

УДК 620.197.6(045)

DOI: 10.18372/0370-2197.2(107).20133

М.В. КАРУСКЕВИЧ, О.Ю. КОРЧУК, О.М. КАРУСКЕВИЧ, В.І. КОРЧУК

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАДІЙ ЗАРОДЖЕННЯ І РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИН В АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ В УМОВАХ ДІЇ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

В статті розглянуто основи методик дослідження інкубаційної стадії втомних тріщин і стадії руйнування алюмінієвих сплавів в умовах їх контакту з поверхнево-активними речовинами, зокрема плівкоутворюючими антикорозійними сполуками. Проблема зумовлена зростаючою кількістю речовин, що взаємодіють з елементами літальних апаратів. Підкреслено актуальність вивчення поверхнево-активних речовин у зв'язку з їх потенційним негативним впливом на довговічність конструкцій при циклічному навантаженні. Розроблено методики дослідження інкубаційної стадії втомних тріщин шляхом аналізу деформаційного рельєфу поверхні з використанням комп'ютерної обробки зображень. Для вивчення стадії розповсюдження тріщин застосовано підходи механіки руйнування, зокрема визначення швидкості росту тріщин за рівнянням Періса. Встановлено доцільність роздільного вивчення обох стадій втоми для оцінки впливу поверхнево-активних сполук. Методики можуть бути використані при виборі поверхнево-активних речовин, зокрема антикорозійних сполук, мастил, олів, перетворювачів корозії, тощо. Метою роботи є обґрунтування критеріїв впливу поверхнево-активних речовин на обидві стадії втоми: інкубаційну і розповсюдження тріщин.

Ключові слова: *втомне пошкодження, зародження втомних тріщин, розповсюдження втомних тріщин, поверхнево-активні речовини, плівкоутворюючі антикорозійні сполуки, деформаційний рельєф*

Вступ. Широке застосування поверхнево-активних речовин (ПАР) в різних сферах технічної активності викликає закономірне питання: чи не є можливим їх негативний вплив на несучу здатність металевих конструкцій, особливо при циклічному навантаженні, при якому, внаслідок тривалості процесу навіть незначні зовнішні фактори можуть сприяти додатковому накопиченню пошкоджень. Враховуючи специфічні вимоги до надійності авіаційних конструкцій, для авіаційної науки це питання є актуальним, має практичне і наукове значення.

Значна кількість наукових досліджень присвячена ефекту Ребіндера, який полягає в адсорбційному зниженні міцності твердих тіл [1]. В роботах [2-4] виявлено зниження довговічності авіаційних заклепкових з'єднань при їх обробці плівкоутворюючими антикорозійними сполуками (ПАС), які також відносяться до ПАР, але серед можливих механізмів зазначеного ефекту розглядається лише одна складова – перерозподіл напружень між елементами з'єднань внаслідок відповідної зміни сил тертя.

Стосовно впливу ПАР на стадію зародження втомної тріщини і на стадію розповсюдження тріщин, накопичених на сьогодні експериментальних даних недостатньо для розробки практичних рекомендацій і узагальнюючих моделей. В статті розглянуто методики експериментальних досліджень, які дозволяють виявити ефекти ПАР, зокрема ПАС, на обидві стадії втоми: інкубаційну і розповсюдження тріщин.

Методика дослідження інкубаційної стадії втоми. Серед значної кількості поверхнево активних речовин найменш дослідженими і в той же час надзвичайно важливими для авіаційної техніки є плівкоутворюючі антикорозійні сполуки (ПАС). Підставами для віднесення цих матеріалів до поверхнево активних речовин є їх склад, зокрема наявність інгібіторів корозії.

ПАР, які знаходяться у складі ПАС можуть адсорбуватися на поверхні металів, утворювати захисний шар, запобігати корозії шляхом зниження електрохімічної активності металевої поверхні.

В той же час, враховуючи, що ПАР містяться в антикорозійних сполуках, необхідно враховувати їх можливий вплив на фізико-хімічні процеси в металах при деформуванні в їх середовищі для уникнення негативних побічних ефектів.

