

М.В. Карускевич¹
О.Ю. Корчук²
М.В. Лісовська³

ФОЛЬГОВИЙ СЕНСОР ВТОМИ ДЛЯ СИСТЕМ «STRUCTURAL HEALTH MONITORING»

Національний авіаційний університет
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680
E-mails: ¹mkaruskevich@hotmail.com; ²korchuk.lena@mail.ru; ³maryanalisovskaya@mail.ru

Розглянуто концепцію фольгового сенсора втомого пошкодження, про втомне пошкодження якого свідчить деформаційний рельєф поверхні. Застосовано кількісний параметр насиченості деформаційного рельєфу, який визначається комп'ютеризованим оптичним контролем. Експериментально доведено можливість моніторингу втомого пошкодження металевих конструкцій за допомогою фольгових сенсорів втоми. Описано шляхи керування чутливістю сенсорів.

Ключові слова: деформаційний рельєф; фольговий сенсор втоми; циклічне навантажування.

Постановка проблеми

Накопичення втомого пошкодження є одним з основних факторів, який обмежує строк дії металевих конструкцій, у тому числі літаків цивільної авіації. Моніторинг втоми критичних елементів конструкції дозволяє попередити раптове руйнування, врахувати індивідуальну історію навантажування під час оцінювання фактичної виробки ресурсу.

Процес втоми металів супроводжується змінами їх властивостей на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях, що дозволяє застосувати фізичні методи для кількісної оцінки накопиченого пошкодження і відповідної виробки ресурсу.

Аналіз досліджень і публікацій

Найбільш ефективними є методи акустичної емісії [1; 7], вихрового струму [6], магнітний коерцитиметричний метод [2] та інші.

Оцінку накопиченого пошкодження виконують як безпосереднім контролем стану матеріалу конструкції, так і за станом зразків-свідків. Такі сенсори втоми кріпляться до критичних елементів конструкції. Сенсори сприймають експлуатаційний спектр навантажень і сигналізують про накопичене пошкодження зміною тих чи інших параметрів свого стану.

Однак ряд достатньо чутливих методів не може бути використаний для моніторингу втомого пошкодження у зв'язку з немонотонністю змін параметрів, що реєструються [3].

Методом, який традиційно використовують інженери-практики для виявлення різних дефектів, у тому числі втомих тріщин, є оптичний контроль.

Дослідження, що були проведені у Національному авіаційному університеті, показали, що оптичний контроль дозволяє відстежувати процес розвитку втомого пошкодження на інкубаційній стадії, тобто задовго до появи тріщин втоми.

Така можливість виникає у зв'язку з тим, що на поверхні багатьох чистих металів і деяких сплавів у результаті дії циклічного навантажування формується і розвивається деформаційний рельєф.

Чисельні дослідження деформаційного рельєфу, який формується на поверхні монокристалічного і полікристалічного алюмінію, показали [9; 10], що його зміна може бути оцінена якісно і кількісно застосуванням комп'ютеризованого оптичного методу неруйнівного контролю.

Для елементів конструкції, які виготовлені з плакованих алюмінієм сплавів, це відкриває можливість безпосередньої діагностики конструкції та оцінювання її пошкоженості.

У випадках, коли на поверхні конструкційного матеріалу деформаційний рельєф не формується або масштабний рівень дефектної структури поверхні не дозволяє застосовувати оптичний метод контролю, припускається встановлення структурно-чутливих сенсорів втоми, стан поверхні яких змінюється відповідно до накопиченого пошкодження.

Таким чином, методологія оцінки накопиченого втомого пошкодження по деформаційному рельєфу поверхні, що розроблена, може бути реалізована двома способами:

– прямим контролем стану поверхні компонентів конструкцій у випадках, коли властивості конструкційного матеріалу забезпечують формування і розвиток деформаційного рельєфу поверхні;

– застосуванням структурно-чутливих сенсорів втоми.

Сенсор втоми, який виготовлений з плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ і припускає можливість адаптації його чутливості відповідно до задач моніторингу і умов навантаження, розглянуто в роботі [8].

