

О.М. Добриденко, О.В. Карпенко, М.С. Стрела

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СТОЯКІВ ШАСІ ЛІТАКІВ ТИПУ СУ-27 З ВИКОРИСТАННЯМ НОВИХ ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ ЗАМІРУ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

В статті наведено погляди авторів щодо вирішення проблематики контролю вичерпання ресурсу силових елементів літаків сучасними засобами неруйнівного контролю на основі явища коерцитивної сили та можливість передбачити їх граничний (передруйнівний) стан. Також в статті наведено результати випробувань зазначеного засобу неруйнівного контролю на такому силовому елементі, як стояк шасі літака типу Су-27. Використання зазначених засобів неруйнівного контролю збільшує можливості щодо визначення технічного стану окремих силових елементів різних типів літаків.

Ключові слова: ресурс, стояк шасі, силовий елемент, літак типу Су-27, коерцитивна сила, метод неруйнівного контролю, технічний стан.

Вступ

Постановка проблеми. З початку повномасштабного вторгнення російської федерації авіація Повітряних Сил (далі – ПС) Збройних Сил України (далі – ЗС України) виконує бойові завдання із захисту держави. Забезпечення справності парку військової авіаційної техніки (далі – ВАТ) – є однією з актуальних проблем, від вирішення якої залежить боєздатність ЗС України та воєнна безпека держави. Фахівці Державного науково-дослідного інституту авіації залучаються до поетапного продовження встановлених показників виробам ВАТ в умовах дії правового режиму воєнного стану.

Загальну оцінку стану парку літальних апаратів (далі – ЛА) авіації ПС ЗС України проведено на основі аналізу етапу експлуатації авіаційної техніки (далі – АТ) в умовах дії правового режиму воєнного стану. Аналіз проведено за такими напрямками:

дослідження порядку та особливостей експлуатації АТ в умовах правового режиму воєнного стану;

науково-технічне супроводження експлуатації АТ та уточнення переліків робіт під час продовження установлених показників в умовах воєнного стану.

З отриманого досвіду щодо продовження установлених показників літаків винищувальної авіації зазначається вкрай важка ситуація через закінчення установлених показників агрегатів, ресурси та строки служби яких відрізняються від ресурсів і строків служби планеру. І, особливо, це

стосується деталей конструкції шасі літаків типу Су-27.

Силові деталі та вузли конструкції шасі виготовлені з різних типів (марок) конструктивних матеріалів, мають різні розміри і форми та за час експлуатації накопичили дефекти втомного характеру. Такий стан впливає на появу, розвиток та накопичення тріщин в матеріалі в різних його шарах. Все це обумовлює до пошуку та застосуванню засобів неруйнівного контролю (далі – НК), заснованих на нових фізичних принципах, для забезпечення виявлення тріщин та передумов до деструктивних змін в конструкції матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для поглибленого контролю деталей шасі можуть бути застосовані більш ефективні спеціалізовані методи (і засоби) НК – магнітний, вихрострумний, ультразвуковий, акустико-емісійний, радіаційний метод та метод коерцитивної сили, кожен з яких ефективний для вирішення вузького кола задач, і застосування якого обмежується тільки технічними можливостями, габаритними характеристиками обладнання НК та видом шуканого дефекту. В процесі дослідження технічного стану шасі комплект діагностичних приладів повинен забезпечувати виявлення таких основних видів дефектів елементів його конструкції [1, с. 5...19; 2, с. 215; 3, с. 105...107]:

розшарування матеріалу, внутрішні тріщини різних розмірів;

корозійні та корозійно-ерозійні ураження;

розтріскування матеріалу деталей;

раковини та пористість металу, включення неметалічних, шлакових, флюсов;

непровари зварених деталей та руйнування по зварному шву;

надриви і підризи матеріалу, знос, забої, місцевий наклеп;

невідповідність товщини матеріалу;

невідповідність твердості матеріалу.

