

УДК 621.9.65

DOI: 10.30987/article_5c486cc46295f0.57582754

А.А. Ситников, д.т.н.,

А.В. Собачкин, к.т.н.,

Ю.Н. Камышов, к.т.н.

(ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова,
656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46)

E-mail: altgtu@list.ru

Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями

Разработана расчетная методика, позволяющая устанавливать межоперационные размеры и припуски на механическую обработку нанесенного покрытия, определять маршрут обработки основного материала, а также обосновывать формирование групп деталей по конструктивно-технологическим признакам и по ремонтным размерам. В статье приведены методики расчета толщины слоя покрытия в зависимости от износа деталей. Разработана схема к расчету толщины остаточного слоя покрытия. Получено выражение для расчета толщины слоя покрытия. Получены теоретические зависимости и методики расчета, что позволяет решить весь комплекс задач, возникающих при размерном анализе технологических процессов изготовления деталей с покрытиями.

Ключевые слова: износ; толщина слоя; напыление покрытия; механическая обработка детали; остаточный слой.

A.A. Sitnikov, Dr. Sc. Tech,

A.V. Sobachkin, Can. Sc. Tech.,

Yu.N. Kamyshev, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HE Polzunov State Technical University of Altay, 46, Lenin Avenue, Barnaul, Russia, 656038)

Design of engineering processes for manufacturing and repair of parts with wear-resistant coatings

A computation procedure is developed allowing the definition of inter-operation dimensions and allowances for machining coating applied and also the definition of the route for basic material machining and the substantiation of the parts group formation according to design-technological signs and repair dimensions. In the paper there shown procedures for the computation of coating thickness depending on parts wear. There is developed a circuit to the computation of a coating residual layer. An expression for the computation of coating thickness is obtained. Theoretical dependences and computation procedures are obtained that allows solving the whole problem complex arising at the dimension analysis of engineering processes of manufacturing parts with coatings.

Keywords: wear; layer thickness; sputtering; part machining; residual layer.

Важный вопрос, который приходится решать при изготовлении деталей с покрытиями – это установление размеров минимальной толщины остаточного слоя P_{\min} . Существуют разные подходы к определению P_{\min} . В основе каждого из них лежит необходимость включения в данную величину слоя покрытия $P_{\text{п.и.}}$,

обеспечивающего эксплуатационный срок [1, 2].

На практике, когда речь заходит о долговечности машин, требуется установить величину предельного износа U_{\max} [3]. В этом случае можно выделить три варианта определения толщины покрытия на износ $P_{\text{п.и.}}$:

1. Толщина слоя покрытия равна величине предельного износа. В процессе эксплуатации происходит полный износ нанесенного слоя, в результате машина не может больше работать.

2. Толщина слоя покрытия больше величины предельного износа. Однако в процессе эксплуатации остаточный слой приводит к попаданию машины и узлов в зону интенсивного износа.

3. Толщина слоя покрытия больше величины предельного износа и определяется из расчета допустимых или регламентируемых пределов износа.

В узлах трения, где используют покрытия, чаще всего, применяется третий вариант. В этом случае детали восстанавливают при периодических плановых ремонтах. Тогда толщина остаточного слоя покрытия должна обеспечить условия эксплуатации и получение ремонтных размеров ($r_{max1}, r_{min1} \dots r_{maxk}, r_{minik}$). Толщина покрытия $P_{p,min}$ (рис. 1), обеспечивающая межремонтный период, определяется износом детали между двумя плановыми ремонтами $U_{м.п.}$ и минимальным суммарным припуском на обработку покрытия $Z_{\Sigma min}$.

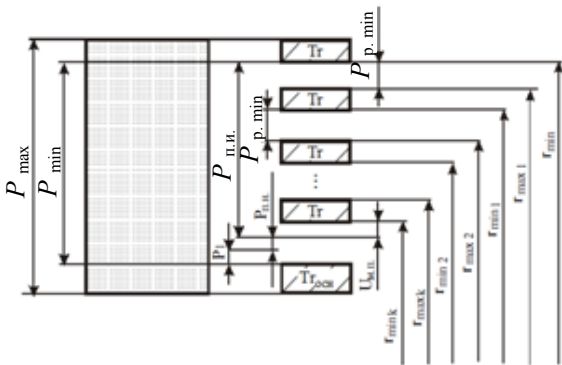


Рис. 1. Схема к расчету толщины остаточного слоя покрытия

С учетом вышеизложенного выражение для расчета толщины слоя покрытия, рассчитанного на изнашивание, можно записать в следующем виде:

$$P_{п.и.} = (k + 1) \cdot c \cdot p_a^m \cdot v^n \cdot T_1 + k(Z_{\Sigma min} + Tr), \quad (1)$$

где T_1 – длительность межремонтного периода; k – количество ремонтных размеров.

Дополнительная толщина покрытия $P_{п.и.}$ (см. рис. 1) должна быть достаточной для нормального функционирования изделия при достижении детали предельно допустимого износа. Ее величина определяется в зависимости от условий работы детали. Например, по данным профессора Крагельского И.В. [2],

при работе в условиях трения предельный максимальный износ не должен превышать 80 % толщины износостойкого слоя. Таким образом на величину $P_{п.и.}$ приходится всего 20 % от общего слоя.

В состав слагаемых выражения для определения минимальной толщины остаточного слоя покрытия должна входить величина переходного слоя P_1 между материалом покрытия и основы. Данная величина определяется особенностями процесса нанесения плазменного покрытия или создается целенаправленно.

Одной из особенностей процесса нанесения плазменных покрытий, является нестабильность физико-механических свойств по толщине нанесенного слоя (рис. 2) [4].

Покрытие имеет пористую структуру, причем распределение пор по объему неравномерно. Наибольшей пористостью обладают слои, прилегающие к основе, и поверхностные слои.

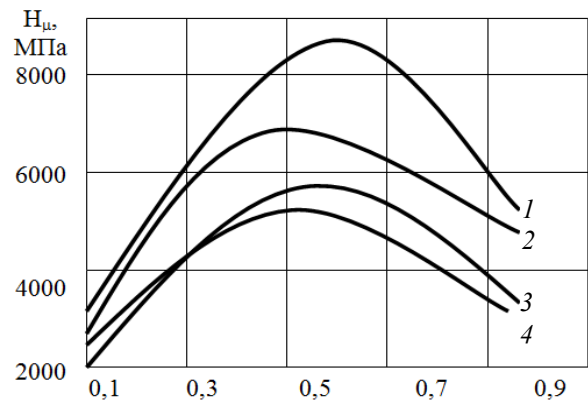


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине покрытия:
1 – ПГ-10Н-01; 2 – ПГ-12Н-01; 3 – ПГ-12Н-02;
4 – ПГ-АН9

Например, при напылении покрытий из порошков системы Ni–Cr–B–Si, образовавшиеся в материале окислы металлов растворяются с образованием стекловидных шлаков, всплывающих на поверхность покрытия.

При этом формируется переходная зона, представляющая собой сплав материала покрытия и основы. Структура зоны – это твердый раствор Ni–Cr с включением соединений металлов, имеющих высокую твердость. Таким образом, переходный слой между материалами основы и покрытия отличается химическим составом, структурой и свойствами, отличными от материала покрытия. В связи с этим данный параметр необходимо учесть при

определении толщины остаточного слоя покрытия.

Величина переходного слоя зависит от множества факторов: режимов напыления, свойств материалов основы и наносимого покрытия и ряд других. В настоящее время нет методик расчета P_1 .

Размер переходного слоя можно определить экспериментально. Так, например, для целой группы плазменных покрытий из порошков системы Ni–Cr–B–Si (см. рис. 2) величина переходного слоя должна лежать в пределах 0,2...0,3 мм. Именно в этом диапазоне происходит резкое снижение пористости, микротвердости и других свойств указанных покрытий.

Известно так же, например [5], что при напылении покрытия из оксида алюминия толщина переходного слоя не превышает 0,1 мм. В других литературных источниках, посвященных исследованию физико-механических свойств покрытий и, в частности, переходной зоны, ее размеры лежат в интервале 0,1...0,3 мм. Поэтому для размерных расчетов, если нет точных экспериментальных данных, можно принимать вышеуказанные пределы.

Рассмотрим второй случай. Очень часто на практике нанесения газотермических покрытий переходная зона формируется целенаправленно. Например [6], путем напыления молибденом и плакированным порошком системы Ni–Al на поверхности основного металла формируется тонкое покрытие с шероховатой поверхностью, на которую затем наносят слой основного покрытия. Такие подготовительные покрытия получили название подслоя. Основным функциональным назначением подслоя является формирование прочной связи с основой и внешним слоем [7]. В качестве материалов для нанесения подслоя используют композиционные порошки (80% Ni – 20% Al; 95% Ni – 5% Al) или сплавов (ПН70Ю30, ПН85Ю15, ПН55Т45 и др.). Для практических целей следует назначать толщину подслоя 0,03...0,13 мм.

Таким образом, минимальная толщина покрытия, оставшегося после механической обработки, является суммой трех составляющих:

$$P_{\min} = P_{\text{п.и.}} + P_{\text{п.н.}} + P_1. \quad (2)$$

Кроме P_{\min} необходимо регламентировать и максимальную толщину остаточного слоя покрытия. Если нет никаких жестких ограничений по колебанию физико-механических свойств покрытия по глубине, ее величину можно определять из расчета технологических

операционных цепей. Максимальная толщина остаточного слоя покрытия P_{\max} непосредственно зависит от требуемой точности готовой детали Tr и точности изготовления основы $Tr_{\text{осн}}$:

$$[P_{\max}] = (r_{\max} + \rho_{\text{д max}}) - (r_{\text{осн min}} + \rho_{\text{осн min}}), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{д max}}$, $\rho_{\text{осн min}}$ – максимальное и минимальное радиальное биение детали на финишной операции и окончательной обработки основы соответственно.

В большинстве случаев величина P_{\max} должна четко оговариваться. По данным литературы [8], колебание минимальной толщины оставшегося после обработки слоя покрытия не должно превышать 0,05 мм на сторону.

Другой пример, для детали с плазменным покрытием ПГ-10Н-01, по условиям эксплуатации, необходимо обеспечить минимальную толщину после механической обработки 0,8 мм и микротвердость поверхностного слоя не ниже 6000 МПа (см. рис. 1).

Для выполнения этих требований максимальная толщина P_{\max} должна быть не больше 0,9 мм. В этом случае максимальная толщина, которая остается после финишной обработки, должна быть больше минимальной на величину запаса определяемого физико-механическими свойствами напыленного материала $P_{\text{з.с.}}$:

$$P_{\max} = P_{\min} + P_{\text{з.с.}} \quad (4)$$

Других рекомендаций, уточняющих данный параметр, в литературе нет. Поэтому для размерных расчетов допуск на колебание остаточного слоя покрытия следует принимать равным 0,05...0,1 мм. Причем, чем выше пористость сформированного материала, тем жестче должен быть допуск.

Для получения требуемых эксплуатационных свойств деталь с покрытием подвергают механической обработке. В связи с этим необходимо нанести слой больше, чем P_{\max} , который бы обеспечил условия для последующей обработки. Минимальная толщина покрытия $P_{\text{н min}}$, наносимого на деталь, взаимосвязана с точностью его нанесения $Tr_{\text{н}}$, припуском на последующую обработку покрытия Z_{\max} и минимально необходимой толщиной после окончательной обработки соотношением [9]:

$$P_{\text{н min}} = P_{\min} + Z_{\max} - Tr_{\text{н}} \quad (5)$$

Величина максимального $P_{\text{н max}}$ и минимального слоя $P_{\text{н min}}$, определяются в результате расчета технологических операционных цепей. При этом следует отметить, что для некоторых покрытий при напылении одним и

тем же материалом увеличение толщины слоя приводит к снижению прочности сцепления последнего с основой [6]. Это вызвано значительными остаточными напряжениями, возникающими в материале покрытия при напылении и способствующими отслоению покрытия от основы. Например, для плазменного покрытия на основе оксида алюминия максимальная толщина нанесенного слоя не должна превышать 0,9 мм.

Размеры остаточного слоя покрытия следует определять, исходя из функционального назначения детали и физико-механических

свойств материала, полученного в результате нанесения покрытия.

Рассмотрим расчет межоперационных размеров и припусков при проектировании технологических процессов изготовления деталей с покрытиями. В зависимости от имеющегося набора исходных данных изменяется методика расчета межоперационных размеров и припусков при проектировании технологических процессов изготовления деталей с покрытиями.

Рассмотрим, какие возникают при этом вопросы. Размерные схемы представлены на рис. 3.

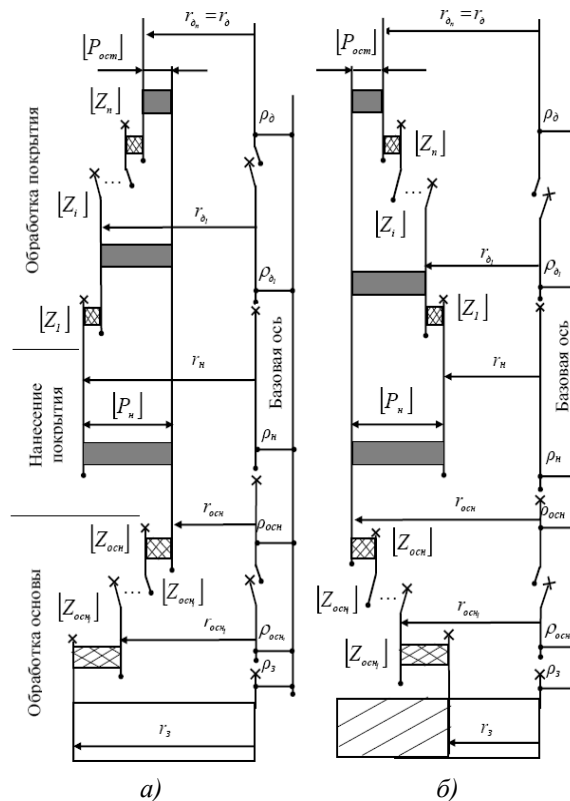


Рис. 3. Размерные схемы диаметральных размеров: а – для вала; б – для отверстия

Задача 1. При проектировании технологического процесса изготовления детали с покрытием технологически обычно известен размер детали r_d , его предельные отклонения верхнее es и нижнее ei , шероховатость обработанной поверхности, минимальная толщина остаточного слоя покрытия P_{min} , физико-механические свойства покрытия и основного материала.

Особенностью данного примера является то, что у толщины остаточного слоя покрытия оговаривается только нижняя граница P_{min} . Точностные параметры детали заданы чертежом. Возникает вопрос о необходимой точности обработки основы. По существующим на практике рекомендациям [3], чем хуже обработана основа, тем меньше затраты на меха-

ническую обработку, и, кроме того, выше прочность сцепления материалов покрытия и основы. В этом случае основным критерием для назначения допуска на размер основы выступает шероховатость ее поверхности, а метод обработки выбирается исходя из общего маршрута изготовления детали. Однако следует помнить, что чем ниже точность изготовления основы, тем больший слой покрытия потребуются нанести и тем длиннее будет маршрут его обработки.

Порядок расчета данной технологической размерной цепи производится по способу координат середин полей допусков.

1) Определяются координаты середин полей допусков составляющих звеньев – детали $e_m r_d$, основы $e_m r_{осн}$, пространственных откло-

нений $e_m \rho_{\text{осн}}$ и $e_m \rho_{\text{д}}$.

2) Рассчитывается координата середины поля рассеяния замыкающего звена $e_m [P_{\text{ост}}]$.

3) Рассчитываются половины полей допусков составляющих звеньев.

4) Определяется половина поля рассеяния толщины остаточного слоя покрытия.

5) Определяется номинал толщины остаточного слоя покрытия

$$[P_{\text{ост}}] = P_{\text{мин}} - e_m P_{\text{ост}} + \frac{TP_{\text{ост}}}{2}. \quad (6)$$

$$\frac{\omega [P_{\text{н}}]}{2} = t \cdot \sqrt{\lambda_{r_{\text{н}}}^2 \cdot \left(\frac{Tr_{\text{н}}}{2}\right)^2 + \lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot \left(\frac{Tr_{\text{осн}}}{2}\right)^2 + \lambda_{\rho_{\text{н}}}^2 \cdot \left(\frac{Tp_{\text{н}}}{2}\right)^2 + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot \left(\frac{Tp_{\text{осн}}}{2}\right)^2}; \quad (8)$$

3. Верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена:

$$es [P_{\text{н}}] = e_m P_{\text{н}} + \frac{\omega P_{\text{н}}}{2}, \quad (9)$$

$$ei [P_{\text{н}}] = e_m P_{\text{н}} - \frac{\omega P_{\text{н}}}{2}. \quad (10)$$

4. Определяется номинал толщины нанесенного слоя $[P_{\text{н}}]$.

Задача 2. Непостоянство физико-механических свойств по глубине нанесенного слоя может привести к тому, что при изготовлении остаточный слой покрытия окажется в зонах с пониженными механическими свойствами. В таких условиях работоспособность детали будет снижена. Действительно, если ограничиться набором исходных данных, как в задаче 1, такая ситуация непременно возникнет. Чтобы избежать подобного, необходимо ужесточить требования к остаточному слою покрытия. Кроме регламентации минимальной толщины $P_{\text{мин}}$, следует задаться и максимальной $P_{\text{макс}}$.

Предварительно задаться точностью обработки основы не представляется возможным, так как в качестве исходных данных выступают предельные размеры остаточного слоя покрытия и точностные параметры готовой детали:

$$[P_{\text{ост}}] = r_{\text{д}} - r_{\text{осн}} \pm (\rho_{\text{д}} + \rho_{\text{осн}}), \quad (11)$$

где $r_{\text{д}}$ – размер детали, мм; $r_{\text{осн}}$ – размер основы, мм; $\rho_{\text{д}}$ – пространственное отклонение детали с обработанным покрытием, мм; $\rho_{\text{осн}}$ – пространственное отклонение обработанной основы, мм; относительно точностных параметров обработки основы (метод максимума-минимума):

$$(Tr_{\text{осн}} + Tp_{\text{осн}}) = T[P_{\text{ост}}] - (Tr_{\text{д}} + Tp_{\text{д}}), \quad (12)$$

где $Tr_{\text{д}}$ – допуск на размер детали, мм;

6) На основании уравнения размерной цепи рассчитывается номинал размера основы $r_{\text{осн}}$.

Далее производится расчет размеров наносимого слоя покрытия:

1. Координата середины поля допуска нанесенного слоя $e_m [P_{\text{н}}]$;

2. Половина поля рассеяния замыкающего звена:

– по методу максимума-минимума:

$$\frac{\omega [P_{\text{н}}]}{2} = \frac{Tr_{\text{н}}}{2} + \frac{Tr_{\text{осн}}}{2} + \frac{Tp_{\text{н}}}{2} + \frac{Tp_{\text{осн}}}{2}, \quad (7)$$

– по вероятностному методу:

$Tr_{\text{осн}}$ – допуск на размер основы, мм; $Tr_{\text{д}}$ – допуск на пространственные отклонения детали, мм; $Tr_{\text{осн}}$ – допуск на пространственные отклонения основы, мм.

В случае расчета по вероятностному методу уравнение (12) примет вид:

$$(\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 r_{\text{осн}} + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 \rho_{\text{осн}}) = \frac{T^2 [P_{\text{ост}}]}{t^2} - (\lambda_{r_{\text{д}}}^2 \cdot T^2 r_{\text{д}} + \lambda_{\rho_{\text{д}}}^2 \cdot T^2 \rho_{\text{д}}) \quad (13)$$

или

$$(T^2 r_{\text{осн}} + T^2 \rho_{\text{осн}}) = \frac{T^2 [P_{\text{ост}}]}{1,44} - (T^2 r_{\text{д}} + T^2 \rho_{\text{д}}). \quad (14)$$

На основании результатов расчета (уравнения (12) или (14)) по таблицам статистической точности в соответствии с параметрами точности назначается метод окончательной обработки основы.

Дальнейший порядок расчетов по определению параметров припуска на обработку покрытия и основы и толщины наносимого слоя покрытия производится аналогично методике, представленной в задаче 1.

Уравнения (12)–(14) устанавливают взаимосвязь между требованиями к точности обработки детали с покрытием, точности обработки основы и колебанием толщины остаточного слоя, и на этапе конструирования появляется возможность прогнозировать условия изготовления детали. Рассмотрим два крайних случая, возникающих при определенном сочетании величин составляющих этих уравнений.

Первый случай. Допуск на толщину остаточного слоя покрытия меньше или равен сумме параметров точности на готовую деталь:

$$T[P_{\text{ост}}] \leq (Tr_{\text{д}} + Tp_{\text{д}}). \quad (15)$$

Тогда в соответствии с равенством (18) параметры точности основы ($Tr_{\text{осн}} + Tp_{\text{осн}}$) должны быть равны нулю или иметь отрицатель-

ный знак, то есть изготовить деталь при таком сочетании исходных данных невозможно.

Второй случай. Допуск на толщину покрытия больше требований точности, предъявляемых к детали:

$$T[P_{\text{ост}}] > (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (16)$$

Данное выражение является необходимым условием при изготовлении детали с покрытием. Для этого случая возможны три различных варианта соотношения параметров точности.

1. Основа и готовая деталь будут обработаны с одинаковой точностью, т.е.

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) = (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}), \quad (17)$$

если

$$T[P_{\text{ост}}] = 2 \cdot (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (18)$$

2. Основа будет обработана с точностью ниже, чем деталь

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) > (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}), \quad (19)$$

$$T[P_{\text{ост}}] > 2 \cdot (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (20)$$

Таким образом, чтобы уменьшить затраты на изготовление основы, необходимо стремиться к соблюдению условия (19) при назначении допусков на размеры детали и толщину остаточного слоя.

3. Основа будет изготовлена с более высокой точностью, чем точность готовой детали с

$$\left(\frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{t} \right)^2 - (\lambda_{r_d}^2 \cdot (Tr_d)^2 + \lambda_{\rho_d}^2 \cdot (Tr_{\rho_d})^2) \geq (\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega r_{\text{осн}}^3)^2 + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega \rho_{\text{осн}}^3)^2). \quad (27)$$

В данных неравенствах (зависимости (26) и (27)) параметры точности $(Tr_d + Tr_{\rho_d})$ и минимальная толщина остаточного слоя P_{min} (соответственно материал покрытия и метод его нанесения) назначаются исходя из условий эксплуатации детали в узле. В зависимости от физико-механических свойств выбранного материала устанавливается максимальная толщина остаточного слоя P_{max} . Однако, если в результате расчетов оказывается, что изготовить основу с соответствующей если точностью $\omega r_{\text{осн}}^3$ и $\omega \rho_{\text{осн}}^3$ в данных производственных условиях не представляется возможным, то тогда необходимо принимать решение о замене материала покрытия или методе его нанесения. Таким образом, существует тесная связь между технологическими особенностями изготовления композиции «деталь – покрытие», ее физико-механическими свойствами и условиями эксплуатации.

Неравенства (26) и (27) позволяют прогнозировать условия изготовления основы, и на этапе разработки конструкции детали обосновано

покрытием:

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) < (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}), \quad (21)$$

если

$$T[P_{\text{ост}}] < 2 \cdot (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (22)$$

Точность обработки основы – величина ограниченная. Поэтому имеет смысл говорить об экономической точности или достижимой точности в условиях конкретного производства, т.е. должно соблюдаться условие:

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3). \quad (23)$$

Тогда выражение (21) переписывается так:

$$(Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}) > (Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3). \quad (24)$$

Достаточное условие, которое необходимо выполнять при назначении допусков на деталь с покрытием, имеет вид:

$$T[P_{\text{ост}}] - (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3), \quad (25)$$

или (в соответствии с уравнением (16)):

$$P_{\text{max}} - P_{\text{min}} - (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3). \quad (26)$$

Применение метода неполной взаимозаменяемости (вероятностный расчет) позволяет существенно расширить допуски на обработку по сравнению с допусками устанавливаемыми расчетом на максимум-минимум. В этом случае неравенство (26) запишется в следующем виде:

вано производить выбор материала покрытия и метод его нанесения. Несоблюдение данных условий потребует увеличения трудоемкости обработки основы или может возникнуть ситуация, при которой изготовить детали с покрытием будет невозможно.

Задача 3. Очень часто при изготовлении деталей с покрытиями приходится ограничивать максимальную толщину наносимого слоя $P_{\text{н max}}$. Это вызвано тем, что при нанесении в покрытии создаются внутренние напряжения, которые при определенной толщине слоя могут привести к его отслаиванию от основы. В этом случае задача решается через предельные размеры, а в качестве исходных данных известно: предельные размеры детали $r_{\text{д max}}$ и $r_{\text{д min}}$; $\rho_{\text{д max}}$ радиальное биение обработанной поверхности и $\rho_{\text{д min}}$; предельные размеры основы, соответственно $r_{\text{осн max}}$ и $r_{\text{осн min}}$, $\rho_{\text{осн max}}$ и $\rho_{\text{осн min}}$; допуск на размер поверхности детали с покрытием $Tr_{\text{н}}$ (назначенный для предельно возможного размера детали после нанесения покрытия $r_{\text{н max}} = r_{\text{осн max}} + P_{\text{н max}}$).

Последовательность расчета для схемы, представленной на рис. 3:

1) Так как размеры детали и параметры толщины остаточного слоя покрытия заданы

конструктором, вначале следует определить, как и во втором примере, размеры основы.

2) В соответствии с параметрами точности готовой детали намечается маршрут ее обработки. Соответственно рассчитываются минимально необходимые припуски Z_{\min} для каждой операции и устанавливаются размеры допусков на межоперационные размеры Tr_i . Размерные цепи толщины нанесенного слоя и припуска на его обработку являются параллельно связанными. Несколько размерных цепей, имеющих одно или несколько общих звеньев, называются 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:

$$\begin{cases} [Z_{\min_n}] = (r_{d \min_{n-1}} + \rho_{d \min_{n-1}}) - (r_{d \max_n} + \rho_{d \max_n}) \\ r_{d \max_{n-1}} = r_{d \min_{n-1}} + Tr_{d_{n-1}} \\ \vdots \\ [Z_{\min_1}] = (r_{n \min} + \rho_{n \min}) - (r_{d \max_1} + \rho_{d_1 \max}) \\ r_{n \max} = r_{n \min} + Tr_n \\ [P_{n \max}] = (r_{n \max} + \rho_{n \max}) - (r_{очн \min} + \rho_{очн \min}) \end{cases}, (28)$$

б) для внутренних поверхностей:

$$\begin{cases} [Z_{\min_n}] = (r_{d \min_n} + \rho_{d \min_n}) - (r_{d \max_{n-1}} + \rho_{d \max_{n-1}}) \\ r_{d \max_{n-1}} = r_{d \min_{n-1}} + Tr_{d_{n-1}} \\ \vdots \\ [Z_{\min_1}] = (r_{d \min_1} + \rho_{d_1 \min}) - (r_{n \max} + \rho_{n \max}) \\ r_{n \max} = r_{n \min} + Tr_n \\ [P_{n \max}] = (r_{очн \max} + \rho_{очн \max}) - (r_{n \min} + \rho_{n \min}) \end{cases}. (29)$$

Решением данных систем является условие, устанавливающее взаимосвязь между максимальной толщиной нанесенного слоя, остаточного слоя, точностными возможностями процесса нанесения покрытия и маршрутом обработки покрытия:

$$[P_{n \max}] - [P_{очн \max}] \geq \sum_{i=1}^n Z_{\min_i} + \sum_{i=1}^{n-1} (Tr_i + Tr_{p_i}) + (Tr_n + Tr_{p_n}), (30)$$

где n – количество операций обработки покрытия.

Невыполнение данного условия требует корректировки маршрута обработки покрытия или изменения условий его нанесения.

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

4) 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. Необходимо совместно решить эти два уравнения относительно максимального радиуса детали после нанесения покрытия. Определим размеры нанесенной поверхности из уравнений:

$$r_{n \max} + esp_n = [P_{n \max}] + r_{очн \min} + eip_{очн}, (31)$$

$$r_{n \max} + esp_n = [Z_{\max_1}] + r_{d \min_1} + eip_{d_1}. (32)$$

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

$$[Z_{\max_1}] = [P_{n \max}] + (r_{очн \min} + eip_{очн}) - (r_{d \min_1} + eip_{d_1}). (33)$$

5) Определить максимальный радиус детали после нанесения покрытия (уравнение (39)).

6) Минимальный радиус детали после нанесения покрытия рассчитывается из уравнения:

$$r_{n \min} = [Z_{\min_1}] + (r_{d \max_1} + esp_{d_1}) - eip_n. (34)$$

7) Завершается расчет параметров операции нанесения покрытия определением минимальной толщины нанесенного слоя.

8) 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:

$$[Z_{\max_1}] = [P_{n \max}] - (r_{очн \max} + esp_{очн}) + (r_{d \max_1} + esp_{d_1}), (35)$$

$$r_{n \min} = (r_{d \max_1} + esp_{d_1}) - [Z_{\min_1}] - eip_n. (36)$$

Задача 4. Процесс нанесения покрытия сопровождается выделением большого количества тепла, приводящего к нагреву основы. Существуют рекомендации, по которым для обеспечения требуемого качества сцепления покрытия с основным материалом при напылении температура основы не должна превышать 260 °С. Однако в ряде случаев такой температурный режим не всегда удается выдержать, что приводит к ее существенным деформациям. Тогда при напылении могут произойти необратимые изменения размеров. Данное явление должно быть учтено при расчете межоперационных размеров и припусков.

Величины погрешностей, возникающих при нагреве основного металла, могут быть определены экспериментально. В настоящее время такие исследования отсутствуют, поэтому в данном примере примем наихудший вариант – смещение поверхности основы за

счет ее раздутия на величину α . Изменение размеров основы, в первую очередь, повлияет на параметры размерной цепи – толщины остаточного слоя покрытия и толщины напыленного слоя.

Для измененных условий вычисления начинаются также с размерной цепи толщины остаточного слоя покрытия, которая примет вид:

$$[P_{\text{ост}}] = r_d - r_{\text{осн}} \pm (\rho_d + \rho_{\text{осн}}) - \alpha, \quad (37)$$

тогда допуск на толщину остаточного слоя:

$$(Tr_{\text{осн}} + T\rho_{\text{осн}}) = T[P_{\text{ост}}] - (Tr_d + T\rho_d) - T\alpha, \quad (38)$$

В случае расчета по вероятностному методу получим уравнение:

$$(\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 r_{\text{осн}} + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 \rho_{\text{осн}}) = \frac{T^2 [P_{\text{ост}}]}{t^2} - (\lambda_{r_d}^2 \cdot T^2 r_d + \lambda_{\rho_d}^2 \cdot T^2 \rho_d + \lambda_{\alpha}^2 \cdot T^2 \alpha) \quad (39)$$

Уравнения (38) и (39) позволяют рассчитать параметры точности основы и соответственно установить метод ее финишной обработки.

Рассмотрим уравнения, в которых необходимо учесть величину α .

Условия (26) и (27) соответственно переписываются так:

$$P_{\text{max}} - P_{\text{min}} - (Tr_d + T\rho_d + T\alpha) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3), \quad (40)$$

$$\left(\frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{t} \right)^2 - (\lambda_{r_d}^2 \cdot (Tr_d)^2 + \lambda_{\rho_d}^2 \cdot (T\rho_d)^2 + \lambda_{\alpha}^2 \cdot (T\alpha)^2) \geq (\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega r_{\text{осн}}^3)^2 + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega \rho_{\text{осн}}^3)^2). \quad (41)$$

В размерную цепь толщины нанесенного слоя может быть включена погрешность, вызванная температурными деформациями. Тогда неравенство (30) примет следующий вид:

$$[P_{\text{нmax}}] - [P_{\text{остmax}}] \geq \sum_{i=1}^n Z_{\text{min}_i} + \sum_{i=1}^{n-1} (Tr_i + T\rho_i) + (Tr_n + T\rho_n) - \alpha_{\text{min}} \quad (42)$$

Уравнения для расчета максимального припуска на первой операции обработки покрытия:

– для наружных поверхностей:

$$[Z_{\text{max}_1}] = [P_{\text{нmax}}] + (r_{\text{оснmin}} + e\rho_{\text{осн}}) + \alpha_{\text{min}} - (r_{\text{дmin}_1} + e\rho_{\text{д}_1}), \quad (43)$$

– для внутренних поверхностей:

$$[Z_{\text{max}_1}] = [P_{\text{нmax}}] + (r_{\text{дmax}_1} + e\rho_{\text{д}_1}) + \alpha_{\text{min}} - (r_{\text{оснmax}} + e\rho_{\text{осн}}) \quad (44)$$

Представленные теоретические зависимости и методики расчета позволяют решить

весь комплекс задач, возникающих при разном анализе технологических процессов изготовления деталей с покрытиями: рассчитать межоперационные размеры и припуски на обработку покрытия и основы; установить возможность изготовления детали с заданными техническими условиями; уточнить допуски на толщину покрытия и размеры детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Трение**, изнашивание и смазка. Справочник. / В 2-х кн. Кн. 1.; под ред. Крагельского, И.В., Алисина, В.В. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
2. **Трение**, изнашивание и смазка. Справочник. / В 2-х кн. Кн. 2.; под ред. Крагельского, И.В., Алисина, В.В. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
3. **Харламов, Ю.А.** Обработка резанием деталей с покрытиями. – М.: Машиностроение, 1990. – 68 с.
4. **Клименко, С.А., Муковоз, Ю.А., Полонский, Л.Г., Мельничук, П.П.** Точение износостойких защитных покрытий. – Киев: Техніка, 1997. – 142 с.
5. **Кулагин, С.П., Леонов, С.Л., Новоселов, Ю.К., Татаркин, Е.Ю.** Технологическое обеспечение качества изготовления деталей с износостойкими покрытиями. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1993. – 209 с.
6. **Хасуй, А., Моригаки, О.** Наплавка и напыление / пер. с яп. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
7. **Борисов, Ю.С., Борисов, А.Л.** Плазменные порошковые покрытия. – Киев: Техніка, 1986. – 223 с.
8. **Сонин, В.И.** Газотермическое напыление материалов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
9. **Карпунин, М.Г., Любинецкий, Я.Г., Майданчик, Б.И.** Жизненный цикл и эффективность машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 312 с.

REFERENCES

1. *Friction, Wear and Lubrication*. Reference book / In 2 Books. Book1; under the editorship of Kragelsky, I.V., