

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 пасті 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

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-

ческих весах это достигается, в основном, за счет конструктивной компенсации [3; 4; 7-10] и определенного расположения продольных осей ВЭ относительно весовой системы координат и их упругих или шарикоподшипниковых шарниров [3; 4; 10]. Применение в ВЭ ТВ статически определимого типа шарикоподшипниковых или шаровых скользящих шарниров приводит к гистерезису их показаний, что обусловлено трением. Этому недостатка лишены упругие шарниры.

В ТВ статически определимого типа, в которых применены ВЭ с упругими шарнирами, каждая составляющая воспринимается не только ВЭ, предназначенным для ее измерения, но и упругими шарнирами остальных ВЭ. Чем меньше доля нагрузки, воспринимаемая упругими шарнирами, тем выше степень статической определимости ТВ. Для уменьшения доли нагрузки, воспринимаемой упругими шарнирами, необходимо увеличивать их эластичность, чтобы жесткость ВЭ в направлении продольной оси была на несколько порядков выше, чем по остальным степеням свободы.

Таким образом, при проектировании ТВ статически определимого типа возникает необходимость в определении эластичности ВЭ с упругими шарнирами по всем степеням свободы. Для определения эластичности ВЭ необходимо выявить их линейные и угловые деформации по всем степеням свободы при раздельном действии соответствующих единичных силовых факторов.

Разработанные в теории упругости методы определения деформации конструкции (интеграл Мора, способ Верещагина [11]) для ВЭ с упругими шарнирами непригодны, поскольку последние состоят из элементов, как статически определимых (шарниров), так и статически неопределимых (чувствительных элементов).

Устройство, методы расчета и особенности проектирования ТВ статически определимого типа описаны в работах [3; 4; 8]. На рис. 1 показаны схемы двух ТВ, в которых применены ВЭ с упругими шарнирами (рис.2).

