

УДК 621.75
DOI: 10.12737/21427

Е.А. Польский, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет)
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 71
E-mail: polski.eugene@hotmail.com

Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей

Изложены основные положения технологического обеспечения точности и качества поверхностей деталей машин на основных этапах жизненного цикла изделия при разработке технологии механической обработки методом автоматизированного генеративного синтеза единичных маршрутных процессов изготовления.

Ключевые слова: метод генерации технологических процессов; распознавание поверхностей; технологичность изделий; размерный анализ.

E.A. Polsky, Can.Eng.
(Bryansk State Technical University)
7, 50 Years of October Avenue, 241035)

Technological support of accuracy and quality of machinery surfaces at designing of route-operation engineering process by synthesis method based on dimensions ties analysis

Basic regulations for technological support of accuracy and quality of machinery surfaces at the basic stages of a product life cycle at the development of machining techniques by a method of automated generative synthesis of single route processes of manufacturing are presented.

Keywords: method of engineering processes generation; surface recognition; product manufacturability; measuring analysis.

Качество продукции закладывается на первых этапах жизненного цикла: при проектировании; при решении вопроса по обеспечению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений; при технологической подготовке производства, с выбором стратегии обработки элементарной поверхности для достижения параметров качества поверхностного слоя де-

тали, обеспечивающих ее установленную долговечность; и сборке, при которой происходит контактирование поверхностей деталей и осуществляется их действительное взаимное расположение [1].

Подготовка производства 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.

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. При этом создаются 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 на опытном производстве при подготовке к выпуску новых изделий, а также в мелкосерийном и единичном производстве, так как в этом случае обычно не разрабатывается весь комплекс документации, предусмотренный стандартами разработки и постановки продукции на производство, а сама разработка проектов осуществляется силами нескольких специалистов.

Структуру конструкторско-технологической модели (КТМ) формообразования детали $Q_{КТ}$, можно представить следующим образом [2]:

$$Q_{КТ} = \langle Z, M_{КТ}, C_{КТ}, S \rangle; \quad (1)$$

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 об 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.

На основе 2D и 3D модели детали КТЭ можно представить в виде следующего кортежа данных:

$$\mathcal{E}_{КТ} = \langle P, (\mathcal{E}_{3D}, \mathcal{E}_q, O), C \rangle, \quad (2)$$

где $P = \langle P_1 \dots P_m \rangle$ – параметры, описывающие КТЭ; \mathcal{E}_{3D} – множество элементов трехмерного представления КТЭ; \mathcal{E}_q – множество элементов двумерного представления КТЭ; O – множество отношений над ними; C – множество ограничений на параметры и структуру КТЭ.

К параметрам КТЭ относятся: геометрические размеры, система координат КТЭ, параметры шероховатости основных поверхностей, параметры точности, вид термообработки, механические свойства, вид поверхностного покрытия.

Некоторые из перечисленных параметров имеют нечеткую природу. Так, например, коническая поверхность, присутствующая в модели, может интерпретироваться и как КТЭ фаски, и как КТЭ коническая ступень вала. При этом различие между ними можно выразить так – протяженность фаски много меньше, чем ступени вала, кроме того, параметры точности и шероховатости исполнения фаски, как правило, не высоки в отличие от ступени и лежат в нечетко определенном интервале.

Представленное в данной работе математическое обоснование процедуры распознавания КТЭ, подразумевает автоматическое формирование КТЭ существующей 3D модели детали, без участия человека. Непосредственная реализация описанной здесь математической

модели на данном этапе исследования может быть затруднена.

Геометрическую модель (ГМ) детали Q_G можно описать:

$$Q_G = \langle \mathcal{E}_G, O_G \rangle, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_G – множество геометрических элементов; O_G – множество отношений над ними.

Тогда задачу декомпозиции ГМ на КТЭ можно сформулировать следующим образом: определить все возможные подмножества Q_G , определяемые зависимостью (3) и удовлетворяющие ограничениям C .

Рассмотрим КТЭ фаска и КТЭ коническая ступень (рис. 1). Как видно, оба этих элемента представляют собой поверхность вращения с образующей прямой, наклонной к оси вращения. Так же одинаков набор параметров характеризующих эти КТЭ. Поэтому при распознавании такие элементы образуют конфликтное множество. Следовательно, возникает задача многокритериальной классификации с нечетко разграниченными классами объектов.

