. (2014). Features of evaluation of wetting of polymeric surfaces. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 1/6 (67), 23–26. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/20797/18938>
 12. Lander, L. M., Siewierski, L. M., Brittain, W. J., Vogler, E. A. (1993). A systematic comparison of contact angle methods. *Langmuir*, 9 (8), 2237–2239. doi: [10.1021/la00032a055](https://doi.org/10.1021/la00032a055)
 13. Hoffman, W. P. (1993). Characterizing the nano-surface of carbon fibers in order to gain a better understanding of the interfaces they form. *Composite Interfaces*, 1 (1), 15–35. doi: [10.1163/156855493x00293](https://doi.org/10.1163/156855493x00293)
 14. Zuo, X. H., Li, W., Yu, Z. L., Ma, F. M., Ruan, M. (2013). Tribological Behavior of Phenolic Resin Composites Modified Using Tetraethyl Orthosilicate. *Tribology Transactions*, 56 (1), 115–120. doi: [10.1080/10402004.2012.732197](https://doi.org/10.1080/10402004.2012.732197)

Bibliography (transliterated):

1. Composite Materials in the Airbus A380 – From History to Future. Available at: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/paper-1695.pdf>
2. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Available at: <http://tocs.ulb-tu-darmstadt.de/14023180.pdf>
3. Magat, E. E. (1980). Fibres from Extended Chain Aromatic Polyamides. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 294 (1411), 463–472. doi: [10.1098/rsta.1980.0055](https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0055)

Надійшла (received) 11. 11. 2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження взаємозв'язку між енергією поверхні волокнистих наповнювачів та міцністю полімерних композицій на їх основі/ О. В. Миронюк, В. А. Дудко, Д. В. Баклан, К. О. Смольниченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.3–8. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование взаимосвязи между энергией поверхности волокнистых наполнителей и прочностью полимерных композиций на их основе/ А. В. Миронюк, В. А. Дудко, Д. В. Баклан, К. А. Смольниченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.3–8. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of the relationship between the surface energy of fibrous fillers and the strength of polymer compositions based on them/ О. Myronyuk, V. Dudko, D. Baklan, K. Smolnychenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.3–8. – Biblogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Миронюк Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: whizershines@gmail.com.

Дудко Володимир Андрійович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: ad777v@gmail.com.

Баклан Денис Віталійович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: denis-baklan@yandex.ru.

Смольниченко Катерина Олександрівна – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: kateyko97@gmail.com.

Мирунюк Алексей Владимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри «Хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: whizershines@gmail.com.

Дудко Владимир Андреевич – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: ad777v@gmail.com.

Баклан Денис Витальевич – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: denis-baklan@yandex.ru.

Смольниченко Катерина Александровна – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: kateyko97@gmail.com.

Myronyuk Oleksiy – PhD, associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: whizershines@gmail.com.

Dudko Volodymyr – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: ad777v@gmail.com.

Baklan Denis – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: denis-baklan@yandex.ru.

Smolnychenko Kateryna – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: kateyko97@gmail.com.

УДК 537.623

М. М. ЛУТЧИН

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ

В даній статті розглянуті способи представлення явища гістерезису. Використання гістерезису спостерігається в електротехніці, біології, гідрології, економіці, філософії та соціології. Моделювання здійснюється з урахуванням особливостей вхідних даних та необхідної точності розрахунків. Показані переваги та недоліки моделей Маделунга, Джона Чана, Джилса-Атертона, Прейзаха, Релея та графоаналітичний. Рекомендується для підвищення точності моделювання використовувати комбіновані методи або виконувати їх модифікацію з урахуванням особливостей представлення гістерезису.

Ключові слова: гістерезис, часткові петлі, крива намагнічування, модель Маделунга, модель Джона Чана, модель Джилса-Атертона, модель Прейзаха

В данной статье рассмотрены способы представления явления гистерезиса. Учет гистерезиса наблюдается в электротехнике, биологии, гидрологии, экономике, философии и социологии. Моделирование осуществляется с учетом особенностей исходных данных и требуемой точности расчетов. Показаны преимущества и недостатки моделей Маделунга, Джона Чана, Джилса-Атертона, Прейзаха, Релея и графоаналитических. Рекомендуется для повышения точности моделирования использовать комбинированные методы или выполнять их модификацию с учетом особенностей представления гистерезиса.

Ключевые слова: гистерезис, частичные петли, кривая намагничивания, модель Маделунга, модель Джона Чана, модель Джилса-Атертона, модель Прейзаха

In the paper, models of hysteresis are presented. Modeling is carried out with a specific of initial data and in accordance with the accuracy of calculations. Preisach model is highly accurate description of the process, but requires a large number of input parameters. Models of John Chan and Jiles-Atherton have highly simple calculations. They enable to simulate a real process conditions for a match characteristics. Rayleigh model provides accurate results in initial magnetization. This model recommended for use in the calculation of the steady state. Semigraphical methods give only an idea of the progress of hysteresis effects. It is recommended to improve the accuracy of modeling to use combined methods or to perform its modification allowing for the representing of specific features of hysteresis.

Keywords: hysteresis, partial loop, magnetization curve, Madelung model, John Chan model, Jiles-Atherton model, Preisach model of hysteresis

Вступ. Явище гістерезису характеризує системи, що не відповідають миттєву реакцію на прикладені відносно них дії. Поведінка таких систем визначається зовнішніми факторами впливу в даний момент та попередніми її станами. Використання гістерезису спостерігається в електротехніці, біології, гідрології, економіці, філософії та соціології [1–3].

Поява математичних моделей опису гістерезису викликана значною кількістю прикладних задач. Тому метою даної роботи є опис основних принципів моделювання зазначеного явища.

В якості прикладу для порівняння використаємо електромагнітний гістерезис.