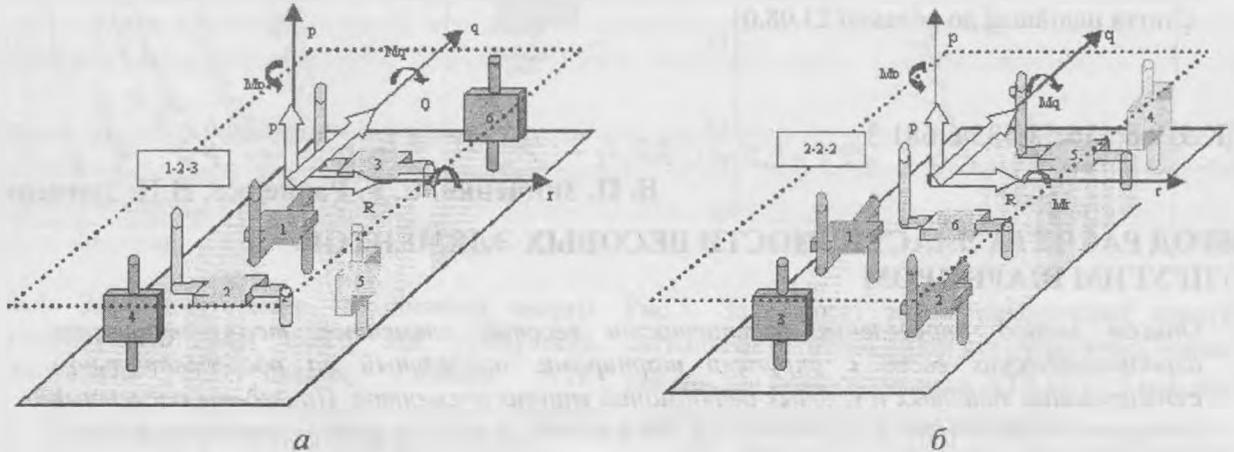


Рис. 1

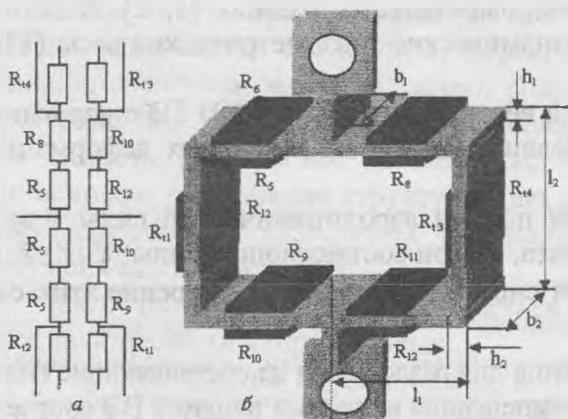


Рис. 2

Метод расчета деформации ТВ статически определимого типа описан в литературе [6; 8; 10]. Этот метод позволяет определить относительно рамы-опоры угловые и линейные перемещения плавающей рамы ТВ в точках a_i , p_i , r_i , где к ней крепятся ВЭ при произвольной комбинации нагрузок (Q, P, R, M_q, M_p, M_r), действующих на ТВ (рис. 1, 3). Этот метод пригоден для расчета любых ТВ статически определимого типа, имеющих одну из двух схем расположения ВЭ: 1-2-3 (см. рис. 1, а) или 2-2-2 (см. рис.1, б) [3; 4;10].

Естественно, что при произвольной комбинации нагрузок точки крепления ВЭ q_i, p_i, r_i испытывают перемещения, представляющие собой произвольную сумму угловых и линейных деформаций по всем шести степеням свободы (рис. 4). Следствием этих деформаций являются упругие реакции ВЭ, которые оказывают влияние на результат измерения. Все элементы ВЭ вследствие малости деформации работают в упругой области, что позволяет применить принцип суперпозиции для определения составляющих суммарной упругой реакции ВЭ, т.е. деформация по каждой степени свободы ВЭ определяется соответствующим ей силовым фактором. Сумма составляющих упругих реакций всех ВЭ в направлении какой-либо степени свободы ТВ статически определимого типа в весовых осях $OQPR$ определяет величину нагрузки, которая воспринимается упругими шарнирами, а ее отношение к измеряемой по этой степени свободы нагрузке – степень статической определимости ТВ.

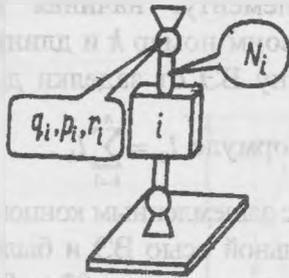


Рис. 3

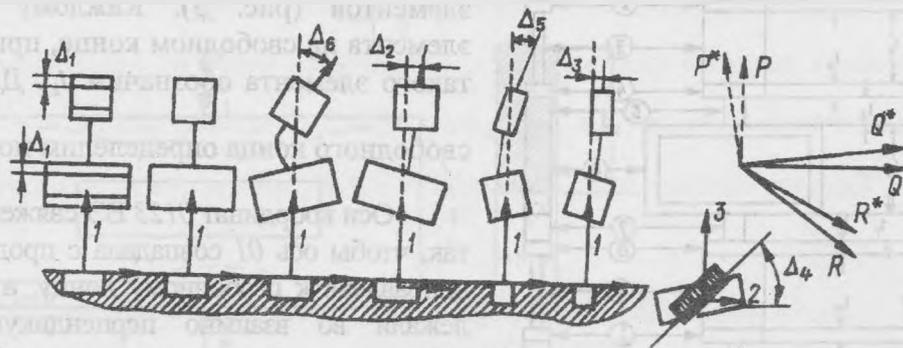


Рис. 4

Таким образом, задача определения степени статической определимости ТВ сводится к определению составляющих упругой реакции каждого динамометра в весовых осях $OQPR$ при известных составляющих его деформации: $\Delta q, \Delta p, \Delta r, \Delta \gamma, \Delta \beta, \Delta \alpha$.

Система осей координат ВЭ 0123 (рис. 4) и система весовых осей $OQPR$ ортогональны, и их взаимная ориентация определяется на стадии выбора схемы ТВ. Этот выбор определяет также однозначную связь между деформациями ВЭ в весовых осях $\Delta q, \Delta p, \Delta r, \Delta \gamma, \Delta \beta, \Delta \alpha$ и осях ВЭ Δ_i , где i – индекс степени свободы ВЭ в осях 0123 . Между составляющими деформации и упругой реакции ВЭ по каждой степени свободы существует однозначная связь. Она определяется эластичностью ВЭ H_{ij} , которая численно равна величине обобщенной деформации (линейной или угловой) по i -й степени свободы, возникающей от приложения j -го единичного обобщенного силового фактора. Функционально эластичность H_{ij} связана с деформацией и упругой реакцией ВЭ формулой:

$$H_{ij} = \frac{\Delta_i}{\Phi_j}, \quad (1)$$

где Δ_i – обобщенная деформация ВЭ в направлении i -й степени свободы; Φ_j – обобщенный силовой фактор (сила или момент силы), соответствующий j -й степени свободы.

