

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**УДК 621.9.004.12**

**Б.И. Коган, С.А. Васильков**

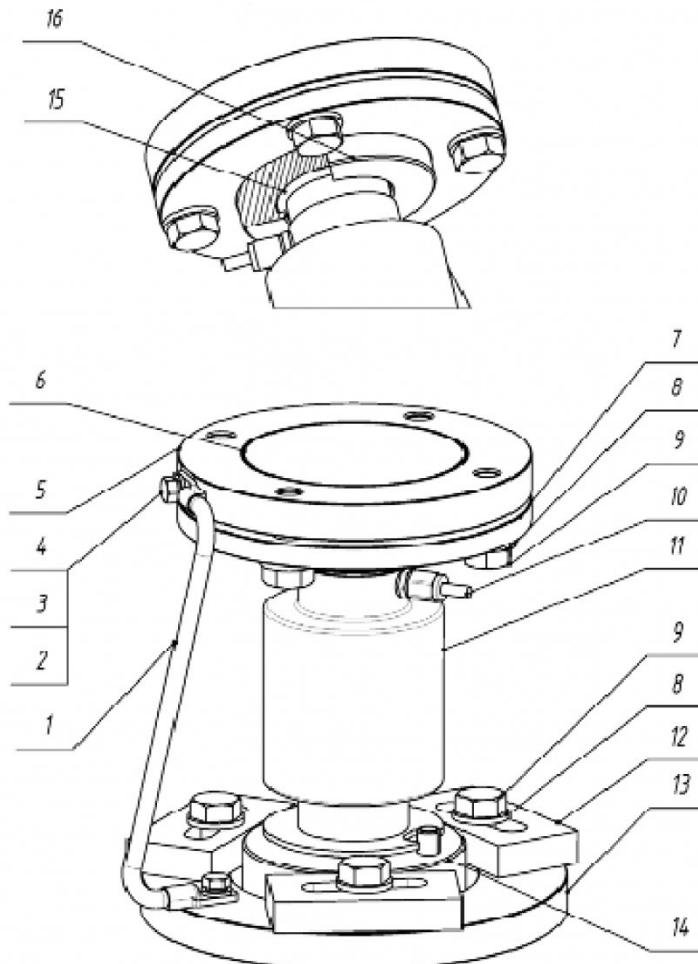
### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА УЗЛА ВСТРОЙКИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА**

Современные тензометрические платформенные, автомобильные, железнодорожные весы снабжаются узлами встройки датчиков силы с номинальной нагрузкой от 10 до 100 т. Узлы встройки определяют качество взвешивания грузов на технологических линиях и надежность грузоприемных устройств для взвешивания путем ориентации и фиксации тензометрических самоустанавливающихся датчиков веса С16А и их аналогов. На рис. 1 показана типовая конструкция узла встройки, применяемого «Инженерным центром АСИ» (г. Кемерово), с датчиком веса.

Верхняя часть узла крепится на весовой плат-

форме, а нижняя – на основании весов или за-кладной детали фундамента. При необходимости узел дополняется устройством ограничения горизонтальных перемещений весов.

Основные задачи узла встройки: достоверная передача нагрузки от платформы на тензометрический датчик; удержание датчика от опрокидывания; удержание датчика от проворота; обеспечение регулировки весов по высоте после их мон-тажа при неточном изготовлении фундамента; обеспечение вертикального положения датчика специальным приспособлением; обеспечение легкой замены датчика без разбора узла; обеспечение



*Рис. 1. Узел встройки: 1 – шунт; 2, 3, 8 – шайбы; 4 – болт; 5 – фланец верхний; 6 – шайба регулиро-вочная; 7 – фланец; 10 – гермовод; 11 – датчик веса; 12 – эксцентрик; 13 – фланец нижний; 14 – ста-кан; 15 – кольцо; 16 – пята нажимная*

защиты рабочих поверхностей узла от загрязнений и попадания влаги; защита датчика от прохождения предельно допустимого тока электрическим шунтом.

Рабочей поверхностью датчика является торец пяты нажимной (поз. 16, рис. 1) в виде сферы радиусом 110-220 мм в зависимости от номинальной нагрузки.

Для обеспечения метрологической характеристики датчика необходимо, чтобы нагрузка передавалась в центр сферы, а площадь приложения нагрузки была минимальной. Допустимый угол наклона датчика не должен превышать  $3^\circ$ . Смещение верхней и нижней точек приложения нагрузки от вертикальной оси датчика не должно превышать 13 мм. Номинальная деформация датчика при номинальной нагрузке находится в пределах 0,55- 1,57 мм. Рабочий температурный диапазон датчика  $-50^\circ\text{...}+70^\circ$ . Предельно допустимая нагрузка составляет 150% от номинала. Разрушающая нагрузка – 300%. Допустимая динамическая нагрузка (амплитуда колебаний согласно DIN 50 100) – 70% от номинальной. Вес датчика 1,9 – 8,0

вибрации. Фланец (поз. 7), фланец нижний \*поз. 13), фланец верхний (поз. 5), эксцентрики (поз. 12) и их крепежные болты воспринимают боковые сдавливающие нагрузки, тем самым удерживая стакан (поз. 14), на который крепится непосредственно сам датчик (поз. 11). Защиту от коррозии обеспечивает цинковое покрытие. Рабочие поверхности имеют шероховатость  $R_a=0.8$ , а базовые поверхности –  $R_a=6.3$ .

