

РОЗРОБКА МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВНАСЛІДОК УДАРІВ

М.Л. Казакевич^{1,2}, В.М. Казакевич^{1,2}, О.І. Семенець³, О.В. Денищенко¹, П.О. Слободенюк¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: kazakevich.m@gmail.com

²ТОВ «НДТ Україна». E-mail: m_kazakevich@ukr.net

³АТ «АНТОНОВ». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполєва, 1. E-mail: semenets@antonov.com

Стаття присвячена розробці технології та засобів експрес-діагностики концентраторів напружень на поверхні літальних апаратів, які створюються внаслідок механічних ударів птахів або уламків гравію при посадці на невідготовлені аеродроми. Неможливість своєчасно виявити місця таких ударів може спричинити катастрофічні наслідки. Авторами проведено дослідження щодо використання комбінації методів крихкого покриття з капілярним тестуванням і розроблено технологію експрес-моніторингу поверхонь великогабаритних авіаконструкцій з виявлення місць напружень і пошкодження. Запропоновано до стандартизованого штатного захисту авіаконструкції додати спеціальні покриття, у тому числі фарбу, що містить індикатор-люмінофор, та крихкий шар авіаційного лаку. Якщо при механічному ударі буде пошкоджено покриття, волога розчинить індикатор та УФ освітлення візуалізує місце впливу. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: експрес-діагностика поверхні літальних апаратів, концентратори напружень, метод крихких покриттів, капілярний метод неруйнівного контролю

Вступ. Дія різноманітних зовнішніх чинників на конструкції призводить до утворення концентраторів напружень та їх пошкоджень. Трапляється, що короткочасна дія зовнішнього чинника на виріб не дозволяє виявити жодної візуальної зміни, залишаючи у той же час внутрішні дефекти. Особливу небезпеку така ситуація створює в авіації, коли внаслідок механічних ударів, які досить часто трапляються в польоті з-за птахів, або впливу інших факторів, наприклад, гравію при посадці на ґрунтовий аеродром, виникає загроза людському життю. У процесі експлуатації літальних апаратів необхідний постійний моніторинг і технічна діагностика цілісності конструкцій. Після аналізу зіткнень літаків із птахами встановлено, що більшість таких аварій (82 %) відбувається під час зльоту та посадки літальних апаратів. Найуразливіші деталі конструкції, що зазнають ударів птахів, – це крило, обтічник двигуна, елементи системи управління польотом. Відома низка пов'язаних з цим катастроф. На жаль, проведення детального моніторингу технічного стану сучасних авіалайнерів за час між польотами не завжди є можливим.

Метою цієї роботи було створення високопродуктивного дистанційного методу експрес-діагностики концентраторів напружень на поверхні літальних апаратів. Задача обумовлена реальною ситуацією, коли при експлуатації літаків внаслідок

механічного впливу (удару) виникало пошкодження елементів керування. Місця в конструкції, де відбувається різке зростання напружень, спричинене зміною порушення цілісності матеріалу, є концентраторами напружень. Внаслідок великих розмірів літака такі дефекти не завжди вдається своєчасно виявити. Це може призводити до створення аварійної ситуації.

Аналіз існуючих методів виявлення місць розташування концентраторів напружень. Методи виявлення місць концентрації напружень наступні: фотопружність, тензометрія та інфразвуковий аналіз. Найпоширенішим серед існуючих методів визначення напружено-деформованого стану елементів конструкції є тензометричний. Він базується на вимірюванні деформацій у зовнішніх шарах деталі за допомогою тензодатчиків. Виходячи з фізичних принципів, відрізняють такі основні методи тензометрії: рентгенівські, поляризаційно-оптичні, інтерференційні, акустичні, крихких покриттів [1]. Останній метод є найзручнішим для проведення експрес-діагностики напружено-деформованого стану авіаційних конструкцій.