В качестве критериев выбора выступают ограничения на параметры КТЭ. При этом большинство ограничений являются нечеткими. Например, ограничения на длину фаски l , шероховатость поверхности Ra , качество точности T . Данная задача известна и достаточно хорошо разработана в области дифференциальной диагностики [3].

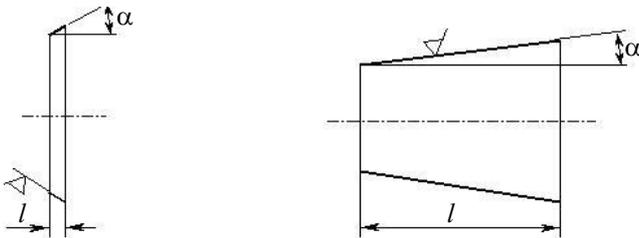


Рис. 1. Пример представления конструкторско-технологического элемента фаска (а) и коническая ступень (б)

Анализ работ в этой области показывает, что в качестве математической базы для решения данной задачи может использоваться теория нечетких множеств Л.А. Заде [4]. Пусть U – полное множество, охватывающее все объекты некоторого класса. Нечеткое подмножество F множества U , которое в дальнейшем будем называть нечетким множеством, определяется через функцию принадлежности $\mu_F(u)$, $u \in U$. Эта функция отображает элементы u_i множества U на множество вещественных чисел отрезка [3, 4], которые

указывают степень принадлежности каждого элемента нечеткому множеству F .

В этом случае каждый тип КТЭ представляет собой класс объектов, характеризующихся соответствующим набором частных критериев (параметры точности, шероховатости, геометрические характеристики и т.п.) в виде кортежа:

$$\langle A_1^k, A_2^k, \dots, A_n^k \rangle, \quad (4)$$

где A_n^k – нечеткое множество на базовом множестве X_i , ($X_1 = Ra$, $X_2 = l$, $X_3 = T$), k – k -й тип КТЭ.

Тогда любой набор геометрических элементов, предположительно формирующих КТЭ, характеризуется вектором исходных данных:

$$(\bar{u}) = (u_1, \dots, u_n), u_i \in X_i, \quad (5)$$

где u_i – конкретное значение критерия, характеризующего КТЭ.

В соответствии с известными подходами был введен обобщенный критерий КТЭ D^k , который представляет собой декартово произведение частных критериев:

$$\forall k : D^k = A_1^k \times \dots \times A_n^k. \quad (6)$$

Значение обобщенного критерия, для заданного вектора исходных данных (4), можно определить зависимостью:

$$\mu_{D^k}(\bar{u}) = \min \{ \mu_{A_1^k}(u_1), \dots, \mu_{A_n^k}(u_n) \}. \quad (7)$$

В случае если критерии неравнозначны, каждому из них приписывается число $\alpha_i \geq 0$ – коэффициент относительной важности. Тогда набор частных критериев принимает вид:

$$\langle (A_1^k)^{\alpha_1}, (A_2^k)^{\alpha_2}, \dots, (A_n^k)^{\alpha_n} \rangle, \quad (8)$$

$$\alpha_i \geq 0, i = \bar{1}, \bar{n}; \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad (9)$$

где α_i определяются на основании процедуры парных сравнений критериев. По известной методике находится w – собственный вектор матрицы B , соответствующий максимальному собственному значению матрицы λ_{\max} :

$$B_w = \lambda_{\max} w. \quad (10)$$

Значения коэффициентов α_i получаются умножением элементов w на n для выполнения условия (9).

При определении нечетких параметров КТЭ эксперты должны указать нечеткие ин-

тервалы или значения, в которых, по их мнению, может находиться тот или иной параметр. На основании этих данных необходимо построить функции принадлежности, которые определяют принадлежность объекта тому или иному типу по каждому параметру. Наличие известных функций принадлежности позволяет производить математическую обработку нечетких суждений, высказанных экспертами.

Анализ литературы показывает, что наиболее подходящим, в данном случае, является метод, который сводится к отысканию параметров заданной (экспоненциальной) функции, на основании результатов экспертного опроса, которая отвечает естественным свойствам функций принадлежности – наличие одного максимума и гладкие затухающие до нуля фронты.

Для числа приблизительно равного некоторому числу K функция имеет вид:

$$\mu_k(u) = e^{-\alpha(k-u)^2}, \quad (11)$$

где α зависит от требуемой нечеткости $\mu_k(u)$ и определяется из выражения:

$$\alpha = \frac{4 \ln 0,5}{\beta^2}, \quad (12)$$

где β – расстояние между точками перехода для $\mu_k(u)$, т.е. точками, в которых функция вида (11) принимает значение 0,5.

Таким образом, задача построения $\mu_k(u)$ для некоторого числа сводится к отысканию параметров a и b , чтобы затем можно было определить $\beta(x)$ и, используя α , построить $\mu_k(u)$.

Для определения множества вида с числом, приблизительно равным K , следует выяснить, как эксперты представляют себе границы классов таких чисел. Для этого проводятся статистические исследования. Экспертам предлагают назвать такие $a(k)$ и $b(k)$, которые, по их мнению, отделяют числа, приблизительно равные заданному K , от чисел, таковыми не являющимися.

Также $\beta(x)$ может быть непосредственно определено при экспертном опросе. В этом случае эксперту предлагают назвать не только само число K , но и точку степень принадлежности которой понятию числа приблизительно равному K , по его мнению, равна 0,5. Тогда $\beta(k) = 2|K - a|$.

В случае, когда параметр определяется нечетким интервалом, заданным значениями K_1 и K_2 , принимаем функцию принадлежности

заданной выражением (13) вблизи K_1 и K_2 , равной 1 между ними. Тогда

$$\mu(u) = \begin{cases} e^{-\alpha_1(k_1-u)^2}, & \text{если } u \leq K_1 \\ 1, & \text{если } K_1 < u < K_2 \\ e^{-\alpha_2(k_2-u)^2}, & \text{если } u \geq K_2 \end{cases} \quad (13)$$

Описанная выше методика определения функций принадлежности, верна для непрерывных величин, характеризующих такие критерии, как параметр шероховатости Ra или длина ступени l . Для дискретных величин с небольшим базовым множеством, например качество точности размера T , функцию принадлежности эксперты могут задать перечислением.

Схему обработки конструкторско-технологического элемента ($C_{КТ}$) можно представить, как взаимодействие самого КТЭ ($\mathcal{E}_{КТi}$) и инструмента (I_i). При этом в данной работе нас будет интересовать только движения КТЭ ($\mathcal{D}\mathcal{E}_{КТi}$) и движения инструмента ($\mathcal{D}I_i$), образующих схему обработки [1, 2].

Структурный состав станка (S) представляется совокупностью составляющих его блоков (B_C) и множеством движений (D_C), характеризующих каждый блок станка. Однако для общего представления информации о станке, на данном этапе необходимы следующие данные о блоках станка. Необходимые данные можно отнести к параметрам каждого из блоков станка:

- назначение блока станка (для обеспечения движения инструмента или детали);
- возможность обеспечения назначения блоком своих функций (описывается множеством объектов, которые могут использоваться данным блоком).

Приняв, что мы получили КТЭ, описывающие исходную деталь, для каждого КТЭ можно получить массив схем обработок при использовании различных формообразующих движений и инструмента. На рис. 2 представлено описание различных схем обработки для одного из КТЭ.

Анализ современных многоцелевых станков с программным управлением (табл. 1) показывает, что все движения, в том числе и формообразующие, с точки зрения общей теории станков называются исполнительными. По целевому признаку их можно разделить на движения формообразования Φ ; установочные $Уст$; деления $Д$; управления $Упр$ и вспомогательные $Всп$.

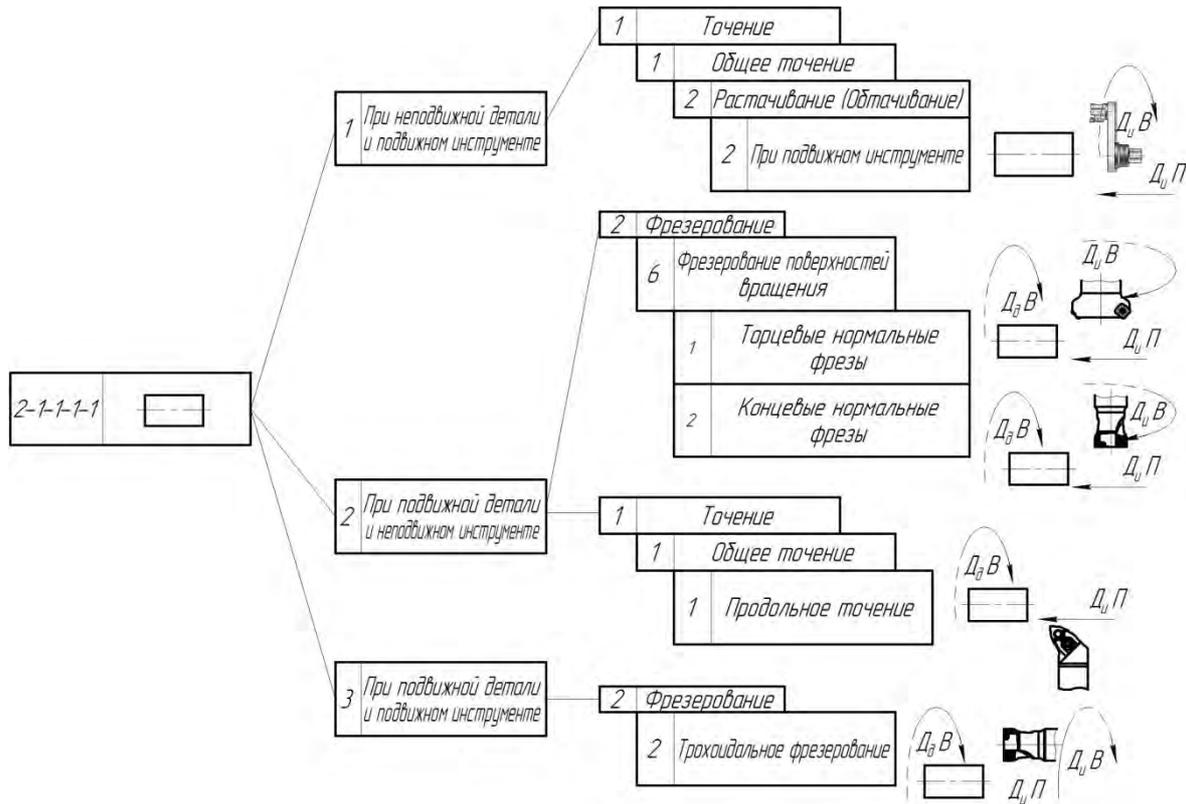


Рис. 2. Пример формирования различных схем обработки цилиндрической ступени вала

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.

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 получения определенных значений параметров точности и эксплуатационных свойств деталей.

В общем случае полученные модели имеют вид:

$$F = k_0 \prod_i T_{SKz_i}^{m_i} \quad (14)$$

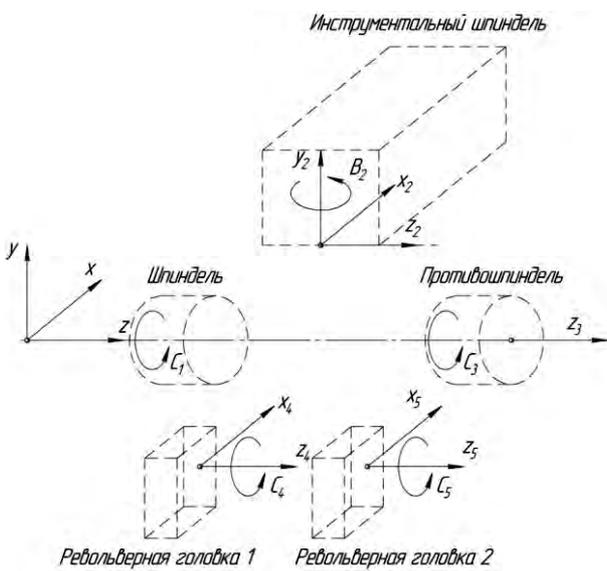
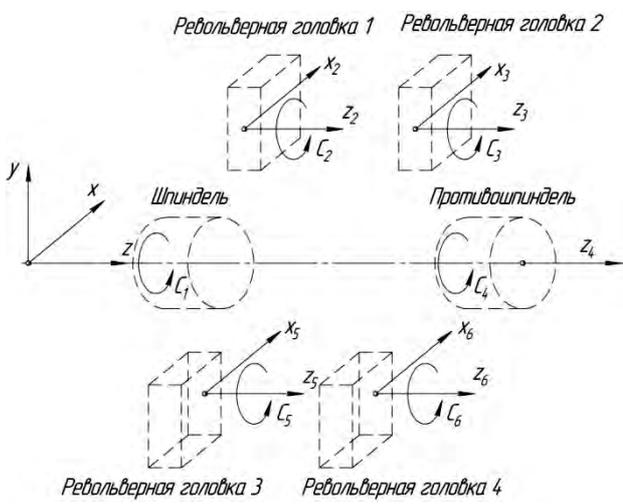
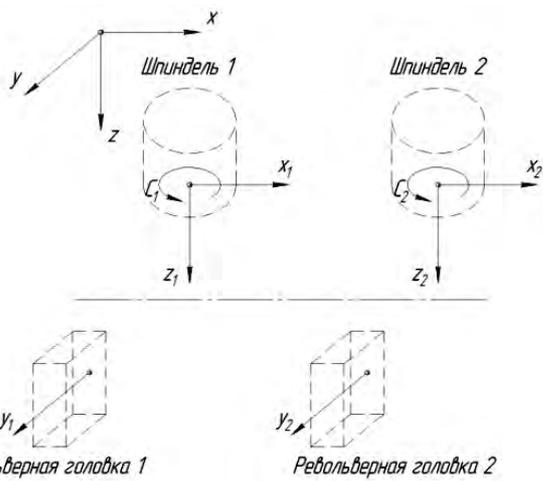
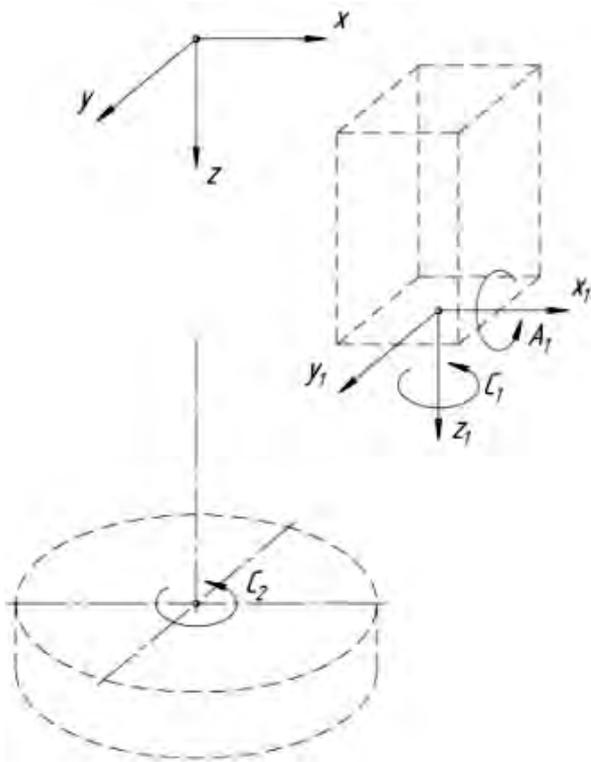
В общем виде допуск линейного замыкающего звена складывается из допусков составляющих звеньев в каждой из проекций с учетом угловых размеров [2]:

$$T_{\Delta} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{эк_k})^{\mu} \right)^2} \quad (15)$$

где 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.

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 [1]:

1. Схемы компоновок станков с программным управлением

<p>1. Горизонтальная компоновка токарного станка, со шпинделем и протившпинделем, инструментальным шпинделем, двумя револьверными головками</p>  <p>The diagram shows a horizontal lathe configuration. At the top, an 'Инструментальный шпиндель' (Instrumental spindle) is shown with a coordinate system (x_2, z_2) and a rotation arrow B_2. Below it, the main 'Шпиндель' (Spindle) and 'Протившпиндель' (Counter-spindle) are shown with coordinate systems (z, z_3) and rotation arrows C_1 and C_3. At the bottom, two 'Револьверная головка 1' (Turret head 1) and 'Револьверная головка 2' (Turret head 2) are shown with coordinate systems (x_4, z_4) and (x_5, z_5) and rotation arrows C_4 and C_5.</p>	<p>2. Горизонтальная компоновка токарного станка, со шпинделем и протившпинделем, с четырьмя револьверными головками</p>  <p>The diagram shows a horizontal lathe configuration with four turret heads. At the top, 'Револьверная головка 1' (Turret head 1) and 'Револьверная головка 2' (Turret head 2) are shown with coordinate systems (x_2, z_2) and (x_3, z_3) and rotation arrows C_2 and C_3. Below them, the 'Шпиндель' (Spindle) and 'Протившпиндель' (Counter-spindle) are shown with coordinate systems (z, z_4) and rotation arrows C_1 and C_4. At the bottom, 'Револьверная головка 3' (Turret head 3) and 'Револьверная головка 4' (Turret head 4) are shown with coordinate systems (x_5, z_5) and (x_6, z_6) and rotation arrows C_5 and C_6.</p>
<p>3. Вертикальная компоновка токарного станка с двумя шпинделями и двумя револьверными головками</p>  <p>The diagram shows a vertical lathe configuration. At the top, 'Шпиндель 1' (Spindle 1) and 'Шпиндель 2' (Spindle 2) are shown with coordinate systems (x, z) and (x_1, z_1) and (x_2, z_2) and rotation arrows C_1 and C_2. Below them, 'Револьверная головка 1' (Turret head 1) and 'Револьверная головка 2' (Turret head 2) are shown with coordinate systems (y_1, z_1) and (y_2, z_2).</p>	<p>4. Вертикальная компоновка многоцелевого станка с вращением стола с деталью и свободного перемещения инструмента</p>  <p>The diagram shows a vertical multi-purpose machine configuration. At the top, a coordinate system (x, z) is shown. Below it, a vertical structure is shown with a 'Револьверная головка' (Turret head) having coordinate systems (x_1, z_1) and (y_1, z_1) and rotation arrows A_1 and C_1. At the bottom, a rotating table is shown with a coordinate system (x_2, z_2) and a rotation arrow C_2.</p>

$$K_{\Sigma}^2 T_{\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^{pq} C_{ij}^2 K_{ij}^2 T_{ij}^2 + 2 \sum_{j=1}^q \left(C_j K_j T_j \sum_{i=2}^{m(n,\dots,p)} r_{ij} C_{ij} K_{ij} T_{ij} \right), (16)$$

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

Известно, что протекающие процессы на поверхностях эксплуатируемых деталей (изнашивание, деформации и т.п.) тесно связаны с состоянием 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 влияет на интенсивность изнашивания (рис. 3). Это воздействие проявляется через изменение номинальной площади контакта, скоростей скольжения, увеличения динамической составляющей нагрузки и т.п. Для сопряжения «вал-штулка» были получены коэффициенты парной корреляции между величиной линейного износа и параметрами шероховатости, отклонениями профиля продольного сечения, радиального биения [5].

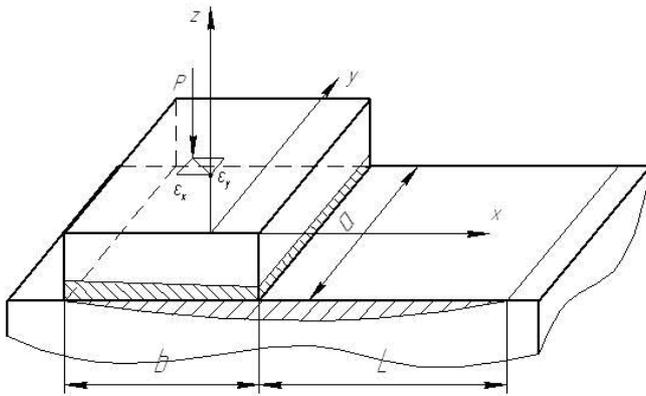


Рис. 3. Расчетная схема определения влияния эксплуатационных свойств на долговечность соединения

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 дополнительную потребность в технологической оснастке и привести к увеличению трудоемкости, что в конечном итоге приведет к увеличению себестоимости продукции [2].

Два показателя технологичности конструкции изделия (ТКИ), рекомендуемые в соответствии с ГОСТ 14.201–83, можно изменить различными сочетаниями баз размеров:

- трудоемкость изготовления изделия;
- удельная материалоемкость (удельная металлоемкость, удельная энергоемкость).

