

УДК 620.18.678.067

DOI: 10.18372/0370-2197.2(103).18672

І.В. СЕМАК, Г.М. БОРОЗЕНЕЦЬ

Національний авіаційний університет, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ АВІАЦІЙНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ

Розглянуто зміни несучої спроможності авіаційних вуглепластиків типу КМУ-3 в процесі статичного та динамічного навантажень. Встановлено задовільний кореляційний зв'язок між деформацією та питомою електропровідністю вуглепластиків в процесі статичного та циклічного навантажень. Показано, що інтенсивність накопичення питомої електропровідності зумовлена видом навантаження, рівнем циклічного напруження та конструктивно-технологічними особливостями матеріалу.

Ключові слова: вуглепластики, міцність, довговічність, електропровідність, теплова активність, мікротвердість.

Вступ. Аналіз розвитку світової цивільної авіації показує, що перспективи її розвитку і підвищення економічності в значній мірі пов'язано з впровадженням нових конструкційних матеріалів. При цьому важливе місце відводиться застосуванню нових конструкційних матеріалів, а саме полімерних конструкційних матеріалів (ПКМ). Серед ПКМ найбільший інтерес в високорозвинених державах займають волокнисті композиційні матеріали. Впровадження ПКМ дозволяє проводити оптимізацію на рівні матеріалу, тобто розробляти матеріал із спеціальними властивостями під задані умови навантаження. Серед ПКМ найбільшого застосування в авіаконструкціях мають вуглепластики із застосуванням високомодульних і високоміцних матеріалів на основі епоксидної та поліамідної матриць, армованих волокнами вуглецю. Найбільшого застосування вуглепластиків досягнуто в конструкціях вітчизняних літаків АН-124, АН-148, АН-72 та АН-74. Так, наприклад, застосування ПКМ в конструкції літака АН-124 складає близько 4500 кг, що дало змогу зменшити масу цих конструкцій на 15%. За оцінками спеціалістів вартість виробництва деяких основних вузлів конструкцій із вуглепластиків може бути нижче вартості аналогічних металічних, а економія маси цивільних літаків досягне близько 10% [1].

В процесі експлуатації елементи конструкцій із ПКМ зазнають впливу циклічних навантажень, механічних ударних дій, температури, вологи, сонячної радіації, що в комплексі спричиняє зміну їх характеристик.

Аналіз результатів експериментальних досліджень вуглепластиків типу КМУ-3Лі показав, що для всіх видів навантажень характеристики міцності ПКМ мають значно більші розсіювання в порівнянні із металічними матеріалами, які застосовуються в авіабудуванні. Найбільші розсіювання характеристик міцності та довговічності мають вуглепластики при стиску, зсуві і розтяганні відповідно [1]. Крім того ПКМ мають крихке руйнування при відносно невеликих деформаціях. Можна вважати встановленим той факт, що вплив таких зовнішніх умов, як температура і волога оточуючого середовища приводить до помітного зниження характеристик міцності ПКМ. Важливим питанням являється можливість контролю за насиченням вуглепластиків вологою в реальних умовах

експлуатації авіаконструкцій, наявність якої в лабораторних умовах може бути визначено із високою вірогідністю, тобто найбільш контрольованим чинником є вологонасичення [1; 2].

Метою роботи є дослідження зміни фізико-механічних характеристик вуглепластиків в процесі статичного та циклічного навантаження шляхом вимірювання питомої електропровідності, теплової активності та деформації.

Методика та результати досліджень. Вивчення зміни міцності та довговічності здійснювалось на зразках виготовлених із вуглепластика КМУ-3Л із широким спектром армування ($0,30 \pm 45, 90^\circ$) товщиною моношлюю 0,1...0,125 мм. При цьому контролювалась зміна питомої електропровідності, мікротвердості та теплової активності. Отримані результати показали, що статична міцність при розтягу є більшою ніж при стиску. В процесі розтягання основне навантаження сприймають вуглецеві волокна, а при стиску епоксидна матриця, в зв'язку з чим характер руйнування вуглепластиків при статичному розтяганні та стиску мають різний характер. Результати дослідження вуглепластика КМУ-3Л з кутом укладки волокон 0° та вуглецевою стрічкою ЛУ-П-01, наведені в таблиці 1. Зразки представляли собою полоси прямокутного перерізу шириною 12 мм та товщиною 1,1 мм [3; 4].