Метод крихких покриттів. Метод крихких покриттів (МКП) [2] полягає в нанесенні на досліджувану поверхню виробу тонкого крихкого шару та у візуальному спостереженні за утворенням у цьому шарі тріщин при навантаженні на ви-

ріб. Тріщини, що утворилися, дозволяють виявити зони максимальних деформацій та напрямки головних деформацій (напружень).

Чутливістю крихкого покриття називають максимальне відносне подовження, при якому з'являються перші дефекти, а сталою крихкого покриття по напруженню – максимальне напруження розтягу на поверхні. Для отримання якісних покриттів, які забезпечують визначення деформацій, матеріал покриття повинен бути прозорим, мати гарну адгезію до конструкційних матеріалів, достатньо низьку та стабільну границю міцності в робочих інтервалах температур і вологості навколишнього середовища. Способи виготовлення та нанесення крихких чутливих покриттів повинні забезпечувати безпеку роботи з такими покриттями та оперативність їх застосування для проведення випробувань у лабораторних і виробничих умовах.

Метод дуже зручний для дослідження місць розташування концентраторів напружень. Незважаючи на високу інформативність цього методу при роботі на великих площах поверхні, у традиційному виконанні він не здатен забезпечити необхідний рівень чутливості. Тому авторами було запропоновано його удосконалити шляхом поєднання з методом проникаючих речовин або капілярним методом неруйнівного контролю.

Капілярний метод неруйнівного контролю. Капілярний метод неруйнівного контролю [3] заснований на капілярному проникненні всередину дефекту індикаторної рідини та призначений для виявлення дефектів, що мають вихід на поверхню об'єкта контролю. Цей метод придатний для виявлення щілин з поперечними розміром 0,1...500 мкм, у тому числі наскрізних, на поверхні чорних і кольорових металів, сплавів, кераміки, скла і т.п., та широко застосовується для контролю цілісності зварного шва. Розрізняють люмінесцентний і кольоровий методи капілярної дефектоскопії.

При капілярному контролі кольорові або люмінесцентні сліди стає можливим зафіксувати візуально. Перевагою капілярної дефектоскопії є те, що з її допомогою можна не тільки виявити поверхневі та наскрізні дефекти, але й отримати інформацію по їх розташуванню, протяжності, формі та орієнтації по поверхні, тобто цінну інформацію про характер дефекту й навіть деякі причини його виникнення (концентрація напружень, недотримання технології тощо). В якості індикаторних рідин застосовують органічні люмінофори – речовини, що дають яскраве власне світіння під дією ультрафіолетових променів, а також різні барвники [4, 5]. Чутливість капілярного

контролю – здатність виявлення щілин заданого розміру із заданою ймовірністю при використанні конкретної технології контролю. Клас чутливості контролю визначають залежно від мінімального поперечного розміру виявлених дефектів.

Оскільки глибина та довжина дефекту також чинять істотний вплив на можливість його виявлення (зокрема, глибина повинна бути істотно більшою від ширини розкриття), ці параметри вважаються стабільними. Нижній поріг чутливості, тобто мінімальна величина розкриття виявлених дефектів, обмежується тим, що вельми мала кількість пенетранта, який затримався в порожнині невеликого дефекту, виявляється недостатньою, щоб отримати контрастну індикацію при даній товщині шару. Існує також верхній поріг чутливості, який визначається тим, що з широких, але неглибоких дефектів пенетрант вимивається при усуненні надлишків на поверхні.

Результати експериментальних досліджень діагностики механічних пошкоджень. Аналіз інформації щодо капілярного методу неруйнівного контролю дає змогу стверджувати [6], що він оптимально доповнює метод крихких індикаторних покриттів для виявлення місць ударів при експлуатації літальних апаратів. Для їх сукупної реалізації необхідно, щоб індикаторна проникаюча речовина (пенетрант) була додана до штатного лакофарбового покриття (ЛФП) (підкладки) у вигляді твердих частинок або емульсії у фарбі та зберігала свої якості до моменту пошкодження крихкого покриття. У зв'язку з тим, що зовнішній вигляд авіатехніки щодо фарбування не повинен змінюватися впродовж її експлуатації, було зроблено висновок про перевагу люмінесцентних пенетрантів. При механічному пошкодженні зовнішнього шару покриття та змочуванні досліджуваної поверхні водою розроблений пенетрант виходить на поверхню, де його можна бачити тільки в ультрафіолетовому світлі.

Розроблено наступну схему підготовки зразків та аналізу руйнування лакофарбових захисних матеріалів і визначення місць розташування концентраторів напружень:

- нанесення захисних ЛФП за стандартною схемою до передостаннього шару;
- нанесення передостаннього шару, модифікованого люмінофором;
- фарбування останнім шаром ЛФП;
- випробування ЛФП за допомогою установки «Константа 1А»;
- спостереження зони удару в ультрафіолетовому світлі.

Розробка матеріалів для діагностики механічних ушкоджень. Для модифікації передостаннього шару ЛФП люмінофором нами запропоновано три методики:

1. Модифікація передостаннього шару ЛФП люмінесцентним пенетрантом ЛЖ-6Ам (ТУ У 21585720-049-99), в якому розчинений люмінофор.

2. Модифікація ЛФП за допомогою мікрокапсул розміром 5...10 мкм, що містять люмінофор.

3. Введення в штатну поліуретанову фарбу твердих частинок люмінофора розміром 1...3 мкм.

Методика 1. У зв'язку з тим, що при виявленні місць удару згідно з першим варіантом як підкладку використовують поліуретанову емаль, що містить люмінофор, метод крихких покриттів не може бути використаний у стандартному вигляді. Тому для поліпшення виявлення місць удару в якості зовнішнього покриття нами рекомендовано для застосування лак АК-113М. Після висихання отриманого зразка, що складається з підшару модифікованою люмінофором поліуретанової емалі УР-1176, який перекрито шаром лаку АК-113М, нами були випробувані фізико-механічні характеристики отриманого «сендвіча». При цьому виявилось, що характеристики міцності й адгезія до підкладки відповідають стандартним вимогам.

При випробуванні ударної міцності виявилось, що при ударі з енергією 6,7 Дж верхній шар пошкоджується, при цьому нижній шар УР-1176 залишається неушкодженим, а люмінофор, що входить до його складу, просвічує через дефекти покривного шару. Це дає можливість визначити місце удару при освітленні зразка ультрафіолетовим ліхтарем.

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд зразка, виготовленого за методикою 1 після випробування на установці «Константа 1А» з енергією удару 6,7 Дж. Через механічне пошкодження у зовнішньому покритті добре видно, що світиться в УФ світлі передостанній шар.



Рис. 1. Зображення зразка, підготовленого за методикою 1, після нанесення удару

Методика 2. У зв'язку зі складною технологією мікрокапсулювання люмінофора нами запропоновано реалізувати цей варіант технології шляхом приготування емульсійної фарби на основі штатної поліуретанової фарби. Для цього 1%-й розчин люмінофора в етиленгліколі емульгують у поліуретановій фарбі за допомогою ультразвукової установки. Краплі розчину люмінофора в етиленгліколі, що вводиться в покриття, мають розмір 5...10 мкм (рис. 2). Люмінофор з передостаннього шару виходить на поверхню пошкодженого покриття та світиться в УФ світлі.

Методика 3. Найефективнішою, на нашу думку, є методика 3. Після випробування на удар поверхня зволожується водою. Проникаючі в дефекти, вода розчиняє люмінофор, який дифундує на зовнішню поверхню крила та стає видимим при освітленні

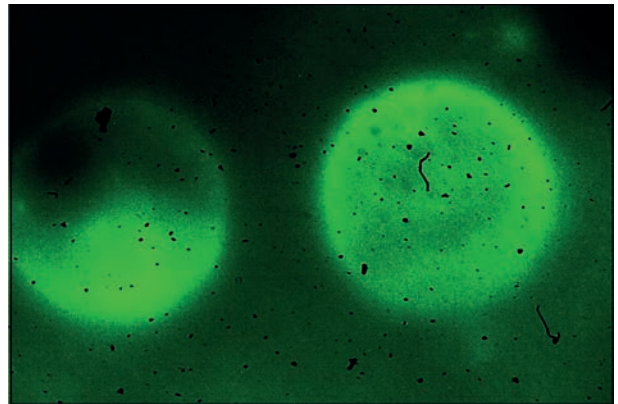


Рис. 2. Капсули розчину люмінофора в суміші етиленгліколю з водою

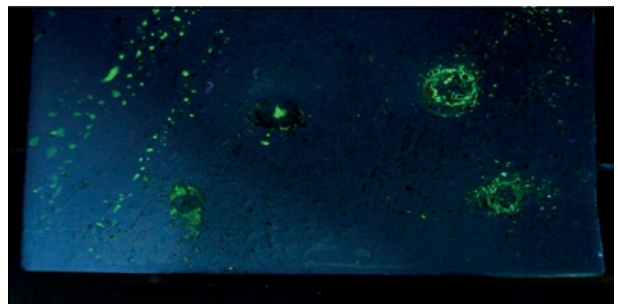


Рис. 3. Зображення зразка, підготовленого за методикою 3, після нанесення удару

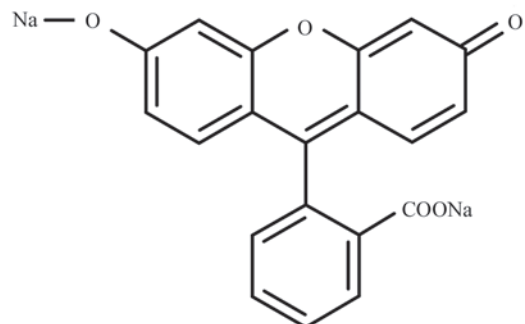


Рис. 4. Уранін А

джерелом УФ опромінення (рис. 3). Індикація місць удару енергією 6...7 Дж за цією методикою стає можливою при товщині зовнішнього шару 30...50 мкм. Для підвищення ефективності даної методики доцільно при її реалізації використовувати в якості зовнішнього покриття лак АК-113м.

Діагностика місць ударів літальних апаратів. При створенні системи діагностики стану конструкції літака, яка б дозволяла фіксувати пошкодження внаслідок механічних ударів, було визначено, що найефективнішим є використання методу крихких покриттів, який удосконалено за допомогою люмінесцентних пенетрантів. Для цього авторами запропоновано введення в штатне ЛФП мікрочастинок нетоксичного люмінофору (натриевої солі флуоресцеїна – уранина А), який широко використовують як компонент водних сумішей.

Уранін А являє собою динатрієву сіль флуоресцеїну, що не розчиняється у ЛФП, натомість добре розчиняється у воді з надзвичайно сильною зеленою флуоресценцією. Застосовується у побутовій хімії для підфарбовування лікувальних солей (у т.ч. хвойного концентрату), миючих засобів, мила. В якості основного ЛФП при проведенні експерименту була обрана поліуретанова емаль (наприклад, УР-1176 або її аналоги). Емалі застосовуються для захисту алюмінієвих і сталевих деталей. В авіації разом з поліуретановим покриттям дуже часто використовують акриловий лак АК-113, у тому числі для покриття ділянок поверхні літака, що не були попередньо оброблені поліуретановою емаллю.

Розроблене індикаторне покриття складається з двох шарів: безпосередньо емалі з вмістом ураніну А (підкладки) та крихкого покриття. Для запобігання передчасної люмінесценції ураніну в рідкому лаку звичайні розчинники було замінено на неполярні (метилацетат та уайт-спирит), у результаті чого було отримано лак АК-113м, властивості якого майже не відрізняються від штатного авіаційного лаку, виготовленого на основі звичайних розчинників (див. табл.).