Фланец верхний (поз. 5) предназначен для крепления узла встройки к платформе весов. При помощи регулировочной шайбы (поз. 6) производится регулировка узла встройки по высоте при монтаже весов. Фланец нижний (поз. 13) предназначен для крепления узла встройки к основанию весов. Эксцентрики с болтами и шайбами (поз. 12, 9, 8) предназначены для регулировки узла встройки, обеспечения вертикального положения датчика и удержания стакана (поз. 14) в рабочем положении. Основная причина отказов – разрушение деталей (14) и (16) из-за превышения предела усталостных напряжений, превышения предельных нагрузок, превышения динамических нагруз-

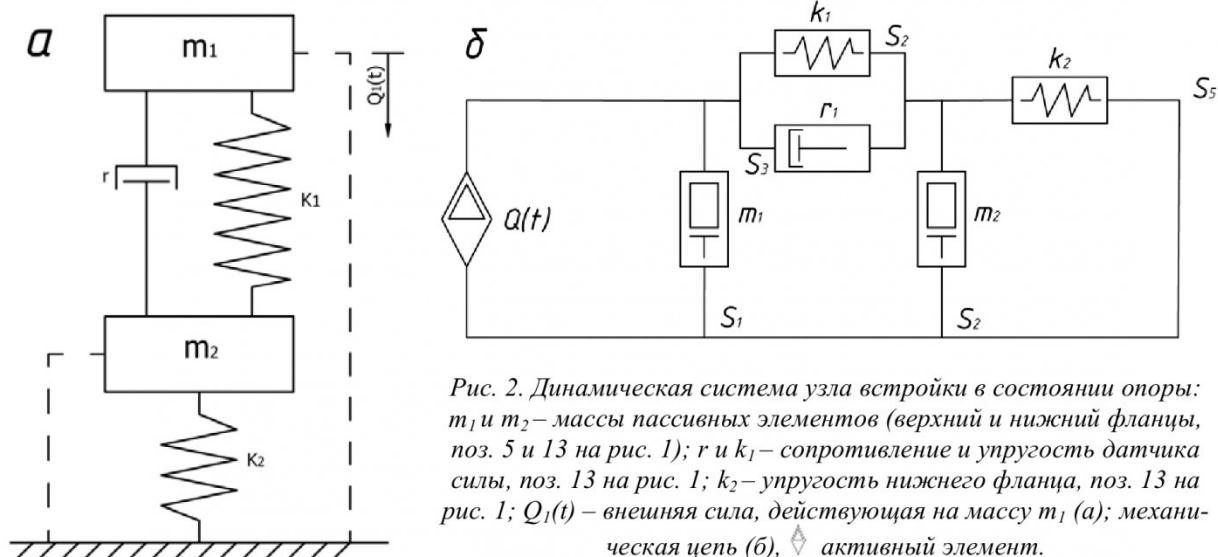


Рис. 2. Динамическая система узла встройки в состоянии опоры:  $m_1$  и  $m_2$  – массы пассивных элементов (верхний и нижний фланцы, поз. 5 и 13 на рис. 1);  $r$  и  $k_1$  – сопротивление и упругость силы, поз. 13 на рис. 1;  $k_2$  – упругость нижнего фланца, поз. 13 на рис. 1;  $Q_1(t)$  – внешняя сила, действующая на массу  $m_1$  (а); механическая цепь (б),  $\diamond$  – активный элемент.

кг в зависимости от его номинальной нагрузки. Твердость рабочей сферы датчика не менее 42-45 HRC, аналогично – рабочих поверхностей элементов узла встройки.

С учетом динамических нагрузок, компоненты узла, передающие нагрузку, должны иметь ударную вязкость не менее 780 кДж/м<sup>2</sup>. Рабочие поверхности должны быть защищены от коррозии и попадания инородных тел. Самые нагруженные компоненты узла, – детали «стакан» (поз. 14 на рис. 1) и «пята нажимная» (поз. 16 на рис. 1) изготовлены из стали 38Х2Н2МА ГОСТ 4543-71. Их основная задача воспринимать осевую вертикальную нагрузку с минимальной площадью рабочей поверхности (так как датчик имеет рабочую поверхность в форме сферы), исходящую со стороны датчика. Они подвержены как многократным динамическим и ударным нагрузкам, так и сильной

зок, наличия зазоров внутри узла встройки при просадках, ослабления крепежа.

