

Деформація та руйнування стрижневої системи пневматичного електромагнітного клапана при циклічному ударному навантаженні

Ю. М. Рикуніч^а, О. Є. Ситніков^а, В. В. Астанін^б, Є. І. Барилюк^б,
Г. Й. Зайончковський^б

^а ПАТ “Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування”, Київ, Україна

^б Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Представлено результати експериментальних досліджень процесів деформації та руйнування стрижневої системи малогабаритних пневматичних клапанів із двопозиційним електромагнітним приводом під дією експлуатаційних циклічних ударних навантажень. Для різних конструкційних матеріалів отримано експериментальні залежності числа циклів спрацьовування клапана до руйнування його стрижневого елемента від величини питомої кінетичної енергії рухомої частини клапана.

Ключові слова: пневматичний клапан, електромагнітний привід, шток, стрижневий елемент, руйнування, втома, циклічні ударні навантаження, питома кінетична енергія, рухома частина клапана.

Вступ. Пневматичні клапани з двопозиційним електромагнітним приводом (рис. 1) широко використовуються в космічній техніці завдяки низькому рівню енергії, яка необхідна для їх тривалої експлуатації [1]. Однією з особливостей роботи таких клапанів є циклічність спрацьовування при ударному характері взаємодії їх рухомих і нерухомих елементів [2].

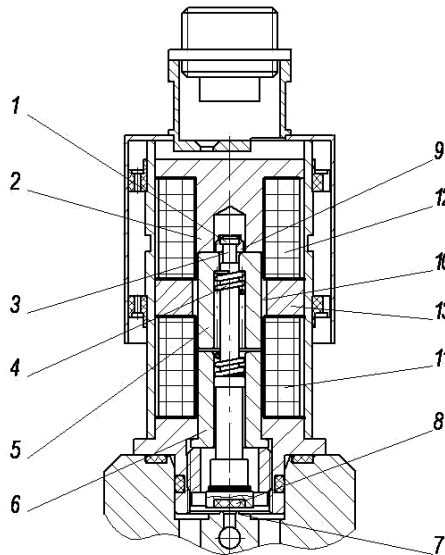


Рис. 1. Конструктивна схема клапана з двопозиційним електромагнітним приводом: 1 – головка штока; 2 – корпус електромагніта (верхній стоп); 3 – шийка штока; 4 – буферна пружина; 5 – повзун (якір); 6 – нижній стоп; 7 – сідло; 8 – золотник; 9 – стопорна шайба; 10 – розподільна трубка; 11 – обмотка закриття клапана; 12 – обмотка відкриття клапана; 13 – постійний магніт.

У процесі роботи клапана частина його елементів знаходиться під дією інтенсивних ударних навантажень. Це призводить до того, що в зоні контакту деталі клапана зазнають динамічних навантажень великої інтенсивності, внаслідок чого в матеріалі деталей виникають значні динамічні напруження. Такий характер навантаження зумовлює розвиток різних процесів утомленості в елементах конструкції клапана, що значно зменшує його ресурс. Характерними відмовами електромагнітних клапанів (ЕМК) в експлуатації є руйнування від втоми стрижневих елементів – штоків, що реалізують кінематичний зв'язок електромагнітного приводу з виконавчим механізмом клапана [3–5].

Питанням визначення і прогнозування ресурсу пневматичних клапанів із двопозиційним електромагнітним приводом деякий час не приділялось достатньої уваги. Це можна пояснити тим, що такі клапани в основному застосовувалися у виробках космічної техніки з невеликим “життєвим” циклом. Проте, розширення застосування клапанів із двопозиційним електромагнітним приводом у виробках авіаційної техніки зі значним ресурсом, а також у виробках космічної техніки багаторазового використання свідчить про актуальність цієї задачі.

Проблеми міцності конструкційних матеріалів під час ударного навантаження присвячено роботи [6–10], проте в більшості з них розглядалися питання лише одноразового ударного навантаження, а в окремих роботах, в яких досліджувалося втомне руйнування, пропонувалося використовувати енергетичні критерії для оцінки міцності конструкційних матеріалів при такому навантаженні [11–15].

У даній роботі зроблено спробу науково обґрунтувати рекомендації щодо підвищення ресурсу пневматичних клапанів із двопозиційним електромагнітним приводом. Для цього було проведено спеціальні експериментальні дослідження втомної міцності стрижневих елементів (штоків) пневматичних клапанів із двопозиційним електромагнітним приводом, виготовлених із різних конструкційних матеріалів.

Результати ресурсних випробувань ЕМК. Із метою проведення випробувань ЕМК було спроектовано дві експериментальні установки: для ресурсних випробувань пневматичних клапанів (рис. 2) і для визначення параметрів переміщення рухомої частини клапана з двопозиційним електромагнітним приводом (рис. 3).