Мета статті – визначення можливості застосування методу неруйнівного контролю з використанням явища коерцитивної сили для дослідження технічного стану елементів конструкції стояків шасі з метою виявлення деструктивних змін, деградації та тріщин в конструкції для подальшого обґрунтування можливості продовження ресурсних показників.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що структура, фізичні та механічні характеристики конструкційних матеріалів в процесі довготривалої експлуатації ЛА суттєво змінюються, відбувається деградація міцності елементів конструкції (виникнення дефектів і пошкоджень) і деградація властивостей конструкційних матеріалів (зниження характеристик міцності матеріалу конструкцій).

Деградація міцності елементів конструкції проявляється в накопиченні корозійних (загальна і міжкристалічна корозія) та корозійно-механічних дефектів (макро і мікротріщини), які зумовлюють зниження їх міцності. Виявляються елементи деградації і оцінюються їх параметри засобами НК.

За час тривалої експлуатації деградація матеріалів обумовлює зміну їх структурно-фазового стану та мікроструктурної пошкоджуваності (утворення вакансій, пор, скупчень дислокацій, мікротріщин), які знижують міцнісні характеристики матеріалу.

На сьогодні фактор деградації матеріалів практично не враховується при оцінюванні залишкового ресурсу силових конструкцій ЛА через відсутність характеристик міцності, витривалості і тріщиностійкості їх матеріалу у даний момент строку служби.

Тому в останні роки інтенсивно розвивається новий напрям в матеріалознавстві – вивчення властивостей конструкційних матеріалів після довготривалої експлуатації. Для оцінювання експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів досліджують їх фізичні, фізико-хімічні та інші структурно чутливі характеристики сучасними методами неруйнівного діагностування – методами і засобами структуроскопії.

В статті розглянуто конструкцію основних елементів стійки шасі літака Су-27, а саме циліндр з траверсою та шток з віссю колеса. (рис. 1)

Це силові елементи конструкції шасі, які отримують значні повторні навантаження в процесі

експлуатації літака (стояки основної і передньої опор шасі та їх допоміжні вузли) та виготовлені зі сталі типу 30ХГСН2А.

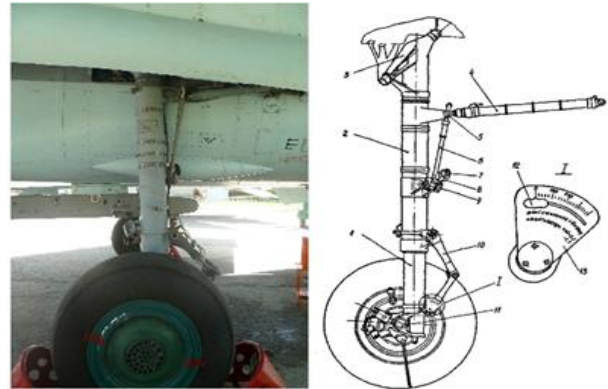


Рис. 1. Основний стояк шасі літака типу Су-27.

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно, для контролю їх технічного стану при продовженні ресурсу необхідно залучити нові засоби неруйнівного контролю, які забезпечать виявлення неприпустимих змін механічних властивостей такого матеріалу та пошук дефектів, що зароджуються і розвиваються в матеріалі.

Для дослідження структурно-механічних властивостей авіаційних матеріалів тривалої експлуатації розроблено електрохімічні методи діагностування алюмінієвих сплавів типу Д-16 і А-95 та методи магнітного структурного аналізу сталей і сплавів, але дані для сталі типу 30ХГСН2А незначні, або відсутні. На основі зазначених методів розроблені дослідні зразки приладів неруйнівного контролю для моніторингу деградації властивостей указаних матеріалів у конструкціях тривалої експлуатації. Зокрема, розроблені магнетоакустична вимірювальна система МАЕ-1Л та вихрострумовий структуроскоп ВЕП-22, які призначені для виявлення внутрішніх тріщиноподібних дефектів авіаційних конструкцій, визначення їх розмірів, аналізу динаміки розвитку дефектів, визначення потенційних місць зародження тріщин у металі, оцінювання залишкового ресурсу металевих елементів за наявним дефектом.

Розглянемо сучасні розробки засобів неруйнівного контролю і вимірювань на основі методів структуроскопії, а саме метод коерцитивної сили, та застосуємо його для діагностики стійки шасі.