Мета роботи – проаналізувати можливість застосування фольгових сенсорів втоми, які виготовлені з полікристалічного алюмінію.

Матеріал, розміри, засіб кріплення сенсора

У роботі [10] показано можливість виготовлення сенсорів втоми з монокристалів алюмінію, які вирощені відповідно до методу Бріджмена. Складність процесу виготовлення і, як наслідок, велика вартість таких сенсорів призвели до пошуку альтернативних варіантів.

Матеріалом, яких дозволяє виготовити структурно-чутливий сенсор втоми, може бути технічний алюміній АД-1 [4].

Товщина фольги до обробки становила 0,2 мм. Розмір сенсора після підготовки поверхні до оптичного контролю $20,0 \times 10,0 \times 0,15$ мм. Зменшення товщини з 0,2 мм у заготовці до 0,15 мм в сенсорі обумовлено його поліруванням.

Для зняття внутрішніх напружень у заготовках сенсорів їх попередньо відпалюють. Температура відпалювання на першому етапі дослідження становить 550°C , тривалість витримки при заданій температурі 2 год. Термообробка призвела до росту зерна з 0,05 до 0,5 мм.

Необхідна для оптичного аналізу деформаційного рельєфу якості поверхні сенсора досягається послідовним застосуванням попереднього механічного полірування і електролітичного полірування.

Механічне полірування виконували ручним способом із застосування алмазної пасти.

Електролітичне полірування проводили в електроліті, який містить: 50% H_3PO_4 , 39% H_2SO_4 , 3% CrO_2 , 8% H_2O . Щільність струму $15\text{--}20$ А/дм², температура розчину при поліруванні $75\text{--}85^\circ\text{C}$.

Кріплення фольгових сенсорів здійснювалось багатокомпонентним клеєм PASCOR[®] FIX на основі етилового ефіру цианакрилової кислоти. Досвід застосування клеїв на основі циакрину для тензометрування під час проведення випробувань літаків дозволяє застосовувати клей у температурному діапазоні, який відповідає умовам роботи авіаційних конструкцій.

Діагностичні параметри

У проведеному циклі досліджень фольговий сенсор кріпився на плоскому зразку сплаву Д16АТ, який випробувався при максимальному напруженні від нульового циклу навантажування $\sigma_{\text{max}} = 180,0$ МПа з частотою навантажування 11,0 Гц.

Випробування проводили на стандартній гідропульсаційній машині МУП-20. Спостереження за станом поверхні проводили за допомогою оптичного металографічного мікроскопа ММР-4 з фіксацією цифрових зображень збільшенням $350\times$.

На рис. 1 показано розвиток деформаційного рельєфу у двох обраних для контролю кристалітах (зернах).

У результаті термообробки було досягнуто такий розмір кристалітів, при якому при збільшенні $350\times$ у полі зору знаходилося тільки одне зерно.

Очевидно, що різниця форми і напрямку смуг ковзання, які спостерігалися, зумовлено особливостями кристалографічної орієнтації досліджених кристалітів.

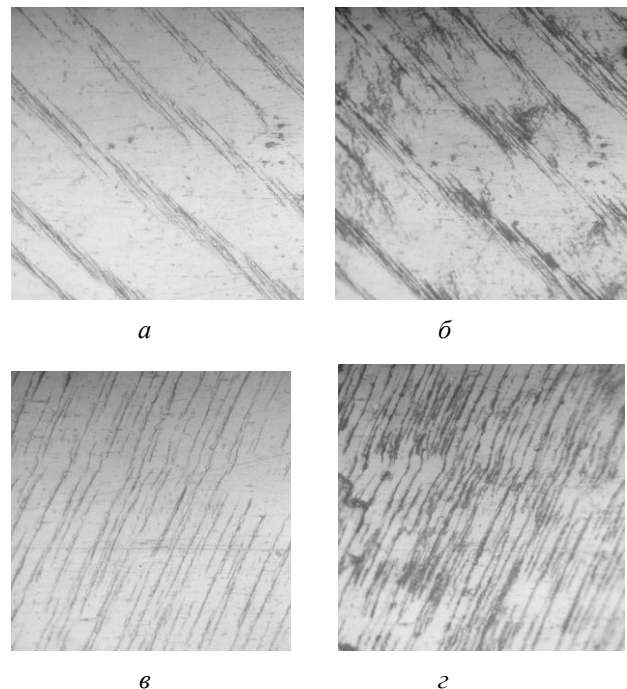


Рис. 1. Деформаційний рельєф поверхні фольгового структурно-чутливого сенсора втоми:

a, б – зерно № 1;