Фізико-хімічна механіка матеріалів (ФХММ) вивчає процеси деформації та руйнування матеріалів під впливом навантажень і фізико-хімічних факторів середовища. Дослідження, що стосуються цієї теми, проводив Г.В. Карпенко [1]. У його роботах порівнювався вплив зниження витривалості сталей за одночасної дії середовища з поверхнево-активними речовинами (вазелинове мастило з олеїновими домішками) і циклічного навантаження з витривалістю у нейтральному середовищі (сухе повітря, чисте вазелинове мастило). Результати показали зниження межі витривалості на 15–20% при навантаженні в олеїновому середовищі. Це явище називається ефектом адсорбційної втоми.

На сьогоднішній день ПАС не досліджувалися в рамках фізико-хімічної механіки матеріалів (ФХММ) або інших суміжних наукових напрямів, тому питання можливих побічних ефектів застосування КПК залишається відкритим і потребує всебічного вивчення.

З огляду на факт активного розвитку втомних процесів у поверхневому шарі деформованого металу та адсорбційного впливу поверхнево активних речовин, найбільш інформативними є методи, що відображають дислокаційні особливості накопичених пошкоджень на поверхні металу.

У результаті циклічного навантаження на поверхні багатьох металів з'являється та розвивається деформаційний рельєф. Складовими рельєфу поверхні є екструзії, інтрузії та стабільні смуги ковзання (рис.1).

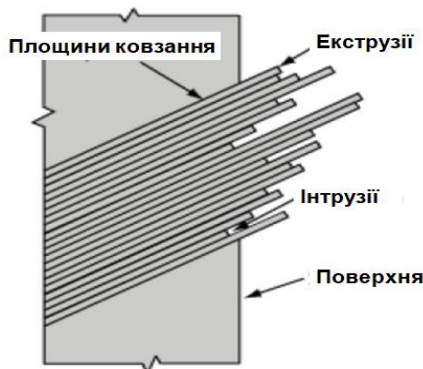


Рис. 1 - Схематичне зображення екструзій та інтрузій

Встановлено, що стійкі смуги ковзання на поверхні відповідають дислокаційній структурі у внутрішньому об'єму металу, особливістю якою є поперемінні зони високої та низької щільності [5].

Пропорційність щільності стійких смуг ковзання амплітуді пластичної деформації була визначена аналітично і доведена експериментально [6].

В статтях [7-9] наведено результати дослідження деформаційного рельєфу поверхні, які були проведені в Національному авіаційному університеті (тепер Державний університет «Київський авіаційний інститут»).

На першому етапі дослідження деформаційного рельєфу зусилля були сфокусовані на монокристалах алюмінію [10].

В подальшому було розроблено метод визначення накопиченого втомного пошкодження плакованих алюмінієвих сплавів шляхом безпосереднього комп'ютеризованого оптичного методу.

Еволюція насиченості деформаційного рельєфу в процесі циклічного навантажування ілюструється фотографіями поверхні, представленими на рис. 2.

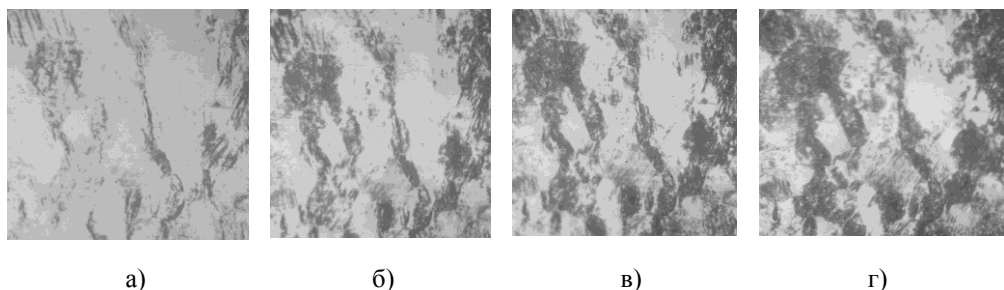


Рис. 2 - Еволюція деформаційного рельєфу в процесі циклічного навантажування, $R=0$, $\sigma_{\max}=147,0$ МПа: а) $N= 30000$ (1,9% довговічності); б) $N= 100000$ (6,3% довговічності); в) $N= 200000$ (12,6% довговічності); г) $N= 400000$ (25,2% довговічності). 250^х

Для кількісної оцінки темних ділянок було розроблено спеціалізовану програму на мові Python, яка базується на використанні бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV. Вибір бібліотеки OpenCV був обумовлений її широкими можливостями для обробки зображень, наявністю оптимізованих функцій для різних методів сегментації, високою продуктивністю та відкритим кодом, що робить її придатною для використання в наукових дослідженнях.

