

# ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ

А.А. Ситников

Применение компьютеров для разработки технологических процессов изготовления деталей с покрытиями позволяет не только значительно повысить производительность труда технологов, но и сформировать оптимальный для данных условий производства вариант процесса. Эффективным средством проектирования экономичных технологий является размерный анализ. Он позволяет выявить и установить связи размерных параметров детали в процессе ее изготовления и произвести их расчет путем решения технологических размерных цепей. Однако выполнение размерного анализа с помощью компьютера требует дальнейшего его развития, более строгой формализации всех задач и способов их решения.

Укрупнено размерный анализ включает следующие этапы:

1. На основании чертежа детали выбирают метод получения заготовки, исходя из условий ее работы в узле и возможностей производства.

2. Разрабатывают планы обработки поверхностей и маршрут технологического процесса.

3. Строят размерные схемы технологического процесса и записывают уравнения размерных цепей. Эти цепи устанавливают взаимосвязь между операционными размерами или другими параметрами (технические требования, толщина покрытия) детали на различных стадиях ее изготовления.

4. Определяют значения всех операционных допусков и минимально необходимых припусков.

5. Выполняют решение размерных цепей, рассчитывают межоперационные размеры и припуски, размеры заготовки.

Различные подходы [1] и [2, 3] существуют уже на третьем этапе формирования размерных связей. При этом обоснования методик построения структурных схем и в том и в другом случае отсутствуют. Анализ особенностей технологии изготовления деталей с покрытиями позволил предложить более рациональную структуру операционных цепей. Для сравнения рассмотрим взаимосвязь трех операций изготовления детали типа "тело вращения" (вал) - операции обработки ос-

новы, нанесения покрытия и операции обработки нанесенного слоя. В технологических размерных цепях принято понятие одностороннего припуска. Поэтому для цилиндрических поверхностей все расчеты выполняются на радиус. Если следовать традиционным рекомендациям [2,3], тогда размерные связи детали в процессе ее изготовления будут иметь вид, представленный на рисунке 1,а. Размерные связи детали, сформированные по предлагаемой методике, представлены на рисунке 1,б. По схеме (рис.1, а) можно построить три размерных цепи, где замыкающими звеньями являются припуски на обработку основы и покрытия и толщина остаточного слоя.

Припуск на обработку основы зависит от радиуса заготовки  $r_{заг}$  и радиуса основы после ее обработки  $r_{осн}$ :

$$[Z_{осн}] = r_{заг} - r_{осн} \pm (\rho_0 + \rho_1 + \rho_{осн}), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  - изогнутость оси заготовки;  $\rho_1$  - биение базовой оси заготовки;  $\rho_{осн}$  - радиальное биение поверхности после обработки основы.

Припуск на обработку покрытия определяется исходя из толщины нанесенного слоя  $P_n$ , размера основы после механической обработки  $r_{осн}$  и готовой детали  $r_\delta$ :

$$[Z_n] = r_{осн} + P_n - r_\delta \pm (\rho_{осн} + \rho_\delta), \quad (2)$$

где  $\rho_\delta$  - радиальное биение детали с обработанным покрытием.

Толщина остаточного слоя покрытия по данной схеме (схема а) зависит от размеров основы и готовой детали:

$$[P_{ост}] = r_\delta - r_{осн} \pm (\rho_\delta + \rho_{осн}). \quad (3)$$

По другой схеме (рис. 1, б) замыкающими звеньями размерных цепей являются припуски на обработку основы и покрытия, толщина остаточного и нанесенного слоев.

Уравнения размерных цепей (1) и (3), построенных по схемам "а" и "б", друг от друга не отличаются.