Величина, обратная эластичности, определяет жесткость В: $\mu_{ij} = \frac{1}{H_{ij}} = \frac{\Phi_j}{\Delta_i}$.

Эластичность ВЭ зависит от геометрических параметров и материала его конструкции.

Для ее определения необходимо найти функциональную связь между деформацией ВЭ и приложенной к нему нагрузкой. Для простейших конструкций, таких, как балки постоянного сечения, эта связь может быть получена с помощью интегралов Мора или способом Верещагина [11]. К ВЭ и ТВ эти методы неприменимы, поскольку они представляют собой сложные конструкции, состоящие из последовательно соединенных балок разного сечения и статически неопределимых рам.

Условно разобьем конструкцию ВЭ на элементы, представляющие собой балки постоянного сечения и статически неопределимые рамы. Эластичность таких элементов, как функция их геометрических параметров и упругих свойств материала, может быть определена по работам [6; 9; 10].

Рассмотрим деформацию ВЭ, как последовательно накапливающуюся деформацию ее элементов, при условии, что сама деформация и все ее производные вдоль продольной оси ВЭ на границах элементов непрерывны. Будем считать, что нам известны эластичности η_{ijk} ($k = 1, 2, \dots, n$) всех n элементов ВЭ.

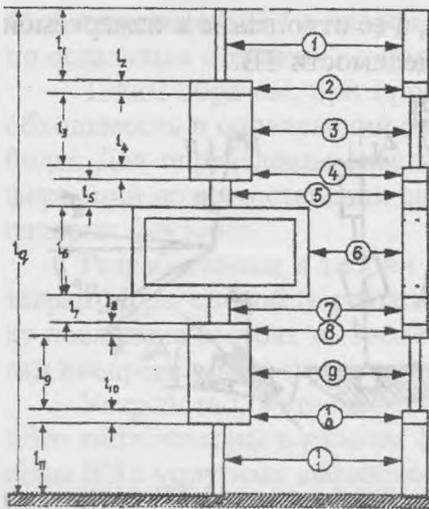


Рис. 5

Уравнения связи между эластичностью ВЭ и составляющих его элементов. Рассмотрим консольно зашпеленный ВЭ, состоящий в общем случае из n элементов (рис. 5). Каждому элементу, начиная с элемента на свободном конце, присвоим номер k и длину такого элемента обозначим l_k . Длину ВЭ от заделки до свободного конца определим по формуле

Оси координат 0123 ВЭ свяжем с зашпеленным концом так, чтобы ось 01 совпадала с продольной осью ВЭ и была направлена к свободному концу, а две другие оси 02 и 03 лежали во взаимно перпендикулярных плоскостях его симметрии. Свободный конец ВЭ по отношению к зашпеленному имеет шесть деформационных степеней свободы (рис. 6).

Силы, действующие вдоль осей 01 , 02 и 03 , обозначим через Φ_1, Φ_2, Φ_3 , а соответствующие им линейные перемещения свободного конца ВЭ в направлении тех же осей через $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ (рис. 6), моменты сил, действующих на свободный конец ВЭ относительно осей, параллельных осям $01, 02$ и 03 – через Φ_4, Φ_5, Φ_6 , а соответствующие им угловые перемещения относительно тех же осей – через $\Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$ (рис. 7). По аналогии обозначим также через δ_{ik} деформацию по i -й степени свободы k -го элемента ВЭ, т.е. линейное или угловое перемещение его сечения на границе с $k-1$ элементом по отношению к сечению на границе с $k+1$ элементом. Это равносильно рассмотрению деформации k -го

