

УДК 621.75  
DOI: 10.12737/18713

**А.Г. Суслов, д.т.н.,  
О.Н. Федонин, д.т.н.,  
Е.А. Польский, к.т.н.**  
(Брянский государственный технический университет,  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)  
E-mail: unti@tu-bryansk.ru

## Научная технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла

*Приведена методика непрерывной компьютерной поддержки технологического обеспечения качества сборочных единиц на основе автоматизированных подсистем проведения размерного анализа для основных этапов жизненного цикла, позволяющих анализировать технологические, сборочные и эксплуатационные размерные связи в конструкциях машин.*

**Ключевые слова:** точность; допуск; размерный анализ; моделирование технологического процесса; параметры качества поверхностного слоя; эксплуатационные свойства; долговечность; технологическое обеспечение параметров качества; проектирование технологической операции.

**A.G. Suslov, D.Eng.,  
O.N. Fedonin, D.Eng.,  
E.A. Polsky, Can.Eng.**  
(Bryansk State Technical University,  
7, 50-th Anniversary of October Boulevard 241035, Bryansk)

## Science intensive technology of quality increase in machinery assembly units at life cycle stage

*The procedure of continuous computer support in technological assurance of assembly unit quality on the basis of the automated subsystems of a dimensional analysis fulfillment for the main stages of a life cycle allowing the analysis of technological, assembly and operation ties in machinery structure is shown. The scientific approaches to technological assurance of machinery unit life on the basis of the analysis of dimension ties arising at the basic stages of a product life cycle are stated. At the heart of investigations is laid the realization of a continuous analysis of dimensioning ties at the basic stages of a life cycle (designing, manufacturing, assembly and service of a product) combined into a general automated subsystem of engineering computations (MES- system) for assurance of machine life stated in design requirements.*

**Keywords:** accuracy; tolerance; dimensional analysis; technological process simulation; surface layer quality parameters; performance attributes; life; technological support of quality parameters; technological operation designing.

Размерный анализ является эффективным инструментом для расчета геометрической точности конструкций машин. С его помощью можно определять номинальные значения, отклонения и допуски размеров, рассчитывать нормы точности и разрабатывать технические условия на машины и их составные части, выполнять анализ правильности простановки размеров и отклонений на рабочих чертежах

деталей, рассчитывать межоперационные размеры, припуски, определять необходимую точность приспособлений и т.д.

Точность является одним из важнейших показателей качества многих машин. Кроме того, точность расположения функциональных поверхностей косвенно оказывает влияние и на многие другие параметры и характеристики машин (параметры служебного на-

значения, надежность, эксплуатационные свойства поверхностей и т.п.), поэтому дальнейшее совершенствование методов размерного анализа конструкций и технологических процессов является актуальной задачей.

Традиционным считается выполнение анализа размерных связей при проектировании в два этапа [1 – 3]: расчет конструкторских размерных цепей и расчет технологических размерных цепей.

Постоянное повышение требований к качеству проектирования, при одновременной необходимости ускорения темпов выполнения этих работ, приводит к необходимости параллельной разработки документации при выполнении мероприятий конструкторско-технологической подготовки производства и создания единых конструкторско-технологических отделов. В результате создаются предпосылки реализации принципа одноступенчатого проектирования – технологического обеспечения требуемых эксплуатационных показателей машин и их надежности при одновременном проектировании технологии механической обработки с уточнением параметров сборки.

Принцип одноступенчатого проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Такое проектирование актуально при

любом типе производства и любой сложности технического проекта.

Необходимость повышения качества продукции и, в частности, надежности требует полного анализа работы узла на этапах проектирования. Следует учитывать не только функциональные параметры, но и технологические возможности производства и сборки машины, возможности контроля основных ее параметров и их изменение в процессе последующей эксплуатации.

На рис. 1, а приведен пример размерной цепи, формирующей осевой зазор между торцом зубчатого колеса и простановочным кольцом. Этот зазор является конструкторским требованием по обеспечению работоспособности узла.

При эксплуатации размерные связи не остаются постоянными [1 – 3]. На машину будут воздействовать внешние и внутренние факторы, которые приводят к потере точности. Такие воздействия необходимо учитывать для комплексного обеспечения точности, поэтому для 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.