Коерцитиметричні методи контролю завдяки високій чутливості до структурних змін та фазових перетворень, достатній простоті, великій точності, слабкій залежності від геометричних розмірів та можливості проведення вимірювань в локальних місцях виробів, отримали найбільш широке розповсюдження серед усіх магнітних методів неруйнівного контролю.

В основі магнітної структурокопії є кореляція між магнітними та механічними властивостями феромагнітних сталей та сплавів. В якості інформаційної характеристики магнітного поля використовують коерцитивну силу H_c , де поміж нею та значенням твердості, глибини загартованого слою та товщини слою цементації існують стійкі кореляційні зв'язки.

В процесі роботи реєструють момент переходу намагнічуваності через нуль при перемагнічуванні виробу на петлі гістерезису за допомогою вимірювання току в обмотках електромагніту. Сила струму в обмотках електромагніту при цьому пропорційна H_c .

У результаті довготривалого напрацювання під дією силових чинників трансформується вихідний структурний і фазовий стан та накопичуються пошкодження матеріалу, що призводить до зміни його фізико-механічних характеристик. Тому одержати об'єктивну інформацію про реальний стан матеріалу та оцінити його ресурс працездатності можливо також методами неруйнівного контролю, які базуються на структурній чутливості до фізичних характеристик матеріалів. Перевагою такого підходу є діагностика технічного стану об'єктів на стадії структурно-фазових змін (не тільки на поверхні, а й в об'ємі конструктивного матеріалу) та формування початкової пошкоджуваності (пор, мікротріщин, тощо), тобто ще задовго до появи відносно крупних дефектів, які є предметом дефектоскопічного контролю. З позиції механіки руйнування це означає, що граничний стан об'єкта контролю розглядають на стадії зародження початкової макротріщини.

У роботі [4 с. 119] сказано, що багаторічними дослідженнями встановили кореляційні зв'язки між структурним станом, хімічним і фазовим складом, механічними характеристиками матеріалів і виробів, з одного боку, та їх магнітними і електричними властивостями – з іншого. Це послужило основою для розвитку одного з напрямків фізики неруйнівного контролю – магнітного структурного аналізу сталей і сплавів, який розвивається на стику двох наук: фізики магнетичних явищ і фізичного матеріалознавства. При цьому не всі магнітні властивості однаково чутливі до зміни структурного стану і фазового складу матеріалів. Крива намагнічування, форма і площа петлі магнітного гістерезису, а також основні параметри, які їх описують (зокрема, коерцитивна сила H_c), відносяться до структурно-чутливих характеристик матеріалів. Теорія магнетизму не завжди може передбачити кількісний зв'язок між намагніченими параметрами і структурним станом матеріалів, проте її можна

успішно використовувати для якісного аналізу закономірностей його зміни. Серед головних причин магнітного гістерезису – затримка росту зародків зворотної магнітної фази і незворотні зміщення доменних меж між різними магнітними фазами внаслідок їх взаємодії з неоднорідностями матеріалу і різного роду дефектами кристалічної будови феромагнетика. У першу чергу це пов'язано з впливом меж зерен, виділень вторинної фази з кристалічною ґраткою, відмінною від матриці (наприклад, карбідів у сталях), локальних зон зі сегрегаціями легувальних елементів або значних внутрішніх напружень II і III роду (наприклад, пов'язаних з дефектами типу дислокацій чи деформаціями внаслідок фазових перетворень), а також пор, тріщин тощо.

Основна відмінність від інших методів неруйнівного контролю полягає в тому, що величина коерцитивної сили металу безперервно і помітно, в рази зростає від початкового значення, поки метал проходить стадії від стану поставки до його кінцевого стану – руйнування. Початкове і кінцеве значення коерцитивної сили у кожній марки металу – це свої характерні константи. Кінцеве значення при цьому не залежить від того, скільки і які експлуатаційні фактори призвели метал до руйнування. Ці дві величини коерцитивної сили – в початковому стані (поставки) і в стані передруйнування – такі ж значущі параметри для кожної марки сталі, як межа міцності і межа текучості. Вони легко вимірюються практично. Різниця між цими двома значеннями коерцитивної сили (початковим і кінцевим) тотожна експлуатаційному ресурсу металу.