Средний срок службы весов составляет 10 лет, срок службы датчика – до 20 млн нагрузений, срок службы узла определяется нагруженностью весов. Детали (14) и (16) определяют надежность конструкции.

На рис. 2<sup>1</sup> представлена динамическая система узла встройки с датчиком силы в механическую цепь [1].

Массы  $m_1$  и  $m_2$  соединены между собой упру-

<sup>1</sup> Механическая цепь – это совокупность активных и пассивных элементов, составляющих динамическую систему и условно связанных между собой линиями влияния сил и скоростей, возникающих в результате внешнего воздействия.

гостью  $k_1$  и подвижной платформой упругости  $k_2$ ; кроме того масса  $m_1$  с платформой соединена со противлением  $r$ . В механической цепи массы  $m_1$  и  $m_2$ , сопротивление  $r$  и упругость  $k_2$  будут находиться в последовательном соединении, а упругость  $k_1$  находится в параллельном соединении по отношению к источнику скорости и включается между массами.

Механические цепи позволяют идентифицировать и оценить качественно силы и скорости в сопряжениях деталей машин, массы элементов, их сопротивление, упругость, определяющие их отказы. При этом рассматриваются полные комплексные сопротивления (ПКС) системы и частные комплексные сопротивления (ЧКС) элементов системы.

Из [1] следует, что ЧКС элементов будут:

$$S_1 = j \cdot w \cdot m_1 , \quad (1)$$

$$S_2 = -j \cdot k / w , \quad (2)$$

$$S_3 = r_1 , \quad (3)$$

$$S_4 = j \cdot w \cdot m_2 , \quad (4)$$

$$S_5 = k_2 / w . \quad (5)$$

Звено  $S_{23}$ , состоящее из двух параллельно соединенных элементов (рис. 2, б) будет иметь вид:

$$S_{23} = S_2 + S_3 \quad (6)$$

Звенья  $S_1$ ,  $S_{23}$ ,  $S_4$  и  $S_5$  находятся в последовательном соединении и для них

$$S_{2...4} = \frac{S_{23} \cdot S_4}{S_{23} + S_4} \quad (7)$$

Определяем ПКС всей цепи, учитывая, что элемент  $S_1$ , звенья  $S_{23}$ ,  $S_4$  и  $S_5$ , находятся в параллельном соединении, (рис. 2, б):

$$S = S_1 + S_5 + \frac{S_{23} \cdot S_4}{S_{23} + S_4} \quad (8)$$

В этих формулах  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  - круговая частота, рад/с.

После подстановки значений ЧКС, найдем ПКС ( $S$ ). Подставив численное значение, получим  $S = f(\omega)$ .

Полная комплексная подвижность при последовательном соединении элементов (ПКП или Л) равна их сумме  $L = L_1 + L_2 + \dots =$

$$L = V/Q \quad (9)$$

При параллельном соединении элементов ПКП, (Л) равна отношению произведений ЧКП отдельных элементов или элементов и звеньев или звеньев соединения к сумме ЧКП этих отдельных элементов.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots \quad (10)$$

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (11)$$

Для  $n$  элементов

Таблица 1. Классификация модулей поверхностей

Б (базирующие)			
<b>B11</b>	Плоские внутренние поверхности	<b>B312</b>	Две плоскости и цилиндрическая наружная поверхность
<b>B12</b>	Плоские наружные поверхности	<b>B321</b>	Две цилиндрические внутренние поверхности и плоскость
<b>B211</b>	Резьбовая цилиндрическая внутренняя поверхность и плоскость	<b>B322</b>	Две цилиндрические наружные поверхности и плоскость
<b>B212</b>	Резьбовая цилиндрическая наружная поверхность и плоскость	<b>B41</b>	Коническая внутренняя поверхность и плоскость
<b>B221</b>	Резьбовая коническая внутренняя поверхность и плоскость	<b>B42</b>	Коническая наружная поверхность и плоскость
<b>B222</b>	Резьбовая коническая наружная поверхность и плоскость	<b>B51</b>	Внутренние поверхности
<b>B311</b>	Две плоскости и цилиндрическая внутренняя поверхность	<b>B52</b>	Наружные поверхности
Р (рабочие)			
<b>P111</b>	Плоские внутренние поверхности	<b>P122</b>	Наружные поверхности вращения
<b>P112</b>	Плоские наружные поверхности	<b>P21</b>	Внутренние поверхности
<b>P121</b>	Внутренние поверхности вращения	<b>P22</b>	Наружные поверхности
С (связующие)			
<b>C111</b>	Плоские внутренние поверхности	<b>C122</b>	Наружные поверхности вращения
<b>C112</b>	Плоские наружные поверхности	<b>C21</b>	Внутренние поверхности
<b>C121</b>	Внутренние поверхности вращения	<b>C22</b>	Наружные поверхности

