

АВІОНІКА

УДК 620.179:534.6

ББК 664.30-184.03 244.15-060.153-7823

В.П. Бабак, С.В. Ленков, І.В. Огарь,
С.Ф. Філоненко, А.В. Чиликин**ДІАГНОСТИКА ЯКОСТІ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ
ТОВСТОПЛІВКОВИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ТА ВПЛИВУ
НА НЕЇ СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ Ag I Ag-Pd**

Розглянуто вплив структурно-фазових особливостей товстоплівкових провідникових шарів на основі системи Ag-Pd на процеси фізико-хімічної взаємодії матеріалу контактних площадок із припоєм ПОС-61.

Одним з основних матеріалів, що застосовуються для виготовлення провідників та контактних площадок (КП) товстоплівкових інтегральних схем, є провідникові пасти на основі срібла Ag і системи срібло – паладій Ag-Pd. Виводи компонентів інтегральних схем, що виконані за товстоплівковими технологіями, приєднуються до КП різними методами: адгезійним з'єднанням, паянням, термокомпресійним зварюванням.

Найбільш поширеним засобом одержання контакту є паяння низькотемпературними олов'яно-свинцевими припоями [1]. Але якість низькотемпературного паяння сьогодні недостатня. Наприклад, відмови радіоелектронної апаратури, які пов'язані з частковим або повним руйнуванням, наприклад, відшаруванням КП від керамічної підложки, контактів, спостерігаються вже через 2,5–5 місяців з початку експлуатації виробів. Подібні відмови радіоелектронної апаратури відбуваються лише при використанні вихідного матеріалу при виготовленні товстоплівкових провідникових шарів паст вітчизняного виробництва і не спостерігаються при використанні паст фірми Du Pont [2].

У процесі досліджень було встановлено, що основними причинами низької якості контактів підложка – КП – припій є погана адгезія товстоплівкового шару до підложки і розчинення функціонального матеріалу КП у розплаві припою, що пов'язано зі структурно-фазовими особливостями товстоплівкових провідникових шарів.

Для виявлення факторів, що перешкоджають процесам розчинення і взаємної дифузії матеріалу КП в розплаві олов'яно-свинцевого припою, які згодом призводять до руйнування контактів у процесі експлуатації виробів, проводили порівняльний аналіз структурних особливостей і хімічного складу системи підложка – Ag-Pd – ПОС-61 для тест-плат двох груп: групи А – КП, що виготовлені за товстоплівковими технологіями з паст вітчизняного виробництва, і групи Б – з паст фірми Du Pont.

Структуру і хімічний склад межі поділу підложка – КП – низькотемпературний припій досліджували методами растрової електронної мікроскопії в режимі рентгенівського мікроаналізу, повторної іонної мас-спектроскопії та інфрачервоної спектроскопії багатократного порушеного повного внутрішнього відбитка.

Об'єкти, що досліджувалися, являли собою КП, відділені від керамічної підложки методом відриву провідника, припаяного до товстоплівкового шару. При цьому досліджувалися як поверхня провідника в зоні зчеплення з підложкою, так і наступні товстоплівкові шари після хімічного та іонного травлення адгезійного шару. Для тест-плат групи А спостерігається механічне відділення паяного з'єднання по межі поділу КП – підложка і часткове руйнування товстоплівкового шару. Для тест-плат групи Б відрив відбувається в області керамічної підложки, при цьому сила зчеплення КП з підложкою для зразків цієї групи була приблизно на порядок вища.

На рис. 1 наведені зображення поверхні КП обох груп у характеристичному рентгенівському випромінюванні Ag, на рис. 2 – розподіли елементів Al, Ag, Sn на межі поділу КП-підложка, які свідчать про значне розчинення функціонального матеріалу товстоплівкового провідника в олов'яно-свинцевому припої в зразках, виготовлених з використанням паст вітчизняного виробництва (група А). У зразків групи А пошаровий рентгенівський

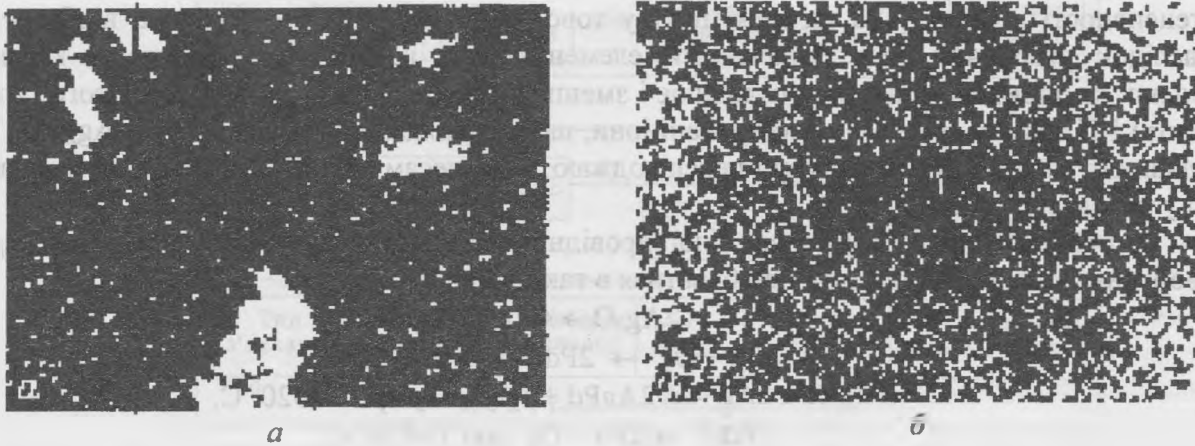


Рис.1. Поверхні контактних площадок у характеристичному рентгенівському випромінюванні Ag:
а – зразки групи А; б – зразки групи Б

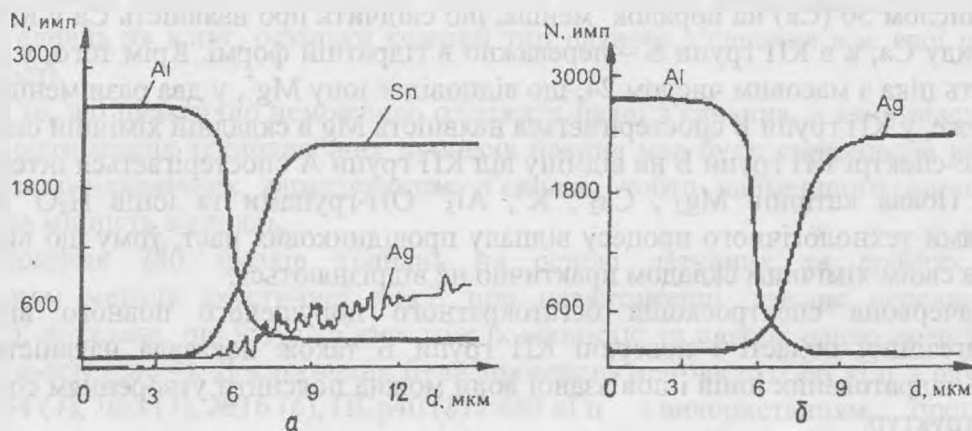


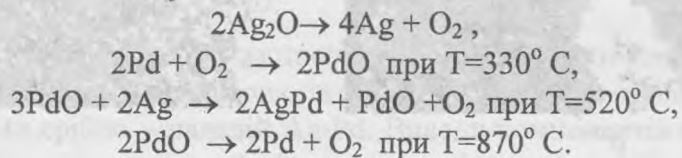
Рис.2. Розподіл Al, Ag, Sn на межі поділу КП – підложка:
а – зразки групи А; б – зразки групи Б

мікроаналіз адгезійної області паяних швів припій – провідник – підложка виявив наявність інтенсивних піків характеристичного рентгенівського випромінювання Sn і Pb навіть на межі поділу КП-підложка. За результатами напівкількісного рентгенівського мікроаналізу встановлено зміну співвідношення концентрацій основних компонентів припою. Інтенсивність сигналу характеристичного рентгенівського випромінювання Sn на межі поділу КП-підложка збільшується в 1,5 разів у порівнянні з інтенсивністю сигналу Sn для чистого припою ПОС-61. Крім того, у зразків цієї групи пошаровий рентгенівський мікроаналіз адгезійної області показав наявність сильного сигналу Sn навіть в приповерхневих прошарках кераміки на глибині приблизно 3 мкм, що свідчить про практично повне розчинення в процесі паяння функціонального матеріалу КП. У зразків групи Б на межі поділу КП – кераміка компонентів припою не виявлено.

Мас-спектрометрія і рентгенівський мікроаналіз показали ідентичність елементного складу КП зразків обох груп: основні елементи Ag, Pd, Si, Al, Ca, Mg, K, Ti, O, C, H та домішкові елементи (на рівні шумів) Fe, Cu, Na, Ni, Cr, B, N, Zn. Відміна полягає в кількісному складі домішкових елементів та фазовому складі об'єктів, що досліджуються.

У зразків групи Б при дослідженні методом повторної іонної мас-спектроскопії межі поділу КП-підложка і тіла КП після хімічного і наступного іонного травлення адгезійного шару виявлено, що Pd на межі поділу практично відсутній і вміст Ag значно зменшений. Так, на мас-спектрі пік Ag в області контакту КП з підложкою з'явився при $U=150$ В, у тілі КП – при $U=15$ В у той час, як елементи кераміки реєструвалися вже при $U=50$ В. Зменшення інтенсивності піків Ag, Pd на межі поділу товстоплівковий шар – підложка відбувається внаслідок утворення між зазначеними елементами й іншими компонентами кераміки сильних хімічних зв'язків, що ускладнює і зменшує емісію іонів Ag^+ , Pd^+ . Крім того, у мас-спектрі КП зразків групи Б зареєстровані іони, що є осколками з'єднань $AgPd$ і Ag_2Pd_3 . Такі з'єднання ущільнюють структуру і перешкоджають процесам дифузії і розчинення матеріалу КП у розплаві припою.

У процесі термообробки вихідної провідникової пасти (при наявності в ній Ag_2O) утворення з'єднання $AgPd$ може відбуватися в такий спосіб:



У мас-спектрі КП групи Б на відміну від КП групи А спостерігаються іони з масовими числами 41 і 57, що відповідають гідратованим $MgOH^+$, $CaOH^+$ і MgO_2H^+ . Інтенсивність піка з масовим числом 56 (Ca) на порядок менша, що свідчить про наявність Ca у КП групи А у вигляді оксиду Ca, а в КП групи Б – переважно в гідратній формі. Крім того, у КП групи Б інтенсивність піка з масовим числом 24, що відповідає іону Mg^+ , у два рази менша, ніж у КП групи А. Отже, у КП групи Б спостерігається наявність Mg в складній хімічній сполуці.

У мас-спектрі КП групи Б на відміну від КП групи А спостерігається інтенсивний пік іона H_2O^+ . Поява катіонів Mg_2^+ , Ca_2^+ , K^+ , Al_3^+ ОН-групами та іонів H_2O^+ обумовлена особливостями технологічного процесу відпалу провідникових паст, тому що вихідні пасти обох груп за своїм хімічним складом практично не відрізняються.

Інфрачервона спектроскопія багатократного порушеного повного внутрішнього відбитка адгезійної області і поверхні КП групи Б також показала наявність ОН-груп. Присутність гідратованих іонів і пов'язаної води можна пояснити утворенням сольватних та гідратних структур.

У випадку утворення сольватних систем у скляній матриці виділяються фази складної просторової структури, наприклад, типу $Me(OH_2)_4$. Природно, що просторово-складні структури блокують дифузію Sn у матрицю і перешкоджають розчиненню інших її компонентів (Ag, Pd) у розплаві припою.

Для КП групи А характерна просторова неуцільненість структури (механічна суміш оксидів), що викликає капілярне затікання Sn при паянні і взаємодифузію Ag і Pd у Sn, тобто розчинення функціонального матеріалу площадки в припої.

Однією з основних величин, яка використовується для характеристики паяних з'єднань є міцність [3]. В процесі паяння припій та основний матеріал зазнають різноманітних фізико-хімічних перетворень, що викликає суттєві зміни їх властивостей по відношенню до початкового стану. Міцність паяних з'єднань залежить від значної кількості конструктивних та технологічних факторів, які формують структуру шва, його дефектність та пружний стан (рис.3).

