

Е.А. Польский, к.т.н., доц.

Брянский государственный технический университет

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ
ТОЧНОСТИ СБОРОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ МЕТОДОМ
ГЕНЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ДЛЯ УСЛОВИЙ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ
С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В статье приводится методика обеспечения работоспособности сборочной единицы при совмещении конструкторской и технологической подготовки производства, с возможностью определения конструкторских размеров с учетом их изменения в процессе эксплуатации и проектирования технологического процесса для формирования требуемых параметров точности и качества поверхностей, обеспечивающих заданную долговечность.

Введение. Выпуск качественной конкурентоспособной продукции с наименьшими затратами было и остается основной задачей технической подготовки производства. Качество продукции во многом определяется на этапах проектирования, изготовления и сборки. На этапе проектирования конструктор осуществляет подбор материалов контактирующих деталей, проводит отработку на технологичность, на основе расчетов на прочность и жесткость назначает номинальные функциональные размеры, назначает параметры качества функциональных поверхностей с учетом обеспечения требуемых эксплуатационных свойств, обеспечивающих работоспособность узлов и машины в целом.

На этапах изготовления деталей сборочных единиц решается задача разработки технологических процессов механической обработки с выбором оборудования, инструмента, технологической оснастки и назначением режимов обработки, обеспечивающих достижение требуемых параметров точности и качества функциональных поверхностей для установленной долговечности.

При сборке необходимо обеспечить заданную точность замыкающего звена одним из методов, формирование посадок сопряжения, обеспечение герметичности и др.

Все три етапа, входящие в общую структуру разработки и постановки продукции на производство, согласованы между собой размерными связями. Поэтому задача комплексного решения размерных цепей с целью реализации конструкторско-технологического обеспечения работоспособности изделия является важным технико-экономическим аспектом повышения эффективности производства и, как следствие, инструментом создания качественных, конкурентоспособных изделий.

В настоящее время последовательность проведения размерного анализа осуществляется в два этапа [1, 2, 3].

Цель работы. Основная часть. На первом этапе конструктор определяет основные габаритные и номинальные размеры элементарных соединений с учетом обеспечения требований по прочности, жесткости и надежности; при разработке рабочего проекта устанавливает значение требуемой точности и величину посадок на функциональные размеры определяющие работоспособность узла и обеспечивающие требуемую точность замыкающего звена на основе расчета сборочных размерных цепей; формируя чертежи деталей сборки, задает вспомогательные размеры для определения размерных характеристик всех конструктивных элементов детали.

На втором этапе для выбранной последовательности переходов в операциях и установленной последовательности смены технологических баз технолог проводит размерно-точностной анализ с целью определения межоперационных размеров, а, следовательно, подтверждения достижения точности конструкторских размеров.

Таким образом, при классическом расчете выделяют следующие типы размеров:

- конструкторские размеры, обеспечивающие точность функциональных параметров изделия;
- технологические размеры, обеспечивающие необходимую точность конструкторских размеров при изготовлении детали.

В настоящее время происходит постоянное повышение требований к качеству проектирования при одновременной необходимости ускорения темпов выполнения этих работ. В результате появляется необходимость параллельной разработки конструкторской и технологической документации, проведения других мероприятий конструкторско-технологической подготовки производства. Жесткое планирование выполнения проектных работ приводит к еще более тесному взаимодействию конструкторов и технологов, созданию единых конструкторско-технологических отделов. Все это создает предпосылки к реализации принципа одноступенчатого

проектирования – технологическое обеспечение требуемых параметров долговечности изделия при проектировании конструкции и разработке чертежей деталей на основе анализа размерных связей, включающего расчет технологически обоснованных значений конструкторских размеров с учетом их изменения в процессе эксплуатации для повышения надежности функциональных показателей машин.

Принцип одноступенчатого проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Это особенно актуально при проектировании машин в мелкосерийном и единичном производстве, так как в этом случае обычно не разрабатывается весь комплекс документации, предусмотренный стандартами разработки и постановки продукции на производство (РПП), а сама разработка проектов осуществляется силами нескольких специалистов.