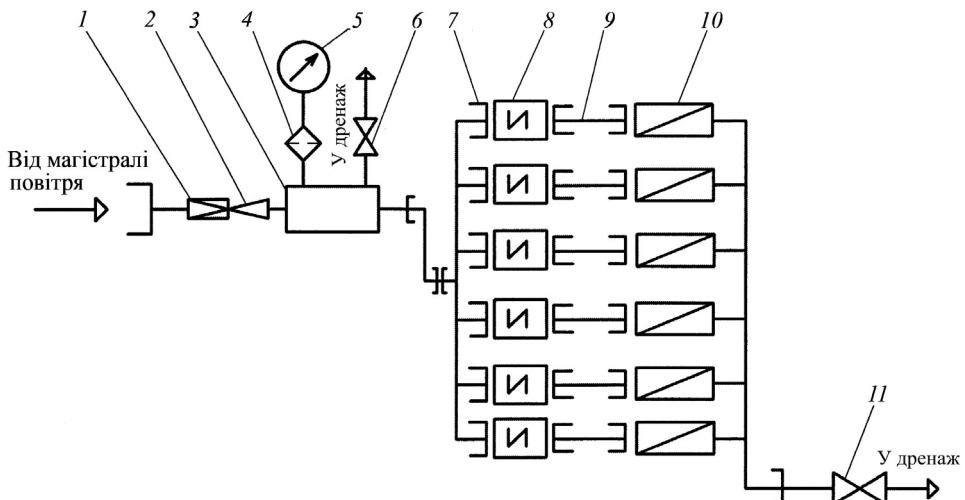


Рис. 2. Принципова пневматична схема стенової установки для проведення ресурсних випробувань ЕМК: 1 – редуктор газовий; 2 – перехідник; 3 – смінь об'ємом $V = 2-5$ л; 4 – фільтр; 5 – манометр; 6 – вентиль; 7 – багатомісне пристосування; 8 – досліджуваний виріб; 9 – трубопровід; 10 – пристосування для візуального контролю спрацьовування; 11 – дренажний вентиль.

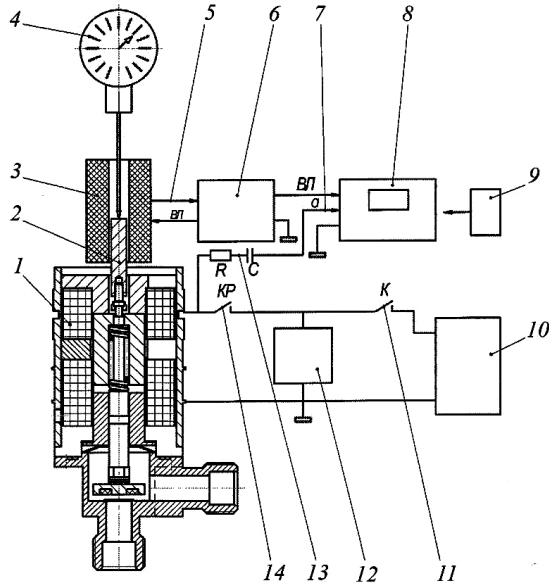


Рис. 3. Схема установки для реєстрації параметрів переміщення рухомої частини електромагнітного приводу ЕМК: 1 – електромагнітний клапан; 2 – залізний сердечник; 3 – індуктивний датчик переміщення; 4 – індикатор переміщення (для тарування датчика); 5 – вимірвальна лінія; 6 – тензометрична станція; 7 – синхронізуючий імпульс для запуску осцилографа; 8 – електронний осцилограф; 9 – цифровий фотоапарат; 10 – джерело стабілізованої напруги; 11 – контакт включення ЕМК; 12 – реле проміжне; 13 – диференціюючий ланцюг для одержання синхронізуючого імпульсу; 14 – контакт включення проміжного реле.

Ресурсні випробування проводилися до повної відмови ЕМК. Штоки клапанів виготовлялися зі сталі 08X18N10T, алюмінієвого сплаву АК4-1 та титанового сплаву ВТ1-0.

У процесі випробувань періодично через кожні 20 тис. цикл спрацьовування, що дорівнювало одному блок-циклу, контролювалися основні функціональні параметри клапана (напруга U_B і час t_B відкриття клапана, напруга U_3 і час t_3 його закриття), проводився мікрообмір деталей клапана і визначався хід золотника $x_{зол}$.

Аналіз результатів випробувань показав, що при спрацьовуванні клапана з двопозиційним магнітним приводом відмічаються наступні характерні процеси.

При відкритті клапана (переміщення рухомої його частини від сідла) має місце: ударний циклічний контакт повзуна і шайби (рис. 1), що призводить до викривлення внаслідок утоми торцевих поверхонь контакту (рис. 4,а) і зміни на величину c'' відносного положення стопорної шайби і повзуна (рис. 4,б);

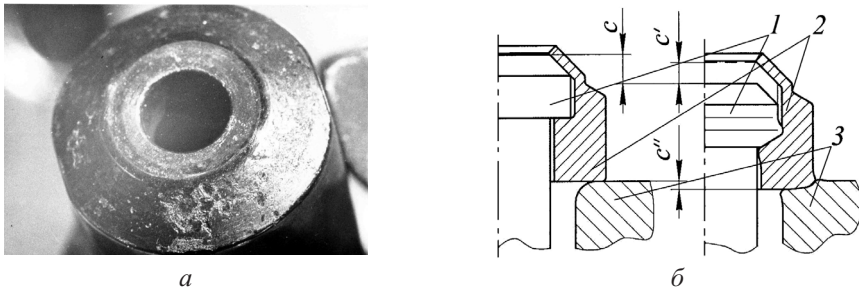


Рис. 4. Пошкоджена верхня торцева поверхня повзуна зі сталі 16X із хімікелевим покриттям – а і зміна взаємного положення стопорної шайби (2), голівки штока (1) і повзуна (3) – б.

циклічне прикладення розподіленого ударного зусилля, нормального до площини контакту шайби і головки штока, що зумовлює зміну форми голівки штока і стопорної шайби (рис. 4,б) внаслідок накопичення однобічних пластичних деформацій, зміну на величину c' їх взаємного положення та накопичення мікропошкоджень у матеріалі шийки штока;

ударний циклічний контакт повзуна і верхнього стопа (рис. 1), що призводить до деградації макрорельєфу поверхонь їх контакту.

При закритті клапана (переміщення рухомої його частини до сідла) має місце (рис. 1):

ударний циклічний контакт золотника і сідла (рис. 1), що призводить до деградації макрорельєфу поверхонь ущільнення на золотнику;

ударний циклічний контакт повзуна і нижнього стопа (рис. 1), що зумовлює відносно незначну деформацію торцевих поверхонь цих деталей.

Окрім того, в процесі зворотно-поступального руху рухомої частини клапана має місце процес зношення циліндричних поверхонь повзуна і розподільної трубки та поверхні штока через тертя по буферній пружині (рис. 1). Це зумовлює поступову деградацію мікрорельєфу поверхонь деталей і збільшення сил тертя.

Накопичення мікрореформацій у матеріалі штока призводить після певного спрацьовування клапана до руйнування шийки штока і повної відмови ЕМК.

Таким чином, у результаті проведених досліджень виявлено, що в процесі відпрацювання ресурсу відмічається пластична деформація деталей рухомої частини клапана. Із рис. 4,б видно, що з напрацюванням суттєво змінюються положення повзуна відносно стопорної шайби і штока внаслідок виробітку кільцевої канавки на торцевій поверхні повзуна (c'') та пластична деформація голівки штока і стопорної шайби на величину c' , що призводить до зменшення ходу золотника на величину:

$$\Delta x_{\text{зол}} = c = c' + c'',$$

а також збільшується довжина камери під буферну пружину (рис. 1), що зумовлює зменшення початкового і робочого зусилля останньої.

У результаті виявлених змін технічного стану деталей і вузлів ЕМК у процесі відпрацювання ресурсу відбуваються відповідні зміни вихідних параметрів клапанів.

Установлено, що для ЕМК із двопозиційним електромагнітним приводом при відпрацюванні ресурсу відмічається зменшення напруги $U_{\text{в}}$ і часу $t_{\text{в}}$ відкриття клапана, збільшення напруги $U_{\text{з}}$ і часу $t_{\text{з}}$ його закриття, а також суттєве зменшення ходу $x_{\text{зол}}$ золотника клапана (рис. 5) при зміні положення повзуна відносно шайби і штока внаслідок виробітку кільцевої канавки на торцевій поверхні повзуна та пластичної деформації деталей клапана, в першу чергу шийки штока. При зменшенні величини $x_{\text{зол}}$ до критичної (0,1 мм) має місце відмова клапана, оскільки він перестає відкриватися.

Аналіз пошкоджень ЕМК. Під час спрацьовування ЕМК відбувається контактна взаємодія деталей рухомої частини електромагнітного приводу з нерухомими елементами конструкції клапана. Така контактна взаємодія супроводжується змінами структурно-напруженого стану матеріалу деталей клапана, фазового складу в мікрооб'ємах контактуючих деталей, утворенням нових хімічних сполук у місцях контакту, накопиченням дефектів у процесі деформації, створенням особливого шару на поверхні деталі.

Величина навантаження і швидкість його прикладання, тобто енергія співудару, визначають об'єм накопичуваних тілом пружно-пластичних деформацій і властивості утвореної структури. Частина цього об'єму, активованого деформацією, зазнає фізико-хімічного перетворення.

У процесі ресурсних випробувань ЕМК досліджувався характер поверхневих пошкоджень таких деталей клапанів після ударних навантажень:

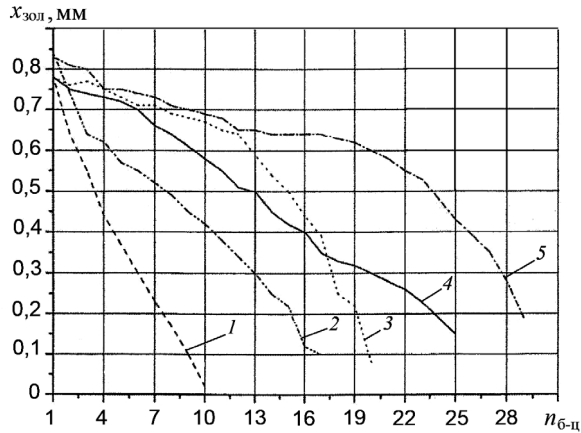


Рис. 5. Залежність ходу золотника від кількості блок-циклів напрацювання (один блок-цикл дорівнює 20000 цикл) для п'яти нових клапанів зі сталі 08X18H10T у штатному виконанні: 1–5 – номер клапана.

повзун у зонах його ударного контакту зі стопорною шайбою і верхнім стопом (матеріал повзуна – сталь 16X із хімікелевим покриттям, напрацювання – 148000 цикл спрацьовування) – рис. 1;

поверхня нижнього стопа після багаторазового ударного контакту з повзуном (матеріал нижнього стопа – сталь 16X із хімікелевим покриттям, напрацювання – 560000 цикл спрацьовування) – рис. 1;

шток у зоні злому від втоми по шийці (матеріал штока – сталь 08X18H10T, число циклів спрацьовування до руйнування – 80000) – рис. 1.

Стан поверхонь деталей досліджувався з використанням растрового електронного мікроскопа JSM-840 фірми JEOL.

Під час відпрацювання ресурсу в поверхневих шарах деталей, що досліджувались, відбувалися такі зміни.

На контактуючих поверхнях як повзуна (рис. 6), так і нижнього стопа (рис. 7) спостерігались зони зношування кільцевої форми зі слідами незначного зміщення.

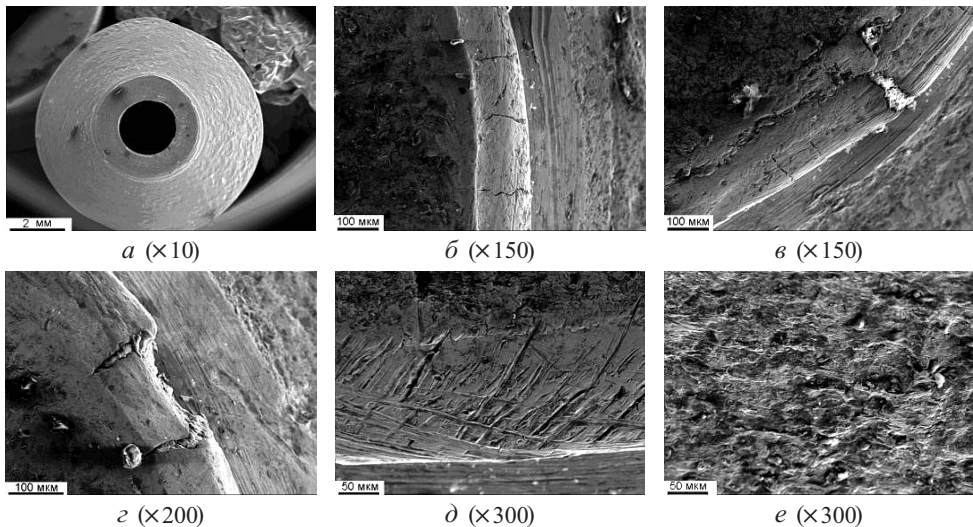


Рис. 6. Характерні пошкодження поверхні повзуна (матеріал – сталь 16X із хімікелевим покриттям) в зонах його ударного контакту зі стопорною шайбою і верхнім стопом.

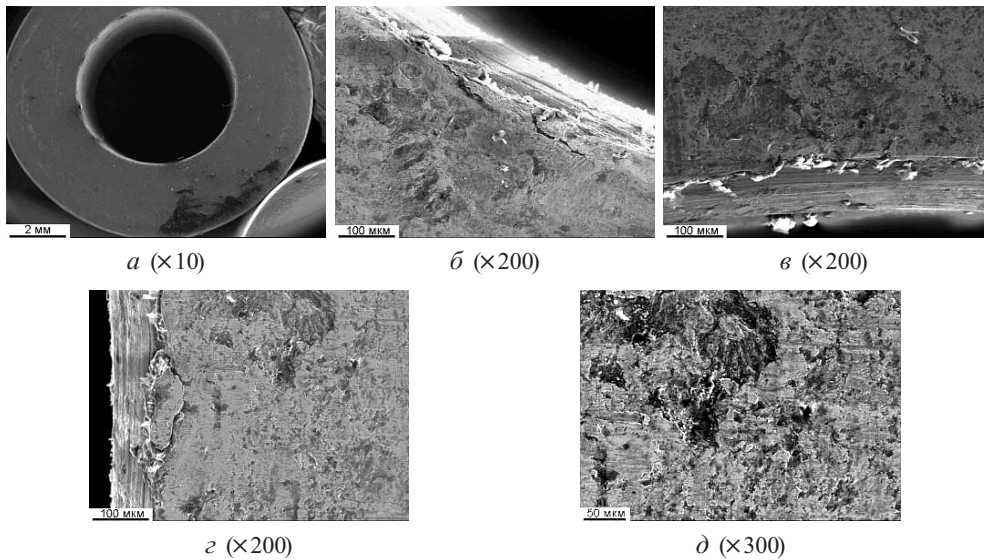


Рис. 7. Характерні пошкодження поверхні нижнього стопа (матеріал – сталь 16Х із хімікелевим покриттям) в зоні його ударного контакту з повзуном.

