

УДК 005.6:631.11

DOI: 10.18372/0370-2197.4(97).16957

О. О. МІКОСЯНЧИК, В. А. ЛИТВИНЕНКО, О. Ю. ЖОСАН, Є. В. ПЕДАН

Національний авіаційний університет, Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МІЦНОСТІ

Проведена оцінка методів, направлених на забезпечення високої якості та прогнозування властивостей виробів з композиційних матеріалів на етапі виробництва. Розглянуто шляхи удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів на етапі вибору оптимальної технології їх виготовлення. Проаналізовані ключові параметри технологічного процесу виготовлення виробів з композиційних матеріалів з застосуванням схеми причинно-наслідкових зв'язків та побудована діаграма Ісікави для визначення причин появи виробничих дефектів композитів. Проведена оцінка впливу кута укладання шарів однонаправленої вуглецевої тканини на міцність перехресно-армованого композиційного матеріалу.

Ключові слова: *композиційний матеріал, технологія виробництва, руйнівне навантаження, межа міцності при розтягуванні.*

Вступ та постановка задач дослідження. Композиційні матеріали (КМ) широко використовуються в авіаційній промисловості та дозволили інженерам значно підвищити характеристики міцності та надійності низки конструктивних елементів, які виготовлялися з сталі або алюмінієвих сплавів. Складові матеріали зберігають свою ідентичність у композитах, разом ці матеріали створюють «гібридний» матеріал із покращеними структурними властивостями. Розробка легких, стійких до високих температур композитних матеріалів дозволить матеріалізувати наступне покоління високоефективних, економічних конструкцій повітряних суден (ПС). Використання таких матеріалів зменшить споживання палива, підвищить економічність і знизить прямі експлуатаційні витрати ПС.

Якщо у ранні періоди 1960-х роках використання композиційних матеріалів світовими лідерами літакобудування (корпораціями Airbus и Boeing) в авіалайнерах становило лише 5% від загальної ваги, то зараз цей показник становить близько 53% від загальної ваги, наприклад, в літаках типу Airbus A350, A-340 та B-777 [1].

Адаптовані технології захисту матеріалів для зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення вогнестійкості необхідні для виконання високих вимог безпеки в авіації. Моделювання та оцінка якості екологічно покращених композитних матеріалів в авіаційному секторі в рамках міжнародної співпраці китайських та європейських партнерів спрямовані на оптимізоване використання матеріалів, тоді як оцінка життєвого циклу має на меті довести екологічні переваги порівняно з найсучаснішими синтетичними матеріалами [2].

Технології виготовлення КМ для забезпечення високої якості повітряних суден (ПС) та технологічні процеси літакобудівного виробництва характеризуються істотними відмінностями в порівнянні з технологічними процесами, застосовуваними в загальному машинобудуванні, через характерні особливості об'єкту виробництва. В конструкції літака з композиційних матеріалів можна виготовити фюзеляж, крила, хвостове оперення, мотогондולי, деталі інтер'єру. Найчастіше для літаків застосовується більш легкий

вуглепластик, а склопластик – для ненавантажених деталей і для носового обтічника. Склопластик важче, ніж вуглепластик, і менш міцний, але він значно дешевше. Носовий обтічник літака роблять зі склопластику, так як ця деталь повинна пропускати радіохвилі, а вуглеволокно проводить струм і створює перешкоди [3].

Розробка і створення деталей з композиційних матеріалів, а також розробка і дослідження характеристик нового КМ є комплексом складних і пов'язаних завдань. Підхід до вирішення таких завдань полягає у виборі оптимального поєднання технологій і матеріалів; проведенні комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій і застосування сучасних технологічних процесів виробництва.

Можливість точно передбачити характеристики композитних матеріалів під час виробництва має вирішальне значення для забезпечення надійності конструкцій, що надають перспективи для збільшення використання долі композитів і прискорення їх впровадження. Тому актуальним напрямком досліджень є розробка методів, направлених на оцінку якості та прогнозування властивостей вже готового виробу.

Метою роботи є удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів на етапі вибору оптимальної технології їх виготовлення та розробка алгоритму організації експериментальних досліджень для визначення міцнісних характеристик створених КМ.