Розроблена програма здійснює аналіз зображень поверхні металевих зразків, отриманих за допомогою оптичної системи. На початковому етапі вихідні кольорові зображення перетворюються у відтінки сірого, що дозволяє спростити подальший аналіз за рахунок зменшення кількості каналів інформації. Для поліпшення контрастності та компенсації нерівномірності освітлення застосовується алгоритм адаптивної еквалізації гістограми (CLAHE), який забезпечує більш рівномірний розподіл яскравості і значно підвищує точність подальшої сегментації.

Для визначення темних ділянок використовується метод адаптивної порогової сегментації (adaptive thresholding) з використанням середнього значення яскравості (adaptive mean thresholding). Даний підхід передбачає локальний розрахунок порогового значення для кожного окремого пікселя на основі інтенсивності навколишніх пікселів. Основними параметрами, що використовуються для цього методу, є розмір блоку (block_size), що визначає область для обчислення локального порогу, та коригувальна константа (C), яка дозволяє регулювати чутливість сегментації.

З метою вибору оптимального значення параметра C програма автоматично створює декілька бінаризованих зображень з різними значеннями C , після чого дослідник може обрати те, яке найбільш точно відповідає реальному стану досліджуваної поверхні. У програмі передбачений автоматичний підрахунок відсотка темних ділянок для кожного бінаризованого зображення, що забезпечує кількісну оцінку дефектів та пошкоджень, спричинених втомою матеріалу. Отримані результати зберігаються у вигляді окремих файлів зображень, що дозволяє проводити подальший аналіз і візуальне порівняння отриманих даних. Цифрові фотографії оброблюються для визначення параметру пошкодження D , який дорівнює відношенню площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі поверхні, що контролюється в зоні локалізації напружень. Площадка розміром 0.2 мм x 0.2 мм розглядається як репрезентативна зона локалізації пошкоджень поблизу концентратора напружень. Типові залежності параметру пошкодження D від кількості циклів навантажування показані на рис. 3.

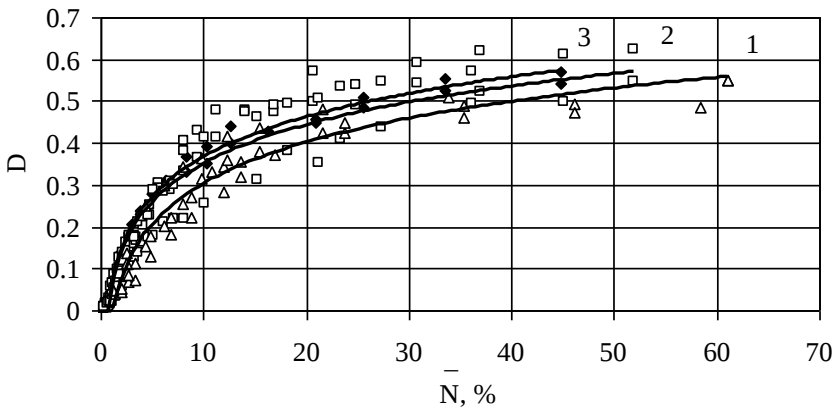


Рис. 3 - Еволюція параметру пошкодження в процесі відпрацювання ресурсу (% кількості циклів до руйнування) 1) $\sigma_{max} = 234,5$ МПа; 2) $\sigma_{max} = 173,2$ МПа; 3) $\sigma_{max} = 147,0$ МПа. $R = 0$

Припускаючи, що ПАС належать до ПАР очікується, що антикорозійні сполуки впливають на еволюцію деформаційного рельєфу поверхні. Слід відмітити, що незважаючи на великий обсяг досліджень деформаційного рельєфу поверхні в процесі циклічного навантажування, цей феномен ніколи раніше не використовувався для оцінки впливу ПАР на втому металів.

Методика дослідження впливу поверхнево активних-речовин на стадію розповсюдження втомних тріщин. Для дослідження впливу поверхнево-активних речовин на кінетику втомних тріщин може бути рекомендована методика, яка розроблена і використовується в АТ АНТОНОВ [11]. Для прискорення циклічного напруження, необхідного для формування тріщини утворюється початковий концентратор, показаний на рис.4.