Місця зношування являють собою ямки (рис. 6,е і 7,д), подряпини (рис. 6,д), потертості (рис. 6,в,з), смуги проковзування (рис. 6,б), кількість та ширина яких збільшувались зі зростанням напруження.

Утворення смуг проковзування зумовлено деяким відносним зміщенням контактуючих поверхонь у момент дії ударних навантажень у результаті їх деформації.

На поверхні нижнього стопа крім дефектів, аналогічних представленим на рис. 6, мають місце сліди викришування – як точкові (7,в), так і злиті в порожнини (рис. 7,д). На обох поверхнях деталей чітко видно сліди зминання металу, напливи (рис. 6,з і 7,з), сформовані і розкриті тріщини в радіальному (рис. 6,б,з) і периметричному напрямку (рис. 7,б,з).

На контактних поверхнях обох деталей виявлено абразивні частинки (рис. 6,в,з,е і 7,б,в), які виникли в результаті зношування і викришування хімікелевого покриття за ударної циклічної дії.

Виявлені морфологічні особливості поверхні контакту на дослідних зразках деталей клапана свідчать про те, що процес зношування є наслідком розвитку двох механізмів: ударно-утомного та ударно-абразивного, причому обидва розвиваються одночасно.

На першій стадії ударного навантаження має місце згладжування шорсткості, поверхневий наклеп і зміцнювання поверхні та підповерхневих частин металу. Потім розпочинається руйнування хімікелевого покриття, частинки якого при викришуванні виконують роль абразиву та проникають у поверхню зношування. Це створює сприятливі умови для зародження в металі крихких тріщин, які легко поєднуються з такими ж тріщинами, утвореними при проникненні сусідніх зерен абразиву. У цих умовах, безсумнівно, негативну роль відіграє наявність у структурі поверхневого шару (покриття) твердих крихких фаз (нітриди), які полегшують зародження крихких тріщин, їх розвиток, наступне злиття та призводять до зниження зносостійкості металу при ударі. У результаті ударно-втомно-абразивного зношування утворюються продукти зносу. Відокремлюючись, вони переносяться на сусідні ділянки контакту і на периферійні ділянки деталей, внаслідок чого має місце крайовий ефект інтенсивного зношування та руйнування інших деталей, які контактують із досліджуваними.

Вивчення характеру руйнування штока показало, що процесу руйнування передувала значна пластична деформація та формозміни головки штока. Дослідження поверхні злому виявили його чітку макроскопічну неоднорідність (рис. 8,а), а саме: наявність зон, відповідних поступовому розвитку тріщини і так званому “миттевому” долому. На поверхні злому відмічається хвилеподібний рельєф, який, як правило, утворюється під дією дотичних напружень по площинах ковзання, що з’явилися внаслідок попередньої деформації, а розмір зони відповідає області локальної деформації у вістрі тріщини, що виникла при навантаженні перед зрушенням тріщини. Неоднорідність будови злому зумовлена також тим, що процес руйнування в загальному випадку має дискретний (стрибоподібний) характер, причому початок кожного наступного “стрибка” частково повторює попередній.

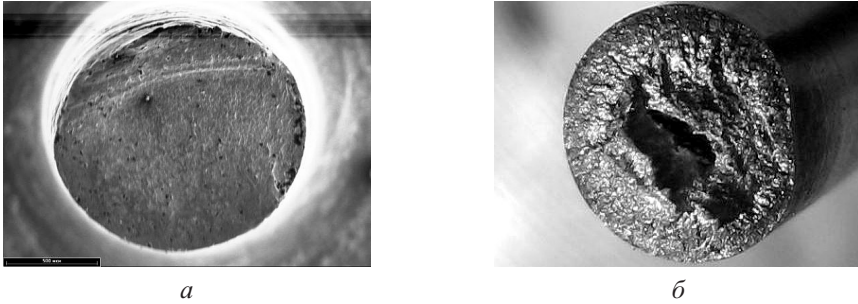


Рис. 8. Поверхні злому шийки штока: а – штатний зразок із матеріалу 08X18H10T; б – макетний зразок із матеріалу VT1-0.

Стрибоподібність процесу злому підтверджується хвилеподібним характером зміни шорсткості вздовж злому. На рис. 8,б показано поверхню втомного руйнування макету стрижневого елемента клапана зі сплаву VT1-0. Руйнування зразка відбулося в результаті об’єднання мікропор у макропорожнину.