Взаимное расположение поверхностей деталей можно задать на чертежах различными системами размеров, обеспечив при этом разную точность. Простановка размеров и допусков на чертеже детали должна отображать требования, предъявляемые к этой детали, исходя из ее служебного назначения, и обеспечивать возможность изготовления детали простыми технологическими методами, с помощью которых может быть достигнуто выполнение требований, предъявляемых к ней с учетом конструкции машины.

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 $h_j(X) \geq 0$ [1].

$$Q(X) \rightarrow \underset{X \in S}{extr} \quad S: \begin{cases} g_i(X) = 0, & i = \overline{1, I}; \\ h_j(X) \geq 0, & j = \overline{1, J}; \end{cases} \quad (17)$$

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

Размерная структура техпроцесса представлялась в двух основных видах: в виде размерной схемы и в виде размерного графа, объединяющего размеры детали, заготовки и техпроцесса:

$$G = \{G_{дет}, G_{заг}, G_{тех}\}, \quad (18)$$

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

Рассмотрим граф размерной структуры ТП. Он представляет собой совокупность размерных связей, которые с позиции оптимизации размерной структуры ТП можно разделить на изменяемые и неизменяемые.

К неизменяемым размерным связям отнесём:

- конструкторские размеры (в размерной структуре они не могут быть изменены без изменения чертежа детали, согласованного с конструктором);

- припуски (они могут быть изменены только при изменении плана обработки);

- размеры исходной заготовки (они могут измениться только при изменении чертежа исходной заготовки, связанного с изменением технологии ее получения).

Количество неизменяемых размерных связей в графе:

$$n_{н} = n_{к} + n_{п} + n_{з},$$

где $n_{к}$ – количество конструкторских размеров; $n_{п}$ – количество припусков; $n_{з}$ – количество размеров исходной заготовки.

К изменяемым размерам отнесем технологические размеры, выполняемые на операциях технологического процесса, их простановка изменяется при изменении технологических и измерительных баз на операциях [1].

Погрешность обработки – параметр, зависящий (при неизменных планах обработки поверхностей) от оборудования и оснастки. Он влияет на выбор допусков технологических размеров и определяет экономическую эффективность ТП. Для его учёта создадим для каждой типовой размерной структуры матрицу средне экономических допусков (СЭД) на

основе матрицы размерной структуры:

$$M_{СЭД} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{ij} & \dots & T_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{k1} & T_{k2} & \dots & T_{kk} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где T_{ij} – средне экономический допуск технологического размера между i -й и j -й поверхностями, если с i -й поверхности снимается припуск, а j -я используется в качестве измерительной базы.

Часть ограничений учитывается при построении матрицы типовой размерной структуры ТП. Для учета остальных на основе $M_{СЭД}$ 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:

$$M_T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1k} \\ t_{21} & t_{ij} & \dots & t_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{k1} & t_{k2} & \dots & t_{kk} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где $t_{ij} = T_{ij}$ из (19), если между поверхностями возможна простановка размера на технологической операции, и $t_{ij} = 0$, если невозможна.

Для математической модели запишем:

$$M = \{M_{TPC}, M_{PC}, M_T\}. \quad (21)$$

Модель размерной структуры технологического процесса механической обработки учитывает все технологические, конструкторские и экономические факторы (рис. 4). Кроме того, выявлены ограничения модели, что позволяет в дальнейшем перейти к ее комплексной оптимизации. Разработана программа реализации размерно-точностного анализа с модулем оптимизации структуры размерных связей для повышения технологичности конструкции детали на основе элементов CALS-технологий.

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.

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1, j=1}^{k, k} \left(c_{ij} e_{ij} t_{ij} \sum_{u=1}^{k-1} |b_{(ij)u}| \right), \quad (22)$$