Методика втомних випробувань відображає загально прийняті в механіці руйнування особливості. Концентратори напружень у вигляді надрізів утворюються електроіскровим або механічним способом, вершини надрізів загострюються лезом [12]. Полірування поверхні в області формування втомної тріщини дозволяє спостерігати і вимірювати довжину втомної тріщини з

більшою точністю. Крім того, полірування дозволяє контролювати і розвиток деформаційного рельєфу, як на стадії формування тріщини втоми, так і при її розповсюдженні.

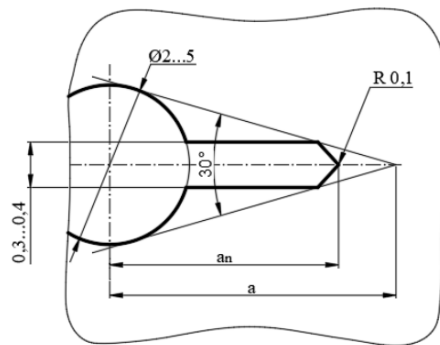


Рис. 4 - Форма концентратора напружень зразку для дослідження швидкості росту втомних тріщин

По результатах експерименту будуються графіки залежностей: а) довжини тріщини (a , мм) від кількості циклів навантажування (N , циклів); б) швидкості росту тріщини (da/dN) від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I (кгс/мм^{3/2}). Розрахунок проводиться за формулою Періса [13].

$$da/dN = C(\Delta K)^m,$$

де a – довжина тріщини;

N – кількість циклів навантаження;

ΔK – амплітуда змінного коефіцієнта інтенсивності напружень;

C і m – коефіцієнти рівняння Періса, значення яких вказують на вплив середовища, тобто поверхнево активної речовини.

У випадку аналізу впливу ПАР на розповсюдження тріщин доцільно розглядати ефект адсорбції ПАР на поверхні металу в вершині тріщини, що призводить до зменшення поверхневої енергії і полегшує руйнування (ефект Ребіндера). В той же час, можливі і інші ефекти, які потребують комплексу досліджень, в першу чергу фрактографічних. Так, наприклад, відомо про так званий ефект клину в кінчику тріщини, який не можна виключати при визначенні домінуючого фактору впливу ПАР на швидкість розповсюдження тріщин [14].

При практичному застосуванні отриманих результатів слід розглядати також вплив частоти навантажування, який визначає різницю тривалості дії ПАР в експерименті і в умовах експлуатації літального апарату.

Нанесення ПАС доцільно виконувати після формування втомної тріщини – таким чином забезпечується максимальний ефект застосування сполук.

Висновки. Існують вагомі підстави для контролю впливу поверхнево активних речовин, які використовуються в авіації, на інкубаційну стадію втоми і на стадію розповсюдження втомних тріщин основних конструктивних елементах, тобто тих, цілісність яких є критичною з точки зору забезпечення міцності і довговічності повітряних суден. Аналіз втомного пошкодження на інкубаційній стадії доцільно виконувати за допомогою методики визначення пошкодження за параметрами деформаційного рельєфу поверхні. Визначення впливу поверхнево активних речовин доцільно виконувати з використанням методик лінійної механіки руйнування.

Список літератури

1. Карпенко Г. В. Вплив активних рідких середовищ на витривалість сталі. Київ : Видавництво АН УРСР, 1955. 208 с.
2. Gavrylov I., Karuskevich M., Ignatovich S., Yutskevych S., Maslak T. Influence of corrosion preventive compounds on the friction force in aircraft lap joints. *Fatigue and Fract Eng Materials Struct.* 2022. 45. P. 938–941.
3. Karuskevich M., Ignatovich S., Gavrylov Ie., Krasnopol'skii V., Dzhavadova I. Actuality and Risks of the Corrosion Preventive Compounds Application in Aviation. *Procedia Structural Integrity.* 2024. № 59. P. 175–181.
4. Гаврилов Є. П., Власенко Ю. В., Юцкевич С. С., Якобчук О. Є., Карускевич О. М. Експериментальне і скінченно-елементне дослідження тертя в авіаційних заклепкових з'єднаннях. *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* 2024. № 4(196). С. 34–42.
5. Woods P.J. Low-amplitude fatigue of copper and copper – 5 at % Al single crystals. *Phil. Mag.* 1973. V. 28. P. 155–191.
6. Grego V., Kratochvil J., Saxlová M. Width and density of persistent slip bands as a consequence of deformation mesostructured. *Physics, Experiments, Modelling and Applications, J.Phys : 2nd European Mechanics of Materials Conference on Mechanics of Materials with Intrinsic Length Scale, IV France 08, 1998.* P. 8.181–8.188.
7. Karuskevich M, Karuskevich O, Maslak T, Schepak S. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage. *International Journal of Fatigue.* 2012. Vol. 39. P. 116–121.
8. Karuskevich M.V., Maslak T.P. Accelerated method for the alclad alloy fatigue curve construction by the surface relief pattern. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures.* 2021. Vol. 44(10). P. 2913–2916.
9. Pejkowski Ł, Karuskevich M, Maslak T. Extrusion/intrusion structure as a fatigue indicator for uniaxial and multiaxial loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 2019. Vol. 42, Issue 10. P. 2315–2324.
10. Zasimchuk E.E, Radchenko A.I, Karuskevich M.V. Single-crystals as an indicator of fatigue damage. *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 1992. Vol. 12. P. 1281–1283.
11. Гаврилов Є. П., Ігнатович С. Р., Карускевич М. В., Маслак Т. П., Карускевич О. М. Комплексний підхід до вибору плівкоутворюючих антикорозійних сполук для захисту авіаційних конструкцій від корозії. *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* 2024. № 4, спецвипуск 2 (198). С. 31–37.
12. Конспект лекцій з дисципліни «Механіка руйнування» для руйнування денної форми навчання за напрямом 6.060101 «Будівництво» та 192 «Будівництво та цивільна інженерія» / Укладачі: П. В. Ясній, В. П. Ясній. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. 116 с.
13. Ясній П.В., Ясній В.П. Механіка руйнування : конспект лекцій. Тернопіль : Тернопільський націон. техн. у-тет імені Івана Пулюя, 2018. 116 с.
14. O'Neill P.H. A short study of the effect of a penetrant oil on the fatigue life of a riveted joint. *Aeronautical research council.* 1975. Current paper No.1305. URL: <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826.2/1318/arc-cp-1305.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата звернення: 09.05.2025).

Стаття надійшла до редакції 13.05.2025

M.V. KARUSKEVYCH, O. YU. KORCHUK, O.M. KARUSKEVYCH, V.I. KORCHUK

METHODS FOR STUDYING FATIGUE CRACK NUCLEATION AND PROPAGATION IN ALUMINUM ALLOYS EXPOSED TO SURFACTANTS

The issue described in the paper arises from the growing number of substances interacting with aircraft metallic components. This paper examines newly developed and recommended methods for studying the nucleation and propagation of fatigue cracks in aluminum alloys exposed to surfactants, with a particular focus on corrosion preventive compounds. While many of these compounds exhibit excellent functional properties, their potential side effects have been studied insufficiently and remain unclear, thus targeted experimental investigations are required. Given that the fatigue life of metal components comprises two distinct stages, fatigue crack nucleation and crack propagation, separate analyses are essential to assess the applicability of specific surfactants.

The first stage of the fatigue for many metals is associated with formation of so called surface deformation relief, which constituents are extrusions, intrusions, persistent slip bands. The dislocation nature of these substructures presumes the possibility of their sensitivity to the surfactants. Among the metal exhibiting surface deformation relief there are alclad alloys having layer of the pure aluminium, particular alclad alloys 2024T3, 7075T6 widely used in the aircraft manufacturing, for example for the skin of the fuselage. The intensity of the surface relief evolves with the number of loading cycles, thus providing the information regarding the consumption of the duration of the nucleation stage.

To study the first stage of the fatigue, i.e. fatigue crack nucleation, computer-aided optical analysis of surface deformation relief is proposed as the primary method. The method was tested and proved by numerous tests of aluminium alloys specimens and aircraft structural components. For examining fatigue crack behavior in contact with surfactants, linear fracture mechanics techniques are considered reliable and indispensable. Details of both procedures are described.

Key words: fatigue damage, fatigue crack nucleation, fatigue crack propagation, surfactants, corrosion preventive compounds, surface deformation relief