в, з – зерно № 2;

a, в – $N = 10\,000$ циклів навантаження;

б, з – $N = 200\,000$ циклів навантаження

Раніше при дослідженні деформаційного рельєфу поверхні монокристалів алюмінію і полікристалічного алюмінієвого плакуючого шару були запропоновані діагностичні параметри, які дозволяли виконувати кількісну оцінку накопиченого втомного пошкодження:

- щільність смуг ковзання [10];
- параметр пошкодження D , який визначається за насиченістю деформаційного рельєфу [9];
- фрактальна розмірність деформаційного рельєфу $D_{p/s}$ [9].

Порівняльний аналіз можливості й ефективності застосування зазначених параметрів дозволив зробити такі висновки:

- щільність смуг ковзання може бути ефективним діагностичним параметром монокристалів і крупних кристалітів тільки при їх певній кристаліграфічній орієнтації;
- застосування фрактальної розмірності смуг ковзання як кількісного параметра потребує використання оптичних систем більшого збільшення і роздільної здатності;
- у зв'язку з тим, що еволюція смуг ковзання включає збільшення кількості ліній і смуг та їх ширини, найбільш ефективним кількісним параметром рельєфу може бути параметр пошкодження D , який визначається як відношення площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі поверхні ділянки, що контролюється.

Результати моніторингу стану структурно-чутливих сенсорів у процесі їх циклічного навантаження

Результати моніторингу параметра пошкодження визначено по деформаційному рельєфу кристалітів № 1 і № 2. Для автоматизованого визначення параметра D використовували розроблене раніше обладнання і програмне забезпечення [9].

Як видно з рис. 2, залежність параметра пошкодження від кількості циклів навантаження є монотонною у продовж усього періоду моніторингу, що підтверджує можливість використання обраного параметра як діагностичного.

Кореляційний і регресійний аналізи показали можливість використання логарифмічної функції для описання зв'язку між параметром пошкодження D і числом циклів навантаження.

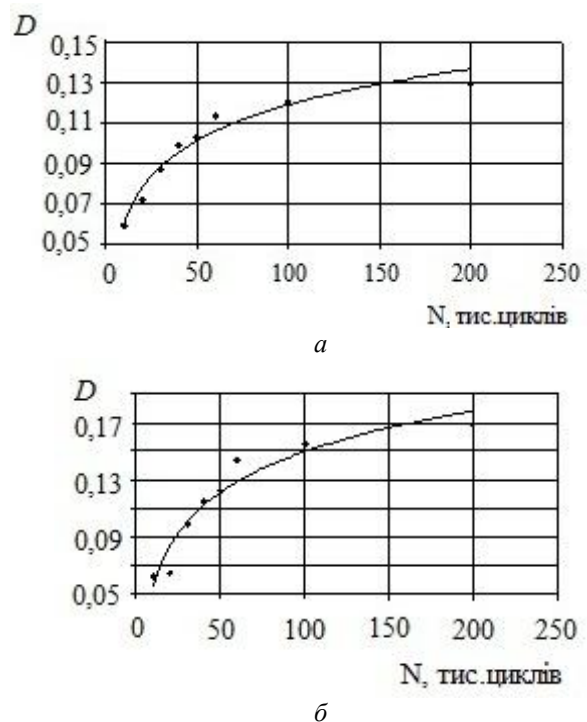


Рис. 2. Еволюція параметру пошкодження D фольгового сенсора:

a – кристаліт № 1;

b – кристаліт № 2

Вплив термічної обробки на характеристики фольгових сенсорів втоми

Відомо, що термообробка металів змінює їх фізико-механічні властивості. Термообробка фольгових сенсорів розглядається як засіб керування їх чутливістю. Можливість керування чутливістю сенсорів означає розширення діапазону режимів циклічного навантаження, для яких на поверхні сенсорів можливо отримати відповідну реакцію у вигляді деформаційного рельєфу. Це, в свою чергу, розширює перелік об'єктів, для яких фольгові сенсори можуть бути ефективним інструментом моніторингу втомного пошкодження.

Дослідження показали, що результатом термообробки є зміна розміру кристалітів. При цьому належить розглядати два варіанти росту розміру зерен:

- зростання зерен при гомогенізаційному відпалюванні;
- зростання зерен у результаті збиральної рекристалізації.

Розмір кристалітів, які формуються при збиральній рекристалізації, і відповідна можливість спостереження деформаційного рельєфу в окремих кристалітах дозволяє вважати таку структуру квазімонокристалічною.

Максимальний приріст параметра пошкодження D при циклічному навантажуванні спостерігався на поверхні фольгових сенсорів із квазімонокристалічною структурою. Таким чином, термообробка може забезпечити певне керування чутливістю сенсорів.

Перспективи використання фольгових сенсорів втоми

Статистика катастроф, які визвано втомою металів, указує на те, що моніторинг утомного пошкодження за допомогою фольгових сенсорів може знайти застосування не тільки в авіації.

Серед конструкцій, механізмів і машин, для яких перспективним може бути застосування фольгових сенсорів утоми, треба відмітити: конструкції кораблів, залізничні і автомобільні транспортні засоби, трубопроводи, мости, крани і багато іншого.

Однією з особливостей розглянутих сенсорів є можливість їх застосування для моніторингу втоми при складному напруженому стані. Це зумовлено як формою сенсорів, так і способом їх кріплення, який забезпечує сприйняття деформацій у довільному напрямку. При цьому очевидна необхідність дослідження процесу формування деформаційного рельєфу у відповідних умовах навантажування, тому що його дислокаційна природа передбачає можливість деяких особливостей, пов'язаних зі збільшенням кількості систем ковзання, що активуються, при двовісному навантажуванні.

Адаптація розробленого інструментального засобу контролю пошкодження для виконання задач різноманітних інженерних конструкцій потребує проведення додаткових досліджень. Алгоритм таких досліджень повинен включати:

- аналіз навантаженості об'єктів контролю;
- проведення лабораторних випробувань зразків конструктивних елементів із моніторингом параметрів деформаційного рельєфу сенсорів втоми, які на них установлені;
- кореляційний і регресійний аналіз результатів випробувань з метою отримання математичних моделей процесу, які пов'язують стан сенсора з кількістю циклів навантажування до досягнення критичного стану елементів досліджуванних конструкцій.

Проте, враховуючи результати досліджень, які були отримані в ході розробки методології моніторингу втоми авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу поверхні [5], такий підхід можливо вважати виправданим і перспективним.

Висновки

В основі концепції фольгових сенсорів утомного пошкодження лежить доведена можливість кількісної оцінки втоми за деформаційним рельєфом поверхні, який формується в результаті циклічного навантажування. Фольгові сенсори втоми можуть застосовуватися для контролю виробки ресурсу різноманітних інженерних конструкцій, які зазнають змінних навантажень. Для практичної реалізації методу розроблено інструментальне і програмне забезпечення, встановлені базові закономірності еволюції параметрів рельєфу в процесі циклічного навантажування.