При эксплуатации размерные связи не остаются постоянными [2, 4]. На машину будут воздействовать внешние и внутренние факторы, которые приводят к потере точности. Такие воздействия необходимо учитывать для комплексного обеспечения точности, поэтому для расчета размерных цепей необходимо выделить еще одну группу размеров – эксплуатационные размеры. Они описывают дополнительные размерные связи, возникающие при эксплуатации изделия. Включение эксплуатационных размеров в конструкторские размерные цепи, позволяет обеспечивать требуемую точность функциональных параметров в течение заданной долговечности изделия.

Целью исследований является решение комплексной задачи обеспечения работоспособности сборочной единицы (узла) на этапах изготовления и сборки на основе анализа и решения размерных связей с формированием технически и технологически обоснованных рекомендаций назначения требований по точности (допуск, верхние и нижние отклонения функциональных размеров с учетом их изменения при эксплуатации, допуск отклонения от правильной геометрической формы, допуск отклонения взаимного расположения поверхностей) и качеству поверхности с достижением требуемой долговечности с разработкой этапов технологического процесса для компактных производственных систем.

В предлагаемой модели одноступенчатого обеспечения работоспособности узла конструктор будет не сам проставлять все размеры, а делать это или совместно с технологом, или строить только

расчетные модели, связывающие функциональные свойства и параметры машины с размерами деталей. А при использовании интегрированных автоматизированных систем проектирования, в результате вычислений по таким моделям, будут определяться критические размеры. При этом технолог получит возможность самостоятельно выбирать базы для простановки конструктивных размеров, что приведет к максимально полному использованию принципа совмещения баз и положительно скажется на себестоимости изделий.

Компания Gartner составила прогноз развития IT технологий для машиностроения на ближайшие 5–10 лет и, в частности, выделяет два таких направления как создание систем управления технологическими процессами (Manufacturing Operations Management Solutions) — систем, предназначенных для запуска, контроля, визуализации и ведения электронных записей производственных операций. Эта, как правило, глубоко специфичная для предприятий функциональность подобных систем не присутствует в должной мере в продуктах известных производителей, поэтому здесь продолжают успешно работать нишевые игроки, обладающие экспертными знаниями в производстве. Подобные системы известны также как MES-системы.

Наибольшая эффективность использования систем MOMS на предприятиях возможна только на компактных производственных модулях (системах) (Microfabrication Labs) — наборе контролируемых компьютером устройств для обработки материалов. Это компактные многоцелевые станки или производственные линии, требующие минимальных инвестиций и затрат на использование и обслуживание. Кроме этого, они могут получать производственные инструкции в электронной форме от удаленных центров НИОКР.

Проблематикой обеспечения точности сборочных соединений занимались разные научные школы, как за рубежом, так и в нашей стране. Особое внимание, при этом, уделялось исследованиям взаимосвязи факторов влияющих на конечные показатели соединения. Основой всех исследований являлась разделение всего многообразия встречающихся соединений по схожим классам, с исследованием всех факторов влияющих на конечное качество сопряжения.

Исследования обеспечения качества сборочных узлов разделяются на два больших направления: 1) автоматизация расчетов, связанных с отклонениями в сборке от допусков деталей, входящих в соединение; 2) исследование факторов влияющих на качество сборки, во взаимосвязи – заготовка–обработка–сборка. При этом основной упор

делался на нахождение закономерностей и функциональных зависимостей, а потом на формализацию расчетов.

Для решения размерных цепей используются различные методики, на основе анализа исследований зарубежных и отечественных ученых был выбран метод прямой линеаризации (Direct Linearization Method). Этот метод позволил описать сборку как цепь векторов.

В векторной форме уравнение размерной цепи в общем случае представляется в простейшем виде:

$$\vec{A}_{\Delta} = \sum_i^n \vec{A}_i \text{ и } \vec{T}_{\Delta} = \sum_i^n \vec{T}_i,$$

где n – количество составляющих размеров в цепи.

Обычно пространственные цепи решают разложением таких уравнений по трем проекциям на координатные оси. Если учитывать, что в пространственную размерную цепь могут входить не только линейные, но и угловые размеры, то общее векторное уравнение следует раскладывать и на линейные проекции и на угловые.

В общем виде, используя матричную форму представления, это можно записать в виде выражения:

$$\{T_{\Delta}\} = [A_{ji}] \cdot \{T\},$$

где $[A_{ji}]$ – матрица, содержащая частные производные, описанные выше, $\{T_{\Delta}\}$ – вектор-столбец, содержащий допуск замыкающего звена, $\{T\}$ – вектор-столбец, содержащий допуски составляющих размеров цепи.

Для учета влияния на точность замыкающего звена эксплуатационных звеньев принят метод введения в размерную цепь новых составляющих размеров, которые будут описывать изменение размерных связей в процессе эксплуатации.

Уравнение такой размерной цепи имеет вид:

$$\vec{T}_{\Delta} = \sum_i^n \vec{T}_i + \sum_j^m \vec{T}_{\text{эк}j},$$

где $T_{\text{эк}}$ – допуски на эксплуатационные размеры, существенно воздействующие на точность замыкающего звена.

В общем виде допуск линейного замыкающего звена складывается из допусков составляющих звеньев в каждой из проекций с учетом угловых размеров

$$T_{\Delta} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\varepsilon_{k_k}})^{\mu} \right)^2}$$

Здесь t – коэффициент риска, характеризующий вероятность выхода отклонений звена за пределы допуска; λ – коэффициенты относительного среднеквадратичного отклонения; β – коэффициент расширения допуска; μ – коэффициент степени, учитывающий метод расчета размерных цепей.

При обеспечении точности замыкающего звена в пространственной размерной цепи методом максимума минимума ($\mu = 1$) выражение принимает вид:

$$T_{\Delta} = \frac{1}{\beta} \sqrt{\sum_i^3 \left(\sum_j^{n-1} (B_{ij} T_j) + B_{\acute{o}\acute{a}i} T_{\acute{o}\acute{a}} \right)^2} = \frac{1}{\beta} \sqrt{\sum_i^3 (d_i^2 + 2d_i B_{\acute{o}\acute{a}i} T_{\acute{o}\acute{a}} + B_{\acute{o}\acute{a}i}^2 T_{\acute{o}\acute{a}}^2)}$$

$$T_{\Delta}^2 \beta^2 = \sum_i^3 d_i^2 + 2T_{\acute{o}\acute{a}} \sum_i^3 B_{\acute{o}\acute{a}i} d_i + T_{\acute{o}\acute{a}}^2 \sum_i^3 B_{\acute{o}\acute{a}i}^2,$$

где $d_i = \sum_j^{n-1} B_{ij} T_j$.

Непосредственно назначение допусков составляющих размеров (решение прямой задачи или синтез) можно осуществлять различными методами. К наиболее известным методам относят методы попыток, равного качества, равного допуска, пропорционального влияния и метод экономически обоснованных допусков. Каждый из них имеет различную трудоемкость и различную эффективность. Однако наилучшие результаты получают при использовании метода экономически обоснованных допусков. Его суть заключается в обеспечении минимальной себестоимости изготовления всего комплекта составляющих размеров для заданной точности исходного (замыкающего) звена:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\varepsilon_{k_k}})^{\mu} \right)^2} \leq T_{\Delta} \\ \sum_i^{n+m} S_i \rightarrow \min \end{array} \right.$$

где S_i – функция себестоимости выполнения i -го составляющего размера, n – количество конструктивных составляющих размеров, m – количество эксплуатационных составляющих размеров.

Другим возможным методом решения прямой задачи является назначение допусков составляющих размеров с учетом вероятности безотказной работы $P(t)$:

$$\left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^\mu + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{y\acute{e}_k})^\mu} \right)^2} \right. \\ \left. 1 - P(t) \leq [Q], \right.$$

где $[Q]$ – величина допустимого брака.

$$P(t) = 0,5 + \hat{O} \left(\frac{T_\Delta - T_0 - \gamma_{\acute{n}\delta} t}{\sqrt{\sigma_{T_0}^2 + \sigma_\gamma^2(t) t^2}} \right),$$

где t – срок службы машины, в течение которого необходимо обеспечить вероятность безотказной работы $P(t)$; $\Phi(x)$ – стандартное нормальное распределение функции; T_0 – допуск замыкающего звена после изготовления и сборки машины, равный допуску составляющих размеров на этот момент времени; γ – скорость изменения размера замыкающего звена во времени, σ – среднеквадратические отклонения соответствующих параметров.

Из проанализированных схем формирования точности замыкающего звена видно, что уравнение размерной цепи можно представить в форме:

$$T_\Delta = \sum_i^n c_i T_i + \sum_j^m c_j k_{внут_j} k_{внеш_j} k_{T_{\acute{э}к_j}}$$

где c – коэффициент передаточного отношения, $k_{внеш_j}$ – коэффициент, характеризующий зависимость допуска j -го эксплуатационного размера от внешних факторов, $k_{внут_j}$ – коэффициент, характеризующие зависимость допуска j -го эксплуатационного размера от внутренних факторов, $k_{T_{\acute{э}к_j}}$ – коэффициент учитывающий погрешности расчетной модели определения эксплуатационных свойств.

Предложена классификация элементарных прототипов, учитывающая возможные движения, допускаемые конкретным сопряжением (рис. 1).

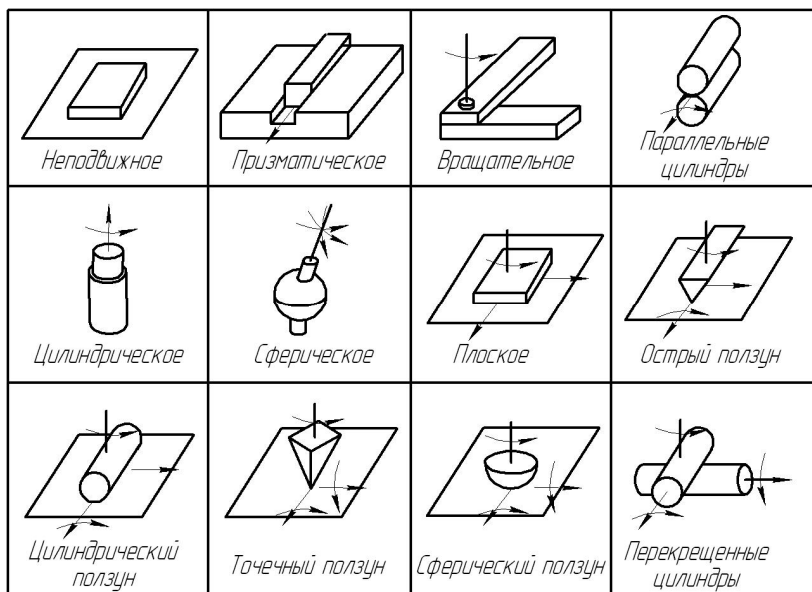


Рис. 1. Виды элементарных прототипов контактирующих пар

Определение значений коэффициентов $k_{\dot{a}\dot{a}\dot{o}_j}$ и $k_{\dot{a}\dot{o}\dot{o}_j}$ внешних и внутренних факторов эксплуатационные звеньев-износов для заданного прототипа и с учетом требований по долговечности позволит обосновать выбор материалов, смазки, параметров качества поверхности.

При проведении размерного анализа с учетом эксплуатационных процессов изнашивание удобнее всего оценивать линейным износом – необратимым изменением формы и размеров контактирующих тел, в направлении перпендикулярным к поверхности трения. В зависимости от параметров нагружения, а в общем случае и от неоднородности свойств изнашиваемых поверхностей линейный износ будет неравномерным (рис. 2).

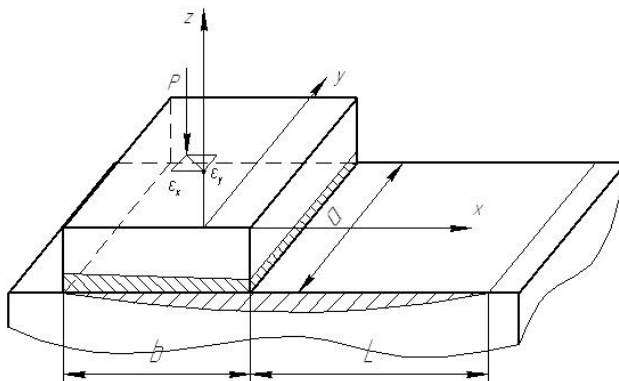


Рис. 2. Расчетная схема сопряжения

Рассмотрение действий контактных деформаций поверхности и изнашивания раздельно, вводит некоторую неточность в расчет, но позволяет получить уравнения, которые в большей степени удобны для технологического управления этими эксплуатационными свойствами. В результате их можно более гибко использовать для проведения размерного анализа сборок и позволит получить выходы на технологию изготовления отдельных деталей.

Износ детали, являющейся ползуном в сопряжении, в соответствии с эшюрой давлений, можно представить:

$$U_2 = k_2 p(l) V t,$$

где $p(l)$ – закон распределения давлений по контактирующим поверхностям.

После учета распределения давления при интегрировании суммарный износ в соединении составит

$$\delta = U_1 + U_2 = k_1 \frac{P}{ab} \left(1 + \frac{12\varepsilon_x}{b^2} x + \frac{12\varepsilon_y}{a^2} y \right) V t + k_2 s \int_{l_1}^{l_2} \varphi(x-l) \frac{P}{ab} \left(1 + \frac{12\varepsilon_x}{b^2} l + \frac{12\varepsilon_y}{a^2} y \right) dl.$$

Из зависимостей видно, что ползун имеет линейную зависимость износа поверхности, а направляющая деталь – нелинейную (рис. 3). Кроме этого на изнашивание ползуна будет большое влияние

оказывать функция $\varphi(x)$ определяющая допуск отклонения от правильной геометрической формы контактирующих поверхностей.

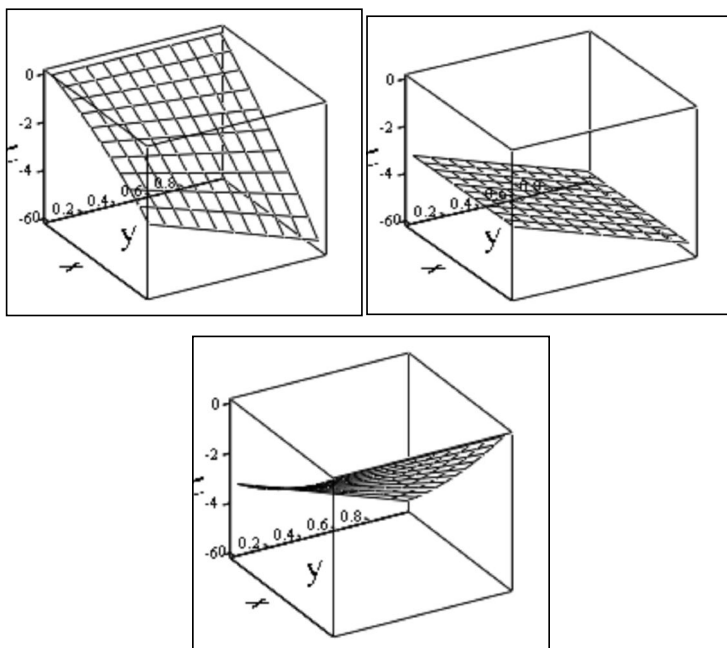


Рис. 3. Форма изношенной поверхности в сопряжении

Кроме этого, необходимо учесть влияние контактной жесткости соединения при упругих и пластических деформациях. Величина пластических деформаций контактирующих деталей определяется формированием фактической площади контакта с учетом ее шероховатости, волнистости, макроотклонений и физико-механических свойств, способной выдерживать приложенную нагрузку.