Незважаючи на значну кількість факторів, міцність з'єднання визначається опором найбільш слабкої ланки на вплив силового або температурного полів. Слабкою ланкою в паяному з'єднанні, перш за все, є дефекти структури, виникнення яких тісно пов'язано з параметрами технологічного процесу паяння. Дефекти та причини їх виникнення при формуванні паяного з'єднання досліджені для широкого класу матеріалів з використанням одно- та багатокомпонентних припоїв [3; 4]. Це стосується

особливостей заповнення зазору рідким припоєм, фізико-хімічних процесів взаємодії матеріалів, зміни температурних границь кристалізації, впливу окисних плівок, дифузійних процесів, виникнення тріщин та ін.

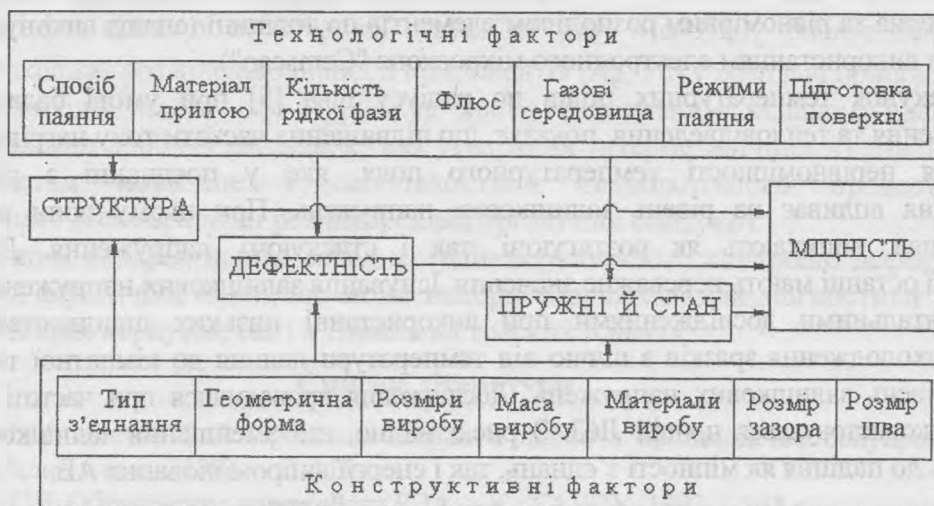


Рис.3. Фактори, які впливають на міцність паяних з'єднань

Єдиної точки зору на допустимість дефектів за типами, розмірами, ступенем їх впливу на якість з'єднань не існує, оскільки кожний тип паяного з'єднання має свої показники та критерії якості.

Через те, що практично неможливо одержати паяні з'єднання, в яких відсутні дефекти структури, оптимізація технологічних процесів паяння має бути спрямована на одержання заданих фізико-механічних характеристик з'єднань, тобто найменшого впливу дефектів структури на міцність з'єднань.

Дослідження 780 зразків з'єднань на основі латунних та срібних припоїв з використанням методу акустичної емісії при навантаженні, яке не перевищує 3% від руйнуючого, показали, що існує зв'язок між їх міцністю та накопиченою енергією сигналів акустичної емісії (рис.4). Дослідження були проведені при частоті 66 кГц з використанням припоїв №34 (4), Л63 (5), №16 (6), ПСр40 (8) і 440 кГц з використанням припоїв №16 (1), Л63 (2), №34 (3), ПСр40 (7).

Аналіз поверхні злому зразків показав, що в перерізі шва спостерігаються основні типи дефектів: газові пори (особливості заповнення зазору припоєм, нерівномірність зазору, блокування виходу газу), непропаяність (відсутність заповнення зазору припоєм), неспаяність (відсутність зчеплення або недостатня адгезія основного матеріалу до припою), флюсові включення, дифузійна пористість (процеси розчину та дифузії матеріалів), релаксаційні та термічні тріщини. Ці дефекти мають різні розміри, конфігурацію та розподіл в перерізі шва. Однак досить важко визначити однозначний зв'язок між площиною дефектів та міцністю з'єднань, оскільки існує значне перекриття експериментальних даних. Це стосується макродефектів, які займають до 35–40 % площини перерізу шва. Одержані результати вказують на те, що дефекти різняться за їх впливом на міцність з'єднань. Тому важливим є оцінка ступеня їх безпеки.