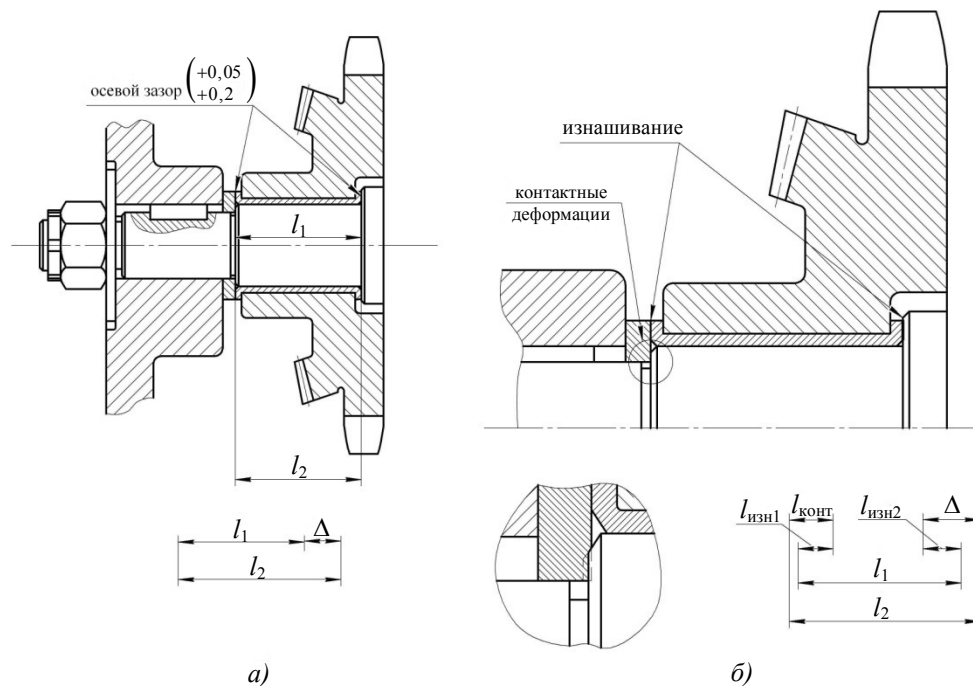


Рис. 1. Формирование точности функционального размера:

а – простая конструкторская размерная цепь; б – конструкторская размерная цепь, с включенными в нее эксплуатационными звеньями

На рис. 1, б изображены несколько дополнительных эксплуатационных звеньев. Так, в процессе сборки при затяжке фиксирующей гайки, возникают усилия, приводящие к определенной величине контактных деформаций. Также в процессе эксплуатации имеет место изнашивание торцов блока-шестерни и оси, причем характер износа для двух торцов будет различным, учитывая реальное распределение эпюры давления в зоне контакта.

Каждый составляющий конструкторский размер формируется в процессе изготовления деталей либо непосредственно при получении заготовки, либо при последующей обработке (чаще всего механической со снятием припусков). Для этого детали определенным образом ориентируются относительно инструментов или неподвижных частей станков. При этом точность конструкторских размеров достигается различными технологическими методами: совмещением, постоянством или последовательной сменой баз [4, 6].

При обработке хребтовой рамы железнодорожного вагона основной особенностью является включение в анализ размерных связей компенсации теплового деформирования исходного полуфабриката в результате выполнения сварочных операций и сверления системы отверстий большого диаметра (рис. 2).

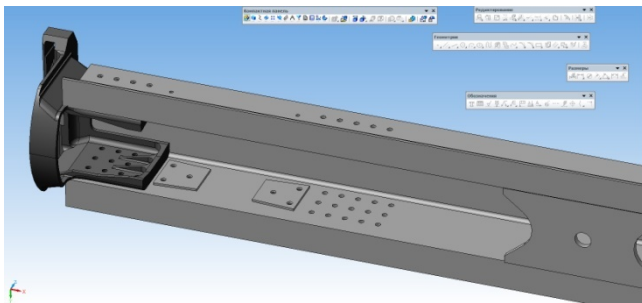


Рис. 2. Модель хребтовой рамы с установленными элементами и отверстиями

Из-за несимметричного расположения нагреваемой полосы для определения активного внутреннего усилия ограничим пластину условными боковыми связями (рис. 3). Эти связи не препятствуют деформациям вдоль оси пластины, но предотвращают явление изгиба от действия внутренних усилий в процессе нагрева и охлаждения средней полосы.

После охлаждения средней полосы остаточные напряжения в средней полосе равно пределу текучести, а напряжения сжатия в крайних полосах можно определить из усло-

вий равновесия, Па:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_2 F_1}{F - F_1} = \frac{\sigma_m b_1}{h - b}, \quad (1)$$

где  $F$  – поперечное сечение всей пластины;  $h$  – ширина пластины;  $b$  – ширина средней (нагреваемой) полосы.

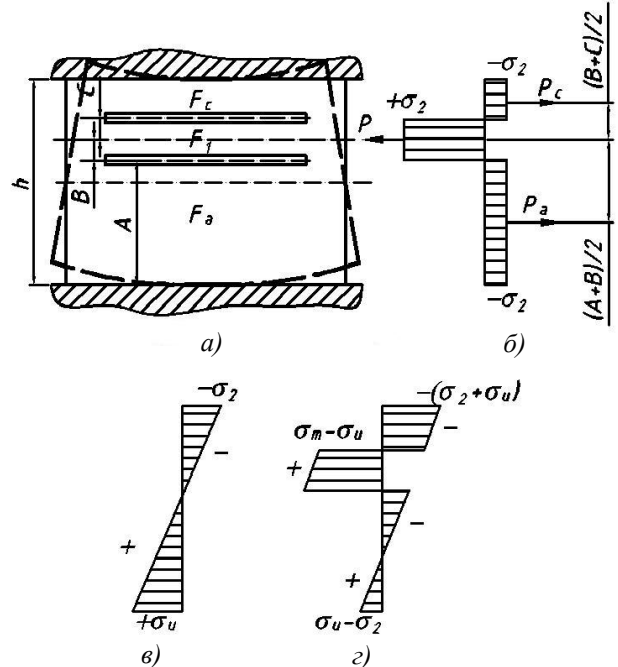


Рис. 3. Нагрев полосы, смещенной относительно центральной оси пластины:

а – стальная пластина со смещенной полосой и боковыми ограничениями; б – эпюра остаточных напряжений; в – эпюра напряжений от изгиба пластины после удаления боковых ограничений; г – результирующие остаточные напряжения в пластине после снятия боковых ограничений

Действие изгибающего момента уравнивается реактивным противодействием боковых ограничений. Если пластину освободить, то под действием момента она изогнется. Произойдет перераспределение напряжений в ее волокнах.

Напряжение от изгиба, Па:

$$\sigma_{u32} = \frac{M}{W} = \frac{\delta M}{\delta h^2} = \frac{3P(a - c)}{\delta h(h - b)}. \quad (2)$$

Прогиб пластины можно определить по формуле, м:

$$f = \frac{Ml^2}{8EJ} = \frac{P h(a - c)l^2}{16(h - b)EJ}. \quad (3)$$

Для решения задачи технологического обеспечения требуемой точности сложных сварных заготовок, проходящих при изготовлении несколько этапов различных обработок, в частности, сварка основной конструкции,

соединение с дополнительными элементами формированием неразъемных соединений и окончательная механическая обработка, необходимо решить ряд задач:

- формализация описания схемы сборки или ТП сборки с учетом выбранного метода обеспечения точности замыкающего звена, в частности, использование принципа наследования при формировании сборки с использованием автоматизированных систем (базовый принцип Pro/Engineer);
- определение (выявление) конструкторского параметра, определяющего работоспособность машины (узла) на основе моделирования процесса кинематического взаимодействия (по кинематической схеме).

В результате объединения размерных цепей с учетом формирования каждого типа размеров могут быть назначены предельные отклонения исходных размеров [1, 5].

$$T_{\Delta} = \sum_i^n c_i T_{Si} + \sum_j^m c_j k_{\text{внут}_j} k_{\text{внеш}_j} k_{T_{\Delta k_j}} + \sum_k^l c_k k_{\text{внут}_k} k_{\text{внеш}_k} k_{o_k} k_{T_{\Delta k_k}}, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициенты передаточных отношений;  $T_S$  – допуски технологических размеров;  $k_{\text{внут}}$ ,  $k_{\text{внеш}}$ ,  $k_d$ ,  $k_{T_{\Delta k}}$  – коэффициенты, формирующие допуски эксплуатационных размеров, соответственно для внутренних и внешних факторов, долговечности, точности расчетной схемы, используемой для определения параметров эксплуатационных свойств.

Значения дополнительных эксплуатационных звеньев являются функциями, которые определяются внешними и внутренними факторами. К внешним факторам можно отнести условия эксплуатации: величину и характер нагрузки, скоростные режимы, долговечность и др. К внутренним факторам – параметры, которые определяют эксплуатационные свойства сопряженных поверхностей: материал деталей, смазочные материалы, параметры качества поверхностного слоя и др.

Получены функции, описывающие дополнительные эксплуатационные звенья для разных типов сопряжений. Так, в плоском контакте сопряженных деталей и при наличии между ними небольших осциллирующих движений, например вследствие вибраций, происходит изнашивание. Взаимное внедрение поверхностей в результате изнашивания приводит к самоустановке деталей. При этом величина внедрения  $U_1$  и  $U_2$  и возможный пере-

кос поверхностей можно описать уравнением плоскости в пространстве:

$$U_1 + U_2 = \beta_1 x + \beta_2 y + U_{\min}, \quad (5)$$

где  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – коэффициенты уравнения плоскости, соответствующие тангенсам углов наклона плоскости износа к соответствующим осям;  $U_{\min}$  – минимальное сближение в контакте.

Коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и параметр  $U_{\min}$  для такой расчетной схемы можно определить как

$$\beta_1 = \frac{6P(k_1 + k_2)Vt}{ab^3} (b - 2l_{px}); \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{6P(k_1 + k_2)Vt}{a^3b} (a - 2l_{py}); \quad (7)$$

$$U_{\min} = \frac{P(k_1 + k_2)Vt}{a^2b^2} (6al_{px} + 6bl_{py} - 7ab). \quad (8)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты износа, характеризующие фрикционные свойства;  $P$ ,  $V$ ,  $t$ ,  $l_{px}$ ,  $l_{py}$  – параметры эксплуатации сопряжения;  $a$ ,  $b$  – геометрия сопряжения.

Из полученных выражений легко выделяются параметры характеризующие внешние факторы эксплуатационных размеров  $k_{\text{внеш}}$ . Аналогичным образом выделяются параметры, определяющие внутренние факторы  $k_{\text{внут}}$  и далее относительного определенного единичного или комплексного параметра качества поверхностного слоя выполняется решение задачи.

Выделение из эксплуатационного допуска  $k_{\text{внеш}_j}$  и  $k_{\text{внут}_j}$  удобно при выполнении прямой задачи размерного анализа. Вместе с коэффициентами передаточных отношений, эти новые коэффициенты позволяют сравнивать относительную значимость воздействия различных эксплуатационных звеньев на точность замыкающего звена. Другими словами, можно видеть, к каким поверхностям предъявляются более высокие требования (по точности для обычных технологических звеньев и по параметрам качества поверхностного слоя для эксплуатационных звеньев).

Также следует обратить внимание на вид эксплуатационных звеньев. Их можно разделить на звенья, имеющие условно постоянный размер, и звенья, имеющие условно переменный размер во времени. К первым относятся эксплуатационные размеры, связанные с деформациями контактирующих поверхностей, а ко вторым – с изнашиванием поверхностей. При этом переменный во времени размер является некоторой постоянной величиной для всего периода эксплуатации узла или машины. С другой стороны вид эксплуатационного

звена определяет значения их номиналов и допусков.

Для повышения технологичности при ремонте машины, в качестве критерия оптимизации можно принять одинаковую долговечность или кратную долговечность всех деталей сборки или узлов. В первом случае, размерный расчет допусков эксплуатационных звеньев деталей первого и второго типа не отличается. Аналогом является расчет на равнопрочность всех деталей сборки. Во втором случае, использование различной долговечно-

сти деталей в узле или узлов в машине позволяет управлять точностью замыкающих звеньев сборки и тем самым находить экономически оптимальный межремонтный срок службы. Наличие ремонтов с заменой деталей, потерявших точность, позволяет уменьшать допуски эксплуатационных звеньев, и тем самым облегчить обеспечение заданной точности машины остальных размеров цепи.