Учитывая довольно тесную корреляционную связь упругих и пластических деформаций, зависимости определения контактной жесткости примут вид:

$$\dot{\sigma}_{i\bar{e}_1} = \left(\frac{2 \cdot P \cdot Ra_1^2 \cdot Wz_1^2 \cdot H \max_1^2}{A \cdot U_{i1} \cdot \sigma_{\dot{\sigma}_1}} \right)^{1/3};$$

$$\dot{\sigma}_{\dot{\sigma}_1} = \pi \cdot \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \cdot U_{i1} \cdot \sigma_{\dot{\sigma}_1} \cdot Sm_1 \cdot \left(\frac{\dot{\sigma}_{i\bar{e}_1}}{Ra_1} \right)^{0.5},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости; Wz – средняя высота волнистости; $H \max$ – максимальная высота макроотклонения; Sm – средний шаг неровностей профиля шероховатости.

Основные положения и методика расчета поверхностей на трение и износ при скольжении изложены в работах А.Г. Суслова:

$$I_h = \frac{1.2 \cdot \pi \cdot p^{7/6}}{n \cdot \lambda \cdot tm^{3/2} \cdot H\mu_0^{3/2}} \sqrt{\frac{30 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot Ra \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3}}{E \cdot Sm}},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; Wz – средняя высота волнистости по десяти точкам, мкм; $H \max$ – максимальная величина макроотклонений формы поверхности, мкм; tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; Sm – средний шаг неровностей, мкм; λ – коэффициент, учитывающий знак и значение остаточных напряжений; σ_T – величина остаточных напряжений, МПа; k – коэффициент упрочнения; p – давление, МПа; n – число циклов воздействия до разрушения поверхностного слоя; E, μ – механические свойства материала заготовки.

Преобразовав зависимость с учетом требований по возможности метрологического контроля, технологического управления и приоритетности параметров качества, влияющих на износостойкость, получаем:

$$I_h \cdot C_M = C_R$$

где C_R – комплексный параметр, характеризующий зависимость интенсивности изнашивания поверхности от параметров качества поверхностного слоя; C_M – комплексный параметр, зависящий от механических свойств материала контактирующей детали:

$$C_R = \frac{(W_z \cdot H \max)^{1/6}}{Sm^{0.5} \cdot \lambda \cdot (k \cdot \sigma_T)^{2/3}} \cdot Ra^{2/3} \cdot (Rp - Ra)^{0.5}$$

$$C_M = \frac{n}{43.47 \cdot (p \cdot \pi)^{7/6}} \cdot \sqrt{\frac{E}{1 - \mu^2}}$$

Теоретическое уравнение изменения коррозионной стойкости деталей при механической обработке имеет вид:

$$v_e = v_{e0} \cdot \left(1.1 \cdot U_i^4 + 4 \cdot U_H^3 - 4.1 \cdot U_H^2 \right) \cdot \left(\frac{28 \cdot 10^6 \cdot Rv}{tm^2 \cdot Sm^2} \right).$$

Для формализации определения допуска отклонения от правильной геометрической формы поверхностей использовалось математическое описание элементарных поверхностей как плоских, так и объемных.

Проблема построения конструкторско-технологических моделей (далее КТМ) деталей, в той или иной степени, затрагивается во многих работах посвященных автоматизации проектирования технологических процессов. Существует множество классификаторов типовых технологических поверхностей для различных классов деталей, в которых, в наиболее обобщенном виде, накоплены знания и опыт многих специалистов. Проанализировав, существующие классификаторы, можно определить набор частных конструкторско-технологических элементов (далее КТЭ) необходимых для описания КТМ деталей различных классов.

За основу классификации конструкторско-технологических элементов (далее КТЭ) была принята классификация КТЭ, разработанная В.Д. Цветковым и применяемая компанией Аскон в продукте Компас.

Основным критерием классификации современного металлорежущего инструмента была возможность его применения для формообразования элементарной поверхности детали машин. Кроме этого учитывалось внутреннее деление типа инструментов в соответствии с каталогами инструмента различных фирм производителей.

Современное металлообрабатывающее оборудование, выпускаемое большинством производителей имеет модульную структуру и обеспечивает возможность получения различного уровня комплектаций.

Согласованные относительные движения заготовки и режущего инструмента, которые непрерывно создают производящие линии, а, следовательно, поверхность заданной формы в целом, называют формообразующими.

Синтез технологического процесса для КПС представляет собой методику последовательного анализа возможности обработки элементарной поверхности с достижением на финишном переходе параметров точности и качества, обоснованные для функциональных поверхностей по условию заданной долговечности. Для каждой элементарной поверхности предлагается максимально возможное число вариантов обработки, анализируется возможность реализовать формообразующие движения на станке и, в итоге, сформировать ТП для комплексной обработки заготовки (рис. 4).

Реальное сокращение стоимостных (уменьшение основного и вспомогательного времени, снижение амортизационных отчислений на оборудование и технологическую оснастку) и материальных (снижение припусков на механическую обработку и повышение коэффициента использования материала) затрат возможно только при соблюдении комплексного проектирования технологии, когда работа конструктора и технолога скоординирована таким образом, что обеспечивается заданная наработка узла на отказ за счет правильной постановки размеров и из отклонений на чертеже и, кроме этого, решена задача оптимизации структуры технологического процесса.

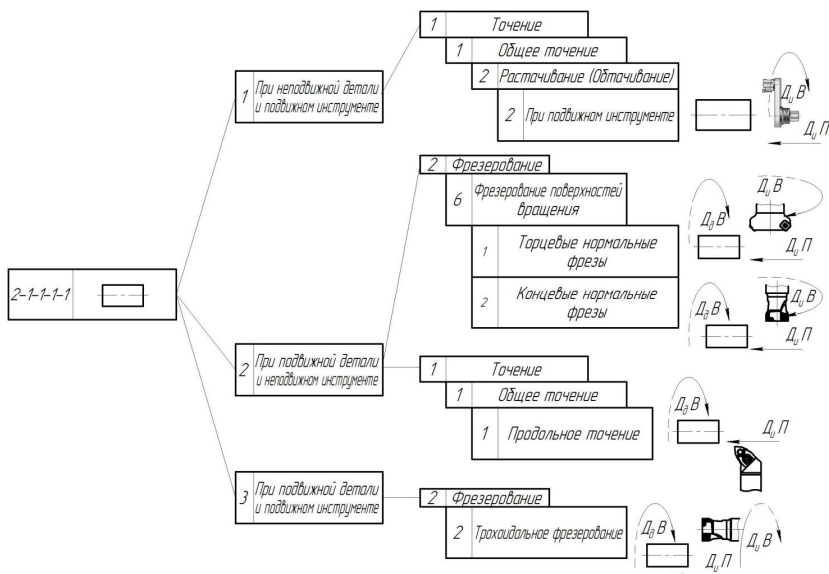


Рис. 4. Схемы обработки цилиндрической ступени вала

Выводы. Из проведенного анализа влияния применяемых методов простановки размеров в ходе конструкторской подготовки производства на технологичность конструкции деталей можно сделать вывод, что для повышения технологичности необходимо решить задачу оптимизации простановки размеров. При решении данной задачи необходимо учитывать рекомендации по выбору и последовательности смены технологических баз, соответствие точности выполнения размера и метода механической обработки, особенности формирования минимального припуска для цепей, где припуск является замыкающим звеном и требования по точности размеров заготовок, получаемых различными методами. Это приводит к повышению сложности расчетов и необходимости введения математических методов, учитывающих многовариантность принимаемых решений – экспертные системы на основе неявных множеств. По критериям минимизации припуска и (или) минимуму рабочих ходов оптимизируется размерно-точностной анализ при различных схемах простановки операционных размеров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Качество машин : справочник : в 2 т. / *А.Г. Сулов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др.* – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 430 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / *А.М. Дальский, А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков и др.* – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 912 с.
3. *Тарабасов Н.Д.* Проектирование деталей и узлов машиностроительных конструкций : справочник / *Н.Д. Тарабасов, П.Н. Учаев.* – М. : Машиностроение, 1983.
4. *Орлов П.И.* Основы конструирования : справ.-метод. пособие : в 2 т. / под ред. *П.Н. Усачева.* – М. : Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 560 с.

ПОЛЬСКИЙ Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– технология машиностроения.

Подано 02.06.2011