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (12)$$

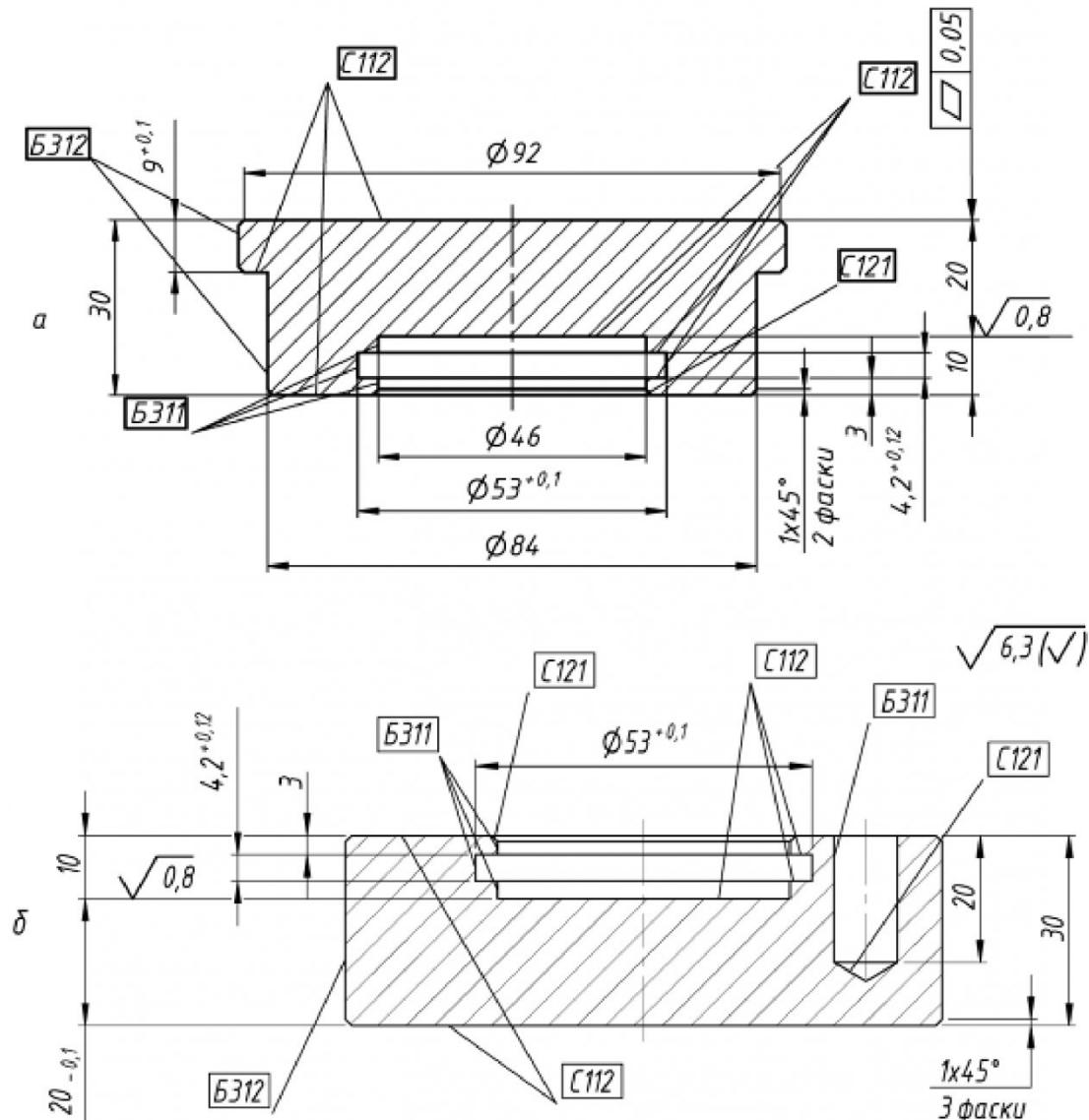
$$L = \frac{\frac{1}{L_1} \cdot \frac{1}{L_2} \cdot \frac{1}{L_3} \cdots \frac{1}{L_n}}{\frac{1}{L_1} \cdot \frac{1}{L_2} \cdots \frac{1}{L_n} + \frac{1}{L_2} \cdot \frac{1}{L_3} \cdots \frac{1}{L_n} + \cdots + \frac{1}{L_1} \cdot \frac{1}{L_2} \cdots \frac{1}{L_{n-1}}} \quad (13)$$

Определив характер и величины подвижностей  $L$  вдоль и вокруг трех осей координат в модулях соединений можно предопределить характер и время отказа, выбрать и реализовать пути увеличения надежности элементов модулей соединений, выбрать или синтезировать технологический ремонтный блок [5].

Модульное представление узла встройки как объекта производства в виде структурированного

множества модулей поверхностей (МП) и модулей соединения (МС) создает научные основы для технологического обеспечения качества [2].