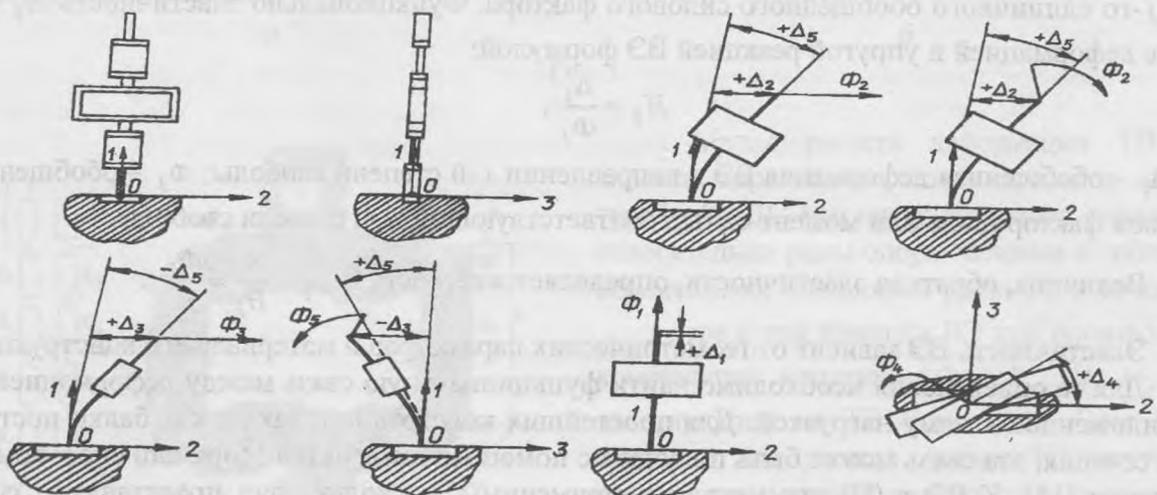


Рис. 6

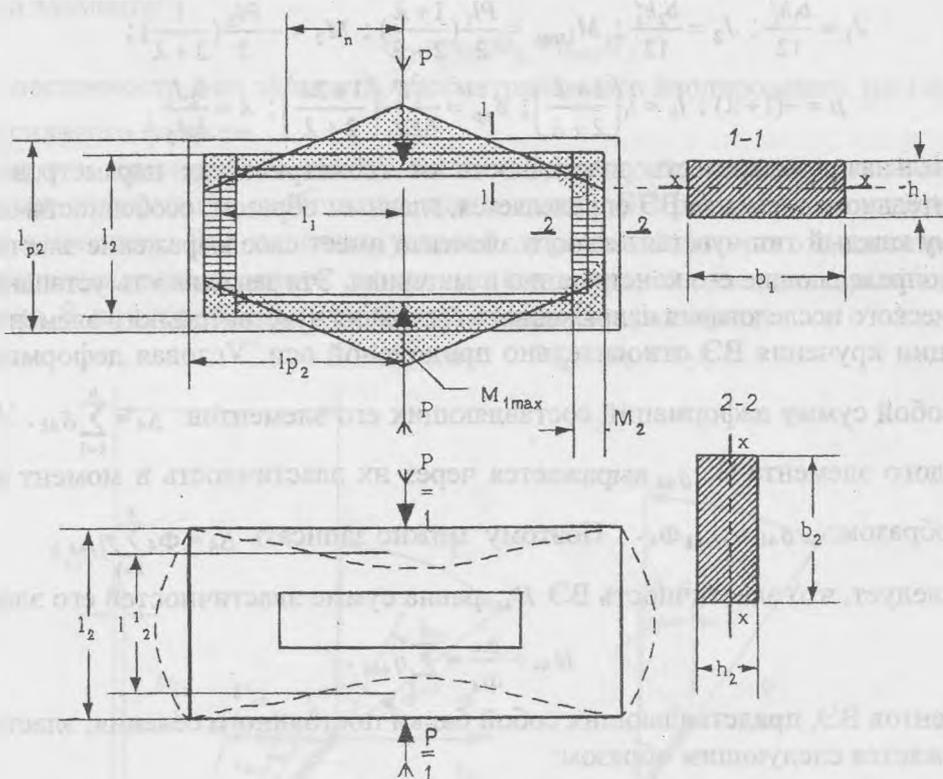


Рис. 7

элемента, консольно защемленного на границе с $k+1$ элементом. Рассмотрим теперь деформации ВЭ Δ_i по всем степеням свободы, как последовательно накопленные деформации его элементов.

Силы Φ_1, Φ_2, Φ_3 и линейные перемещения $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – положительные, если они направлены вдоль положительного направления соответствующих осей. Моменты Φ_4, Φ_5, Φ_6 и угловые перемещения $\Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$ – положительными при вращении против часовой стрелки.