Для забезпечення ефективного удосконалення процесу оцінки якості виробів з композиційних матеріалів необхідно вирішити наступні завдання:

- вивчити визначальні чинники процесу формування якісних ознак виробів з КМ;
- розробити систему забезпечення якості виробів з КМ за вимогами міжнародних (ІСО, ІКАО) та національних стандартів;
- запропонувати алгоритм причинно-наслідкових зв'язків для виявлення ключових параметрів, характеристик та технологічних процесів, що впливають на якість виробів.

Розробка алгоритму впровадження системи якості для удосконалення технологічних операцій на етапах виробництва композиційних матеріалів.

При виробництві КМ формування необхідних показників якості виробів відбувається за встановленою схемою певної послідовності і черговості технологічних операцій. Кожна наступна операція все більше наближує формуючий показник якості до бажаного, при цьому мають значення характеристики вихідних матеріалів, які також отримані за певною технологічною схемою. Основні чинники, що впливають на показники якості виробів з КМ на етапі виробництва, представлені на рис. 1.

Недотримання вимог технологічного процесу виробництва КМ призводить до неминучої появи виробничих дефектів. В роботі [4] узагальнено механізм утворення залишкових напружень, пустотних дефектів і багатих смолою дефектів у матриці композитів, представлено механізм формування дефектів армування волокон, таких як зморшки та хвилястість волокон у композитах. З урахуванням наявності виробничих дефектів проаналізовано їх вплив на механічні властивості композитів при вигині і стисненні та показано, що дефекти зміщення волокон серйозно знижують модуль пружності, міцність і стійкість несучих конструкцій.

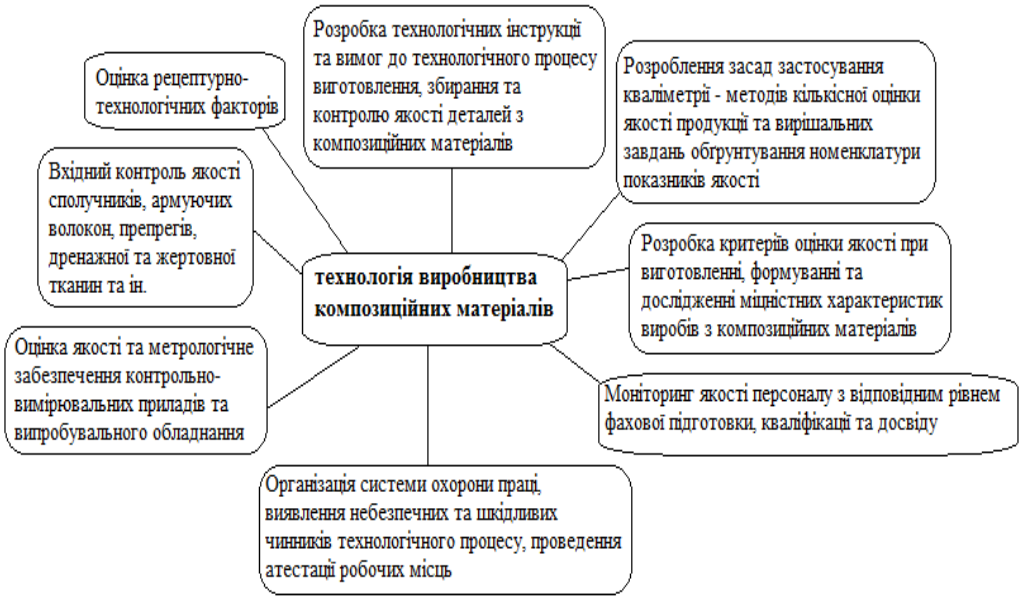


Рис. 1. Структурна схема впливу значимих показників на рівень якості технологічного процесу виготовлення композиційних матеріалів

Встановлено механізми утворення міжфазних дефектів, таких як розшарування та роз'єднання на межі між армуючим матеріалом та матрицею [5]. Проаналізовані дефекти КМ при механічній обробці, такі як дефекти свердління та різання [6], до яких можна віднести розшарування, розриви і задири, які серйозно вплинуть на міцність і надійність з'єднання між компонентами.