Виникнення нерівностей на поверхні руйнування є наслідком утворення злому шляхом злиття мікротріщин та поширення тріщин по траєкторії, зумовленої напрямком діючих напружень, орієнтуванням елементів структури, мікроструктурною неоднорідністю тощо.

У результаті удару в поверхневих шарах повзуна та нижнього стопа відбулися структурні перетворення, які поширювались на глибину до 300 мкм і визначались змінами мікротвердості (рис. 9).

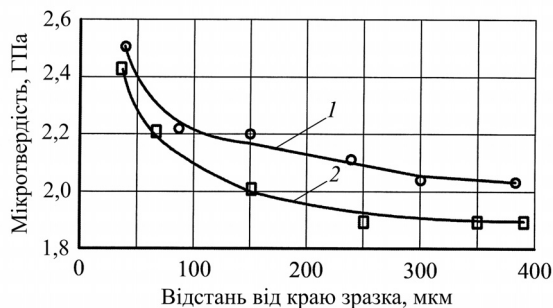


Рис. 9. Мікротвердість поперечних зразків із матеріалу 16X із хімікелевим покриттям після циклічних випробувань: 1 – для повзуна; 2 – для нижнього стопа.

У процесі ударного зношування поверхневий шар зазнавали значної пластичної деформації, що призводило до наклепу і підвищенню мікротвердості. Найбільша

мікротвердість мала місце поблизу поверхневого шару, на глибині 50–70 мкм вона різко знижувалась і залишалась практично постійною для даної структури. Зміцнювання поверхневих шарів склало приблизно 25...30%.

Таким чином, проведені металографічні та фрактографічні дослідження деталей ЕМК після ресурсних випробувань показали наступне:

морфологічні особливості поверхні досліджених деталей клапана (повзун, нижній стоп, шток) свідчать про те, що їх зношення є наслідком розвитку двох деградаційних процесів: ударно-утомного руйнування і ударно-абразивного зношення;

руйнуванню шийки штока передують комплекс деградаційних процесів, що відбуваються в матеріалі в період відпрацювання ресурсу: зародження і накопичення мікрodefektів; злиття мікропор у мікротріщини; утворення магістральних тріщин або макropopожнин.

Залежність руйнування ЕМК від кінетичної енергії їх рухомої частини.

Розглядаючи процес накопичення пошкоджень у стрижневих елементах ЕМК від утомленості з фізичної точки зору, можна констатувати, що швидкість негативних змін в елементах клапана пов'язана з величиною кінетичної енергії переміщення контактуючих деталей і вузлів. Під час спрацьовування кінетична енергія рухомої частини електромагнітного приводу клапана переходить у потенціальну енергію деформації його стрижневого елемента – штока. Накопичення таких мікрodeformaцій у конструкційному матеріалі штока призводить після певної кількості спрацьовувань n_p до руйнування шийки штока і відмови ЕМК. Можна визначити (теоретично або експериментально) в залежності від кількості спрацьовувань певний критичний рівень питомої кінетичної енергії рухомої частини клапана $E_{к.кр}^p$, яка переходить у потенціальну енергію деформації конструкційного матеріалу штока, що призводить до руйнування його шийки. Таким чином, умовою неруйнування стрижневих елементів ЕМК під час експлуатації буде нерівність

$$E_k^p < E_{к.кр}^p.$$

Тут E_k^p – питома кінетична енергія рухомої частини електромагнітного приводу клапана, яка визначається так:

$$E_k^p = \frac{mV_{сep}^2}{2A_{min}},$$

де m – маса рухомої частини електромагнітного приводу клапана; $V_{сep}$ – середня швидкість переміщення рухомої частини електромагнітного приводу; A_{min} – мінімальна площа поперечного перерізу стрижневого елемента.

Середня швидкість переміщення рухомої частини електромагнітного приводу клапана $V_{сep}$ у першому, достатньому для інженерних розрахунків наближенні, може бути визначена як

$$V_{сep} \approx h/t,$$

де h – переміщення стрижневого елемента (штока) клапана під час спрацьовування; t – час спрацьовування клапана.

На рис. 10 наведено експериментально отримані залежності числа циклів напруження ЕМК до руйнування їх штоків, виготовлених із різних конструкційних матеріалів, від рівня питомої кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана. Використовуючи отримані залежності для кожного рівня питомої кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана E_{ki}^p , можна