Деформация сдвига $\Delta_1 = \sum_{k=1}^n \delta_{1k}$ вдоль продольной оси ВЭ. Из геометрической схемы (рис. 6) следует, что

Поскольку силовой фактор Φ_1 одинаков для всех элементов ВЭ, а их эластичность η_{1k} предполагается известной, то $\delta_{1k} = \eta_{1k} \Phi_1$. Откуда $\Delta_1 = \Phi_1 \sum_{k=1}^n \eta_{1k}$, следовательно, формулу (1) можно записать в виде

$$H_{11} = \frac{\Delta_1}{\Phi_1} = \sum_{k=1}^n \eta_{1k} \tag{2}$$

Из выражения (2) следует, что эластичность ВЭ в направлении продольной оси равна сумме эластичностей составляющих его элементов. Причем для элементов, представляющих собой балки постоянного сечения, эластичность выражается следующим образом:

где E – модуль Юнга материала ВЭ; S_k – площадь сечения k -го элемента.

Эластичность чувствительного элемента, представляющего собой неопределимую раму (см. рис. 6), выражается через геометрические параметры конструкции и упругие свойства ее материала:

$$\eta_{11} = \frac{\delta_{pp}}{P} = \frac{l_1}{\sigma E I_1} \left(\frac{1+2\lambda}{2+\lambda} \right),$$

$$J_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12}; J_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}; M_{1\max} = \frac{Pl_1}{2} \left(\frac{1+\lambda}{2+\lambda} \right); M_2 = -\frac{Pl_2}{2} \left(\frac{1}{2+\lambda} \right);$$

$$\mu = -(1+\lambda); l_n = l_1 \left(\frac{1+\lambda}{2+\lambda} \right); \delta_{pp} = \frac{l_1^3 P}{6EJ_1} \left(\frac{1+2\lambda}{2+\lambda} \right); \lambda = \frac{l_2 J_1}{l_1 J_2}.$$

Функциональная зависимость эластичности от геометрических параметров и упругих свойств чувствительного элемента ВЭ определяется, главным образом, особенностями его конструкции. Поэтому каждый тип чувствительного элемента имеет свое выражение эластичности через параметры, определяющие его конструкцию и материал. Эта зависимость устанавливается на стадии теоретического исследования напряженного состояния чувствительного элемента.

Деформации кручения ВЭ относительно продольной оси. Угловая деформация ВЭ Δ_4 представляет собой сумму деформаций составляющих его элементов: $\Delta_4 = \sum_{k=1}^n \delta_{4k}$. Угловая деформация каждого элемента ВЭ δ_{4k} выражается через их эластичность и момент кручения Φ_4 аналогичным образом: $\delta_{4k} = \eta_{44k} \Phi_4$. Поэтому можно записать

Отсюда следует, что эластичность ВЭ H_{44} равна сумме эластичностей его элементов:

$$H_{44} = \frac{\Delta_4}{\Phi_4} = \sum_{k=1}^n \eta_{44k}.$$

Для элементов ВЭ, представляющих собой балки постоянного сечения, эластичность от кручения выражается следующим образом:

$$\eta_{44k} = \frac{l_k}{GJ_k},$$

где G – модуль сдвига; J_k – момент инерции сечения при кручении.

Деформации изгиба ВЭ в плоскости 012 . В отличие от деформации сжатия–растяжения и кручения ВЭ линейные Δ_2 и угловые Δ_6 деформации изгиба нельзя рассматривать изолированно. Это обусловлено тем, что сила Φ_2 и момент Φ_6 , приложенные раздельно, вызывают как угловые Δ_6 , так и линейные Δ_2 деформации свободного конца динамометра.

Рассмотрим угловые и линейные деформации свободного конца ВЭ, возникающие в нем при воздействии силовых факторов Φ_2 и Φ_6 (рис. 8). Для вывода уравнений воспользуемся методом индукции. Предположим, что ВЭ состоит из одного элемента. С использованием принципа суперпозиции можно записать:

– линейные и угловые деформации свободного конца ВЭ в виде:

$$\delta_{21}^{\wedge} = \eta_{221} \Phi_2 + \eta_{261} \Phi_6;$$

от второго элемента:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{22}^{\vee} &= \eta_{222} \Phi_2 + \eta_{262} M_2; \\ \delta_{22}^{\vee} &= \delta_{62} l_1 = (\eta_{622} \Phi_2 + \eta_{622} M_2) l_1; \end{aligned} \right\};$$