В результате для обеспечения эксплуатационных параметров сборки мы приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} \sum_i^{n_1} c_i T_{S_i} + \sum_j^{m_1} c_j k_{\text{внут}_j} k_{\text{внеш}_j} k_{T_{Эк_j}} + \sum_k^{l_1} c_k k_{\text{внут}_k} k_{\text{внеш}_k} k_{\delta_k} k_{T_{Эк_k}} = T_{\Delta_1}; \\ \sum_i^{n_2} c_i T_{S_i} + \sum_j^{m_2} c_j k_{\text{внут}_j} k_{\text{внеш}_j} k_{T_{Эк_j}} + \sum_k^{l_2} c_k k_{\text{внут}_k} k_{\text{внеш}_k} k_{\delta_k} k_{T_{Эк_k}} = T_{\Delta_2}; \\ \sum_i^{n_3} c_i T_{S_i} + \sum_j^{m_3} c_j k_{\text{внут}_j} k_{\text{внеш}_j} k_{T_{Эк_j}} + \sum_k^{l_3} c_k k_{\text{внут}_k} k_{\text{внеш}_k} k_{\delta_k} k_{T_{Эк_k}} = T_{\Delta_3}; \end{cases} \quad (9)$$

В случае использования для обработки деталей одинакового основного оборудования и технологической оснастки и учета погрешностей появляются дополнительные совместные звенья цепи, и связность уравнений еще более корригируется [6].

Кроме задачи определения допусков составляющих звеньев, т.е. допусков размеров и параметров качества поверхностного слоя, предложенный комплексный подход к анализу размерных связей можно использовать при разработке оптимизированных технологий изготовления деталей машин.

В настоящий момент на этапе технологической подготовки производства подбор технологических баз и перераспределение допусков между операционными размерами также выполняется. Однако предлагаемая концепция отличается от используемых в данный момент методов тем, что появляется возможность уже при конструировании узла определять и закладывать технологию изготовления.

Для всех свободных поверхностей, которые не выполняют никаких определенных функций в конструкции узла, конструкторские размерные цепи не формируются. Таким образом, при решении расчетной схемы эти поверхности автоматически получают размеры от принятых технологических баз. При проработке технологических процессов это гарантированно позволяет избежать включения в технологические размерные цепи неответственных размеров.

При решении размерных цепей сборочного узла может быть получено большое количество размерных уравнений, поэтому подобный анализ следует выполнять с использованием ЭВМ и соответствующего программного обеспечения.

Разработанная система позволяет учитывать целый ряд технологических параметров и получать оптимальный набор технологических баз для заданных начальных условий. Поиск оптимального набора выполняется на основе исходной информации о конфигурации деталей, особенностях выбранных технологических баз, вида операций технологических процессов, технологических возможностей в обработке отдельных поверхностей деталей и других параметров. В результате выполняется определение коэффициентов технологичности баз и возможных технологических (операционных) размеров.

Поиск допусков технологических размеров и параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих необходимые значения эксплуатационных свойств, следует выполнять методами математического программирования. В качестве целевой функции обычно выбирают себестоимость изготовления и эксплуатации узла, но при необходимости можно использовать функцию, характеризующую требуемую надежность, функцию производительности или любую другую функцию, описывающую необходимый критерий оптимальности.

Следовательно, решение задачи будет сведено к системе

$$\begin{cases} F = f(S, k_{T_{\Sigma k}}, z) \rightarrow \min; \\ CT_{Skz} \leq T_{\Delta}. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь  $F$  – целевая функция, используемая для оптимизации параметров размерной цепи;  $C$  – матрица, содержащая передаточные коэффициенты составляющих звеньев цепи;  $T_{Skz}$  – вектор искомых параметров составляющих звеньев;  $T_{\Delta}$  – вектор допусков исходных параметров узла;  $z$  – звенья припусков на механическую обработку.

Решение прямой задачи размерного анализа по этой системе требует оптимизации с учетом затрат не только на изготовление и эксплуатацию, но и на ремонт, а также связанный с ним простой оборудования. Разработана математическая модель экономичности обеспечения параметров. Она базируется на учете себестоимости выполнения технологических операций и их влиянию на получение определенных значений параметров точности и эксплуатационных свойств деталей. В общем случае полученные модели имеют вид:

$$F = k_0 \prod_i T_{SKz_i}^{m_i}. \quad (11)$$

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

$$T_{\Delta} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\Sigma k})^{\mu} \right)^2}. \quad (12)$$

Здесь  $t$  – коэффициент риска, характеризующий вероятность выхода отклонений звена за пределы допуска;  $\lambda$  – коэффициент относительного среднеквадратичного отклонения;  $\beta$  – коэффициент расширения допуска;  $\mu$  – коэффициент степени, учитывающий метод расчета размерных цепей.

Размеры, входящие в размерную цепь, обязательно являются независимыми величинами. Между ними могут существовать различного рода связи. Например, обычные технологические размеры деталей, изготовленных с применением одного и того же приспособления, инструмента или на одном и том же настроенном оборудовании, часто имеют корреляционную связь. Корреляция оказывает дополнительное воздействие при расчете допуска замыкающего звена вероятностным методом [5]:

$$K_{\Sigma r}^2 T_{\Sigma r}^2 = \sum_{i,j}^{pq} C_{ij}^2 K_{ij}^2 T_{ij}^2 + 2 \sum_{j=1}^q \left( C_j K_j T_j \sum_{i=2}^{m(n,\dots,p)} r_{ij} C_{ij} K_{ij} T_{ij} \right), \quad (13)$$

где  $i$  – порядковый номер зависимых величин внутри каждой группы;  $j$  – порядковый номер групп зависимых величин.

Известно, что протекающие на поверхностях эксплуатируемых деталей изнашивание, деформации и т.п. тесно связаны с качеством этой поверхности и условиями их работы. В ходе исследований проведен корреляционный анализ связей между некоторыми видами конструкторских и эксплуатационных размеров. Износ поверхностей зависит от вида сопряжения, поэтому в определенной степени точность выполнения размеров сопряжения, точности формы и расположения поверхностей влияют на интенсивность изнашивания.

Это воздействие проявляется через изменение номинальной площади контакта, скоростей скольжения, увеличения динамической составляющей нагрузки и т.п. Для сопряжения «вал–втулка» были получены коэффициенты парной корреляции между величиной линейного износа с одной стороны и параметрами шероховатости, отклонениями профиля продольного сечения, радиального биения с другой [3].

Таким образом, объединение конструкторских цепей с технологическими цепями позволяет более гибко управлять качеством машин, в том числе определять параметры эксплуатационных свойств поверхностей деталей. Общие размерные схемы позволяют проследить совместное влияние различных параметров на качество и, прежде всего точность, проектируемых машин и отдельных сборочных единиц. Применение численной оптимизации системы ограничений заключается в уходе от ручных методов, которые обычно сводятся к усреднению звеньев цепи или по величине допуска, или по значению качества. Допуск обоснованно перераспределяется из менее строгих размерных цепей или составляющих размеров в более ответственные цепи с трудно реализуемыми размерами.

Если требования производства в процессе проектирования и простановки размеров детали учитываются в недостаточной мере, то при изготовлении и восстановлении деталей возникают затруднения, которые удлиняют сроки подготовки производства и могут вызвать до-

полнительную потребность в технологической оснастке и привести к увеличению трудоемкости, что в конечном итоге приведет к увеличению себестоимости продукции [3].

В формализованном виде процесс обеспечения технологичности изделия можно представить как воздействие на множество параметров точности размеров изделия  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ , которое приводит к достижению экстремальной цели при соблюдении сформулированных ограничений вида  $g_i(X) = 0$  и  $h_j(X) \geq 0$  [2].

$$Q(X) \rightarrow \underset{X \in S}{extr} \quad (14)$$

$$S: \begin{cases} g_i(X) = 0, & i = \overline{1, I}; \\ h_j(X) \geq 0, & j = \overline{1, J}, \end{cases}$$

где  $Q, g, h$  – функции, которые определяются исходя из требований точности размеров изделия и разнообразных производственных, эксплуатационных и ремонтных факторов, влияющих на технологичность изделий.

В рассмотренной методике размерного анализа и расчёта размерных цепей размерная структура техпроцесса представляется в двух основных видах: в виде размерной схемы и в виде размерного графа, объединяющего размеры детали, заготовки и технологического процесса:

$$G = \{G_{дет}, G_{заг}, G_{тех}\}, \quad (15)$$

где  $G_{дет}$  – граф конструкторских размеров детали;  $G_{заг}$  – граф конструкторских размеров исходной заготовки;  $G_{тех}$  – граф технологических размеров и припусков ТП механической обработки.

Часть ограничений учитывается при построении матрицы типовой размерной структуры ТП, для учета остальных на основе МСЭД создаем матрицу точности и свойств поверхностей (ТСП), записывая в матрице экономических допусков нули вместо допуска для тех случаев, когда простановка размера между поверхностями не возможна.

В формализованном виде зависимость определения оптимального соотношения размеров примет вид:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1, j=1}^{k, k} \left( c_{ij} e_{ij} t_{ij} \sum_{u=1}^{k-1} |b_{(ij)u}| \right), \quad (16)$$

где  $1/2$  – коэффициент, учитывающий дублирование размерных связей в матрице ТРС;  $k$  – количество узлов графа размерной структуры (равно размерности матрицы ТРС);  $c_{ij} = 2^{K-y}$  – коэффициент увеличения трудоемкости при ужесточении средне-

экономического допуска (по существующим нормативам при увеличении точности на качество (К-Ку), увеличивается в 2 раза);  $e_{ij} = 1000/l_{ij}$  – коэффициент приведения точности (равен обратной величине единицы допуска, приведенной к мм),  $1/\text{мм}$ ;  $t_{ij}$  – коэффициент из матрицы ТСП, мм;  $b_{(ij)u}$  – коэффициент матрицы размерных цепей, соответствующий  $a_{ij}$  из матрицы РС.

Критерий  $Q$  учитывает комплекс конструкторско-технологических и структурных ограничений матрицы точности и свойств поверхностей, экономических факторов целевой функции, при этом является безразмерной величиной, не изменяющей физического смысла.

Размерно-точностной анализ технологического процесса оптимизируется по критериям минимизации припуска и (или) минимуму рабочих ходов при различных схемах простановки операционных размеров.

Для подтверждения возможности достижения требуемой точности размера, рассчитанной в рамках автоматизированной подсистемы, по приведенной формуле [4] может быть определена суммарная погрешность обработки, обусловленная факторами, непосредственно связанными с процессом резания, а также решена обратная задача, т.е. по заданному значению суммарной погрешности может быть определено требуемое сочетание режима резания.

Технологическая подготовка в современных условиях, не может осуществляться без использования средств автоматизации и систем автоматизированного производства (CAD/CAM/CAE-систем). Однако отдельное использование этих средств не дает желаемого результата, а иногда создает еще и дополнительные препятствия. В настоящее время вопросы технологической подготовки могут быть решены на качественно новом уровне с использованием интегрированных САПР. Применение этих систем должно быть неразрывно связано с CALS-технологиями – современными технологиями информационной интеграции процессов, выполняющихся в ходе всего жизненного цикла продукции, и ее компонентов [1].

Генеративный подход к разработке технологии подразумевает автоматический синтез стратегии обработки на основании геометрической конфигурации и технических требований, предъявляемых к детали, с указанием сведений о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках контроля изделия.

$$\Delta_{\Sigma} = \tau_p \mu_2 \sin \eta \left( \frac{20L_3}{c_j E_g d^4} + \frac{1}{c_1 D^x} + \frac{1}{J_{np}} \right) St \times \left\{ \frac{1}{B} - 1 + \operatorname{tg}(\arctg B - \gamma) + \frac{0,5 \rho_1 b}{\mu_1 St} \left[ \arccos \left( 1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}} \right) + \frac{a_2 B^{1-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right] \cos \alpha \right\} -$$

$$-A_2 \theta_A \left( 0,5 + \frac{0,3 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{BE}} + \frac{0,465 B^{1,275} B^{0,625} E^{0,55} \cos \alpha}{\Gamma^{0,25} D^{0,075} \sin^{0,275} \operatorname{aerf} \sqrt{\frac{BB}{4}}} \right) - 10^3 \left\{ \frac{C \beta_g \theta_m F_0^m}{0,5 R_H + 1} \left( \frac{l}{S_m} \right)^n \left[ R_H - \left( \frac{R_B}{R_H} \right)^{0,5 R_H} R_B \right] \right\} + c_1 \frac{\pi dl}{S} \left( \frac{\tau_p}{\sigma_u} \right)^{m_1} (BB)^{j_1} E^{\tau_1}; \quad (17)$$

Структура конструкторско-технологической модели формообразования детали  $Q_{КТ}$  можно представить следующим образом [2]:

$$Q_{КТ} = \langle Z, M_{КТ}, C_{КТ}, S \rangle, \quad (18)$$

где  $Z = \langle Z_1 \dots Z_n \rangle$  – данные для идентификации детали и общие сведения о ней;  $M_{КТ} = \langle \mathcal{E}_{КТ}, O_{КТ} \rangle$  – структурный состав детали;  $\mathcal{E}_{КТ}$  – множество конструкторско-технологических элементов (КТЭ);  $O_{КТ}$  – множество отношений над ними;  $C_{КТ} = \langle \mathcal{E}_{КТ}, I \rangle$  – множество схем обработки конструкторско-технологического элемента;  $I = \langle I_1 \dots I_n \rangle$  – данные о инструменте, реализующем  $i$ -ю схему обработки;  $S = \langle B_C, D_C \rangle$  – структурный состав станка;  $B_C$  – множество блоков станка;  $D_C$  – множество движений блоков станка.

В отличие от обобщенной КТМ, в данном определении отсутствуют основные технологические базы, предполагается, что их определение является одной из функций САПР ТП. Кроме того, используется единственный уровень расчленения детали.

Для эффективной обработки геометрическая модель должна включать в себя как плоский чертеж, выполненный в соответствии со стандартами, так и трёхмерную модель (современные САД системы тяжелого и среднего уровня обеспечивают такую возможность).

Такой подход позволит решить задачу автоматизированного проектирования структуры технологической операции с генерацией рекомендаций по оптимальному назначению, как стратегии обработки элементарной поверхности, так и по траектории движения инструмента с разработкой управляющей программы для системы ЧПУ.

Комплексное решение конструкторско-технологических задач обеспечения требуемой точности размеров деталей на основных этапах жизненного цикла изделия возможно на основе концепции автоматизированной подсистемы технологической подготовки производства, обеспечивающей определение конструктивных размеров и корректировку

точности функциональных размеров отдельных деталей по критериям повышения технологичности конструкции при оптимизации простановки технологических размеров для различных вариантов реализации операций механической обработки (выбор схемы установки заготовки, настройка станков различных типов на обеспечение требуемой точности конструкторских размеров).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модель обеспечения качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей / В.Б. Ильицкий, Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Справочник. Инженерный журнал. 2010. №4 (157). С. 51–56.
2. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2009. №5/277 (576). С. 59–66.
3. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.
4. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
5. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Расчет допусков размеров. М.: Машиностроение, 2001. 304 с.
6. Повышение точности токарных станков с ЧПУ / О.Н. Федонин, Д.И. Петрешин, В.А. Хандожко, А.В. Агеев // Научные технологии в машиностроении. 2012. №5(11). С. 36–43.

## REFERENCES

1. Model of assembly unit quality support based on dimensioning ties analysis/ V.B. Ilyitsky, E.A. Polsky, D.M. Filkin // Reference Book. Engineering Journal. 2010. №4 (157). pp. 51–56.
2. Model of dimensioning ties complex analysis to ensure accuracy in assembly units / E.A. Polsky, D.M. Filkin // Proceedings of OrelSTU. Series “Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology”. 2009. №5/277 (576). pp. 59–66.
3. Engineering of Part Surface / the authors; under the editorship of A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering. 2008. pp. 320.
4. Bezyazychny V.F. Similarity Method in Engineering Techniques. M.: Mechanical Engineering, 2012. pp. 320.
5. Dunayev P.F., Lelikov O.P. Dimension Tolerance Computation. M.: Mechanical Engineering, 2001. pp. 304.
6. NC Lathe accuracy increase / O.N. Fedonin, D.I. Petreshin, V.A. Khandozhko, A.V. Ageyenko // Science intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2012. № 5(11). pp. 36–43.

Рецензент д.т.н. В.В. Непомилуев