

УДК 629.735.33.028:620.194.3

doi: 10.32620/aktt.2024.4.04

Є. П. ГАВРИЛОВ¹, Ю. В. ВЛАСЕНКО², С. С. ЮЦКЕВИЧ²,
О. Є. ЯКОБЧУК², О. М. КАРУСКЕВИЧ²

¹ Акціонерне товариство «Антонов», Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ І СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРТЯ В АВІАЦІЙНИХ ЗАКЛЕПКОВИХ З'ЄДНАННЯХ

В статті представлено результати дослідження факторів, які визначають вплив плівкоутворюючих антикорозійних сполук на втому заклепкових з'єднань. Досліджувались антикорозійні сполуки, рекомендовані для захисту конструкції літака транспортної категорії на основі досвіду їх використання відомими розробниками авіаційної техніки. Розглядалось два варіанти обробки плівкоутворюючими антикорозійними сполуками, які визначали: а) «надлишкову кількість сполуки» і б) «лімітовану кількість сполуки». При надлишковій кількості сполуки в зазорі з'єднання спостерігався негативний вплив на втомну довговічність. Виявлено експериментально зв'язок між в'язкістю досліджених сполук і кількістю циклів навантажування до руйнування при «надлишковому» режимі обробки, що пояснюється проникненням сполук в зазори з'єднань. Застосуванням оригінального пристрою для дослідження сил тертя між елементами з'єднання в присутності антикорозійних сполук визначався коефіцієнт статичного тертя в присутності ряду антикорозійних матеріалів. Результати визначення коефіцієнтів статичного тертя вказують на суттєвий вплив антикорозійних матеріалів на сили статичного тертя (тертя спокою) та необхідність їх вибору за комплексом характеристик. Встановлено, що товщина шару сполуки не впливає на величину статичного тертя, а головним чинником при визначенні впливу сполук на тертя і відповідне зниження циклічної довговічності, є доля поверхні, вкритої мастильним шаром, що обумовлює один з можливих режимів тертя: граничне, сухе, чи змішане. Експериментально встановлено, що сила тертя спокою збільшується при збільшенні тривалості інтервалу між нанесенням антикорозійних сполук і випробуваннями. Виявлено також вплив величини сили стискування на тертя в з'єднаннях. Скінченно-елементне моделювання формування заклепкового з'єднання проведено з урахуванням пластичної деформації матеріалу заклепки. На основі отриманих результатів зроблено висновок про локальний характер контактної взаємодії пластин, яка зосереджена виключно в зоні отворів. Проведений скінченно-елементний аналіз і чисельний експеримент дозволили отримати важливий висновок: локальні напруження в зоні отвору, які визначають довговічність суттєво залежать від коефіцієнту статичного тертя між листами обшивки.

Ключові слова: авіаційні конструкції; заклепкові з'єднання; методи випробувань; антикорозійні сполуки; втома; тертя; статичне тертя; коефіцієнт тертя.

Вступ

Корозія основних конструкційних елементів впливає на безпеку авіаційного транспорту і ресурсні характеристики повітряного судна, потребує значних матеріальних витрат для підтримання льотної придатності.

Плівкоутворюючі антикорозійні сполуки (ПАС) є ефективним додатковим засобом запобігання корозії конструкцій повітряних суден, а також уповільнення її розвитку у випадку формування корозійних пошкоджень.

Однією з переваг ПАС є їх здатність проникати у конструктивні щілини і зазори, зокрема у зазори заклепкових з'єднань, витісняючи вологу, яка слугує електролітом для гальванічної корозії. Проте, саме ця властивість ПАС викликає певну насторогу при їх виборі і використанні.

Існують підстави вважати, що їх застосування може також призвести до негативних побічних ефектів, зокрема до зниження втомної довговічності заклепкових з'єднань. Відповідні результати досліджень були отримані авторами робіт [1, 2].

Вплив на циклічну довговічність був виявлений і в роботах, які в теперішній час проводяться сумісно Національним авіаційним університетом і АТ «Антонов».

Для перевірки припущення про ключову роль ефекту перерозподілу зусиль між елементами з'єднання внаслідок змін сил тертя між елементами з'єднання було розроблено спеціальний стенд, який дозволяє кількісно оцінювати вплив антикорозійних сполук на силу статичного тертя [3].

Скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану елементів з'єднання в присутності

ПАС підтвердив припущення про наслідки перерозподілення зусиль в елементах з'єднання, зокрема зміну напруженого стану в зоні формування втомної тріщини.

Методи, зразки, матеріали

Представлене дослідження містило:

а) втомні випробування зразків авіаційних заклепкових з'єднань;

б) визначення сил статичного тертя в елементах, які моделювали заклепкове з'єднання;

в) скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану заклепкових з'єднань і моделювання роботи з'єднань за умови наявності ПАС в зазорі між листами.

Випробування проводилось при максимальному напруженні циклу навантажування $\sigma = 120$ МПа з коефіцієнтом асиметрії $R = 0,1$. Частота навантажування f становила 2...5 Гц. База випробувань $N = 500\ 000$ циклів.

Для дослідження сил тертя в заклепковому з'єднанні використовувався стенд, конструкція і принцип роботи якого було описано в роботі [3] і патенті на корисну модель [4].

Скінченно-елементний аналіз було проведено використанням середовища моделювання CATIA V5 Analysis.

В якості середовища, в якому досліджувалась сила тертя використовувались ПАС фірми ARDROX: AV-8; AV-25; AV-30.

Результати дослідження

Результати випробувань на втому

Розглядалось два варіанти обробки плівкоутворюючими антикорозійними сполуками:

а) «надлишкова кількість сполуки» і

б) «лімітована кількість сполуки».

Різниця в процедурі нанесення полягала в тому, що в першому випадку сполука наносилась і потрапляла в зазор заклепкового з'єднання з двох сторін зразка, а в другому – з однієї. Очевидно, що це впливало на кількість ПАС в зазорі з'єднання і на розподілення сполуки по контактних поверхнях.

Розглянуто вплив наступних сполук: розчинене в керосині мастило ЦІАТІМ 201 (еталонне середовище), ПАС ARDROX AV-8, ARDROX AV-25, ARDROX AV-30. Крім того проведено втомні випробування зразків без обробки антикорозійними сполуками.

Втомні тріщини формувались у внутрішньому ряду заклепкового з'єднання. Результати випробувань наведено на рис. 1 і рис. 2.

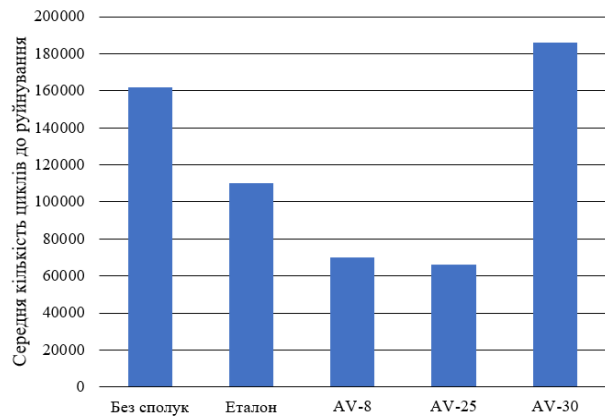


Рис. 1. Середня кількість циклів навантажування до руйнування для зразків: без обробки; після обробки сполукою порівняння; після обробки сполукою ARDROX AV-8; після обробки сполукою ARDROX AV-25; після обробки сполукою ARDROX AV-30.

Варіант обробки – «надлишкова кількість сполуки»

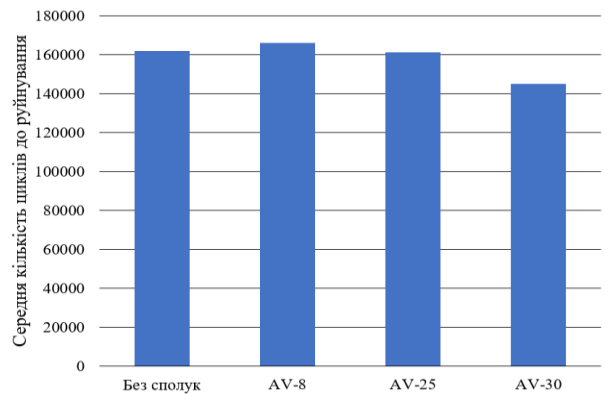


Рис. 2. Середня кількість циклів навантажування до руйнування для зразків: без обробки; після обробки сполукою ARDROX AV-8; після обробки сполукою ARDROX AV-25; після обробки сполукою ARDROX AV-30.

Варіант обробки – «лімітована кількість сполуки»

Як видно з рис. 1, 2 зміна режиму обробки зразків, яка полягала в зменшенні кількості ПАС в зазорі з'єднання сприяла зменшенню негативного ефекту. Це може бути пояснено зміною умов тертя між елементами заклепкового з'єднання.

Важливою характеристикою рідин є їх в'язкість: динамічна та кінематична [5].

Кінематична в'язкість ПАС ARDROX® AV-8 становить $6,0 \text{ mm}^2/\text{s}$ [6]; кінематична в'язкість ПАС ARDROX® AV-25 становить $37,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ [7]; кінематична в'язкість ПАС ARDROX® AV-30 становить $98,000 \text{ mm}^2/\text{s}$ [8]. На рис. 3 показано виявлений експериментально зв'язок між в'язкістю досліджених сполук і кількістю циклів навантажування до руйну-

вання при «надлишковому» режимі обробки, що пояснюється проникністю ПАС в зазори з'єднань. При цьому, слід враховувати, що на проникність ПАС в зазори впливають: в'язкість, сила поверхневого натяження, хімічний склад, летучість, розмір зазору між контактними поверхнями та інші показники.

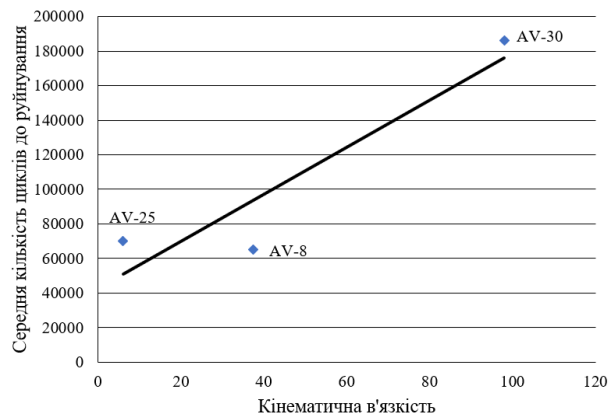


Рис. 3. Зв'язок кінематичної в'язкості ПАС з довговічністю заклепкових з'єднань при «надлишковому» режимі антикорозійної обробки

Експериментальне дослідження тертя в заклепковому з'єднанні

Враховуючи опубліковані дані та припущення [1, 2] стосовно впливу сил статичного тертя в заклепкових з'єднаннях на циклічну довговічність, очевидно є необхідність методу випробувань для кількісної оцінки сил статичного тертя (тертя спокою) та відповідних коефіцієнтів тертя при обґрунтованому виборі засобів захисту від корозії.