References

1. Karpenko H. V. Vliyanye aktyvnykh zhydkykh sred na vynoslyvost staly. Kyiv : Vydavnytstvo AN URSS, 1955. 208 s.
2. Gavrylov I., Karuskevich M., Ignatovich S., Yutskevych S., Maslak T. Influence of corrosion preventive compounds on the friction force in aircraft lap joints. *Fatigue and Fract Eng Materials Struct.* 2022. 45. P. 938–941.
3. Karuskevich M., Ignatovich S., Gavrylov Ie., Krasnopol'skii V., Dzhavadova I. Actuality and Risks of the Corrosion Preventive Compounds Application in Aviation. *Procedia Structural Integrity.* 2024. № 59. P. 175–181.
4. Havrylov Ye. P., Vlasenko Yu. V., Yutskevych S. S., Yakobchuk O. Ye., Karuskevych O. M. Eksperymentalne i skinchenno-elementne doslidzhennia tertia v aviatsiinykh zaklepkovykh ziednanniakh. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia.* 2024. № 4(196). S. 34–42.
5. Woods P.J. Low-amplitude fatigue of copper and copper – 5 at % Al single crystals. *Phil. Mag.* 1973. V. 28. P. 155–191.
6. Grego V., Kratochvíl J., Saxlová M. Width and density of persistent slip bands as a consequence of deformation mesostructured. *Physics, Experiments, Modelling and Applications, J.Phys : 2nd European Mechanics of Materials Conference on Mechanics of Materials with Intrinsic Length Scale*, IV France 08, 1998. P. 8.181–8.188.
7. Karuskevich M., Karuskevich O., Maslak T., Schepak S. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage. *International Journal of Fatigue.* 2012. Vol. 39. P. 116–121.

8. Karuskevich M.V., Maslak T.P. Accelerated method for the alclad alloy fatigue curve construction by the surface relief pattern. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021. Vol. 44(10). P. 2913–2916.

9. Pejkowski L., Karuskevich M., Maslak T. Extrusion/intrusion structure as a fatigue indicator for uniaxial and multiaxial loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2019. Vol. 42, Issue 10. P. 2315–2324.

10. Zasimchuk E.E., Radchenko A.I., Karuskevich M.V. Single-crystals as an indicator of fatigue damage. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 1992. Vol. 12. P. 1281–1283.

11. Havrylov Ye. P., Ihnatovych S. R., Karuskevych M. V., Maslak T. P., Karuskevych O. M. Kompleksnyi pidkhid do vyboru plivkoutvoriuiuchykh antykoroziiynykh spoluk dlia zakhystu aviatsiynykh konstruksii vid korozii. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia*. 2024. № 4, spetsvypusk 2 (198). S. 31–37.

12. Konspekt leksii z dystsypliny «Mekhanika ruinuвання» dlia ruinuвання dennoi formy navchannia za napriamom 6.060101 «Budivnytstvo» ta 192 «Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia» / Ukladachi: P. V. Yasnii, V. P. Yasnii. – Ternopil : Terno-pil'skyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia, 2018. 116 s.

13. Iasnii P.V., Yasnii V.P. Mekhanika ruinuвання : konspekt leksii. Ternopil : Ternopil'skyi natsion. tekhn. u-tet imeni Ivana Puliuia, 2018. 116 s.

14. O'Neill P.H. A short study of the effect of a penetrant oil on the fatigue life of a riveted joint. *Aeronautical research council*. 1975. Current paper No.1305. URL: <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826.2/1318/arc-cp-1305.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (data zvernennia: 09.05.2025).

Karuskevich Mykhailo Vitaliiiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Aircraft Design at the State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, +38(050)2284505; <https://orcid.org/0000-0003-1698-0296>.

Korchuk Olena Yuriyivna – PhD in Technical Sciences, Senior Research Fellow, Head of the Department of Philological and Natural Sciences at the State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, , +38(098)0041943; email: olena.korchuk@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7270-3915>.

Karuskevich Oleh Mykhailovych – PhD in Technical Sciences, Doctoral Candidate at the State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0009-0009-7496-0075>.

Korchuk Vladyslav Ihorovych – Postgraduate Student at the State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine; +38(095)1203334; email: 9038585@stud.kai.edu.ua <https://orcid.org/0009-0006-0063-1656>.

Karuskevich Mykhailo Vitaliiiovych – д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкції літальних апаратів Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна, +38(050)2284505; <https://orcid.org/0000-0003-1698-0296>

Корчук Олена Юрійівна – канд. техн. наук, с. наук. співр., завідувач кафедри філологічних та природничих дисциплін Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна, +38(098)0041943; email: olena.korchuk@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7270-3915>

Кaruskevich Олег Михайлович – канд. техн. наук, докторант Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0009-0009-7496-0075>

Корчук Владислав Ігорович – аспірант Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна; +38(095)1203334; email: 9038585@stud.kai.edu.ua <https://orcid.org/0009-0006-0063-1656>.