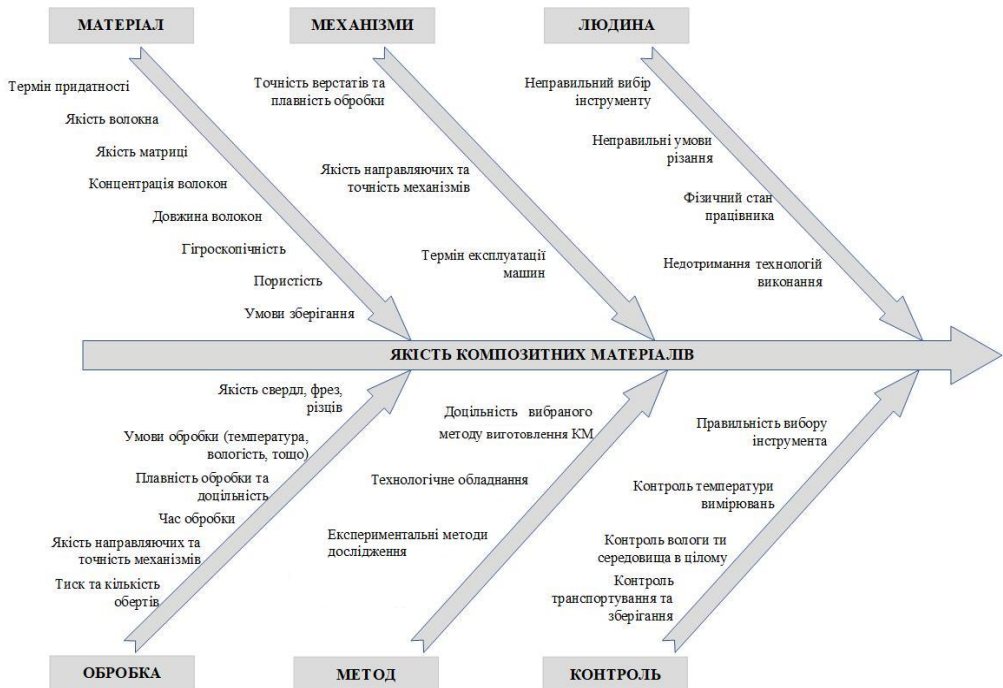


Рис. 2. Схема причинно-наслідкових зв'язків при оцінці якості виробів з композиційних матеріалів

Імовірність виробничих дефектів у композитах дуже висока через складні фізико-хімічні властивості компонентних матеріалів і процесів формування. Тому дослідження причин появи виробничих дефектів композитів та застосування методів їх виявлення набувають важливого значення в оцінці якості композитів. Проаналізуємо ключові параметри технологічного процесу виготовлення виробів з композиційних матеріалів з застосуванням схеми причинно-наслідкових зв'язків при побудові діаграми Ісікави (рис. 2).

Метою створення композиційного матеріалу є поєднання схожих або різних компонентів для отримання матеріалу з новими заданими властивостями та характеристиками, відмінними від властивостей та характеристик вихідних компонентів. Більшість властивостей отриманих КМ виявляються вищими, ніж властивості вихідних компонентів. З появою такого роду матеріалів виникла можливість селективного вибору властивостей композитів, необхідних для задоволення потреб кожної конкретної галузі застосування. Головна перевага будь-якого композиту – це можливість при проектуванні самостійно вибрати тип матеріалу, орієнтацію та об'ємний вміст волокон. Це дозволяє отримувати конструкційні матеріали з бажаними для конструктора функціональними властивостями. Однак, обов'язковою умовою при оцінці міцнісних характеристик сформованого КМ є не тільки моделювання його напружено-деформованого стану з застосуванням сучасних методик чисельного розрахунку на міцність з використанням CAD/CAE систем, таких як ANSYS, PRO-E, SolidWorks, але й залишається першочерговою потребою застосування експериментальних методів досліджень міцнісних характеристик виробів з КМ (табл. 1). Одержані експериментальним шляхом результати тестування механічних характеристик технологічного зразку КМ можуть суттєво відрізнятись від показників при моделюванні.

Проведена оцінка впливу кута укладання шарів однонаправленої вуглецевої тканини на міцність перехресно-армованого КМ. Форма досліджуваних зразків КМ, відповідає стандарту ASTM D3039.