Коерцитивна сила – чисельно дорівнює напруженості магнітного поля, необхідного для повного розмагнічування зразка, попередньо намагніченого до насичення, тобто напруженості поля, при якому індукція або намагніченість зразка з феромагнітного сплаву падають до нуля (рис. 2).

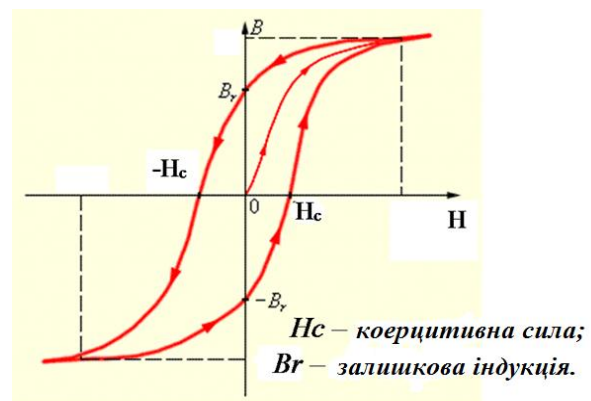


Рис. 2. Петля гістерезису із зазначеною коерцитивною силою.

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з уявленнями енергетичної теорії міцності, кожен матеріал характеризується своїм значенням питомої енергії руйнування. При цьому вважається, що питома енергія руйнування не залежить від способу підведення енергії. Для оцінки залишкового ресурсу необхідно знати дві величини: граничне значення енергії руйнування для даного матеріалу і поточне значення поглиненої енергії.

Розглянемо це положення з точки зору коерцитивної сили. Встановлено, що для ряду конструкційних сталей, що відносяться до класу таких, які згодом втрачають міцність, зі збільшенням енергії, витраченої на накопичення дефектів і пошкоджень, одночасно зростає і коерцитивна сила, яка є енергетичною характеристикою.

Роботи останніх років в області магнітного контролю напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу металоконструкцій різних об'єктів дозволили встановити тісний кореляційний зв'язок (коефіцієнт кореляції $> 0,9$) залежно від зміни коерцитивної сили H_c з механічними властивостями конструкційних сталей (вуглецевих Ст3, Ст20, Ст65, малолегованих 09Г2С, 10ХСНД, 17ПС та ін.), з навантаженістю конструкцій і накопиченням ними пошкоджень. Це пояснюється єдністю природи намагнічування металу, упругопластичній деформації, накопичення ушкоджень і зростання коерцитивної сили.

Рахували, що конструкція із сталі типу 30ХГСН2А не пластична та не має зон для накопичення ушкоджень. Але мікрофрактографічні дослідження стійки, що зруйнувалась при експлуатації, показали, що в зоні початку втомного руйнування на поверхні деталі має місце дефектний структурно змінений шар (окислений і частково

безвуглецевий) глибиною 30...100 мкм, що утворився в умовах високотемпературного нагріву в процесі виготовлення деталі. В межах цього шару присутня сітка мікротріщин по границі зерен матеріалу. Механічні властивості матеріалу шасі, що характеризують пластичність та ударну вязкість, мають розкид і неоднорідність при достатньо високому рівні міцності.

Запас енергії, що витрачається на накопичення пошкоджень і руйнувань, і відповідна величина коерцитивної сили H_c приблизно однакові для досліджених марок конструкційних сталей як при статичному, так і при змінному, циклічному (втомному) навантаженні. Цей факт є експериментальним підтвердженням енергетичної теорії руйнування, що дозволяє визначити базові параметри для контролю за станом металу магнітним методом за величиною коерцитивної сили. Залежно від стану сталі розрізняють:

H_{c0} – початкове значення коерцитивної сили;

H_{c0c} – мінімальне для кожної марки сталі;

H_{cT} – значення коерцитивної сили, що відповідає рівню внутрішньої напруги, рівні границі текучості сталі;

H_{cB} – значення сили, відповідне досягненню межі статичної міцності сталі;

$H_{cB\text{втом}}$ – значення сили, відповідне досягненню межі втомної міцності.

Величини коерцитивної сили для деяких марок сталей в різних станах наведені в таблиці (для сталі типу 30ХГСН2А встановлено експериментально).

Таблиця

Величини коерцитивної сили для деяких марок сталі

Марка сталі	Коерцитивна сила, А/см			
	H_{c0}	H_{cT}	H_{cB}	$H_{cB\text{втом}}$
Ст3	2,0	5,3	6,0	5,8
09Г2С	4,0	7,8	9,5	9,5
10ХСНД	5,0	11,5	14,5	13,5
30ХГСН2А	17,0	19,5	36,0	32,5
ДС	5,0...6,0	8,0...8,5	10,0...11,0	9,5...10,5

Джерело: [9, с. 216...219].

У першому наближенні залишковий ресурс може бути оцінений відношенням H_c/H_{cB} . При наближенні цього відношення до одиниці залишковий ресурс зменшується до нуля. Більш точно оцінити залишковий ресурс можливо за

номограмами для відповідної марки сталі, наведеними в [5, с. 1...22; 6, с. 1...4; 10, с. 1...5].

Проте, дослідження також проведено на стояках шасі літака типу Су-27. З попередніх досліджень [8, с. 126] виявлені основні критичні зони цього стояка, в яких з найбільшою імовірністю

буде розвиватись тріщина. В процесі ремонту стояків шасі та продовження (збільшення) ресурсних показників виконано замір коерцитивної сили в зазначених критичних зонах. Схематично ці зони із значеннями коерцитивної сили в них зображені на рисунку 3.

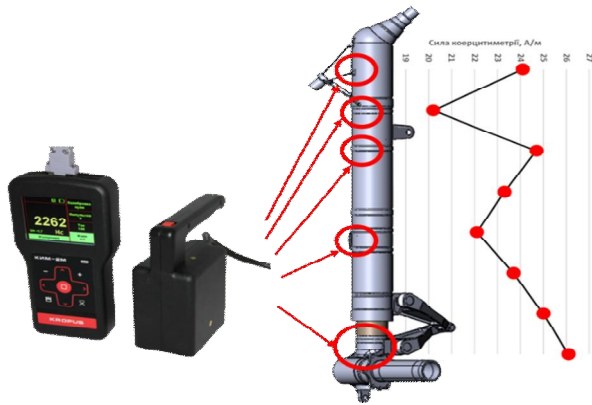


Рис. 3. Виміри коерцитивної сили на стояку шасі літака типу Су-27.

Джерело: розроблено авторами.

При наявності ретроспективних даних про величину коерцитивної сили і відповідного напрацювання кількості циклів навантаження між вимірами залишковий ресурс розраховується аналітично за такою методикою.

Залежність, що зв'язує поточне значення коерцитивної сили H_c з її вихідним значенням і відповідним числом циклів навантаження N , апроксимується рівнянням

$$H_c = H_c^0 + b \ln N, \quad (1)$$

де b – коефіцієнт, який визначає швидкість росту H_c .

Виразовуючи з останнього виразу N , отримаємо

$$N = C_1 \exp(C_2 H_2) \quad (2)$$

де C_1 і C_2 – постійні, які визначаються з рішення системи трьох рівнянь з трьома невідомими (N_0 , C_1 і C_2), отриманих після підстановки результатів трьох вимірювань коерцитивної сили H_c із інтервалами ΔN_2 і ΔN_3 ; (N_0 , H_{C1}), ($N_0 + \Delta N_2$, H_{C2}), ($N_0 + \Delta N_3$, H_{C3});

N_0 – число циклів навантаження, відповідне першому вимірюванню коерцитивної сили H_{C1} .

Гранично допустиму кількість циклів навантаження отримують з рівняння:

$$N_{доп} = C_1 \exp(C_2 H_c^0). \quad (3)$$

Залишковий ресурс в числах циклів навантаження визначають з виразу

$$N_{зал} = N_{доп} - N. \quad (4)$$

Результати вимірювання числа циклів коерцитивної сили можуть бути використані також для перевірки відповідності фактичного напруженого стану за умовою міцності або стійкості, що встановлені відповідними нормативними документами. Перевірку виконують за умовою

$$N_c \leq H_c^{kp} \quad (5)$$

де H_c^{kp} – критична величина коерцитивної сили, яка відповідна допустимій напрузі і визначається із номограми або за табличними даними.