Існують стандартні та оригінальні методи визначення коефіцієнту статичного тертя. Проте, відомі методи не імітують в достатній мірі умови тертя в заклепкових з'єднаннях, що і обумовило розробку і використання нового методу [3, 4].

Спектр антикорозійних сполук для дослідження було обрано на основі поточної практики їх застосування та з метою узагальнення отриманих експериментальних даних.

Досліджувались антикорозійні сполуки, рекомендовані для захисту конструкції літака транспортної категорії на основі досвіду їх використання відомими розробниками авіаційної техніки.

На першому етапі проведено дослідження сил тертя в між елементами з'єднання:

а) без нанесення антикорозійних/мастильних матеріалів;

б) нанесенням мастила ЦІАТІМ-201 як модельного середовища;

в) з нанесенням антикорозійного матеріалу Dinitrol AV25;

г) з нанесенням антикорозійного матеріалу Dinitrol AV30;

д) з нанесенням мастила LPS-2, яке використовується як антикорозійний матеріал;

е) з нанесенням уповільнювача корозії LPS-3.

Антикорозійні сполуки були нанесені перед кожним випробуванням на обидві контактні поверхні рухомого з'єднання. Отримані середні значення сил статичного тертя показані на рис.4.

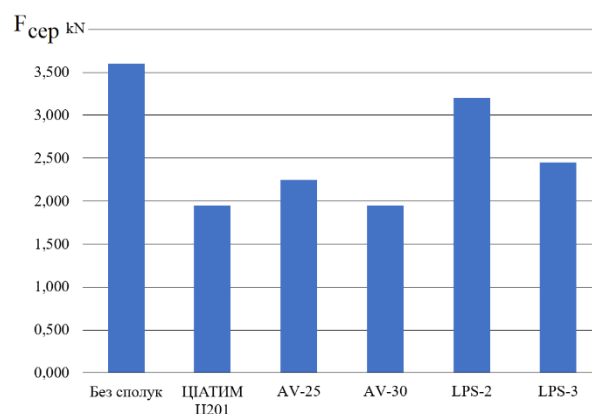


Рис. 4. Середні значення сили статичного тертя

Коефіцієнт статичного тертя

$$\mu_s = F_k / N,$$

де: F_k – зусилля, що відповідало початку ковзання елементів з'єднання;

N – сила стискання листів рухомого з'єднання.

Практичне значення при порівняльному аналізі дії антикорозійних сполук/мастильних матеріалів має коефіцієнт статичного тертя (тертя спокою), який відповідає початку ковзання, тобто його максимальному значенню. Відповідно до стандарту [9] коефіцієнт тертя визначається як відношення сили тертя до нормальної сили, що притискує тіла одне до одного.

Результати визначення коефіцієнтів статичного тертя наведено в таблиці 1.

Результати визначення коефіцієнтів статичного тертя вказують на суттєвий вплив антикорозійних/мастильних матеріалів на сили статичного тертя (тертя спокою) та необхідність їх вибору за комплексом характеристик. При цьому, слід зауважити, що отримані при обробці антикорозійними сполуками значення коефіцієнтів тертя суттєво вище, ніж при обробці мастилом ЦІАТІМ 201. Важливим є і вплив сполук на розкид результатів вимірювання. Максимальне значення стандартного відхилення спостерігалось при відсутності мастила, а мінімальне – після обробки сполукою LPS-2. Приймаючи до уваги важливість урахування розкиду результатів при проведенні ресурсних випробувань, цей факт заслуговує подальшого дослідження з відповідними рекомендаціями.

Таблиця 1

Коефіцієнти статичного тертя в рухомому конструктивному елементі при обробці антикорозійними/мастильними матеріалами

Обробка	Без обробки	ЦАТІМ 201	AV-25	AV-30	LPS2	LPS3
Середнє значення F_k , kN	3,577	1,952	2,239	1,961	3,196	2,464
Коефіцієнт статичного тертя, μ_s	0,214	0,117	0,134	0,117	0,191	0,147

Проведене дослідження і методика визначення сил тертя за допомогою рухомого конструктивного елементу може бути рекомендована для практичного застосування при виборі та обґрунтуванні захисних покриттів.

Після вибору антикорозійних сполук для захисту конструкцій літаків розробки АТ «Антонов» на основі результатів втомних випробувань, проведених в ході виконання представленої роботи, аналізу існуючої практики застосування плівкоутворюючих покриттів, аналізу ринку захисних плівкоутворюючих сполук, були визначені матеріали для апробації методу дослідження сил статичного тертя: ARDROX AV-8, ARDROX AV-25, ARDROX AV-30.

Представлені вище результати дослідження сил тертя між елементами заклепкового з'єднання показали наявність зв'язку між властивостями антикорозійних сполук і можливість визначення факторів, які мають практичне значення при удосконаленні технології застосування плівко утворюючих антикорозійних покриттів.