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

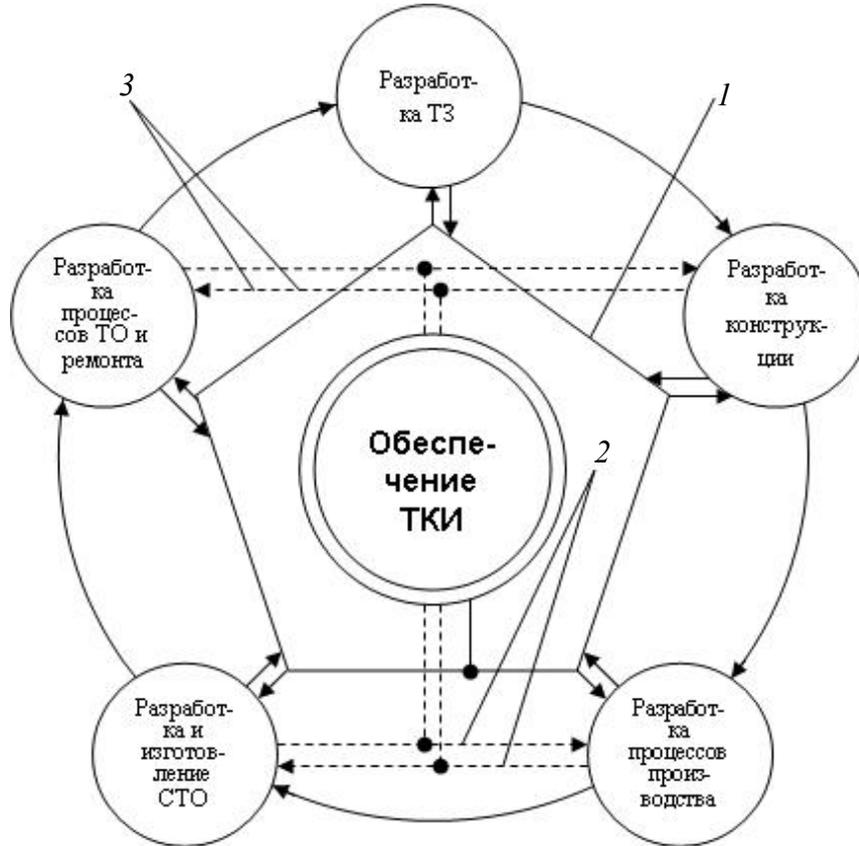


Рис. 4. Схема отработки изделия на технологичность с учетом анализа размерных связей

Выводы:

1. Предложена концепция автоматизированной подсистемы технологической подготовки производства, обеспечивающая 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).

2. По критериям минимизации припуска и (или) минимуму рабочих ходов оптимизируется РТА при различных схемах простановки операционных размеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г., Федонин, О.Н., Польский, Е.А. Научноёмкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С. 34–41.
 2. Польский, Е.А., Филькин, Д.М. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации // Научноёмкие

технологии в машиностроении. – 2014. – №11 (41). – С. 36–44.

3. **Искусственный интеллект:** Применение в интегрированных производственных системах / под ред. Э. Кьюсиака; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.

4. **Представление** и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука; пер. с япон. – М.: Мир, 1989. – 220 с.

5. **Польский, Е.А.** Технологическое обеспечение работоспособности узлов машин на основе анализа размерных параметров на этапах жизненного цикла с учетом их изменения в процессе эксплуатации // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №2 (32). – С. 38–48.

REFERENCES

1. Suslov, A.G., Fedonin, O.N., Polsky, E.A. High technology for quality increase of machinery assemblies at life

stages // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – №5 (59). – pp. 34–41.

2. Polsky, E.A., Filkin, D.M. Technological support of assemblies quality based on analysis of dimensions ties taking into account operation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №11 (41). – pp. 36–44.

3. Artificial Intelligence: Application in Integrated Production Systems / under the editorship of E. Cusack; transl. from. Engl. – М.: Mechanical Engineering, 1991. – pp. 544.

4. Presentation and Use of Knowledge / under the editorship of . H. Ueno, M. Isizuka; transl. from Japanese. – М.: Mir (World), 1989. – pp. 220.

5. Polsky, E.A. Technological support of machinery unit capacity for work based on analysis of dimensions data at life cycle stages taking into account their changes during operation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №2 (32). – pp. 38–48.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

Уважаемые читатели и подписчики!

Подписка на I полугодие 2017 г. на журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» проводится:

– через агентство «Роспечать» индекс 79195;

– через Брянский государственный технический университет.

Адрес: 241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7. БГТУ.

Издательство БГТУ

E-mail: avkswsu@mail.ru

E-mail: naukatm@yandex.ru (редакция)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

Учредитель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 15.07.2016. Подписано в печать 09.09.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7