В процесі статичного розтягання при напруженнях від 3 до $5 \cdot 10^{-3}$ МПа спостерігалось потрiскування зразків, відповідно мало місце руйнування окремих вуглецевих волокон а відтак перерозподіл внутрішніх напружень. При напруженні в $8 - 9 \cdot 10^{-3}$ МПа спостерігалась поява тріщин в напрямку армувальних волокон, але при цьому зниження міцності не спостерігалось. При статичних випробуваннях вуглепластика КМУ-3Л виконувався безперервний контроль питомої електропровідності.

Таблиця 1

Статистична оцінка результатів на міцність при розтяганні та стиску зі схемою армування 0°

| Вид навантаження | Статистична оцінка результатів | | | |
|------------------|--|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| | Середнє значення вибірки, σ , МПа | Середнє квадратичне відхилення, s , | Коефіцієнт варіації, v % | Довірчі інтервали |
| Розтягання | 778,8 | 22,874 | 2,94 | $a_b = 798,7$ $a_n = 758,9$ |
| Стиск | 622 | 9,99 | 1,6 | $a_b = 630,0$ $a_n = 613,3$ |

Примітка: Вибірка відповідає випробуванню 9 зразків.

Нижче наведена залежність приросту питомої електропровідності від навантаження при статичному розтяганні та стиску. Приріст питомої електропровідності при розтяганні значно більший ніж при стиску.

Приріст питомої електропровідності можна пояснити вирівнюванням та руйнуванням окремих вуглецевих волокон, а при стиску вірогідно за рахунок втрати стійкості волокон.

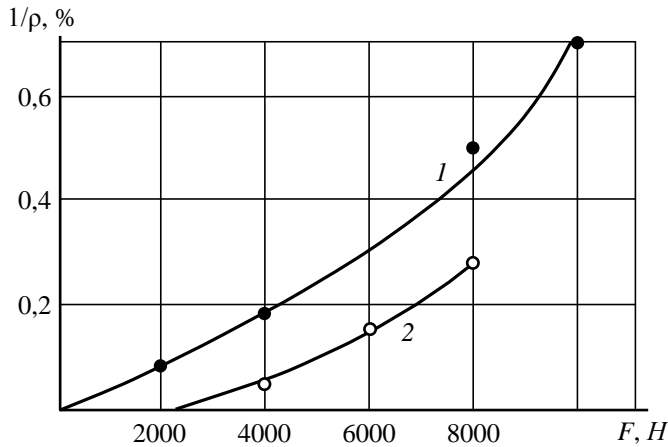


Рис. 1. Приріст питомої електропровідності вуглепластика з армування 0^0 в процесі статичного розтягання та стиску: 1 – розтягання; 2 – стиск.

Дослідження вуглепластика під кутом армування волокон 0^0 проводилося в процесі циклічного розтягання та стиску на трьох рівнях навантаження: 0,6; 0,7; 0,8 при відношенні σ_{\max}/σ_b . Аналіз отриманих результатів показав, що при навантаженні 0,6 σ_{\max}/σ_b як при розтяганні так і стиску зразки не руйнуються на протязі бази випробувань, що дорівнює 10^7 циклів.

Таблиця 2

Результати зміни характеристик міцності вуглепластика КМУ-3Л з кутом армування 0^0 в процесі циклічного розтягання та стиску

| Рівень навантаження σ_{\max}/σ_b | Вид навантаження | Статистична оцінка результатів | | | |
|--|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| | | Середнє значення вибірки, lgN | Середнє квадратичне відхилення, s | Коефіцієнт варіації, v % | Довірчі інтервали |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0,8 | Розтягання | 6,0268 | 0,1346 | 2,23 | $a_b = 6,1193$ $a_n = 5,9343$ |
| | Стиск | 5,8836 | 0,1388 | 2,36 | $a_b = 5,9789$ $a_n = 5,7882$ |
| 0,7 | Розтягання | 6,5334 | 0,3558 | 5,44 | $a_b = 6,7778$ $a_n = 6,2889$ |
| | Стиск | 6,2408 | 0,1449 | 2,32 | $a_b = 6,1413$ $a_n = 6,3403$ |
| 0,6 | Розтягання | 7,000 | - | - | - |
| | Стиск | 7,000 | - | - | - |