Існування залежності накопиченої енергії акустичної емісії з руйнуючими навантаженнями (рис.4, криві 1, 2, 3, 7) дозволяє, по-перше, визначити матеріал припою, який забезпечує максимальну міцність для даного типу з'єднань та технологічних параметрів процесу паяння, по-друге, прогнозувати міцність з'єднань з дефектами, які існують в перерізі шва після їх виготовлення. Зміна температурних режимів нагріву, перехід від крайового нагріву (індукційний нагрів з частотою току 440 кГц) до глибинного рівномірного нагріву (індукційний нагрів з частотою току 66 кГц) призводять до падіння міцності з'єднань та зміни нахилу залежностей по

акустичній емісії (рис.4, криві 4, 5, 6, 8). Металографічний аналіз показує існування однотипних дефектів та відсутність зміни структури як на границі розділу основного матеріалу і матеріалу припою, так і в перерізі шва. Паяний шов має структуру α -твердого розчину з однотипним розміром зерна та рівномірним розподілом елементів по товщині (аналіз виконувався на зломах та шліфах з використанням електронного мікроскопа "Camscan").

Розрахунок температурних полів по радіусу шва [5] при умові балансу потужності тепловиділення та тепловідведення, показує, що підвищення частоти току нагріву призводить до підвищення нерівномірності температурного поля, яке у поєднанні з різними видами охолодження впливає на рівень залишкових напружень. При цьому вони нерівномірні по перерізу шва, виникають як розтягуючі, так і стискуючі напруження. Для розглянутої конструкції останні мають переважне значення. Існування залишкових напружень підтвердилося експериментальними дослідженнями при використанні низьких швидкостей охолодження (повільне охолодження зразків з піччю від температури паяння до кімнатної температури, що зменшує рівень залишкових напружень. Дослідження проводилися при частоті струму нагріву 440 кГц, використовувався припій Л63. З рис.5 видно, що зменшення залишкових напружень призводить до падіння як міцності з'єднань, так і енергії випромінювання АЕ.

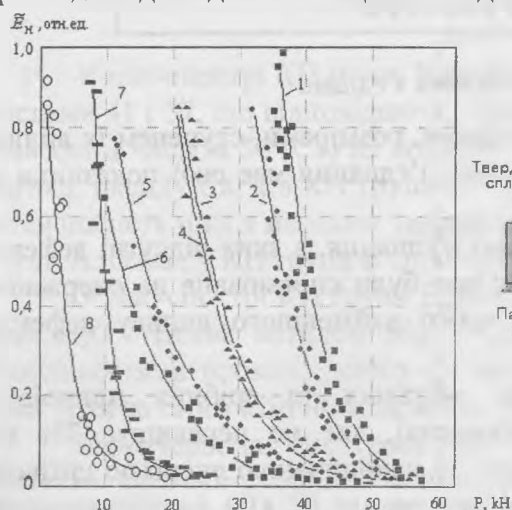


Рис.4. Залежності зміни накопиченої енергії сигналів акустичної емісії від руйнуючих навантажень для паяних з'єднань АТР \varnothing 13,5 мм при частотах струму нагріву 440 кГц (1, 2, 3, 7) і струму 66 кГц (4, 5, 6, 8)

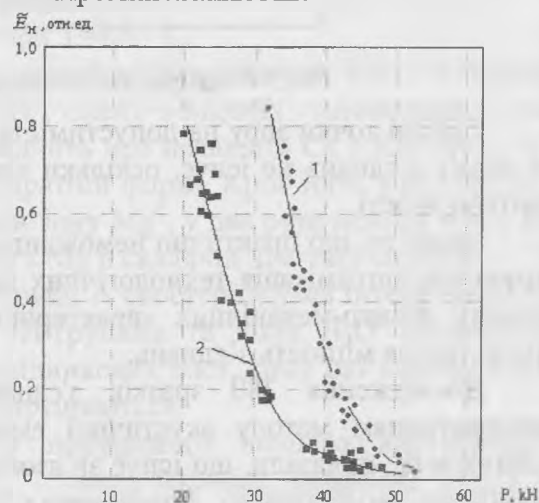


Рис.5. Залежності зміни накопиченої енергії сигналів акустичної емісії від руйнуючих навантажень для паяних з'єднань АТР \varnothing 13,5 мм при різних швидкостях охолодження: 1 – при кімнатній температурі після відключення струму нагріву; 2 – охолодження з піччю до кімнатної температури протягом 30 хв

Таким чином, при існуванні значної кількості технологічних факторів якості паяних з'єднань визначається структурою, дефектністю шва та залишковими напруженнями. Паяні з'єднання елементів радіоелектронної апаратури не становлять виключення. Природно, що конкретний тип з'єднань потребує визначення та мінімізації впливу різноманітних факторів на їх міцність. Перш за все, це стосується температурних режимів нагріву та охолодження, які є основою формування структури шва, його дефектності та залишкових напружень. При цьому важливим є визначення оптимального сполучення розтягуючих та стискуючих напружень або їх відсутності.