Висновки

Таким чином, застосування методу неруйнівного контролю з використанням явища коерцитивної сили для дослідження технічного стану силових елементів конструкції стояків шасі забезпечує:

дослідження технічного стану доступних деталей конструкції стояка і елементів конструкції з обмеженим доступом;

визначення місць, в яких починають зароджуватись дефекти (в глибині поверхневого шару), оцінювання рівня їх небезпечності, прогнозування руйнівного навантаження і залишкового ресурсу матеріалу;

підвищення ймовірності виявлення особливо небезпечних дефектів шляхом застосування в процесі діагностування засобів неруйнівного контролю, заснованих на явищі коерцитивної сили.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2008. № 2, – С. 5-19.
2. Румянцев С.В., Добромислов В.А., Борисов О.И., Азаоров Н.Т. Неразрушающие методы контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 1976. – 335 с.
3. Белокур И.П. Дефектоскопия и неразрушающий контроль. К.: Вища школа, 1990. – 207 с.
4. Осташ О.П. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідковий посібник: в 15 т. 2015. Т. № 15. Львів: СПОЛОМ, – 312 с.
5. ГОСТ 30415-96. Сталь – неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. [Чинний від 1999-01-01]. Офиц. изд. 2005. – 22 с.
6. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением, при проведении экспертизы промышленной безопасности. Харьков: "КРАН"-009-99 Р.И. 2012. – 4 с.
7. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности). "КРАН"-007-97/02 Р.И. 2012. – 5 с.

8. Бойко А.П., Манулін Ю.О., Стрела М.С. Аналіз напружено-деформованого стану основного стояка шасі літаків типу Су-27 при визначенні можливості подальшої експлуатації за межами призначених показників. Зб. наук. праць ДНДІА, вип. №12(19), 2016. – С. 160–165.

9. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа. 2006. – 279 с.

Надійшла до редколегії 02.11.2022

Схвалена до друку 7.12.2022

Відомості про авторів:

Information about the authors:

Добриденко Олег Миколайович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2029-1488>

Oleg Dobridenko

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2029-1488>

Карпенко Олександр Валерійович

начальник науково-дослідної лабораторії
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9507-3573>

Oleksandr Karpenko

Head of Research Laboratory
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9507-3573>

Стрела Максим Скергійович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4055-1600>

Maxim Strela

Researcher Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4055-1600>

**STUDY OF THE POSSIBILITY OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT
LANDING GEAR RACKS TYPE SU-27 USING NEW MEANS OF NK, BASED ON THE
MEASUREMENT OF CORRECTIVE FORCE**

O. Dobridenko, O. Karpenko, M. Strela

The article presents the views of the authors regarding the problem of controlling the exhaustion of the resource of aircraft power elements by modern means of non-destructive control based on the phenomenon of corrective force and the possibility of predicting their ultimate (pre-destructive) state.

Since the beginning of full-scale hostilities on the territory of Ukraine, caused by the full-scale invasion of the Russian Federation, the aviation of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine has been effectively performing combat tasks as assigned. However, this led to a significant increase in the intensity of use of aviation equipment and an increased depletion of the resource indicators of all units, especially those that differ from the airframe resource. Since the rearmament has not yet been completed, research and work is being carried out to extend the assigned resource indicators of individual units and component products. In the article, the main attention is paid to the chassis riser of the Su-27 type aircraft, as the most critical from the point of view of flight safety and resource residues.

The article also analyzes the theoretical foundations of such a non-destructive testing tool as the phenomenon of coercive force and gives the advantages of this tool over others, especially since this method allows you to estimate the residual resource and monitor the limit state of the material.

The results of tests of the method of non-destructive testing based on the phenomenon of coercive force on the responsible (from the point of view of flight safety) structural element of the aircraft - the main landing gear of the Su-27 type aircraft are presented. Compared experimental data with tabular data.

At the end, the algorithm for measuring the coercive force on the object under study is given.

The use of the specified method makes it possible to more objectively solve the issue of determining the technical condition of individual power elements of different types of aircraft, and also provides an opportunity to more reasonably make decisions about the extension of resource indicators assigned to these elements by the developer.

Keywords: resource, chassis riser, power element, Su-27 type aircraft, coercive force, method of nondestructive testing, technical condition.