Дослідження другого етапу містило:

а) визначення впливу товщини шару антикорозійної сполуки в зазорі заклепкового з'єднання на сили тертя;

б) визначення впливу тривалості інтервалу між нанесенням захисної сполуки і навантаженням конструкції;

в) визначення впливу стискаючого зусилля заклепки на силу тертя.

Проведені втомні випробування конструктивних елементів показали, що їх довговічність суттєво залежить від властивостей ПАС і способу обробки.

Використання запропонованого методу вимірювання сил тертя дозволяє оптимізувати спосіб обробки.

Розглянуто два варіанти обробки:

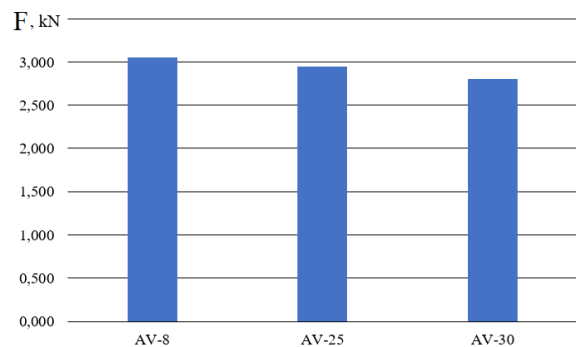
а) нанесення покриття на одну з контактних поверхонь;

б) нанесення покриття на обидві контактні поверхні.

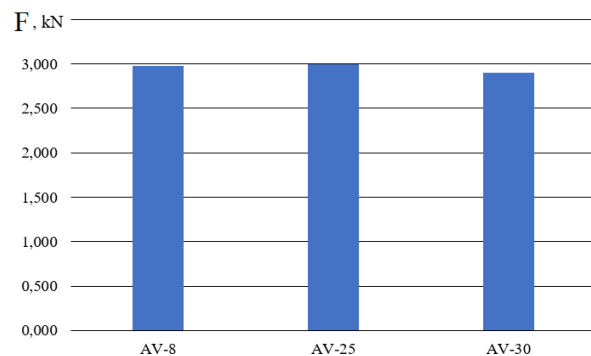
Результати вимірювань показані на відповідних діаграмах (рис. 5 і рис. 6).

Аналіз отриманих даних вказує на те, що: а) сполуки AV-8; AV-25; AV-30 при повному покритті контактних поверхонь мають приблизно однакові значення статичного тертя; б) товщина шару сполуки не впливає на величину статичного тертя. Отже, головним чинником при визначенні впливу ПАС на тертя

і відповідне зниження циклічної довговічності, є доля поверхні, вкритої мастильним шаром ПАС, що обумовлює один з можливих режимів тертя: граничне, сухе, чи змішане. З точки зору класифікації режимів тертя, процес відповідає умовам граничного тертя як при обробці однієї з поверхонь, так і при обробці обох поверхонь.



а



б

Рис. 5. Сила статичного тертя:

а – при наявності одного шару ПАС;

б – при нанесенні ПАС на обидві контактні поверхні

Фактором, що може бути варіативним в реальних умовах експлуатації та ремонту авіаційної техніки і може бути контрольованим, є інтервал часу між виконанням антикорозійної обробки та навантаженням елементу конструкції. На рис. 6 показано результати вимірювання сил тертя безпосередньо після нанесення, при інтервалі часу 24 години, 14 діб.

Порівняння проведено для умов покриття одним шаром ПАС AV-8. Як видно із наведених результатів, сила тертя спокою збільшується при збільшенні тривалості інтервалу між нанесенням ПАС і навантаженням.

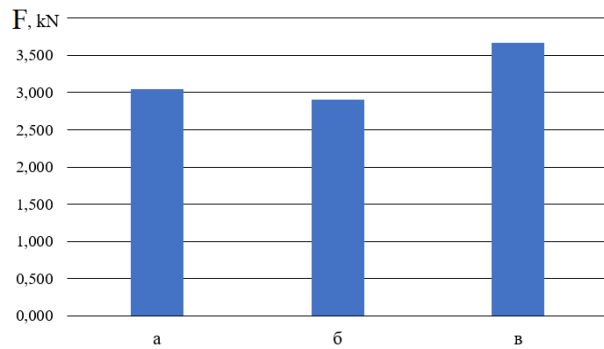


Рис. 6. Результати вимірювання сил тертя при використанні ПАС AV-8:

а – безпосередньо після нанесення;
б – при інтервалі часу 24 години, в – 14 діб

Сила стискування при виконанні клепок залежить від матеріалу заклепки і технологічного режиму клепок. Вплив величини сили стискування досліджувався шляхом порівняння сил статичного тертя при стискаючих зусиллях 2,67 kN, 4,2 kN і 5,0 kN. Відповідні значення сил тертя становили 2,65 kN, 3,15 kN, 3,42 kN відповідно. Залежність сили статичного тертя від стискаючого зусилля показана на рис.7.