Якість паяних з'єднань визначається однорідністю та дефектністю структури шва, а також залишковими напруженнями.

У процесі паяння провідникових шарів на основі системи Ag-Pd доцільно застосовувати припої з більш високим рівнем вмісту Pb і низьким рівнем вмісту Sn, або для запобігання розчинення КП використовувати дифузійні бар'єрні прошарки інших металів.

У процесі відпалу провідникових паст виробництва фірми Du Pont утворюються інтерметалічні з'єднання $AgPd$ і Ag_2Pd_3 , що ущільнюють структуру і перешкоджають процесам дифузії та розчинення функціонального матеріалу КП у розплаві припою. Крім того, утворення у вихідній матриці фаз складної просторової структури типу $Me(OH_2)_k^1$ блокує дифузію Sn у матрицю і перешкоджає розчиненню інших її компонентів (Ag, Pd) у розплаві припою.

Оскільки вихідні пасти обох груп за своїм елементним складом практично не відрізняються, можна зробити висновок, що утворення інтерметалічних з'єднань Ag_x-Pd_y і сольватних систем пов'язане з особливостями технологічного процесу відпалу провідникових паст (температурні режими, склад органічної сполуки).

Дуже наочним та ефективним серед методів неруйнівного контролю дефектів паяних з'єднань є метод акустичної емісії, що може використовуватися для діагностики як паяних з'єднань герметичних корпусів, так і з'єднань на товстих плівках.

Список літератури

1. Мазур А.М., Алехин В.П. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 116.
2. Ленков С.В. Обеспечение надежности РЭА. – К.: ГАЛПУ, 1997. – 148 с.
3. Кузнецов О.А., Погалов А.И. Прочность паяных соединений. – М.: Машиностроение, 1987. – 112 с.
4. Гржимальский Л.Л., Ильевский И.И. Технология и оборудование пайки. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
5. Новиков Н.В., Цибенко А.С., Анисин А.М. Математическое моделирование процесса индукционной пайки АТР // Докл. АН УССР, Сер.А. – 1986. – № 3 – С.27 – 31.

Стаття надійшла до редакції 23.08.01.

УДК 519.6:536.58:533.6:681.3

ББК 052-01-026 427-52-028.4 + * 1076-5-028.4

В. П. Зинченко, С. Г. Радченко, Н. П. Зинченко

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛАСТИЧНОСТИ ВЕСОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УПРУГИМ ШАРНИРОМ

Описан метод определения эластичности весовых элементов тензометрических аэродинамических весов с упругими шарнирами, основанный на последовательном суммировании линейных и угловых деформаций упругих элементов. Приведены расчетные формулы для определения эластичности динамометров по всем шести степеням свободы.

Актуальной проблемой при создании автоматизированных систем экспериментальных исследований моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах является разработка первичных источников получения экспериментальных данных [1; 2]. К таким устройствам относятся шестикомпонентные аэродинамические тензометрические весы (ТВ) статически определимого типа [3–5].

Обобщенный метод определения эластичности весовых элементов (ВЭ) ТВ с упругими шарнирами основан на последовательном суммировании линейных и угловых деформаций упругих элементов.

Принцип работы ТВ основан на разложении полной аэродинамической силы и момента, действующих на модель летательного аппарата, на три составляющие силы X, Y, Z и три составляющих момента M_x, M_y, M_z в весовой системе координат. Измерение этих составляющих производится ВЭ ТВ.

В консольных ТВ статически неопределимого типа для разложения на составляющие силы и момента используется схемная и конструктивная компенсация взаимных влияний ВЭ соответствующих компонент [4; 6]. В ТВ статически определимого типа и механических аэродинами-