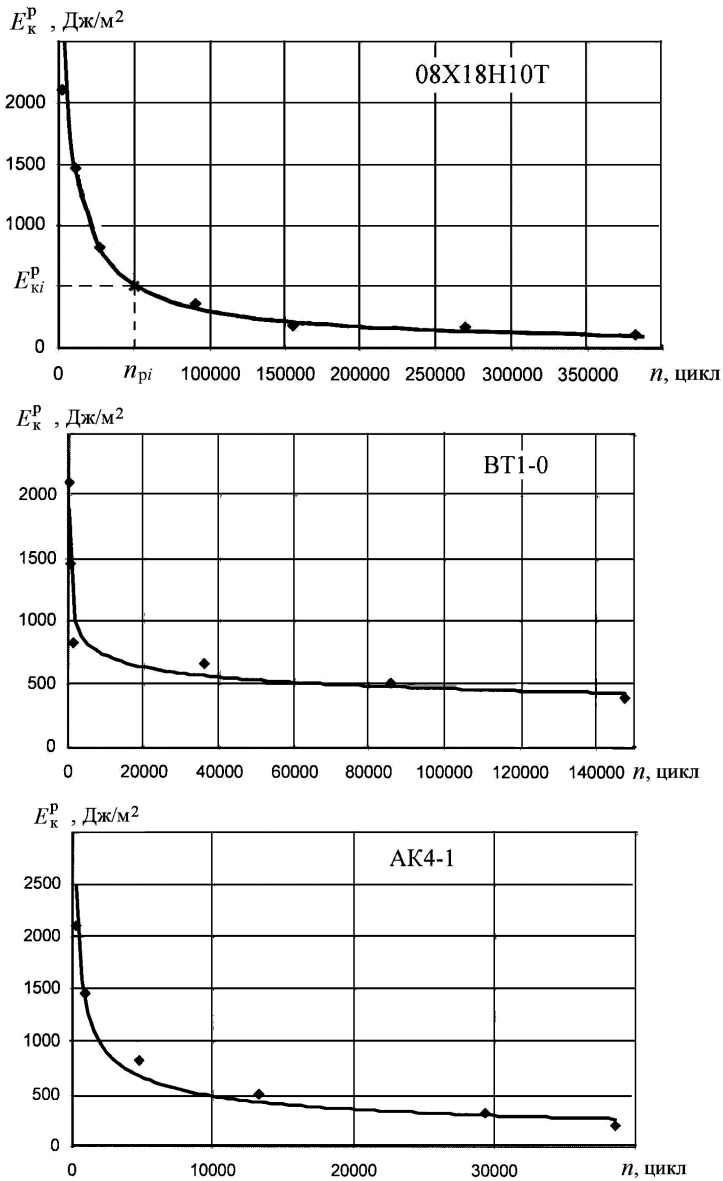


Рис. 10. Залежність числа циклів напрацювання ЕМК до руйнування їх штоків від рівня питомої кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана для різних конструкційних матеріалів.

визначити граничну кількість спрацювань n_{ri} клапана, перевищення якої може привести до руйнування його штока від втоми.

На кожному рівні E_{ki}^P значення n_{ri} мають певне розсіювання, що визначається середнім квадратичним відхиленням S_{n_p} .

Для запобігання руйнуванню стрижневих елементів клапанів під час відпрацювання ресурсу необхідно, щоб робоча точка, яка визначається співвідношенням питомої кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана E_{ki}^P до зумовленого за технічними умовами (ТУ) необхідного числа циклів спрацювань

клапана у процесі експлуатації $[n]^{TY}$, знаходилася нижче залежностей, наведених на рис. 10. Збільшення ресурсу стрижневих елементів клапана може бути досягнуто як за рахунок зменшення кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана, так і за рахунок удосконалення його конструкції.

Оскільки найслабкішою ланкою ЕМК із двопозиційним електромагнітним приводом є вузол з'єднання повзуна (якоря) зі штоком, було розроблено пропозиції щодо удосконалення цього вузла шляхом введення у кінематичний ланцюг передачі зусилля від електромагніту до золотника демпфірувального елемента для розсіювання частини кінетичної енергії ударного імпульсу. Як демпфірувальний елемент використовували плоску прокладку з гуми ППР-1338 товщиною 2 мм (рис. 11), що привело до незначного зниження швидкодії клапана: час відкриття нового клапана збільшився з 32,5 до 36,3 мс, час його закриття – з 44,5 до 46,2 мс. Однак при цьому суттєво зросло напрацювання клапана до руйнування його стрижневого елемента (штока).

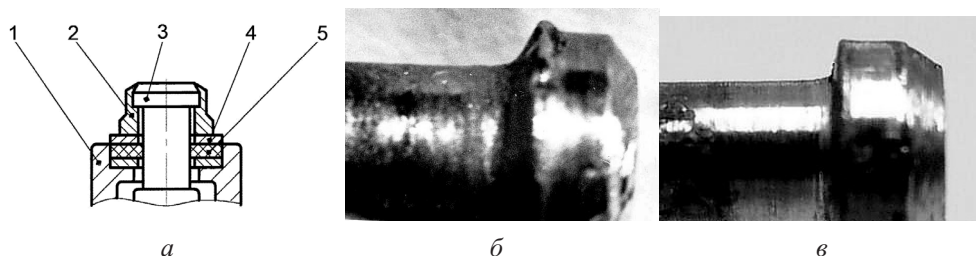


Рис. 11. Демпфер у кінематичному ланцюзі рухомої частини електромагнітного приводу клапана (1 – повзун; 2 – стопорна шайба; 3 – шток; 4 – шайба; 5 – пружний елемент із малою жорсткістю) – а та головки штоків клапана після напрацювання 20000 цикл: б – штатне виконання, в – з демпфірувальним елементом.