Примітка: вибірка складає від 7 до 10 зразків

Для вуглепластиків типу КМУ-3Л криві втоми мають дуже малий нахил. Показник рівняння втоми кривої змінюється в межах $m = 20 - 40$. На рис. 2 наведені криві втоми вуглепластика КМУ-3Л з базою випробування $N = 10^7$. Так, наприклад, зміна навантаження при циклічних випробуваннях на 5 – 7% викликає зміну довговічності на один порядок. В зв'язку з малим нахилом кривої втоми суттєво збільшується розсіювання довговічності, що приводить

до значного збільшення коефіцієнта надійності. Це підтверджує той факт, що напруження стиску більш небезпечні для вуглепластиків.

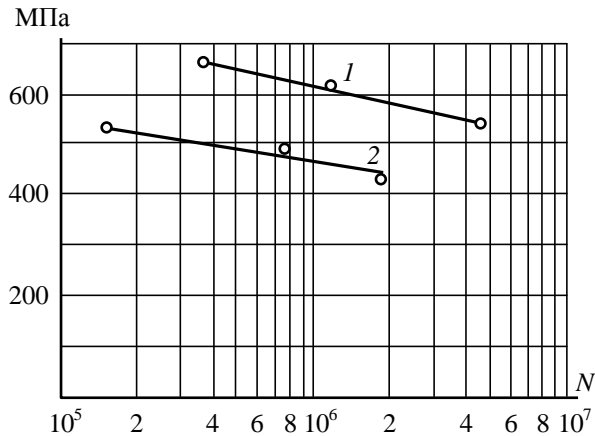


Рис. 2. Криві втоми вуглепластика КМУ-3Л з напрямом армування волокон 0°.

У вуглепластиках як і у всіх гетерогенних матеріалах в процесі експлуатації руйнування має дисперсний характер, а моделі руйнування, що включають дисперсну стадію накопичення так і перехід до розповсюдження мікротріщин в матеріалі має велике значення для розробки методів попередження руйнування. Інтенсивність накопичення пошкоджень неруйнівними методами контролю може суттєво показати поведінку композитів під навантаженням.

Оцінка взаємозв'язку довговічності зразків із напрямом армування 0° вуглепластика КМУ-3Л з основними фізико-механічними характеристиками в процесі циклічного асиметричного розтягання проводилась шляхом періодичного вимірювання питомої електропровідності, теплової активності, ємності та мікротвердості. На рис. 3 та 4 показано, що з ростом циклічного навантаження приріст питомої електропровідності зростає на всіх рівнях навантаження, досягає свого максимуму та стабілізується до руйнування зразка. На відміну від цього теплова активність та діелектричні властивості знижуються досягаючи мінімального значення перед руйнуванням. В процесі циклічного навантаження вірогідно відбувається порушення однорідності матеріалу. Ймовірно, що зниження теплової активності має місці за рахунок теплоізоляційних властивостей повітряних шарів. На основі отриманих результатів побудована діаграма втоми вуглепластиків (див. рис. 3 та 4) де умовно можна виділити три стадії руйнування вуглепластика: I-I лінія початкового накопичення пошкоджень; II-II лінія втрати несучої спроможності, яка може бути умовно прийнята в якості критерія втрати несучої спроможності матеріалу; III-III лінія руйнування вуглепластика. При цьому на стадії III-III значну роль мають руйнування, що проявляються в виді розривів суцільності і супроводжується потріскування, появою мікротріщин та розділення зразка на дві частини.

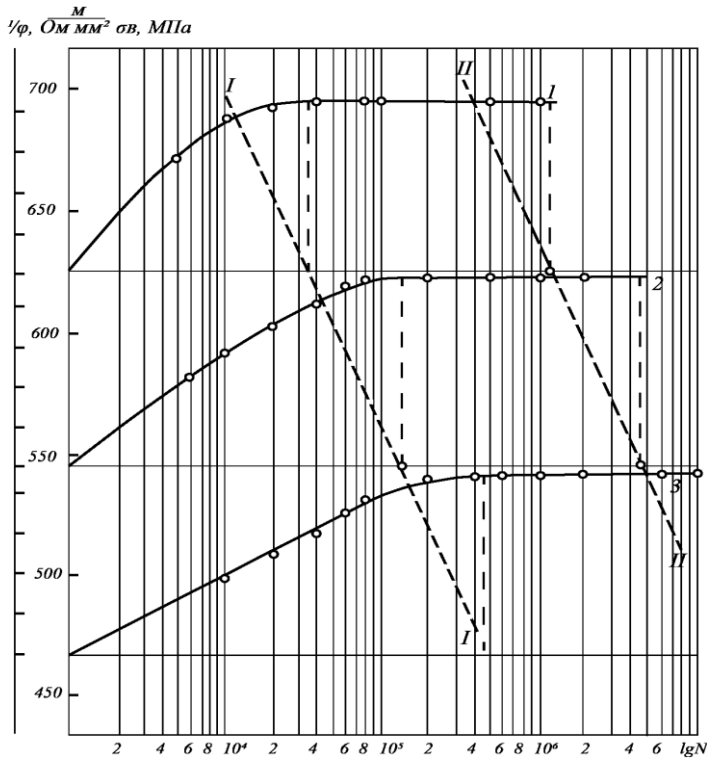


Рис. 3. Діаграма циклічного розтягання вуглепластика КМУ-3Л зі схемою армування 0^0 .

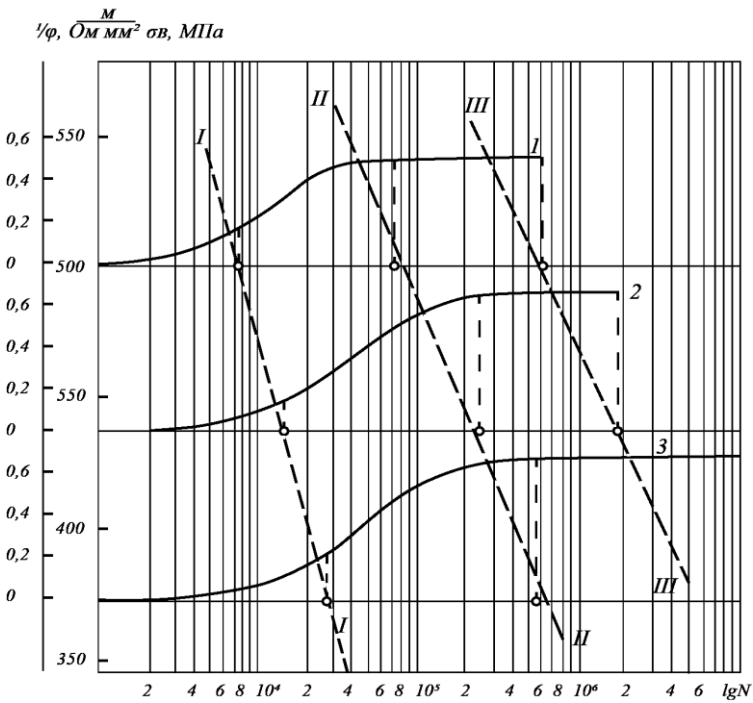


Рис. 4. Діаграма циклічного стиску вуглепластика КМУ-3Л зі схемою армування 0^0 .

На відміну від питомої електропровідності теплова активність та діелектричні властивості знижуються і досягають мінімального значення перед руйнуванням. В процесі циклічного навантаження має місце порушення однорідності матеріалу. На рисунку 5 показана зміна теплової активності, ємності та мікротвердості вуглепластика КМУ-3Л зі схемою армування 0^0 .