Література

1. *Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из авиаматериалов и элементов авиационных конструкций* / Л.Н. Степанова, Н.М. Пестов, В.Н. Чаплыгин и др. // ФГУП. Сибирский НИИ авиации им. Чаплыгина. Контроль. Диагностика. – 2002. – № 2. – С. 19–24.
2. *Безлюдько Г.Я.* Эксплуатационный контроль втомного стану і ресурсу металокопструкції неруйнівним магнітним (коерцітиметричним) методом / Г.Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 2. – С. 20–26.
3. *Вимоги до діагностичних параметрів при неруйнівному контролі втоми елементів авіаційних конструкцій* / М.В. Карускевич, О.Ю. Корчук, Т.П. Маслак та ін. // Вісник НАУ. – 2011. – № 2. – С. 110–114.
4. *ГОСТ 618–73.* Фольга алюминиєвая для технических целей. Технические условия. – Москва.
5. *Карускевич М.В.* Методологія визначення відпрацювання ресурсу літальних апаратів за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів та зразків-свідків: дисертація на здобуття вченого ступеня д-ра техн. наук: 05.07.02 / Карускевич Михайло Віталійович. – К., 2012. – 305 с.
6. *Кириленко А.Б.* Дискретные процессы усталостного разрушения алюминиевого материала Д16АТВ: дисертація на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / А.Б. Кириленко. – Киев, 1985. – 159 с.
7. *Скальський В.Р.* Оцінка накопичення об'ємної пошкоджуваності твердих тіл за сигналами акустичної емісії / В.Р. Скальський // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 4. – С. 29–35.

8. Структурно-чувствительный сенсор усталости авиационных конструкций / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, Т.П. Маслак, Д.Н. Костенюк // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Спецвипуск. Ч. 1. – С. 178–182.

9. Karuskevich, M.; Karuskevich, O.; Maslak, T.; Schepak, S. 2012. *Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage*. International Journal of Fatigue. N 39: 116–121.

10. Karuskevich, M.V.; Radchenko, A.I.; Zashimchuk, E.E. 1993. *Single-crystal as an indicator of fatigue damage*. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 15. N 12: 1281–1283.

References

1. Stepanova, L.N.; Pestov, N.M.; Chaplihn, V.N. et al. 2002. *Acoustic-emission control of the destruction process of the aviation materials samples and components of aircraft structures*. Siberian research institute of aviation. Control. Diagnostic. N 2: 19–24 (in Russian).

2. Bezludko, G.Ya. 2003. *Operational control of fatigue and service life of metal constructions by nondestructive magnetic method*. Technical diagnostics and non-destructive testing. N 2: 20–26 (in Ukrainian).

3. Karuskevych, M.V.; Korchuk, O.Yu.; Maslak, T.P. et al. 2011. *Requirements for diagnostic parameters at fatigue nondestructive testing of aircraft structures elements*. Proceedings of National Aviation University. N 2: 110–114 (in Ukrainian).

4. *State Standard 618–73 Aluminum foil for technical goals*. Specifications. Moscow (in Russian).

5. Karuskevich, M.V. 2012. *Methodology of the assessment of service life exhausting by the parameters of the deformation relief of structural components and fatigue sensors*. Thesis for the Doctor of science: 05.07.02. Kyiv. 305 p. (in Ukrainian).

6. Kirilenko, A.B. 1985. *Discrete processes of fatigue failure of the aluminium alloy D16ATV*. Thesis for PhD degree: 01.02.06 “Dynamics, strength of machines, instrument and apparatus”. Kyiv. 159 p. (in Russian).

7. Skalsky, V.R. 2003. *Assessment of the three dementional damage accumulation by acoustic emission signals*. Technical diagnostics and non-destructive testing. N 4: 29–35 (in Ukrainian).

8. Ignatovich, S.R.; Karuskevich, M.V.; Maslak, T.P.; Kostenyuk, D.M. 2011. *Structurally-sensitive sensor of aircraft fatigue*. Proceedings of Ternopil National Technical University. Special Issue. Part 1: 178–182 (in Russian).

9. Karuskevich, M.; Karuskevich, O.; Maslak, T.; Schepak, S. 2012. *Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage*. International Journal of Fatigue. N 39: 116–121.

10. Karuskevich, M.V.; Radchenko, A.I.; Zashimchuk, E.E. 1993. *Single-crystal as an indicator of fatigue damage*. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 15. N 12: 1281–1283.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2013.