Досліджуваний матеріал – перехресно-армований КМ, виготовлений з однонаправленої вуглецевої тканини SkyCarbon (табл. 2) і полімерного епоксидно-діанового сполучника КДА (ТУ 2225-032-00203306-97), модифікованого аліфатичною епоксидною смолою марки ДЭГ-1.

За результатами механічних випробувань зразків на розтяг зафіксована максимальна величина зусилля на зразок, що призводить до його руйнування. За максимальним значенням руйнівного навантаження для кожного кута укладання обчислено межу міцності при розтягуванні (рис. 3).

За одержаними експериментальними значеннями руйнівного навантаження встановлено, що перехресно-армований КМ характеризується найвищою міцністю при куті укладання 0 градусів в напрямку прикладеного навантаження, зростання кута укладання армуючих вуглеволокон до 90° призводить до зниження руйнівного навантаження в 95 разів. Таким чином, залежно від кута укладання проявляється анізотропія міцності КМ. Мінімальний кут укладання, який має меншу розбіжність з напрямком прикладання сили, призводить до зниження руйнівного навантаження в 1,3 рази.

Оцінка руйнівного навантаження при 90° укладання свідчить про розривну міцність сполучника КДА, яка знижується в 1,4 рази, згідно нормам, встановлених в ТУ.

Таблиця 1

**Аналіз стандартів ASTM для оцінки міцнісних характеристик
композиційних матеріалів**

Метод	Мета випробувань	Процедура тестування	Результати тестування
Випробування на розтяг композиційних матеріалів ASTM D3039	Використовується для вимірювання сили, необхідної для розриву зразка полімерного композиту, і ступеня, до якого зразок розтягується або подовжується до точки розриву.	Зразки поміщають в ручки універсальної випробувальної машини на певній відстані між рукоятками і витягують до руйнування. Швидкість випробування може бути визначена специфікацією матеріалу або часом до відмови (від 1 до 10 хв). Типова швидкість випробування стандартних зразків становить 2 мм/хв. Для визначення подовження та модуля пружності при розтягуванні використовується тензодатчик. Залежно від армування та типу може знадобитися випробування в кількох напрямках.	Діаграма напруження-деформація. Міцність на розрив (МПа). Модуль пружності по хорді розтягування (МПа). Деформація розтягування (%). Коефіцієнт Пуассона.
Міцність на розрив сендвіч-конструкцій ASTM C297	Інформація про стабільність з'єднання серцевини з поверхнею, передачу навантаження та міцність на розтягування в плоскому положенні сендвіч-серцевини стільникових КМ.	Випробувальні зразки вирізають із сендвіч-панелей, а грані випробувальних зразків скріплюють з алюмінієвими блоками. Один з алюмінієвих блоків монтується в пристосуванні на нерухомій стороні універсальної випробувальної машини, протилежний алюмінієвий блок монтується в пристосуванні на рухомій стороні універсальної випробувальної машини. Потім вузол переміщують зі швидкістю 0,50 мм/хв до руйнування або зі швидкістю, налаштованою на руйнування протягом 3...6 хв.	Гранична міцність на розтягнення в плоскому стані, МПа. Когезійна недостатність клею, що облицьовує серцевину. Порушення адгезії клею, що облицьовує серцевину. Дефекти при розтягуванні.
Розтягнення з відкритим отвором ASTM D5766	Вимірює силу, необхідну для розриву зразка полімерного композитного ламінату з центральним отвором. Використовується в аерокосмічній промисловості, коли є технологічна необхідність створення отворів для кріплення КМ.	Зразки для випробувань поміщають в ручки універсального випробувального приладу на певній відстані між ручками і витягують до руйнування. Випробувальні зразки та протокол випробувань відповідають стандарту ASTM D3039. ASTM D5766 описує підготовку отвору.	Межа міцності на розрив у відкритому отворі (з насічкою) вказується в МПа і дорівнює максимальній силі, яку витримує випробувальний зразок до руйнування, поділений на площу загального поперечного перерізу. Можливість оцінки типу пошкодження ламінату в отворі.