Процес обробки зразків полягав у послідовному нанесенні зазначених шарів за допомогою аерозолю. Для цього еталон із алюмінієвого сплаву Д16АТ розміром 100×100 мм² був знежирений та

Властивості лаку АК-113м

Масова частка нелетучих речовин, %	6...9
Вихідна в'язкість за В34, с	13...17
Твердість плівки, у.о., по маятниковому приладу: типу М-3	0,5
типу ТМЛ (маятник А)	0,45
Міцність при згині, мм	1
Режим затвердіння при 20 °С, год	2

оброблений шаром емалі, яка містила люмінофор. Після повного висихання він додатково був пофарбований лаком АК113м і висушений впродовж 2 год. Підготовлений таким чином зразок після обробки водою не світився під світлом УФ лампи. Далі його використовували для підбору режимів технологічного процесу виявлення пошкоджень під дією ударів.

Випробувальний комплекс «ВК-1» для виявлення механічних пошкоджень внаслідок ударів. Для метрологічного забезпечення проведення досліджень авторами спроектовано, укомплектовано та виготовлено випробувальний комплекс для проведення досліджень матеріалів для виявлення механічних пошкоджень елементів управління літака. Комплекс розроблено на базі приладу для визначення міцності плівок при ударі.

Комплекс «ВК-1» включає прилад «КОНСТАНТА У-1А» і мікроскоп Sigeta QX500, інформація з якого оброблюється за допомогою спеціально розробленої програми (рис. 5).

Прилад «КОНСТАНТА У-1А» складається зі станини (основи) із запресованим у неї ковадлом. Усередині направляючої труби знаходяться пристосування для утримання та скидання вантажу і власне вантаж. У направляючої труби є проріз, уздовж якого нанесено шкалу 0...500 мм з ціною поділки 10 мм для перевірки висоти встановлення вантажу.

Пристосування для утримання та скидання вантажу (далі за текстом – пристосування) складається з корпусу, стопора, кнопки та вказівної стрілки. Воно вільно переміщається по трубі уздовж прорізу та фіксується на необхідній висоті стопорним гвинтом. Вантаж масою 1 кг складається з обважнювача, рукоятки та конуса. Рукоятка вантажу проходить через проріз напрямної труби. Конус слугує для фіксації вантажу в пристосуванні.



Рис. 5. Комплекс «ВК-1» для проведення досліджень і контролю якості індикаторних матеріалів для виявлення механічних пошкоджень

За допомогою стопорного гвинта пристосування встановлюється за шкалою направляючої труби на необхідну для випробувань висоту. Вантаж за рукоятку підводиться до контакту, конус потрапляє в стопор і вантаж автоматично закріплюється (фіксується) у пристосуванні. При натисканні на кнопку конус звільняється зі стопора та вантаж масою 1 кг вільно падає. Після випробування зразок розміщується в портативному мікроскопі, з'єднаному з комп'ютером.

Портативний цифровий мікроскоп QX500 з LED підсвічуванням і збільшенням $\times 5 \dots 500$ поєднує в собі якість зображення, компактність і портативність. Завдяки підключенню до комп'ютера з'являється можливість записувати фото і відео з QX500, що містить матрицю CMOS і має максимальну роздільну здатність 2.0 МП.

Яскраве підсвічування з 8 діодів з можливістю регулювання гарантує оптимальний підбір освітленості предмета. Наявність діодів, випромінюючих в ультрафіолетовому діапазоні, дозволяє збуджувати люмінесценцію пенетранта в місцях дефектів. Розширені можливості фотографічної та відеозйомки дозволяють робити фотографії з витримкою і 24-бітної передачею кольору та записувати відео з частотою 30 кадрів на секунду.

Для обробки інформації щодо виявлення «слідів» дефектів розроблено комп'ютерну програму на основі операційної системи Windows 2000/xp/Vista/732bit/64bit MAC. Програма дозволяє робити кількісну оцінку індикаторного малюнку «слідів» дефектів.

Міцність плівки при ударі умовно визначають значенням максимальної висоти в сантиметрах, падіння якої на пластинку не завдає механічних пошкоджень покриття (тріщин, відшарування).

Слід від удару виявляють після обробки поверхні водою за яскравим випромінюванням індикаторного покриття при УФ освітленні зони пошкодження (рис. 6). Це обумовлено проникненням

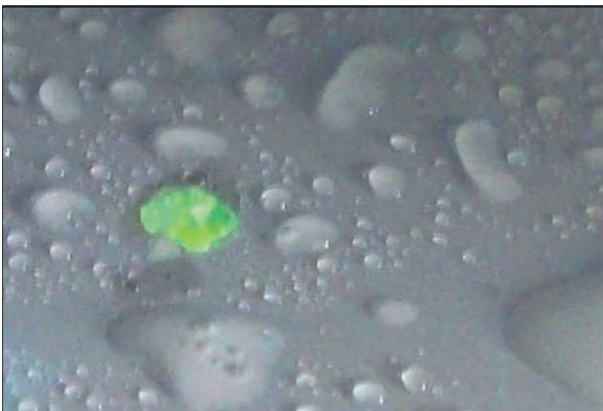


Рис. 6. Зображення зразка, підготовленого за методикою 3, після нанесення удару

водного розчину люмінофору в тріщини крихкого покриття, утворені в результаті удару. Тверді частинки люмінофору розчиняються при змочування поверхні конструкції водою, яка проникає у пошкодження, захоплює сусідні тверді частинки люмінофору та тим самим формує більш розширену зону індикаторного сліду. Цей процес сприяє підвищенню чутливості саме експрес-діагностики.

Висновки

Внаслідок вивчення проблеми пошкодження елементів керування конструкції літаків під дією ударів птахів та уламків ґрунтових аеродромів запропоновано експрес-методику виявлення пошкоджень на базі поєднання методу крихких індикаторних покриттів і капілярного неруйнівного контролю. Нова методика дозволяє проводити виявлення дефектів габаритних авіаційних конструкцій під час контролю між польотами, що дає змогу підвищити безпеку експлуатації та зменшити витрати на обслуговування.

Для реалізації технології виявлення місць пошкоджень обшивки крила та поверхні літальних апаратів внаслідок механічних ударів обрано метод крихких покриттів, суміщений з капілярним контролем, який був реалізований у вигляді трьох методик, а саме:

- шляхом модифікації штатного поліуретанового ЛФП люмінесцентним пенетрантом, призначеним для капілярного контролю;
- шляхом виготовлення індикаторної емульсійної фарби, яка містить розчин люмінофора;
- шляхом введення в штатну поліуретанову фарбу твердих частинок люмінофора «Ураніна А» розміром 1...3 мкм.

Усі три варіанти дозволяють виявляти місця розташування механічних деформацій при енергії удару, що перевищує 6,7 Дж. Найбільш ефективною (чутливою) серед них є остання методика, що використовує тверду фазу люмінофора, який при контролі розчиняється у воді.

Встановлено, що метод «крихких покриттів» може бути реалізований з використанням лаку АК-113м. На основі акрилової смоли та неполярних розчинників розроблено рецептуру такого лаку, який не розчиняє люмінофор.

Розроблено індикаторне двошарове покриття для тестування цілісності авіаційних конструкцій, які зазнали впливу ударів птахів або інших механічних пошкоджень. Запропоновані склад і технологія експрес-оцінювання результатів проведення неруйнівного контролю дозволяють їх застосування для технічної діагностики літальних апаратів із композитних матеріалів.

Список літератури

1. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. (2023) *Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій. Монографія.* Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка».
2. Касаткін Б.С., Кудрін А.Б., Лобанов Л.М. (1981) *Експериментальні методи дослідження деформацій та напружень: Довідковий посібник.* Київ, Наукова думка, 1981.
3. 2020) *Principles and Applications of Liquid Penetrant Testing.* ASNT, ISBN 978-1-57117-1-479-6.
4. Казакевич М.Л., Семенец А.И., Дереча В.Я., Казакевич В.М. (2015) Современные задачи диагностирования технического состояния авиационной техники методом проникающих веществ. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 49–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.03.09>
5. Alburger, J.A. (1972) *Testing panel for inspection penetrants having cracks of controlled depth and width.* Patent US3791198A, 5007 Hillard Ave., La Canada, Calif. 9101, Nov. 27, 1972. Appl. No. 309,690.
6. Казакевич М.Л., Семенец О.И., Дереча В.Я. (2015) *Индикаторный материал для выявления дефектов в поверхностных шарах деталей машин.* Патент и неразрушающий контроль № 100082. Заявка № U201500018 від 05.01.2015 р. Опубл. 10.07.2015 р. Бюл. № 13. <https://iprop-ua.com/inv/ftxyuqom/>

References

1. Tymchyk, G.S., Filippova, M.V., Demchenko, M.O. (2023) *Diagnostics of stress-strain state of metal structures. Monograph.* Kyiv, KPI, Vyd-vo Politekhnika [in Ukrainian].
2. Kasatkin, B.S., Kudrin, A.B., Lobanov, L.M. (1981) *Experimental methods of strain and stress investigation: Textbook.* Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
3. 2020) *Principles and Applications of Liquid Penetrant Testing.* ASNT, ISBN 978-1-57117-1-479-6.
4. Kazakevich, M.L., Semenets, A.I., Derecha, V.Ya., Lazakevich, V.M. (2015) Modern tasks of diagnostics of technical condition of aviation equipment by penetrant inspection. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol*, 3, 49–51 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.03.09>
5. Alburger, J.A. (1972) *Testing panel for inspection penetrants having cracks of controlled depth and width.* Patent US3791198A, 5007 Hillard Ave., La Canada, Calif. 9101, Nov. 27, 1972. Appl. No. 309,690.
6. Kazakevych, M.L., Semenets, O.I., Derecha, V.Ya. (2015) *Indicator material for identification of defects in surface layers of machine parts.* Pat. on utility model 100082. Appl. U201500018 of 05.01.2015. Publ. 10.07.15. <https://iprop-ua.com/inv/ftxyuqom/>

DEVELOPMENT OF MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF DAMAGE TO AIRCRAFT STRUCTURES DUE TO IMPACTS

M.L. Kazakevych^{1,2}, V.M. Kazakevych^{1,2}, O.I. Semenets³, O.V. Denyshchenko¹, P.O. Slobodenyuk¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: kazakevich.m@gmail.com

²LLC «NDT Ukraine», Kyiv, Ukraine. E-mail: m_kazakevich@ukr.net

³SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: semenets@antonov.com

The paper is devoted to the development of technology and means of express diagnostics of stress raisers on the surface of aircraft, which are generated as a result of mechanical impacts of birds or gravel fragments when landing on unprepared airfields. The inability to timely detect the places of such impacts can cause catastrophic consequences. The authors conducted a study on the use of a combination of brittle coating methods with capillary testing and developed a technology for express monitoring of the surfaces of large-sized aircraft structures to detect stress and damage. It is proposed to add special coatings to the standardized protection of aircraft structures, including paint containing a phosphor indicator, and a brittle layer of aviation varnish. If the coating is damaged by mechanical impact, moisture will dissolve the indicator and UV lighting will visualize the impact site. 6 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: *express diagnostics of aircraft surfaces, stress raisers, brittle coating method, capillary method of non-destructive testing*

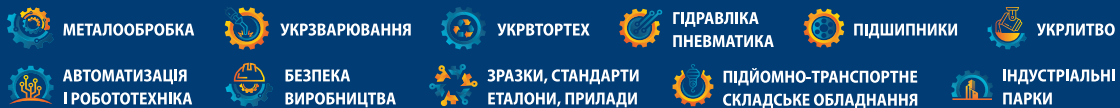
Отримано 08.10.25

Отримано у переглянутому вигляді 04.11.25

Прийнято 12.12.25

XXIV МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2026

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ



Генеральний інформаційний партнер:



26-28 травня

Місце проведення: МВЦ, м. Київ, Броварський пр-т, 15, станція метро «Лівобережна»

+38 (095) 268-05-85, +38 (096) 505-52-66

plast@iec-expo.com.ua www.iec-expo.com.ua