от третьего элемента:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{23}^{\vee} &= \eta_{223} \Phi_2 + \eta_{263} M_3; \\ \delta_{23}^{\vee} &= \delta_{63} (l_1 + l_2) = (\eta_{623} \Phi_2 + \eta_{623} M_3) (l_1 + l_2); \end{aligned} \right\};$$

– составляющие угловой деформаций Δ_6 от первого элемента:

$$\delta_{61} = \eta_{621} \Phi_2 + \eta_{661} M_1;$$

от второго элемента:

$$\delta_{62} = \eta_{622} \Phi_2 + \eta_{662} M_2,$$

от третьего элемента:

$$\delta_{63} = \eta_{623}\Phi_2 + \eta_{663}M_3,$$

где η_{ijk} – эластичность k -го элемента, рассматриваемого изолированно, по i -й степени свободы от j -го силового фактора.

Рассмотрим теперь деформации ВЭ, состоящего из двух элементов.

Угловая деформация свободного конца такого ВЭ равна сумме угловых деформаций обоих его элементов. Для подсчета угловой деформации второго элемента воспользуемся методом параллельного переноса сил на границу между первым и вторым элементами. Как видно из рис. 8, на второй элемент действуют силовые факторы:

$$\Phi_{22} = \Phi_2; \quad \Phi_{62} = \Phi_6 + \Phi_2 l_1. \quad (3)$$

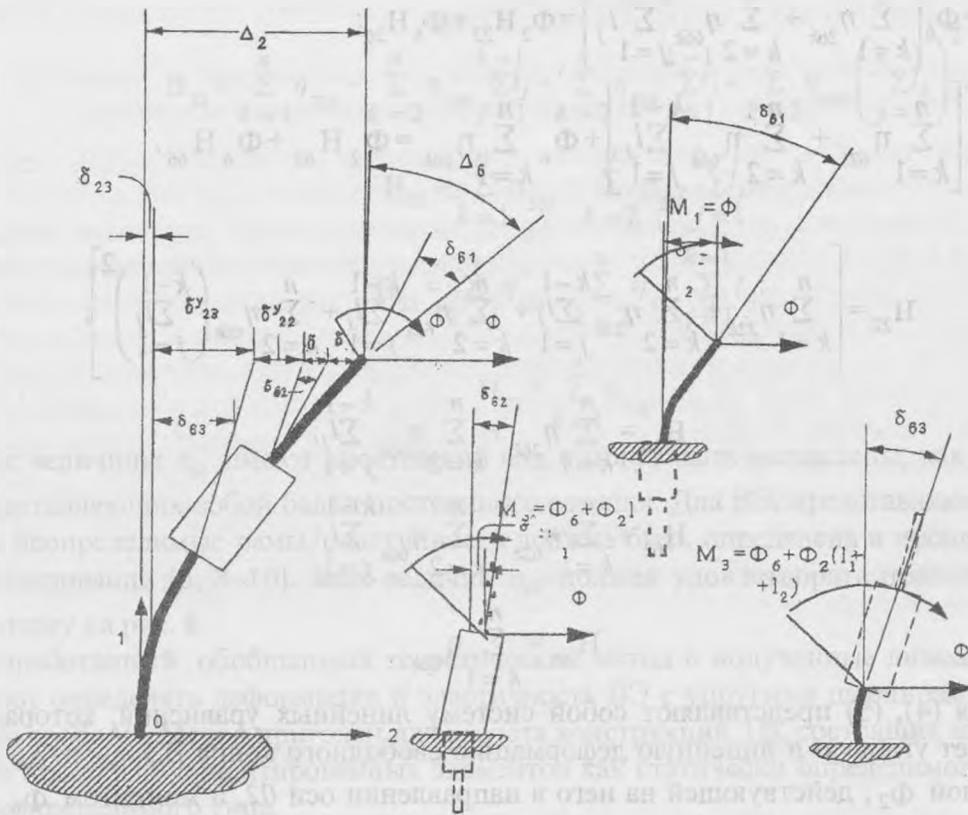


Рис. 8

На основании выражения (3) можно записать угловую деформацию ВЭ, состоящего из двух элементов в виде:

$$\Delta_6 = \eta_{621}\Phi_2 + \eta_{661}\Phi_6 + \eta_{622}\Phi_2 + \eta_{622}(\Phi_6 + \Phi_2 l_1) = (\eta_{621} + \eta_{622} + \eta_{622} l_1)\Phi_2 + (\eta_{661} + \eta_{662})\Phi_6.$$