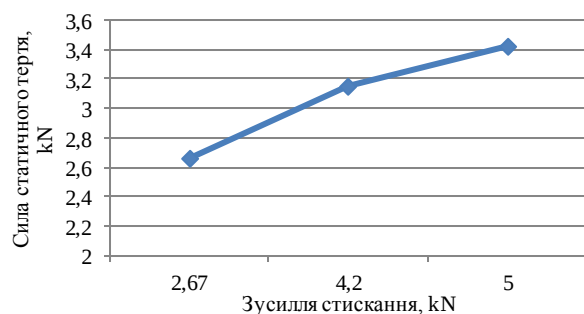


Рис. 7. Залежність сили тертя спокою від сили стискування з'єднання наявності в зазорі ПАС AV-8

Скінченно-елементний аналіз тертя в заклепковому з'єднанні

Скінченно-елементний аналіз проведено для

спрощеної тривимірної моделі зразка. Модель відображає конструктивні особливості поздовжнього з'єднання, властивості матеріалу листів обшивки та заклепок, які використовуються для таких з'єднань.

Аналіз напружено-деформованого стану містив покрокове додавання факторів, які визначають стан елементів з'єднання. Такий підхід сприяє запобіганню похибок загального результату і дозволяє скорегувати процедуру аналізу. На першому етапі аналізу стискаюча сила заклепок не була врахована. Деформації верхньої пластини з'єднання при напруженні розтягу в перерізі 120 МПа показані на рис.8.

Моделювання формування заклепкового з'єднання проведено з урахуванням пластичної деформації матеріалу заклепки. Результати представлені на моделі AnalysisH6 (OrphanMesh) m.CATAnalysis. Розрахунок проведено з метою визначення напружено-деформованого стану після формування з'єднання. Результати використовувались на наступних етапах дослідження роботи з'єднання в умовах циклічного навантаження.

При моделюванні процесу формування заклепки використано дані стосовно пластичних властивостей сплаву B65, наведених в роботі [10].

Слід зауважити, що в разі моделювання болтового з'єднання може бути досягнуто більш широкий діапазон значень зусилля стискування листів. Остаточна фаза формування і навантаження заклепки нормованої геометрії з визначеними характеристиками напружено-деформованого стану з'єднання на рис.9.

Зусилля стискування відповідає процесу формування замикаючої головки заклепки необхідної геометрії.

Слід відмітити, що в процесі навантаження з'єднання розтягуючим зусиллям контактні навантаження перерозподіляються, як показано на наступному рисунку. Діаграма відображає лише ненульові значення контактних напружень (рис.10).

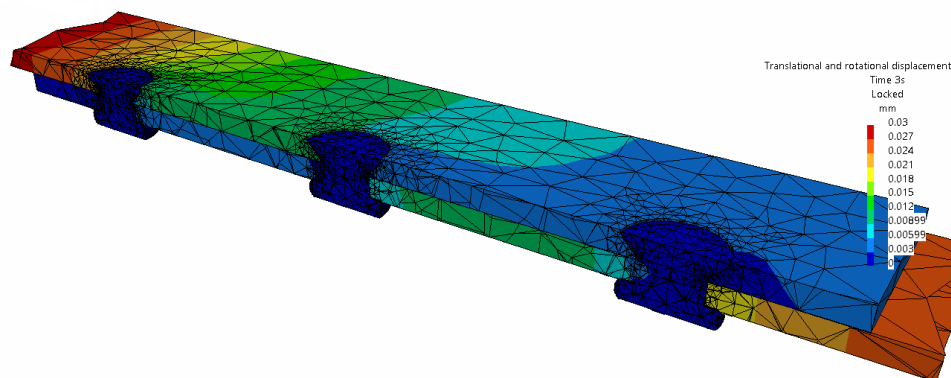


Рис. 8. Характер розподілу деформацій верхньої пластини з'єднання при напруженні розтягу в перерізі 120 МПа

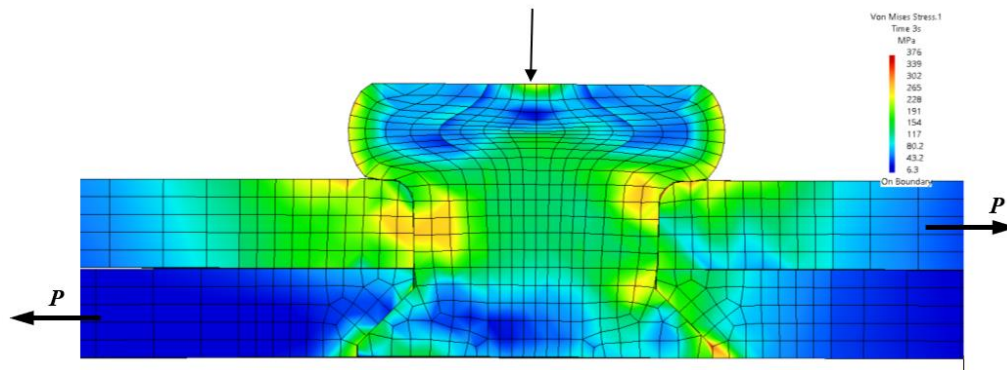


Рис. 9. Остаточна фаза формування і навантаження заклепки і листів обшивки (при дії зусилля розтягу)