Карускевич Михайло Віталійович. Доктор технічних наук. Старший науковий співробітник. Професор. Кафедра конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Освіта: Київський інститут інженерів цивільної авіації, Київ, Україна (1980). Напрямок наукової діяльності: втомі авіаційних конструкцій. Кількість публікацій: 65. E-mail: mkaruskevich@hotmail.com

Корчук Олена Юрївна. Кандидат технічних наук. Старший науковий співробітник. Доцент. Кафедра філологічних та природничих дисциплін, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Освіта: Київський політехнічний інститут, Київ, Україна (1992). Напрямок наукової діяльності: експериментальне дослідження втомі авіаційних конструкцій. Кількість публікацій: 33. E-mail: korchuk.lena@mail.ru

Лісовська Марьяна Володимирівна. Студентка. Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Кількість публікацій: 3. E-mail: maryanalisovskaya@mail.ru

M. Karuskevich¹, O. Korchuk², M. Lisovska³. Foil fatigue sensor for «Structural Health Monitoring» systems

National Aviation University, Kosmonavta Komarova avenue, 1, Kyiv, Ukraine, 03680

E-mails: ¹mkaruskevich@hotmail.com; ²korchuk.lena@mail.ru; ³maryanalisovskaya@mail.ru

The concept of foil fatigue sensor is presented. The deformation relief of the sensor surface is considered as an indicator of the fatigue damage. The quantitative parameter of the deformation relief intensity determined by the computer aided method is applied. The possibility to monitor fatigue damage of metal structures by the application of foil fatigue sensor is proved. The method to control sensitivity of the sensors is shown.

Keywords: cyclical loading; deformation relief; foil fatigue sensor.

Karuskevich Mikhail. Doctor of Engineering. Senior Researcher. Professor.

Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, Kyiv, Ukraine (1980).

Research area: aircraft fatigue.

Publications: 65.

E-mail: mkaruskevich@hotmail.com

Korchuk Olena. Candidate of Engineering. Senior Researcher. Associate Professor.

Department of the Philological and Natural Sciences, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnical Institute, Kyiv, Ukraine (1992).

Research area: experimental research of aircraft fatigue.

Publications: 33.

E-mail: korchuk.lena@mail.ru

Lisovska Mariana. Student.

National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Publications: 3.

E-mail: maryanalisovskaya@mail.ru

М.В. Карускевич¹, Е.Ю. Корчук², М.В. Лисовская³. Фольговый сенсор усталости для систем «Structural Health Monitoring»

Национальный авиационный университет, просп. Космонавта Комарова, 1, Киев, Украина, 03680

E-mails: ¹mkaruskevich@hotmail.com; ²korchuk.lena@mail.ru; ³maryanalisovskaya@mail.ru

Рассмотрена концепция фольгового сенсора усталостного повреждения, про усталость которого свидетельствует деформационный рельеф поверхности. Использован количественный параметр насыщенности деформационного рельефа, который определяется компьютеризированным оптическим контролем. Экспериментально доказана возможность мониторинга усталостного повреждения металлических конструкций с помощью фольговых сенсоров усталости. Описаны пути управления чувствительностью сенсоров.

Ключевые слова: деформационный рельеф; фольговый сенсор усталости; циклическое нагружение.

Карускевич Михаил Витальевич. Доктор технических наук. Старший научный сотрудник. Профессор.

Кафедра конструкции летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Киевский институт инженеров гражданской авиации, Киев, Украина (1980).

Направление научной деятельности: усталость авиационных конструкций.

Количество публикаций: 65.

E-mail: mkaruskevich@hotmail.com.

Корчук Елена Юрьевна. Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Доцент.

Кафедра филологических и естественных дисциплин, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Киевский политехнический институт, Киев, Украина (1992).

Направление научной деятельности: экспериментальное исследование усталости авиационных конструкций.

Количество публикаций: 33.

E-mail: korchuk.lena@mail.ru.

Лисовская Марьяна Владимировна. Студентка.

Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Количество публикаций: 3.

E-mail: maryanalisovskaya@mail.ru