Операция нанесения покрытия по схеме "б" представляется размерной цепью с замы-

кающим звеном- толщиной нанесенного слоя покрытия:

$$[P_n] = r_n - r_{осч} \pm (\rho_n + \rho_{осч}), \quad (4)$$

1. Пространственное отклонение  $\rho_n$ , формирующееся на операции нанесения покрытия, не участвует в расчетах размерных цепей построенных по схеме "а";

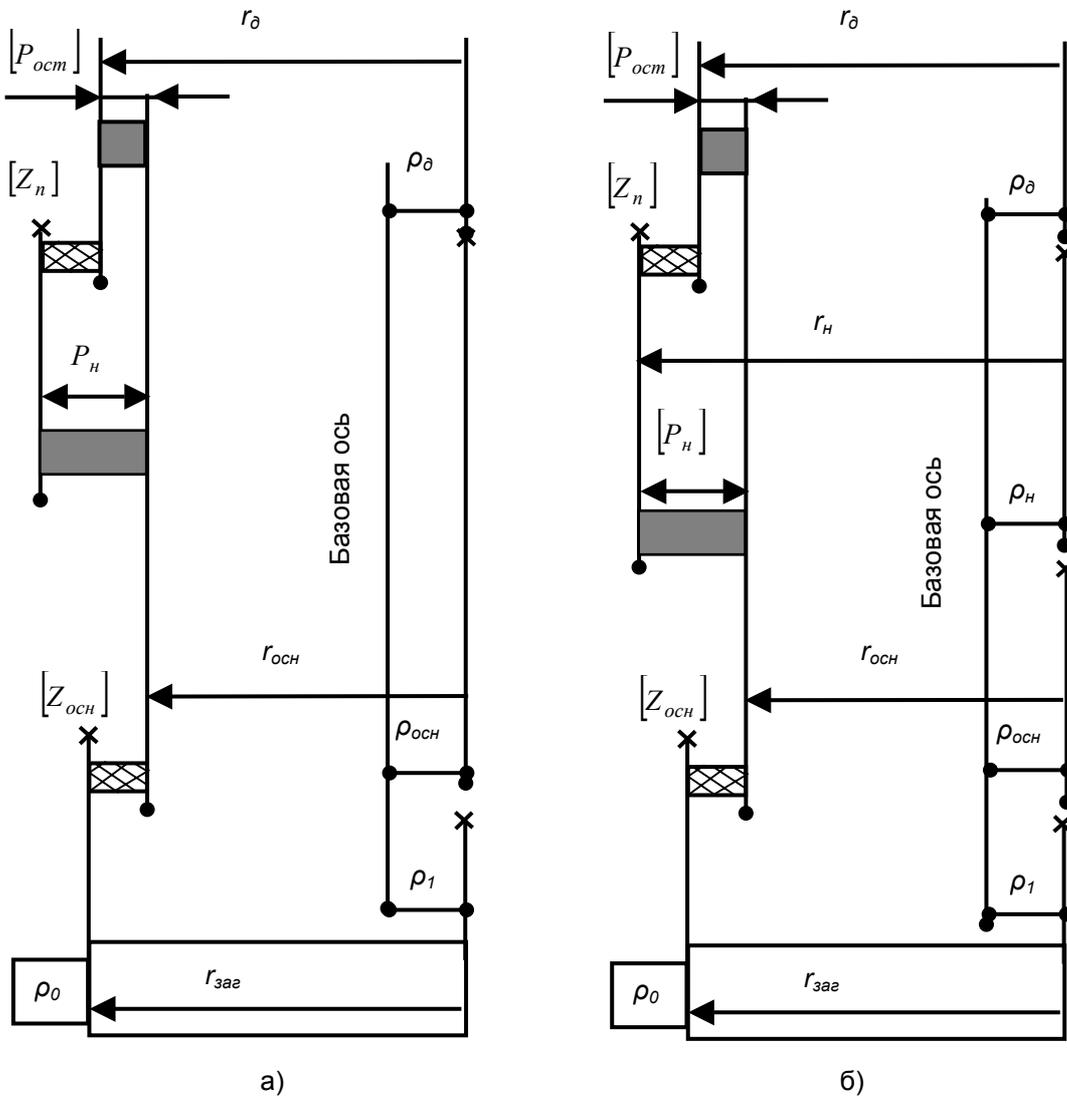


Рис. 1. Размерные связи детали в процессе ее изготовления: а) традиционный подход; б) предлагаемый подход

где  $\rho_n$  - радиальное биение детали с нанесенным покрытием.