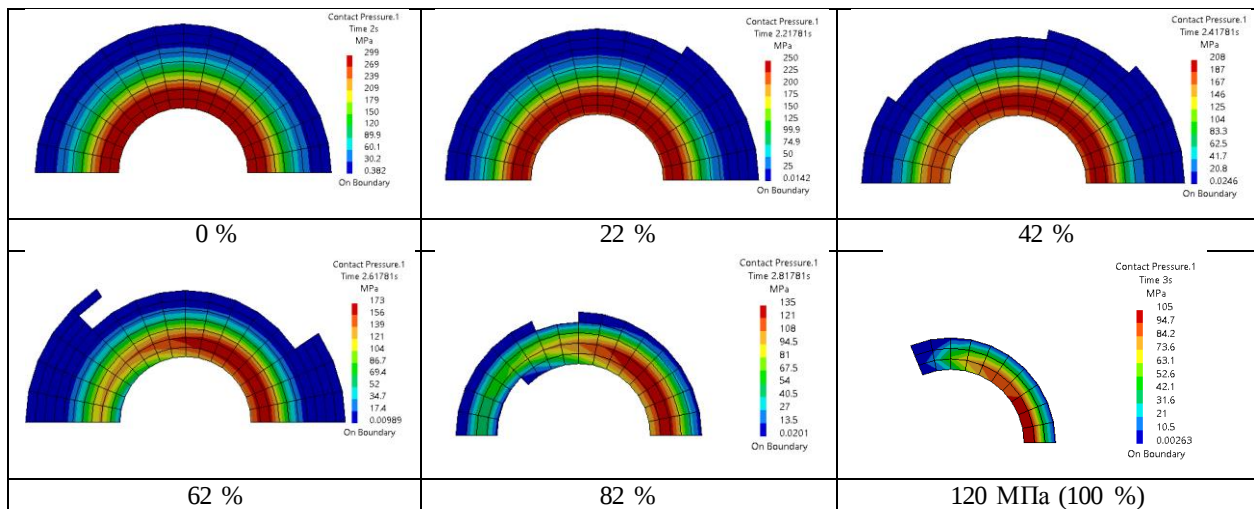


Рис. 10. Перерозподіл контактних напружень між листами в процесі навантажування зразків

На основі отриманих результатів можемо зробити висновок про локальний характер контактної взаємодії пластин, яка зосереджена виключно в зоні отворів.

Отримане моделювання заклепкового з'єднання, контактного тиску та фактичної геометрії зони контакту узяті за основу для подальшого аналізу.

Черговий етап полягав в підготовці схеми найбільш навантаженої області з'єднання для чисельного експерименту і визначенні напружень в поперечному розрізі пластини.

Отримані результати дозволили моделювати роботу з'єднань в присутності ПАС, а також визначити зв'язок між коефіцієнтом статичного тертя між листами обшивки та локальними напруженнями поблизу концентратора напружень в зоні формування втомної тріщини.

Проведений скінченно-елементний аналіз і чисельний експеримент дозволили отримати важливий висновок: локальні напруження в зоні отвору суттєво залежать від коефіцієнту статичного тертя між листами обшивки. Тенденція до збільшення, або

зменшення сил статичного тертя в залежності від коефіцієнту тертя обумовлена режимом клепок, тобто величиною стискаючого зусилля. На наведених на рис. 11 залежностях за одиницю прийнято найбільше значення внутрішніх напружень для першої серії експериментів.

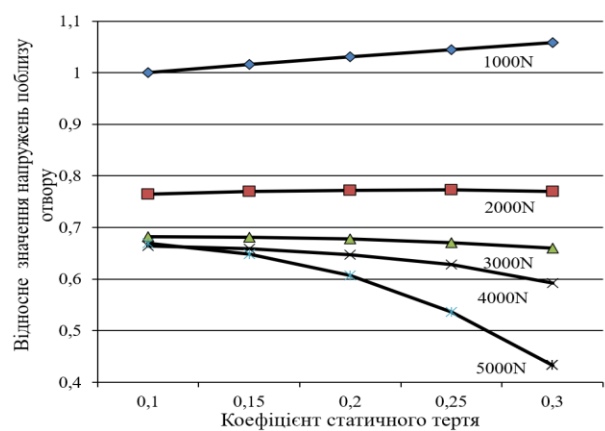


Рис. 11. Локальні напруження в зоні формування втомних тріщин в залежності від коефіцієнту статичного тертя між листами обшивки

Таким чином, напруження в зоні формування втомної тріщини залежить як від стискаючого зусилля, так і коефіцієнта статичного тертя.

Висновки

Проведені втомні випробування зразків заклепкових з'єднань довели, що наявність плівкоутворюючих антикорозійних сполук в зазорі заклепкових з'єднань за певних умов впливає на втомну довговічність з'єднань.

Дія сили статичного тертя з'єднання має локалізований характер. Сили тертя знижуються за рахунок наявності ПАС на контактній площадці поблизу отвору.

Проведений скінченно-елементний аналіз і чисельний експеримент дозволили отримати важливий висновок: локальні напруження в зоні отвору, які визначають довговічність суттєво залежать від коефіцієнту статичного тертя між листами обшивки. Тенденція до збільшення, або зменшення сил статичного тертя в залежності від коефіцієнту тертя обумовлена режимом клепок, тобто величиною стискаючого зусилля.

Внесок авторів: аналіз стану проблеми, постановка задачі дослідження, теоретичне обґрунтування нового методу дослідження тертя в заклепкових з'єднаннях – **Є.П. Гаврилов**; скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану елементів заклепкового з'єднання – **Ю.В. Власенко**; приборне забезпечення проведення експериментальних досліджень – **С.С. Юцкевич**; обробка результатів дослідження – **С.С. Юцкевич**, **О.Є. Якобчук**; проведення експериментальних досліджень, – **О.Є. Якобчук**, **О.М. Карускевич**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Робота виконувалась за фінансової підтримки АТ «Антонов».