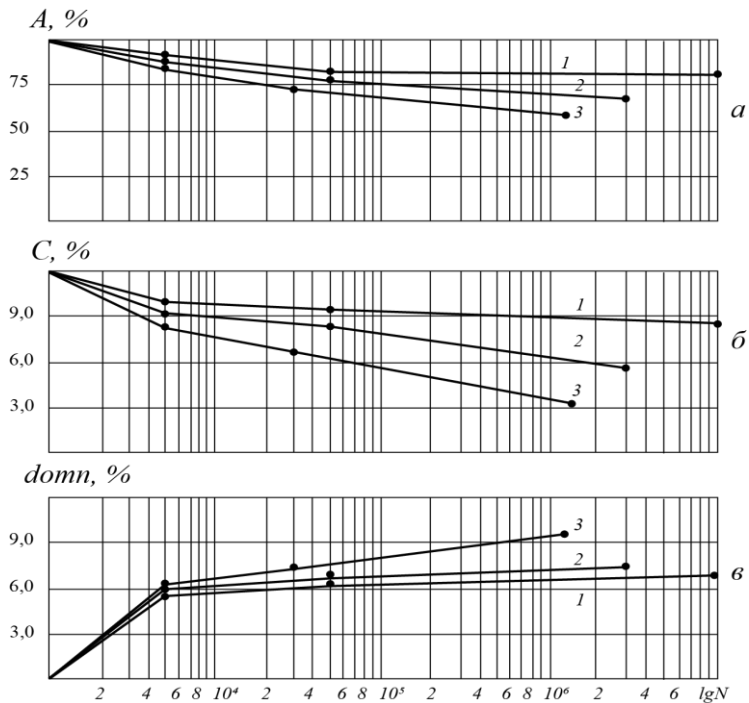


Рис. 5. Зміна теплової активності (A), ємності (C) та мікротвердості (dopn) в процесі циклічного розтягання вуглепластика КМУ-3Л зі схемою армування 0^0 .

Кінетика накопичення та розміри пошкоджень на стадії II-II (див.рис. 3, 4) залежать від структури матеріалу, умов навантаження і розмірів зразка, що приводить до різної інтенсивності росту питомої електропровідності по мірі збільшення рівня навантаження може бути пояснено наступною моделлю розповсюдження мікротріщин в системі матриця- армуюче волокно. Згідно цієї моделі (рис.б) тріщина з'являється на межі розділу матриця-волокно (точка А) і розповсюджується через границю розподілу в напрямку до волокон поки не досягне точки Б.

Якщо інтенсивність напружень в цій точці зі сторони волокна недостатня величина для того щоб викликали руйнування останнього, то тріщина оmine волокно. В іншому випадку тріщина розповсюджується в волокні і буде розвиватись одночасно в волокні та границі розділу. Очевидно при циклічному розтяганні матеріалу мають місце більш складні схеми руйнування. Ймовірно, що з ростом рівня навантаження буде переважати друга схема, що визиває зменшення інтенсивності приросту питомої електропровідності на другій стадії навантаження.

На основі результатів досліджень можна робити висновок, що систематичний контроль приросту питомої електропровідності в процесі циклічного навантаження конструкцій із вуглепластика дає можливість проведення прискорених випробувань шляхом побудови діаграми $1/\rho - N$.

Встановлення взаємозв'язку між плинністю основних стадій накопичення пошкоджень для конкретного випадку навантаження в експлуатації дасть можливість прогнозувати довговічність вуглепластиків з необхідним коефіцієнтом надійності.

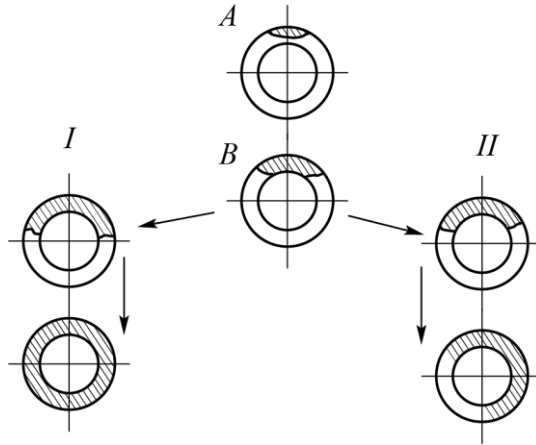


Рис. 6. Модель розповсюдження тріщин по границі розподілу матриця-волокно в залежності від напруження.

Висновки. Експериментально встановлено задовільна кореляція між деформацією і питомою електропровідністю в процесі статичного і циклічного навантаження конструкційного вуглепластика КМУ-3Л зі схемою армування 0^0 .

Показано залежності між фізико механічними характеристиками і основними етапами накопичення пошкоджень матеріалів, які можуть бути використані в якості критеріїв оцінки працездатності елементів конструкцій із вуглепластиків за критерієм міцності.

Встановлено, що протікання всіх етапів діаграми накопичення втомних пошкоджень в матеріалі КМУ-3Л, таких як інтенсивність приросту питомої електропровідності викликана видом навантаження рівнем циклічних напружень та конструктивно-технологічними особливостями метаріалу.

Список літератури

1. Борозенець Г.М., Семак І.В. Оцінка залишкової міцності конструкційних вуглепластиків в процесі їх вологонасичення, характерного для умов експлуатації // Проблеми тертя та зношування. – 2018. № 1 (78). – С. 108-112.
2. Борозенець Г.М., Семак І.В. Оцінка впливу вологи і агресивних середовищ на фізико-механічні характеристики конструкційних вуглепластиків // Проблеми тертя та зношування. – 2015. № 1 (68). – С. 85-89.
3. ISO 527-1. Загальні принципи визначення властивостей розтягування. – Введ. 1996-12-14. – СЕН: Європейський комітет стандартизації, 1994. – 12 с.
4. ISO 14126. Пластикові композити, армовані волокнами. Визначення властивостей стиску в площинному напрямку. – Введ. 1999-09-10. – СЕН: Європейський комітет стандартизації, 1999. – 18с.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2024.

I.V.SEMAK, G.M. BOROZENETS,

EVALUATION OF THE RESIDUAL STRENGTH OF STRUCTURAL CARBON PLASTICS IN THE PROCESS OF THEIR MOISTURE SATURATION, CHARACTERISTIC FOR OPERATING CONDITIONS

The nature of the moisture saturation of constructive skin carbon plastics is examined, as well as the effect of the previous static load and the process pressure of formation on the moisture content of the material. The change in the residual strength of carbon plastics in the process of their moisture saturation characteristic for the operating conditions is shown.

Key words: carbon fiber, moisture saturation, modes of formation pressure, residual strength

Reference

1. Borozenets H.M., Semak I.V. Otsinka zalyshkovoї mitsnosti konstruktsiinykh vuhleplastykiv v protsesi yikh volohonasychnnia, kharakternoho dlia umov ekspluatatsii // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2018. № 1 (78). – S. 108-112.
2. Borozenets H.M., Semak I.V. Otsinka vplyvu volohy i ahresyvnykh seredovyshch na fizyko-mekhanichni kharakterystyky konstruktsiinykh vuhleplastykiv // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2015. № 1 (68). – S. 85-89.
3. ISO 527-1. Zahalni pryntsypy vyznachennia vlastyvostei roztiahuvannia. – Vved. 1996-12-14. – CEN: Yevropeyskyi komitet standartyzatsii, 1994. – 12 s.
4. ISO 14126. Plastykovi kompozyty, armovani voloknamy. Vyznachennia vlastyvostei stysku v ploshchynnomu napriamku. – Vved. 1999-09-10. – CEN: Yevropeyskyi komitet standartyzatsii, 1999. – 18s.

Семак Інна Вікторівна – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, вул. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна, E-mail: inna.semak@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9742-3226> тел.:+38 067 357 39 93.

Борозенець Григорій Михайлович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: borozenecg@gmail.com, тел.:+38 068 198 59 05.

Semak Inna Viktorivna – seniorteacher of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: inna.semak@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9742-3226> tel.:+38 067 357 39 93.

Borozenets Hryhorii Mykhailovych – candidate of technical sciences, senior researcher, associate professor of the Department of Mechanical Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: borozenecg@gmail.com, tel.:+38 068 198 59 05.