Размерная цепь припуска на механическую обработку покрытия изменится. В ее состав войдет размер детали с нанесенным покрытием  $r_n$ :

$$[Z_n] = r_n - r_{\delta} \pm (\rho_n + \rho_{\delta}). \quad (5)$$

Сопоставление схем "а" и "б" (рис.1) показывает, что:

2. По схеме "б" появляется дополнительная размерная цепь (4) толщины наносимого слоя покрытия;

3. Размерные цепи расчета припуска на механическую обработку покрытия (2) и (5) имеют разные составляющие.

Все эти отличия тесно взаимосвязаны. Для облегчения процесса сравнения введем обозначение: индекс "1" для составляющих размерных цепей построенных по схеме "а"; индекс "2" для составляющих цепей схемы "б".

При решении прямой задачи необходимо определить межоперационные размеры и их предельные отклонения. Для этого существует три уравнения (1), (2) и (3). Расчеты начинаются с цепей, в которых участвуют размеры готовой детали. Так как размерные цепи остаточного после обработки слоя покрытия, построенные по разным схемам, не имеют отличий, сравнивать следует цепи с размером готовой детали  $r_{\partial}$  (цепь припуска на механическую обработку покрытия).

Прежде чем выполнить это сравнение следует отметить, что при решении операционных размерных цепей должен быть принят единый способ задания размеров. В связи с этим пространственные отклонения, которые являются самостоятельными звеньями указанных цепей, так же должны быть заданы предельными размерами. При симметричном расположении поля допуска максимальное значение погрешности взаимного расположения поверхностей  $\rho_{i\max} = 0 + es\rho_i$ , а минимальное  $\rho_{i\min} = 0 + ei\rho_i$  (0- номинал,  $es\rho_i$  - верхнее отклонение,  $ei\rho_i$  - нижнее отклонение).

Пространственные отклонения  $\rho_i$  можно отнести и к увеличивающим и к уменьшающим звеньям.

По известным методикам [2, 3] рекомендуется в цепях, где замыкающим звеном является припуск, принимать их как уменьшающие звенья, так как они всегда ведут к уменьшению величины действительного припуска (являются уменьшающими звеньями). Однако такая трактовка не верна.

Примем, что пространственные отклонения являются уменьшающими звеньями, тогда уравнение (4) через предельные размеры запишется в следующем виде:

$$[P_{n\min 2}] = r_{n\min 2} - (r_{очн\max 2} + es\rho_{n2} + es\rho_{очн2}), \quad (6)$$

$$[P_{n\max 2}] = r_{n\max 2} - (r_{очн\min 2} + ei\rho_{n2} + ei\rho_{очн2}). \quad (7)$$

У пространственных отклонений с нулевым номиналом и симметричным расположением поля допуска  $es\rho_i = -ei\rho_i$ . Тогда раскрыв скобки уравнения (6) и (7) переписутся так:

$$[P_{n\min 2}] = r_{n\min 2} - r_{очн\max 2} + ei\rho_{n2} + ei\rho_{очн2}, \quad (8)$$

$$[P_{n\max 2}] = r_{n\max 2} - r_{очн\min 2} + es\rho_{n2} + es\rho_{очн2}. \quad (9)$$

Сравним с вариантом, когда пространственные отклонения являются увеличивающими звеньями. В этом случае уравнение (4) через предельные размеры запишется следующим образом:

$$[P_{n\min 2}] = (r_{n\min 2} + ei\rho_{n2} + ei\rho_{очн2}) - r_{очн\max 2}, \quad (10)$$

$$[P_{n\max 2}] = (r_{n\max 2} + es\rho_{n2} + es\rho_{очн2}) - r_{очн\min 2}. \quad (11)$$

Как видно зависимости (8) и (10), (9) и (11) попарно являются идентичными. Отсюда следует, что нет разницы, к какой группе звеньев (увеличивающие или уменьшающие) следует относить пространственные отклонения с симметричным расположением поля допуска. Аналогичная ситуация наблюдается и в цепях, где замыкающим звеном является припуск (размерная цепь (2)):

$$[Z_{n\min 2}] = r_{n\min 2} - r_{\partial\max 2} + ei\rho_{n2} + ei\rho_{\partial2}, \quad (12)$$

$$[Z_{n\max 2}] = r_{n\max 2} - r_{\partial\min 2} + es\rho_{n2} + es\rho_{\partial2}. \quad (13)$$

Теперь можно приступить к сравнению схем. Выразим радиус нанесения покрытия из выражений (10) и (11) и подставим в (12) и (13), соответственно получим:

$$[Z_{n\min 2}] = [P_{n\min 2}] - ei\rho_{n2} - ei\rho_{очн2} + r_{очн\max 2} - r_{\partial\max 2} + ei\rho_{n2} + ei\rho_{\partial2}, \quad (14)$$

$$[Z_{n\max 2}] = [P_{n\max 2}] - es\rho_{n2} - es\rho_{очн2} + r_{очн\min 2} - r_{\partial\min 2} + es\rho_{n2} + es\rho_{\partial2}. \quad (15)$$

Предельные размеры припуска на обработку покрытия для схемы "а" рассчитываются следующим образом:

$$[Z_{n\min 1}] = r_{очн\min 1} + P_{n\min 1} - r_{\partial\max 1} + ei\rho_{очн1} + ei\rho_{\partial1}, \quad (16)$$

$$[Z_{n\max 1}] = r_{очн\max 1} + P_{n\max 1} - r_{\partial\min 1} + es\rho_{очн1} + es\rho_{\partial1}. \quad (17)$$

Минимальный припуск на обработку покрытия определим из разности выражений (14) и (16):

$$[Z_{n\min 1}] - [Z_{n\min 2}] = r_{очн\min 1} + P_{n\min 1} - r_{\partial\max 1} + ei\rho_{очн1} + ei\rho_{\partial1} - [P_{n\min 2}] + ei\rho_{n2} + ei\rho_{очн2} - r_{очн\max 2} + r_{\partial\max 2} - ei\rho_{n2} - ei\rho_{\partial2}. \quad (18)$$

Преобразуем зависимость (18), исходя из условия равенства размеров основы (по-

лучаются в результате расчета размерной цепи (4) и готовой детали с покрытием (заданы по чертежу):

$$\begin{aligned} [Z_{n \min 1}] - [Z_{n \min 2}] = & (r_{осн \min 1} - r_{осн \max 2}) + \\ & + (P_{n \min 1} - [P_{n \min 2}]) + 2 \cdot ei\rho_{осн}. \end{aligned} \quad (19)$$

Минимальный припуск на обработку покрытия определяется суммой величин дефектного слоя и шероховатости [2] по табличным данным. Поэтому изначально  $[Z_{n \min 1}] = [Z_{n \min 2}]$  и, соответственно, разность минимальных припусков равна 0. Кроме того, ввиду одинаковости размеров основы  $(r_{осн \min 1} - r_{осн \max 2}) = -Tr_{осн}$  и  $2 \cdot ei\rho_{осн1} = -T\rho_{осн}$ . На основании выше изложенного выражение (19) имеет вид.

$$P_{n \min 1} - [P_{n \min 2}] = Tr_{осн} + T\rho_{осн}. \quad (20)$$

Как видно из уравнения (20) минимальная толщина нанесенного покрытия, рассчитанная по схеме "а" больше, чем толщина, определяемая по схеме "б". И чем грубее будет обработана основа, тем больший слой  $P_{n \min 1}$  должен быть нанесен.

Произведя аналогичные преобразования, разность максимальных припусков (уравнения (15) и (17)) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} [Z_{n \max 1}] - [Z_{n \max 2}] = & (r_{осн \max 1} - r_{осн \min 2}) + \\ & + (P_{n \max 1} - [P_{n \max 2}]) + 2 \cdot es\rho_{осн2}, \end{aligned} \quad (21)$$

или

$$\begin{aligned} ([Z_{n \max 1}] - [Z_{n \max 2}]) - (P_{n \max 1} - [P_{n \max 2}]) = \\ = (Tr_{осн} + T\rho_{осн}). \end{aligned} \quad (22)$$

Анализ выражений (20) и (22) показывает, что чем ниже будут требования точности, предъявляемые к основе, тем больший припуск на обработку покрытия потребуются в результате расчетов по схеме "а"  $[Z_{n \max 1}] > [Z_{n \max 2}]$ , а соответственно необходимо увеличить слой наносимого покрытия  $([P_{n \max 1}] > [P_{n \max 2}] \text{ и } [P_{n \min 1}] > [P_{n \min 2}])$ .