Линейная деформация свободного конца ВЭ, состоящего из двух элементов складывается из линейной деформации первого элемента от воздействия силы Φ_2 и момента Φ_6 , линейного перемещения свободного конца первого элемента, обусловленного угловой деформацией конца второго элемента, возникающего от воздействия силы и момента (3), линейной деформации второго элемента под воздействием силовых факторов, определенных уравнениями (3). Тогда выражение для линейной деформации двухэлементного ВЭ можно записать в виде:

$$\Delta_2 = \eta_{221}\Phi_2 + \eta_{261}\Phi_6 + l_1[\eta_{662}\Phi_2 + \eta_{662}(\Phi_6 + \Phi_2 l_1)] + \eta_{222}\Phi_2 + \eta_{262}(\Phi_6 + \Phi_2 l_1) = \Phi_2 \left[(\eta_{221} + \eta_{222}) + \eta_{262} l_1 + \eta_{622} l_1 + \eta_{662} l_1^2 \right] + \Phi_6 \left[(\eta_{261} + \eta_{262}) + \eta_{662} l_1 \right].$$

Рассуждая аналогично, для ВЭ, состоящего из трех элементов, деформации его свободного конца могут быть записаны в виде

$$\Delta_2 = \Phi_2 \left[\left(\eta_{221} + \eta_{222} + \eta_{223} \right) + \eta_{262} l_1 + \eta_{263} (l_1 + l_2) + \eta_{622} l_1 + \eta_{623} (l_1 + l_2) + \eta_{622} l_1^2 + (l_1 + l_2)^2 \right] + \\ + \Phi_6 \left[\left(\eta_{261} + \eta_{262} + \eta_{263} \right) + \eta_{662} l_1 + \eta_{663} (l_1 + l_2)^2 \right].$$

Метод индукции приводит к следующим выражениям угловой и линейной деформации для ВЭ, состоящего из n элементов:

$$\Delta_2 = \Phi_2 \left[\sum_{k=1}^n \eta_{22k} + \sum_{k=2}^n \eta_{26k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j + \sum_{k=2}^n \eta_{62k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j + \sum_{k=2}^n \eta_{66k} \left(\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right)^2 \right] + \quad (4)$$

$$+ \Phi_6 \left[\sum_{k=1}^n \eta_{26k} + \sum_{k=2}^n \eta_{66k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] = \Phi_2 H_{22} + \Phi_6 H_{26};$$

$$\Delta_6 = \Phi_2 \left[\sum_{k=1}^n \eta_{62k} + \sum_{k=2}^n \eta_{66k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] + \Phi_6 \sum_{k=1}^n \eta_{66k} = \Phi_2 H_{62} + \Phi_6 H_{66}, \quad (5)$$

где

$$H_{22} = \left[\sum_{k=1}^n \eta_{22k} + \sum_{k=2}^n \eta_{26k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j + \sum_{k=2}^n \eta_{62k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j + \sum_{k=2}^n \eta_{66k} \left(\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right)^2 \right];$$

$$H_{26} = \sum_{k=1}^n \eta_{26k} + \sum_{k=2}^n \eta_{66k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j;$$

$$H_{62} = \sum_{k=1}^n \eta_{62k} + \sum_{k=2}^n \eta_{66k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j;$$

$$H_{66} = \sum_{k=1}^n \eta_{66k}.$$

Уравнения (4), (5) представляют собой систему линейных уравнений, которая однозначно связывает угловую и линейную деформацию свободного конца ВЭ Δ_2 и Δ_6 в плоскости 012 с силой Φ_2 , действующей на него в направлении оси 02 , и моментом Φ_6 , действующим относительно оси 03 .

Таким образом, если заданы составляющие Δ_2 и Δ_6 деформации конца ВЭ, то составляющие его упругой реакции на ТВ численно равны силовым факторам Φ_2 и Φ_6 из уравнений (4), (5) и противоположны им по знаку.

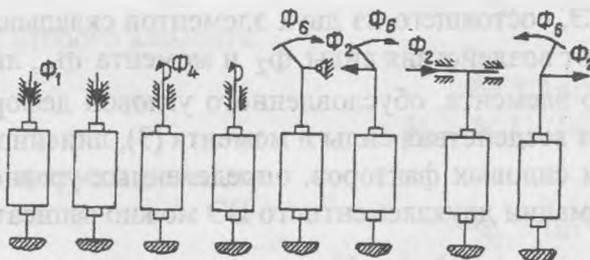


Рис. 9

Естественно, что уравнения (4), (5) позволяют определить не только сами силовые факторы, но и соотношение между ними в общем виде для различных условий деформации ВЭ в ТВ, в том числе в случаях, показанных на рис. 9.

Деформации изгиба ВЭ в плоскости 013 . Методом индукции могут быть получены зависимости деформации Δ_3 и Δ_5 от силовых факторов Φ_3 (сила вдоль оси

03) и Φ_5 (момент относительно оси 02) и эластичности составляющих элементов. Эти зависимости имеют вид:

$$\Delta_3 = \Phi_3 \left[\sum_{k=1}^n \eta_{33k} + \sum_{k=2}^n \eta_{35k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j - \sum_{k=2}^n \eta_{53k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j + \sum_{k=2}^n \eta_{55k} \left(\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right)^2 \right] +$$

$$+ \Phi_5 \left[\sum_{k=1}^n \eta_{35k} - \sum_{k=2}^n \eta_{55k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] = \Phi_3 H_{33} + \Phi_5 H_{35};$$

$$\Delta_5 = \Phi_3 \left[\sum_{k=1}^n \eta_{53k} - \sum_{k=2}^n \eta_{55k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] + \Phi_5 \sum_{k=1}^n \eta_{55k} = \Phi_3 H_{53} + \Phi_5 H_{55},$$

где

$$H_{33} = \sum_{k=1}^n \eta_{33k} - \sum_{k=2}^n \eta_{35k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j - \sum_{k=2}^n \eta_{53k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j + \sum_{k=2}^n \eta_{55k} \left(\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right)^2;$$

$$H_{35} = \sum_{k=1}^n \eta_{35k} - \sum_{k=2}^n \eta_{55k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j;$$

$$H_{53} = \sum_{k=1}^n \eta_{53k} - \sum_{k=2}^n \eta_{55k} \sum_{j=1}^{k-1} l_j;$$

$$H_{55} = \sum_{k=1}^n \eta_{55k}.$$

Все величины η_{ijk} имеют простейший вид и могут быть вычислены, как для элементов ВЭ, представляющих собой балки постоянного сечения. Для ВЭ, представляющих собой статически неопределимые рамы, эластичность должна быть определена в процессе теоретических исследований [6; 8–10]. Знак величин η_{ijk} должен удовлетворять правилу, проиллюстрированному на рис. 8.

Разработанный обобщенный теоретический метод и полученные линейные уравнения позволяют определять деформации и эластичность ВЭ с упругими шарнирами ТВ по шести степеням свободы. Метод пригоден для расчета конструкций ТВ, состоящих из произвольного числа продольно-ориентированных элементов как статически определимого, так и статически неопределимого типа.

Список литературы

1. Зинченко В.П. Автоматизация экспериментальных исследований в аэродинамической трубе // УсиМ. – 1989. – № 1. – С. 95–99.
2. Египко В.М., Зинченко В.П., Белоусов Б.Н., Горин Ф.Н. Системы автоматизации экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. – К.: Наук. думка, 1992. – 264 с.
3. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. – М.: Высш. шк., 1970. – 423 с.
4. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. – М.: Наука, 1964. – 720 с.
5. Прикладная аэродинамика / Н.Ф. Краснов, В.Н. Кошевой, А.Н. Данилов и др. – М.: Высш. шк., 1974. – 732 с.
6. Зинченко В.П., Зинченко Н.П. Методика проектування внутрімодельних тензозагів // Вестн. НТУУ "КПІ". Машиностроение. – Вып. № 34. – К.: НТУУ "КПІ", 1999. – С. 319–328.
7. Дубов Б.С. Многокомпонентные механические весы // Тр. ЦАГИ. – Вып. 1270. – М.: ЦАГИ, 1971. – 128 с.
8. К методике расчета электровесов статически определимого типа; Техн. отчет/ЦАГИ; Р.И. Косых. НИО-2; № 1740. – М., 1971. – 39 с.
9. О теоретическом исследовании напряженного состояния упругого чувствительного элемента однокомпонентного тензометрического динамометра ONERA; Техн. отчет / ЦАГИ; Р.И. Косых. – НИО-2; № 2717. – М., 1975. – 24 с.