Наявність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку фахівцям АТ «Антонов» і Національного авіаційного університету за допомогу в проведенні експериментальних досліджень.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *The influence of corrosion treatments on fatigue of aircraft structural joints [Text] / A. Jaya, U. H. Tiong, R. Mohammed [et al.] // 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice, 19–24 September 2010. – P. 1–8.*
2. *Schijve, J. Effect on anticorrosion penetrant on the fatigue life in flight simulation tests of various riveted joints NLR TR 77103 [Text] / J. Schijve, F. A. Jacobs, P. J. Tromp. – Amsterdam: National Aerospace Laboratory. – 1977. – 35 p.*
3. *Influence of corrosion preventive compounds on the friction force in aircraft lap joints [Text] / Ie. Gavrylov, M. Karuskevich, S. Ignatovich, S. Yutskevych, T. Maslak // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2021. – Vol. 45, Iss. 3. – P. 938–941. DOI: 10.1111/ffe.13621.*
4. *Пат. 155484 Україна : МПК G01N19/02. Пристрій для визначення коефіцієнтів тертя спокою в авіаційних заклепкових з'єднаннях [Текст] / Карускевич М. В., Гаврилов Є. П., Ігнатович С. Р., Юцкевич С. С., Маслак Т. П.; заявник і патентовласник Національний авіаційний університет - №и202204280; заявл. 11.11.2022; опубл. 06.03.2024, Бюл. № 10. – 7 с.*
5. *LibreTexts. 2.6: в'язкість [Електронний ресурс] / Pavan M. V. Raja, Andrew R. Barron. – 2022. – Режим доступу: [https://ukrayinska.libretexts.org/Хімія/Аналітична_хімія/Фізичні_методи_в_хімії_та_нанонауці_\(Barron\)/02%3A_Фізичний_і_термічний_аналіз/2.06%3A_В'язкість](https://ukrayinska.libretexts.org/Хімія/Аналітична_хімія/Фізичні_методи_в_хімії_та_нанонауці_(Barron)/02%3A_Фізичний_і_термічний_аналіз/2.06%3A_В'язкість). (accessed 12.03.2024)*
6. *30690975/SDS_GEN_US/EN. Safety data sheet. Ardrex® AV8 [Electronic resource]. – Effective from 2023-01-05. – Official edition: BASF Group, 2023. – 11 p. – Available at: https://cdn11.bigcommerce.com/s-jifykode7m/product_images/uploaded_images/msds/SGP98072.pdf. (accessed 12.03.2024)*
7. *Version: 6.0. Safety data sheet. Ardrex AV25 [Electronic resource]. – Effective from 2012-11-22. – Official edition: BASF Group, 2015. – 13 p. – Available at: [https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20\(1\).pdf](https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20(1).pdf). (accessed 12.03.2024)*

8. 30690983/SDS_GEN_GB/EN. *Safety data sheet. Ardrex AV30 [Electronic resource]. – Replaces Previous version: 2.0 ; effective from 2020-04-04. – Official edition: BASF Group, 2020. – 17 p. – Available at: <https://www.fds.supavia.eu/ARDROX%20AV%2030%20FDS%20ENG.PDF>. (accessed 12.03.2024)*

9. *Зносостійкість виробів. тертя, зношування та мащення. ДСТУ 2732-94: Терміни та визначення [Текст]. – Київ. - 1994. – 30 с.*

10. Гребеников, А. Г. *Метод определения характеристик локального НДС в элементах заклепочного соединения листов обшивки хвостовой балки вертолета транспортной категории [Текст] / А. Г. Гребеников, М. Н. Орловский, Ю. Ю. Высочанская // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2017. – № 76. – С. 101–111.*

References

1. Jaya, A., Tiong, U. H., Mohammed, R., Bi, C., & Clark, G. The influence of corrosion treatments on fatigue of aircraft structural joints. *27th International Congress Of The Aeronautical Sciences*, 19–24 September 2010, Nice, France, 2010, pp. 1–8.

2. Schijve, J., Jacobs, F. A. ta Tromp, P. J. *Effect on anti-corrosion penetrant on the fatigue life in flight simulation tests of various riveted joints*. Amsterdam: National Aerospace Laboratory, 1977. 35 p.

3. Gavrylov, Ie., Karuskevich, M., Ignatovich, S., Yutskevych, S., & Maslak, T. Influence of corrosion preventive compounds on the friction force in aircraft lap joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, vol. 45, iss. 3, pp. 938–941. DOI: 10.1111/ffe.13621.

4. Karuskevich, M., Gavrylov, I., Ignatovich, S., Yutskevych, S., & Maslak, T. *Prystriy dlya vyznachennya koefitsiyentiv tertya spokoyu v aviatsiynykh zaklepkovykh z"yednannyakh [Device for determining the coefficients of resting friction in aircraft riveted joints]. Patent UA, No. 1554847. Available*

at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1787270/#1>. (accessed 12.03.2024).

5. Raja, P. M. V., & Barron, A. R. LibreTexts. 2.6: viazkist LibreTexts, 2022. Available at: [https://ukrayinska.libretexts.org/Khi-miia/Analitichna_khimii/Fizychni_metody_v_khimii_ta_nanoutsu_i_\(Barron\)/02%3A_Fizychnyi_i_termichni_analiz/2.06%3A_V%27iazkist](https://ukrayinska.libretexts.org/Khi-miia/Analitichna_khimii/Fizychni_metody_v_khimii_ta_nanoutsu_i_(Barron)/02%3A_Fizychnyi_i_termichni_analiz/2.06%3A_V%27iazkist). (accessed 12.03.2024).