Таблиця 2

Властивості вуглецевого волокна в однонаправленій тканині SkyCarbon

№	Характеристика	Значення
1	Межа міцності	4137 МПа
2	Модуль пружності	242 ГПа
3	Подовження	1,5 %
4	Діаметр волокна	7.2 мкм
5	Лінійна щільність	270 м/кг

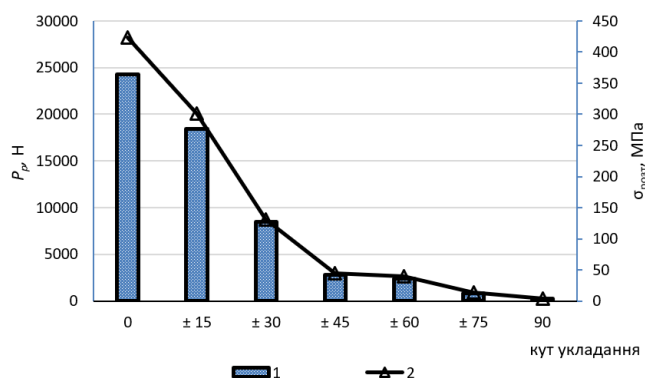


Рис. 3. Міцнісні характеристики перехресно-армованого композиційного матеріалу: 1 – руйнівне навантаження (P_p), 2 – межа міцності при розтягуванні ($\sigma_{розт}$)

Імовірно, це обумовлено адгезійною взаємодією активних епоксидних груп сполучника з поверхнею вуглеволокон в процесі формування КМ, що призводить до неоднорідності розподілу епоксидних груп в КМ – найбільша їх щільність проявляється на межі армуюче волокно - сполучник, найнижча – в основі сполучника.

Таким чином, змінюючи кут укладання армуючого матеріалу залежно від передбаченого напрямку дії прикладеного навантаження, можна досягнути високої міцності КМ в процесі твердіння. Однак експлуатаційні умови застосування КМ, як правило, свідчать про різновекторність прикладання діючого навантаження, що передбачає необхідність створення умов експерименту, максимально наближених до реальних умов експлуатації виробу.

Висновки:

1. Розроблена структурна схема впливу значимих показників на рівень якості технологічного процесу виготовлення композиційних матеріалів.

2. Проведена оцінка причин появи виробничих дефектів композитів та запропонована діаграма Ісікави причинно-наслідкових зв'язків технологічного процесу виготовлення виробів з композиційних матеріалів.

3. За результатами механічних випробувань перехресно-армованого композиційного матеріалу, виготовленого з однонаправленої вуглецевої тканини SkyCarbon, на розтяг встановлена найвища міцність при куті укладання 0 градусів в напрямку прикладеного навантаження, зростання кута укладання армуючих вуглеволокон до 90° призводить до зниження руйнівного навантаження в 95 разів.

Список літератури

1. Nedelcu R., Redon P. Composites materials for aviation industry / R. Nedelcu, P. Redon // International conference of scientific paper AFASES 2012, Brasov, 24-26 May 2012. – P. 11-13.
2. Bachmann J., Yi X., Gong H. et al. Outlook on ecologically improved composites for aviation interior and secondary structures / CEAS Aeronaut J. – 2018. – 9. – С. 533–543.
3. Ключников Ю. В., Сердітов О. Т., Дубнюк В. Л. Авіаційні матеріали та їх технології: навч. посібник / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2022. – 114с.
4. Fu Y., Yao X. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites / Y. Fu, X. Yao // Composites Part C: Open Access. – 2022. – Vol. 8. – P. 100276
5. Андреев А.В., Петропольский В.С. Оптимизация выбора материала мастер-моделей для изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях единичного и опытного производства в изделиях авиационной техники / А.В. Андреев, В.С. Петропольский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(82). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 20-29.
6. Тарасюк А.Д., Андреев А.В., Артаков А.Ю. Влияние автоматизации технологических процессов производства деталей из полимерных композитов на качественные и экономические характеристики изделий / А.Д. Тарасюк, А.В. Андреев, А.Ю. Артаков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(83). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 7-16.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2022.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>.

Литвиненко Валентин Андрійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка», освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: valekss93@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3680-2198>.

Жосан Олександр Юрійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», освітньо-професійна програма «Обладнання повітряних суден», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: acelamond@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4649-8222>.