Під час ресурсних випробувань п'яти клапанів УФ 96414-014 у штатному виконанні руйнування їх штоків зі сплаву 08X18H10T відбувалося при напрацюванні 6400, 6500, 10000, 12000 і 20000 цикл. За тих самих умов випробовували два зразка модернізованого клапана УФ 96414-010 із демпфірувальними гумовими прокладками. Випробування було зупинено після 100000 цикл спрацьовувань. Руйнування штоків у цих клапанів не зафіксовано. За результатами дефекації елементів клапанів із демпфірувальними прокладками після відпрацювання 100000 цикл суттєвих змін технічного стану елементів рухомої частини клапанів не виявлено, не виявлено також значних формозмін головок штоків, що характерно для клапанів у штатному виконанні (рис. 11,б,в).

Висновки

1. Основними деградаційними процесами, що визначають ресурсні можливості клапанів даного типу, є накопичення пластичних деформацій в елементах стрижневої системи рухомої частини електромагнітного приводу клапана внаслідок ударних циклічних навантажень, ударно-утомного руйнування і ударно-абразивного зношування.

2. Ресурсні можливості клапана лімітуються характеристиками утомної міцності елементів стрижневої системи рухомої частини електромагнітного приводу клапана; повна відмова клапана відбувається внаслідок руйнування шийки штока від утоми.

3. Підтверджено, що напрацювання стрижневих елементів (штоків) ЕМК із двопозиційним електромагнітним приводом до утомного руйнування залежить від питомої кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана.

4. Одержано уточнені експериментальні залежності числа циклів спрацьовування клапанів до утомного руйнування їх стрижневих елементів, виконаних із різних конструкційних матеріалів, від питомої кінетичної енергії рухомої частини електромагнітного приводу клапана.

5. Із метою збільшення ресурсу ЕМК із двопозиційним електромагнітним приводом рекомендується встановлювати демпфірувальний елемент у кінематичний ланцюг передачі зусилля від електромагнітного приводу до золотника.

Резюме

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов деформации и разрушения элементов малогабаритных пневматических клапанов с двухпозиционным электромагнитным приводом под действием эксплуатационных циклических ударных нагрузок. Для разных конструкционных материалов получены экспериментальные зависимости числа циклов срабатывания клапана до разрушения его стержневого элемента от величины удельной кинетической энергии подвижной части электромагнитного привода клапана.

1. Кармугин Б. В., Кисель В. Л., Лабезник Б. В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры. – Киев: Техніка, 1980. – 296 с.
2. Хильчевский В. В., Ситников А. Е., Ананьевский В. А. Надежность трубопроводной пневмогидроаппаратуры. – М.: Машиностроение, 1989. – 208 с.
3. Ситников А. Е. Отказы электромагнитных клапанов // Вестн. НТУУ “Киевский политехнический институт”. Машиностроение. – 2002. – 2, № 42. – С. 46 – 49.
4. Рыкунич Ю. Н., Ситников А. Е., Лабунец В. Ф., Федоричко Я. Б. Исследование изменения технического состояния элементов пневмоклапанов с электромагнитным приводом // Там же. – 1, № 42. – С. 173 – 178.
5. Рыкунич Ю. Н., Ситников А. Е., Зайончковский Г. И., Лабунец В. Ф. Изменение технического состояния контактирующих деталей электромагнитных клапанов при эксплуатации // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 3 (59). – С. 46 – 52.
6. Алексеев Е. В., Соколовский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 199 с.
7. Кильчевский Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. – Киев: Наук. думка, 1976. – 319 с.
8. Долотов А. М. Исследование динамических явлений, возникающих в конических парах с упругим седлом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львов, 1981. – 16 с.
9. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. – Киев: Вища шк., 1989. – 159 с.
10. Херурберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.
11. Романов А. Н. Энергетические критерии разрушения при малоцикловом нагружении. Сообщ. 1. Энергия разрушения при малом числе циклов нагружения // Пробл. прочности. – 1974. – № 1. – С. 3 – 10.
12. Романов А. Н. Энергетические критерии разрушения при малоцикловом нагружении. Сообщ. 2. Циклический эффект Баушингера и критерии разрушения // Пробл. прочности. – 1974. – № 1. – С. 11 – 18.

13. Троценко В. Т., Фомичев В. Т. Энергетический критерий усталостного разрушения // Там же. – 1993. – № 1. – С. 3 – 10.
14. Матвеев В. В. К обоснованию энергетических критериев многоциклического усталостного разрушения металлов // Там же. – 1995. – № 5-6. – С. 18 – 28.
15. Малков В. П., Крамаров Л. И. Закономерность связи удельной энергии деформации до разрушения материалов со скоростью силового нагружения // Завод. лаб. – 1999. – № 39. – С. 57 – 61.

Поступила 18. 03. 2013