6. 30690975/SDS_GEN_US/EN. *Safety data sheet. Ardrex® AV8. Official edition: BASF Group, 2023. 11 p. Available at: https://cdn11.bigcommerce.com/s-jifycode7m/product_images/uploaded_images/msds/SGP98072.pdf. (accessed 12.03.2024).*

7. *Version: 6.0. Safety data sheet. Ardrex AV25. Official edition: BASF Group, 2015. 13 p. Available at: [https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20\(1\).pdf](https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20(1).pdf). (accessed 12.03.2024).*

8. 30690983/SDS_GEN_GB/EN. *Safety data sheet. Ardrex AV30. Replaces Previous version: 2.0. BASF Group, 2020. 17 p. Available at: <https://www.fds.supavia.eu/ARDROX%20AV%2030%20FDS%20ENG.PDF>. (accessed 12.03.2024).*

9. *Znosostiykist' vyrobiv. tertya, znoshuvannya ta mashchennya. DSTU 2732-94. Terminy ta vyznachennya [Wear resistance of products. friction, wear and lubrication. DSTU 2732-94: Terms and definitions]. Kyiv, 1994. 30 p.*

10. Grebenikov, A. G., Orlovskij, M. N., & Vysochanskaja, Ju. Ju. *Metod opredelenija harakteristik lokal'nogo NDS v jelementah zaklepochnogo soedinenija listov obshivki hvostovoj balki vertoletov transportnoj kategorii [The method of determining the characteristics of the local stress-strain state in the rivet joint elements of sheathing sheets of the tail boom transport category rotorcraft]. Open information and computer integrated technologies, 2017, no. 76, pp. 101–111.*

Надійшла до редакції 15.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

THE EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT STUDY OF FRICTION IN AIRCRAFT RIVETED JOINTS

**Ievgen Gavrylov, Yuri Vlasenko, Sviatoslav Yutskevych,
Oleksandr Yakobchuk, Oleg Karuskevych**

This article presents the results of a study on the factors determining the effect of film-forming anticorrosive compounds on the fatigue of riveted joints. Anti-corrosion compounds recommended for protecting the structure of transport category aircraft, based on the experience of their use by well-known developers of aviation equipment, were studied. Two treatment variants with film-forming anticorrosive compounds were considered, defined as: a) "excessive amount of compound" and b) "limited amount of compound". An excessive amount of compound in the joint gap caused a negative effect on fatigue life. The relationship between the viscosity of the studied compounds and

the number of loading cycles to failure under the "excessive" processing mode was experimentally revealed, which can be explained by the penetration of compounds into joint gaps. Using an original device for studying the friction forces between joint elements in the presence of anticorrosive compounds, the static friction coefficient was determined using several anticorrosive materials. The results of determining the coefficients of static friction indicate that anticorrosive materials have a significant effect on the forces of static friction (friction at rest) and the necessity to select them based on a set of characteristics. It has been established that the thickness of the compound layer does not affect the value of static friction. The primary factor in determining the effect of compounds on friction and the corresponding decrease in cyclic durability is the fraction of the surface covered with a lubricating layer, which determines one of the possible friction modes: boundary, dry, or mixed. It has been experimentally established that the resting friction force increases with the duration of the interval between the application of anticorrosive compounds and testing. The effect of compressive forces on friction in the joints was also investigated. Finite-element modeling of the formation of a riveted joint was carried out, considering the plastic deformation of the rivet material. Based on the obtained results, a conclusion was drawn about the local nature of the contact interaction between the plates, which was concentrated exclusively in the hole zone. The finite element analysis and numerical experiments led to an important conclusion: the local stresses in the hole zone that determine the durability significantly depend on the coefficient of static friction between the skin sheets.

Keywords: aircraft structures; riveted joints; anticorrosive compounds; fatigue; static friction.

Гаврилов Євген Павлович – виконувач обов'язки генерального директора АТ «Антонов», Київ, Україна.

Власенко Юрій Віталійович – старш. викл. каф. конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Юцкевич Святослав Сергійович – канд. техн. наук, доц., зав. каф. конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна.

Якобчук Олександр Євгенійович – старш. викл. каф. конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Карускевич Олег Михайлович – канд. техн. наук, докторант, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Ievgen Gavrylov – Head of the Joint Stock Antonov, Kyiv, Ukraine,
e-mail: ievgengavrylov@ukr.net, ORCID: 0009-0007-2240-5198, Scopus Author ID 57366196400.

Yurii Vlasenko – Senior Teacher at the Department of Aircraft Design, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: yurii.vlasenko@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6171-3528.

Sviatoslav Yutskevych – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Aircraft Design, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: yutskevych@nau.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6650-4453, Scopus ID: 57204993861.

Oleksandr Yakobchuk – Senior Teacher at the Department of Aircraft Design, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: a-yak@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3452-1264, Scopus Author ID: 55949486300.

Oleg Karuskevych – PhD, Doctoral Candidate, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: karuskevych@ukr.net, ORCID: 0009-0009-7496-0075, Scopus Author ID 37007575500.