Модульный принцип – особенность построения технологических систем, заключающаяся в подчинении их размеров проектному модулю или модулям и в обеспечении возможности комплектования разнообразных сложных нестандартных технических систем с большим различием характеристик из небольшого, экономически обоснованного количества типов и типоразмеров одинаковых первичных (типовых или стандартных) общих элемент-модулей. Ограниченностю номенклатуры модулей поверхностей (всего 26 наименований, табл. 1.) и модулей соединений открывает возможности создания единой элементной базы на



Неуказанные предельные отклонения размеров:  $H14$ ,  $h14$ ,  $\pm IT14/2$ .

Твердость 40...45 HRC.

Покрытие Ц12 хр.

Рис. 3. Чертежи деталей Пята нажимная (а) и Стакан (б) в модульном исполнении; материал: Сталь 38Х2Н2МА ГОСТ 4543-71

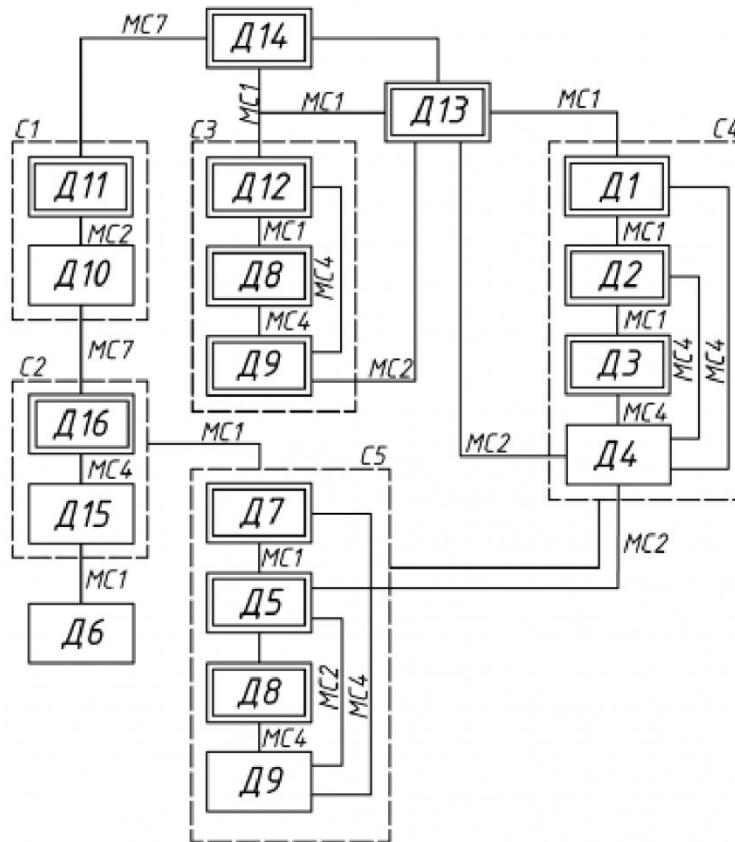


Рис. 4 Граф деталей узла встройки:  $D_1, D_2, \dots, D_{16}$  – детали изделия (соответствующие номерам позиций на рис. 1);  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – сборочные единицы

модульном уровне для всего производства.

Внедрение модульного принципа в производство начинается с модульного построения изделия.

Представим детали, испытывающие наибольшие нагрузки, пяту нажимную (а) и стакан (б), в виде совокупности модулей поверхностей, рис. 3.

Однако, описание деталей в виде совокупности модулей поверхностей не дает представления о взаимоположении деталей в пространстве.

Чтобы можно было определить характер соединений модулей поверхности представим узел встройки в виде модулей соединений, рис. 4.

Данный вид позволяет использовать типовые соединения, рассматриваемые в теории взаимозаменяемости модулей соединения (табл. 2).

Одним из путей увеличения долговечности деталей машин, работающих в условиях ударно-усталостного износа, в процессах производства и ремонта машин является применение комбинированных электротехнологических методов. Тре-

буемое сочетание воздействий, обеспечивающих необходимую долговечность деталей, в общем виде выражают уравнением:

$$\vec{S}(R; \sigma; \alpha; \beta; \gamma) \vec{v} = \vec{k} \cdot \vec{a},$$

где  $\vec{S}$  – вектор-функция, описывающая распределение показателей качества поверхностного слоя при конкретном или комбинированном воздействии;

$R$  и  $\beta$  – обобщенные микро- и макрогоеометрии поверхностного слоя;

$\sigma$  – обобщенный показатель напряженности поверхностного слоя;

$\alpha$  – показатель, характеризующий обобщенные, металлофизические особенности сформированных поверхностных зон;

$\gamma$  – показатель связи поверхностного слоя и основы материала детали.

Алгоритм расчета электротехнологических методов на основе вектора внешнего воздействия представлен на рис. 5.

Таблица 2. Классификация модулей соединения деталей

<b>MC1</b>	Плоские шпоночные и шлицевые соединения	<b>MC5</b>	Соединение двух внутренних цилиндрических отверстий с наружными
<b>MC2</b>	Резьбовые цилиндрические соединения	<b>MC6</b>	Коническое гладкое соединение
<b>MC3</b>	Резьбовые конические соединения	<b>MC7</b>	Сферическое соединение
<b>MC4</b>	Цилиндрическое гладкое соединение		

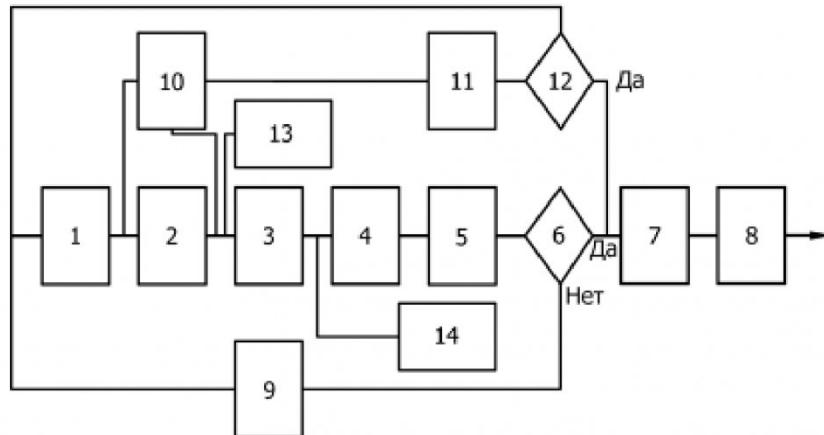


Рис. 5. Алгоритм расчета комбинированного электротехнологического метода

В основу алгоритма положен итерационный процесс изменения вектора  $\vec{S}$  внешнего воздействия, соответствующего определенному вектору параметров поверхностного слоя  $\vec{S}$  (химический состав, микро- и макрорельеф, субструктура и др.). Отдельные элементы содержат системы дифференциальных уравнений, аппроксимации экспериментальных зависимостей, блоков логических функций.

Рассмотрим работу алгоритма (рис. 5).

**Блок 1** исходных данных. Исходя из заданных условий работы деталей производится выбор материала, задается начальное значение вектора внешнего воздействия  $\vec{k}$  с использованием априорных данных.

**Блок 2** модели твердого тела содержит систему уравнений, описывающих изменение параметров поверхностного слоя некоторым вектором  $\vec{S}$ . Блок имеет четыре подсистемы: систему зависимостей, описывающих процесс фазовых превращений; систему уравнений, описывающих теплоперенос; систему уравнений, описывающую напряженное состояние, и систему массопереноса, описывающую изменение геометрии поверхности.

**Блок 3** является промежуточным выходным параметром поверхностного слоя, заданных вектором  $\vec{S}$ .

**Блок 4** модели обобщенного нагружения описывает закономерности изменения долговечности деталей в условиях реальной картины усталостного износа.

**Блок 5** содержит выходные параметры  $Z$  работоспособности, величину износа, число циклов до разрушения образца.

**Блоки 6 и 12** осуществляют сопоставление полученных и требуемых эксплуатационных характеристик с использованием вектора  $\vec{k}$ . При невыполнении этого условия происходит изменение значений вектора  $\vec{k}$ .

В блоке 7 производится разложение вектора  $\vec{k}$  на составные векторы, пространственно-временно разделенные в конкретных методах, что

осуществляется посредством таблицы идентификации во всех рассматриваемых методах.

**Блок 8** осуществляет перевод каждого составляющего вектора  $\vec{k}_i$  в параметры конкретного технологического метода с учетом полезной энергии и потерь в системе.

**Блок 9** изменяет вектор внешнего воздействия  $\vec{k}$  с помощью градиентного метода при меньших значениях эксплуатационных характеристик.

**Блок 10** связывает выходные параметры поверхностного слоя  $\vec{S}$  с вектором внешнего воздействия  $\vec{k}$ . Посредством линеаризации и упрощений эта зависимость сводится к аналитической с набором экспериментально или теоретически полученных коэффициентов.

**Блок 11** аналогично блоку 10 формирует аналитическим путем взаимосвязь поверхностного слоя  $\vec{S}$  с вектором  $\vec{Z}$ , что позволяет в процессе теоретических расчетов непрерывно уточнять приближенные зависимости критериев нагружения и упрочнения, и использовать их в разработке операций упрочнения.

В блоках 13 и 14 при расчетах применяются значения параметров твердого тела, генерируемых с помощью датчиков случайных чисел и соответствующих законов распределения.

Решение задачи о целенаправленном формировании поверхностных свойств сталей под влиянием внешних воздействий производится посредством рассмотрения и описания взаимодействия твердого тела с потоками носителя воздействий, формализуемых вектором состояния. В это математическое описание входит ряд математических моделей, связывающих параметры вектора состояния с изменением качественных характеристик поверхностного слоя деталей, как при решении тепловой задачи, так и при описании упруго-пластического деформирования твердого тела – заготовки. В частности, рассмотрение тепловой задачи с использованием методов лазерного и эрозийного упрочнения приводит к анализу динамики фазовых превращения в условиях действия

мощного потоков энергии, обеспечивая оформление конкретных критериев: шага дорожек перекрытия и фазовых превращений. Эти зависимости являются составной частью блока 2 (рис. 5).

Упругопластическая задача деформирования заготовки, а следовательно, динамика распределения остаточных напряжений определяется с учетом условий нагружения рассматриваемого объекта  $\vec{v}$  и описывается обобщенными уравнениями износа с учетом ударно-усталостного нагружения при высокой температуре, наличия агрессивных газов и жидкостей.

Такой подход позволяет создать ряд комбинаций электротехнологических методов (электроэррозионный, электрохимический, лазерный, ионно-плазменный, электронно-лучевой и т. п.) в сочетании с традиционными способами упрочнения (поверхностно-пластическое деформирование, гальваническое хромирование, химико-термическое диффузионное нанесение покрытий и др.). Применение единого энергетического подхода с использованием обобщенного вектора состояния позволяет прогнозировать оптимальные

сочетания внешних воздействий, и на их основе создавать параллельно-последовательные комбинированные электротехнологические методы, обеспечивающие увеличение конкретных эксплуатационных характеристик.

В результате теоретических исследований с использованием предоставленной блок-схемы, получены следующие сочетания электротехнологических методов:

дробеструйное упрочнение и электрохимическое полирование на импульсном и постоянном токе;

лазерное термоупрочнение в условиях сканирования луча на непрерывном CO<sub>2</sub> лазере и ультразвуковое выглаживание;

чистовое электроэррозионное формообразование, гальваническое хромирование и ультразвуковое выглаживание;

электроискровое легирование и ультразвуковое выглаживание;

шлифование и дробеструйное упрочнение;  
шлифование и ультразвуковое упрочнение.

Методика выбора рационального способа вос-

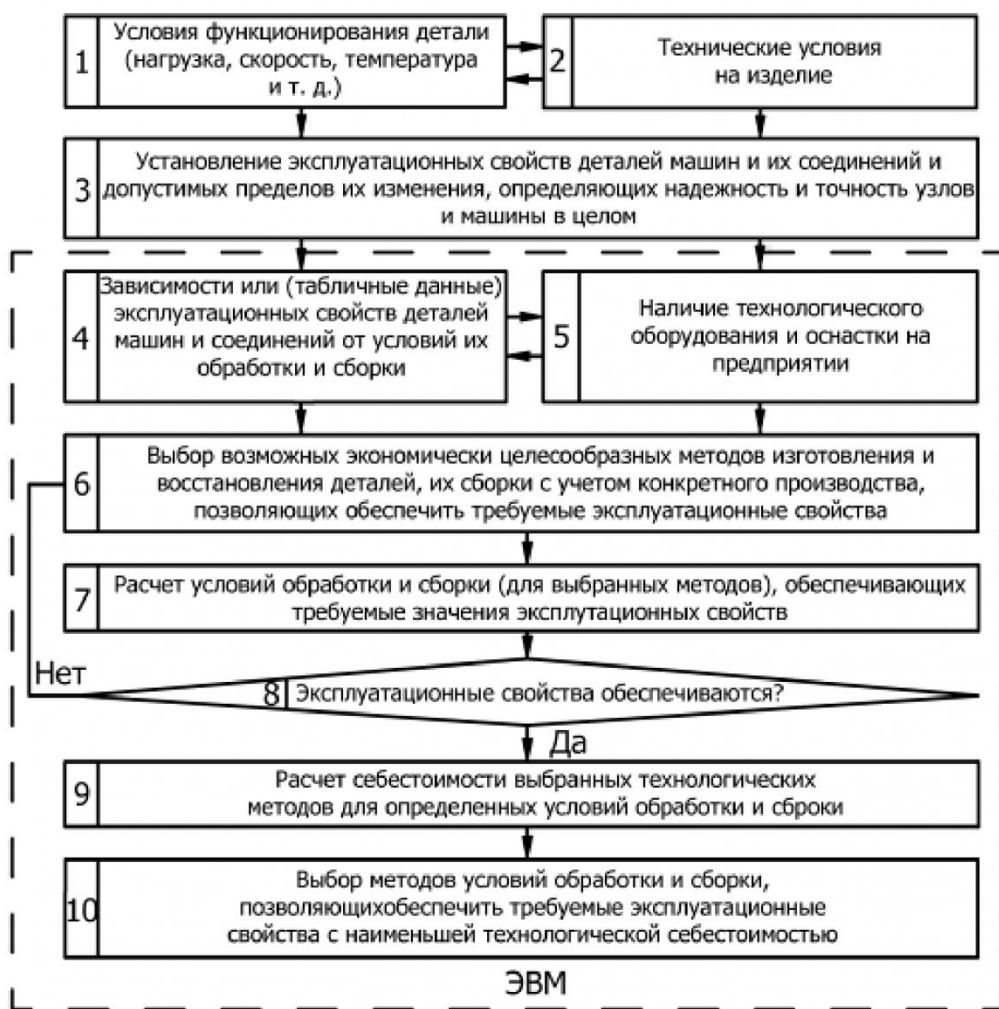


Рис. 6. Структурная схема решения задачи обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений

становления деталей основана на последовательном рассмотрении способов восстановления согласно трем критериям: применимости, долговечности и технико-экономической эффективности.