Порядок расчета межоперационных размеров и припусков из уравнений размерных цепей при проектировании технологического процесса изготовления детали с покрытием так же имеет существенные отличия.

Рассмотрим последовательность расчета для структурной схемы, представленной на рисунке 2,а:

1. Так как размеры детали и параметры толщины остаточного слоя покрытия заданы конструктором, вначале следует определить параметры точности основы:

$$(Tr_{осн} + T\rho_{осн}) = T[P_{осн}] - (Tr_{\partial} + T\rho_{\partial}). \quad (23)$$

На основании результатов расчета по таблицам статистической точности в соответствии с параметрами точности назначается метод окончательной обработки основы.

2. Исходя из параметров точности готовой детали, заданных конструктором, намечается маршрут ее обработки. Соответственно рассчитываются минимально необходимые припуски  $Z_{\min i}$  на обработку покрытия для каждой операции и устанавливаются размеры допусков на межоперационные размеры  $Tr_i$ .

Очень часто, особенно при изготовлении деталей с газотермическими покрытиями, приходится ограничивать максимальную толщину наносимого слоя  $P_{n \max}$ . Это вызвано тем, что при нанесении в покрытия создаются внутренние напряжения, которые при определенной толщине слоя могут привести к его отслаиванию от основы. Задача решается через предельные размеры, а в качестве исходных данных известно: максимальный и минимальный размеры детали  $r_{\partial \max}$  и  $r_{\partial \min}$ , радиальное биение обработанной поверхности  $\rho_{\partial \max}$  и  $\rho_{\partial \min}$ ; предельные размеры основы соответственно  $r_{осн \max}$  и  $r_{осн \min}$ ,  $\rho_{осн \max}$  и  $\rho_{осн \min}$ ; допуск на размер напыленной поверхности  $Tr_n$  (назначенный для предельно возможного размера детали после нанесения покрытия  $r_{n \max} = r_{осн \max} + P_{n \max}$ ).

В этом случае размерные цепи толщины напыленного слоя и припуска на его обработку являются параллельно связанными. Данное понятие было введено профессором Балакшиным Б.С. Для этих цепей общее звено-радиус основы. В этом случае необходимо решить систему уравнений:

а) для наружных поверхностей

$$\begin{cases} [Z_{\min n}] = (r_{\partial \min n-1} + \rho_{\partial \min n-1}) - (r_{\partial \max n} + \rho_{\partial \max n}) \\ r_{\partial \max n-1} = r_{\partial \min n-1} + Tr_{\partial n-1} \\ \text{М} \\ [Z_{\min 1}] = (r_{n \min} + \rho_{n \min}) - (r_{\partial \max 1} + \rho_{\partial 1 \max}) \\ r_{n \max} = r_{n \min} + Tr_n \\ [P_{n \max}] = (r_{n \max} + \rho_{n \max}) - (r_{осн \min} + \rho_{осн \min}), \end{cases} \quad (24)$$

б) для внутренних поверхностей

$$\left\{ \begin{aligned} [Z_{\min_n}] &= (r_{\partial \min_n} + \rho_{\partial \min_n}) - (r_{\partial \max_{n-1}} + \rho_{\partial \max_{n-1}}) \\ r_{\partial \max_{n-1}} &= r_{\partial \min_{n-1}} + Tr_{\partial_{n-1}} \\ M \\ [Z_{\min_1}] &= (r_{\partial \min_1} + \rho_{\partial \min_1}) - (r_{n \max} + \rho_{n \max}) \\ r_{n \max} &= r_{n \min} + Tr_n \\ [P_{n \max}] &= (r_{осн \max} + \rho_{осн \max}) - (r_{n \min} + \rho_{n \min}). \end{aligned} \right. \quad (25)$$

Решением данных систем является ус-

ловие, устанавливающее взаимосвязь между максимальной толщиной напыленного слоя, остаточного слоя, точностными возможностями процесса нанесения покрытия и маршрутом обработки покрытия:

$$\begin{aligned} [P_{n \max}] - [P_{осн \max}] &\geq \sum_{i=1}^n Z_{\min_i} + \\ &+ \sum_{i=1}^{n-1} (Tr_i + T\rho_i) + (Tr_n + T\rho_n), \end{aligned} \quad (26)$$

где  $n$  - количество операций обработки покрытия. Не выполнение данного условия требует корректировки маршрута обработки покрытия или изменения условий его нанесения.