Педан Євген Валерійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка», освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: kedr23edan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8761-750X>.

O. O. MIKOSIANCHYK, V. A. LYTVYENENKO, O. Y. ZHOSAN, Y. V. PEDAN

QUALITY ASSESSMENT OF PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS ACCORDING TO STRENGTH CHARACTERISTICS

An assessment of the methods aimed at ensuring high quality and predicting the properties of products made of composite materials at the production stage was carried out. Ways of improving the quality assessment process of products made of composite materials at the stage of choosing the optimal technology for their production are considered. An algorithm for the implementation of the quality system for the improvement of technological operations at the stages of production of composite materials is proposed. The key parameters of the technological process of manufacturing products from composite materials were analyzed using the scheme of cause-and-effect relationships and the Ishikawa diagram was constructed to determine the causes of the emergence of manufacturing defects of composites. The necessity of applying experimental methods of researching the strength characteristics of products made of composite materials has been proven, because the experimental results of the mechanical characteristics of the composite material can differ significantly from the indicators during modeling. The influence of the angle of laying the layers of unidirectional carbon fabric on the strength of the cross-reinforced composite material was evaluated. According to the obtained experimental values of the failure load, it was established that the cross-reinforced composite material is characterized by the highest strength at a laying angle of 0° in the direction of the applied load; an increase in the laying angle of reinforcing carbon fibers to 90° leads to a decrease in the failure load by 95 times.

Key words: composite material, production technology, failure load, tensile strength.

Referenses

1. Nedelcu R., Redon P. Composites materials for aviation industry / R. Nedelcu, P. Redon // International conference of scientific paper AFASES 2012, Brasov, 24-26 May 2012. – P. 11-13.
2. Bachmann J., Yi X., Gong H. et al. Outlook on ecologically improved composites for aviation interior and secondary structures / CEAS Aeronaut J. – 2018. – 9. – C. 533–543.
3. Kljuchnikov Ju. V., Serditov O. T., Dubnjuk V. L. Aviacijni materiali ta ih tehnologii: navch. posibnik / Nacional'nij tehnicnij universitet Ukraïni «Kiïvs'kij politehnicnij institut imeni Igorja Sikors'kogo», Kiïv, 2022. – 114s.
4. Fu Y., Yao X. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites / Y. Fu, X. Yao // Composites Part C: Open Access. – 2022. – Vol. 8. – P. 100276
5. Andreev A.V., Petropol'skij V.S. Optimizacija vybora materiala master-modelej dlja izdelij iz polimernih kompozicionnyh materialov (PKM) v uslovijah edinichnogo i opytного proizvodstva v izdelijah aviacionnoj tehniki / A.V. Andreev, V.S. Petropol'skij // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov: Sb. nauch. tr. Nac. ajerokosmich. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Vyp. 2(82). – Har'kov: NAKU, 2015. – S. 20-29.
6. Tarasjuk A.D., Andreev A.V., Artakov A.Ju. Vlijanie avtomatizacii tehnologicheskikh processov proizvodstva detalej iz polimernih kompozitov na kachestvennyye i jekonomicheskie charakteristiki izdelij / A.D. Tarasjuk, A.V. Andreev, A.Ju. Artakov // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov: Sb. nauch. tr. Nac. ajerokosmich. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Vyp. 3(83). – Har'kov: NAKU, 2015. – S. 7-16.

Mikosianchik Oksana Oleksandrivna - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>.

Lytvynenko Valentyn Andriyovych - Graduate of Higher Education with a Master`s Degree in Specialty 152 "Metrology and information-measuring technology", educational and professional program "Quality, standardization and certification", <https://orcid.org/0000-0003-3680-2198>.

Zhosan Oleksandr Yuriyovych – Graduate of Higher Education with a Master`s Degree in Specialty 134 «Aviation and Rocket-space Engineering», Educational and Professional Program «Aircraft Equipment», National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0003-4649-8222>.

Pedan Yevhen Valeriyovych – Graduate of Higher Education with a Master`s Degree in Specialty 152 «Metrology and Information-measuring Technology», Educational and Professional Program «Quality, Standardization and Certification», National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0002-8761-750X>.