Критерий применимости или технологический критерий

$$K_T = f \left( M_d; \Phi_d; D_d; I_d; H_d; \sum_{i=1}^m T_i \right)$$

где  $M_d$  - материал детали;  $\Phi_d$ ,  $D_d$  - форма и диаметр восстанавливаемой поверхности детали;  $I_d$  - износ детали;  $H_d$  - величина и характер нагрузки восстанавливаемой детали;  $\sum_{i=1}^m T_i$  - совокупность технологических особенностей способа.

Рациональность способа восстановления деталей может определяться коэффициентом долговечности  $K_d$ , пропорциональным сроку службы деталей в условиях эксплуатации:

$$K_d = K_i K_v K_c$$

где  $K_i$ ,  $K_v$ ,  $K_c$  - коэффициенты соответственно износостойкости, выносливости и сцепляемости покрытия с основой.

Коэффициенты  $K_i$ ,  $K_v$  определяют в результате испытаний на изнашивание и усталость. Для определения  $K_c$ , наиболее широкое применение получил метод отрыва штифта.

Окончательное решение о целесообразности применения выбранного способа принимают по критерию взаимосвязи стоимости восстановления детали  $C_v$  с ее долговечностью

$$C_v \leq K_d C_n$$

где  $C_n$  - стоимость новой детали.

Виды нагрузок на рис. 2 характеризуют взаимодействие поверхностей узла встройки и датчика силы (удар, скольжение, вибрация, коррозия).

На рис. 6 представлена структурная схема решения задачи обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и их сопряжений.

Для повышения долговечности сферы пяты и опоры они могут быть изготовлены из твердого сплава ВК15. При изготовлении пяты датчика

можно рекомендовать определить границу скругления сферической поверхности, например при электрохимической размерной обработкой для исключения прижогов и микротрещин при изготовлении. Эта задача решена сотрудниками КГУ (г. Казань) и НГТУ (г. Новосибирск) использованием теории функций комплексного переменного с привлечением гидродинамической интерпретации [4]. Удалось определить координаты точек границ скругления сферической части опоры при заданных геометрических параметрах.

Эффективным методом повышения надежности подвижных сопряжений являются АМТП – технологии (адресная модификация функциональных поверхностей по патентам Украины № 34768 МКН С10М 125/10 «Способ для обработки пар трения». // Александров С. М. и № 35512А МКН F16C 33/14. Способ обработки поверхностей пар трения. // Агафонов А. К. [3]

Целесообразно использовать способ формирования информационной модели и синтеза технологического блока ТБ (комплекса методов и средств производства, технологически обеспечивающий качество объекта производства или ремонта) по патенту РФ № 2333088 для выбора технологических воздействий на функциональные поверхности пяты нажимной, поз. 16, и стакана, поз. 14, на рис. 1 с целью технологического обеспечения оптимальных параметров этих поверхностей (шероховатость, твердость и др.) [5].

### Заключение

Повышение надежности узла встройки тензометрического датчика возможно выявлением характера взаимодействий и действующих сил в элементах узла встройки, построением и решением механических цепей; использованием твердого сплава вместо стали в контактирующих элементах; оптимизацией, при изготовлении форм скругления сферической части опоры; использованием АМТП – технологий; путем использования виртуальных информационных моделей при синтезе РБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинский И. Механические цепи. – Л.: Машиностроение, 1977. – 240 с.
2. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
3. Физика, химия и механика трибосистем. Межвузовский сборник научных трудов, вып. 3. – Иваново, НВГУ, 2003. – 70 с.
4. Клоков В. В., Красильников Б. А., Яннолтский В. В. Решение задачи скругления сферической части опоры пары трения при электрохимической размерной обработке. // Обработка металлов, 2010, № 1 [46], с. 9-13.
5. Патент РФ № 2333088, МПК, В23Р 6/00. Способ формирования технологического ремонтного блока. ГУ КузГТУ. Коган Б. И., Черныш А. П. Опубл. В Б. Н., 2008, № 25.

□ Авторы статьи:

Коган

Борис Исаевич

- докт. техн. наук, проф. каф. технологии машиностроения КузГТУ

Тел. 8-906-928-80-81

Васильков

Станислав Андреевич

- студ. гр. МК-071 КузГТУ

Тел. 8-906-988-42-62