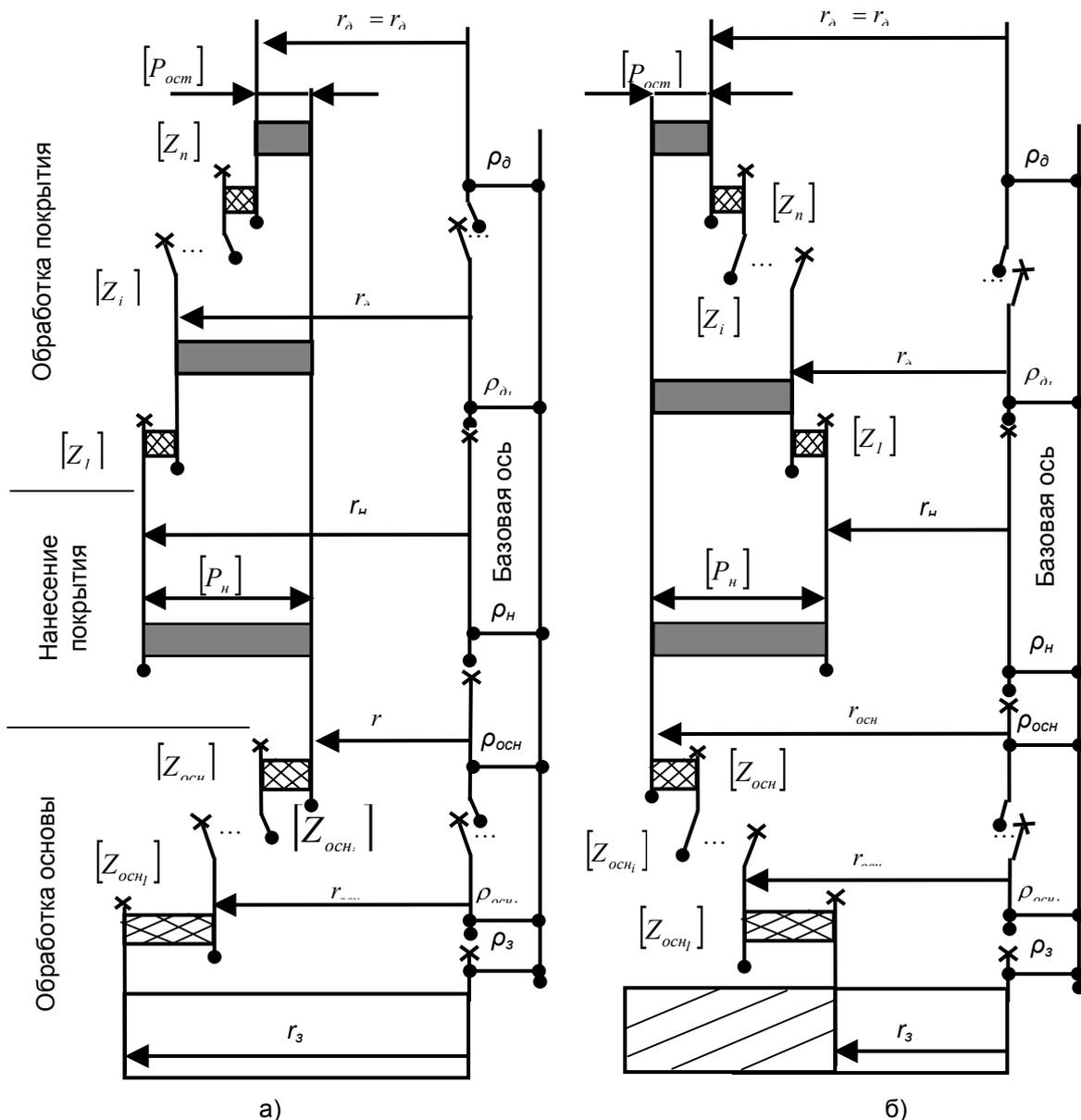


Рис. 2. Схемы диаметальных размеров: а) для наружной поверхности; б) для внутренней поверхности

Если условие выполняется, тогда в соответствии с намеченным маршрутом рассчитываются межоперационные размеры и припуски на обработку покрытия.

3. Рассчитать максимальный припуск для черновой обработки покрытия на основе существующих данных не представляется возможным, так как в размерную цепь входит максимальный радиус детали с нанесенным покрытием и величина его неизвестна. Кроме того,  $r_n \max$  является составляющим звеном цепи напыленного слоя. Необходимо совместно решить два уравнения относительно максимального радиуса детали после нанесения покрытия:

$$r_n \max + es\rho_n = [P_n \max] + r_{очн \min} + ei\rho_{очн}, \quad (27)$$

$$r_n \max + es\rho_n = [Z_{max_1}] + r_{\delta \min_1} + ei\rho_{\delta_1}. \quad (28)$$

Приравняв правые части, получим уравнение для расчета максимального припуска на первой операции обработки покрытия:

$$[Z_{max_1}] = [P_n \max] + (r_{очн \min} + ei\rho_{очн}) - (r_{\delta \min_1} + ei\rho_{\delta_1}). \quad (29)$$

4. Максимальный радиус детали после нанесения покрытия определяется в соответствии из уравнения (28).

5. Минимальный радиус детали после нанесения:

$$r_n \min = [Z_{min_1}] + (r_{\delta \max_1} + es\rho_{\delta_1}) - ei\rho_n. \quad (30)$$

6. Завершается расчет параметров операции нанесения покрытия определением минимальной толщины нанесенного слоя (уравнение (10)).

7. На последнем этапе вычисляются припуски на обработку основы и размеры заготовки.

По приведенной методике производится размерный анализ технологического процесса изготовления для случая, когда у детали обрабатываются наружные поверхности вращения. Для внутренних поверхностей (рис.2,б) уравнения (29) и (30) будут иметь другой вид:

уравнение (29)-

$$[Z_{max_1}] = [P_n \max] - (r_{очн \max} + es\rho_{очн}) + (r_{\delta \max_1} + es\rho_{\delta_1}), \quad (31)$$

уравнение (30)-

$$r_n \min = (r_{\delta \max_1} + es\rho_{\delta_1}) - [Z_{min_1}] - ei\rho_n. \quad (32)$$

## Выводы

1. При формировании размерных связей операция нанесения покрытия, являясь формообразующим элементом технологического процесса, должна представляться через размеры детали с покрытием и ее пространственное отклонение, а не только через толщину наносимого слоя. Такой подход позволит в проектируемой технологии сократить припуски на механическую обработку покрытия.

2. Пространственные отклонения с симметричным расположением поля допуска и номиналом равным нулю при расчете размерных цепей через предельные размеры могут быть представлены как увеличивающимися, так и уменьшающимися звеньями. Для звеньев с симметричным расположением поля допуска тип звена не оказывает влияния на результаты вычислений. Выбор типа звена должен производиться на этапе формирования уравнений размерных цепей.

3. Выявленная взаимосвязь между максимальной толщиной напыленного и остаточного слоя, точностными возможностями процесса нанесения и обработки покрытия, позволяет сформировать необходимые условия обеспечения заданной точности обработки детали с покрытием.

4. Особенности физико-механических свойств газотермических покрытий, ограниченность наносимого слоя, взаимосвязь между точностью размеров основы, обработанной поверхности и толщиной остаточного слоя предполагает итерационную схему расчета размерных цепей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулагин С.П., Леонов С.Л., Новоселов Ю.К., Татаркин Е.Ю. Технологическое обеспечение качества изготовления деталей с износостойкими покрытиями. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. – 209 с.
2. Размерный анализ технологических процессов/ Матвеев В.В., Тверской М.М., Бойко Ф.И. и др.- М.: Машиностроение, 1982.- 264с. (Б-ка технолога).
3. Татаркин Е.Ю., Федорова Н.П., Ситников А.А. Определение межоперационных размеров при изготовлении деталей с покрытиями // Сварочное производство. - 1991.- N12.- С.5-6.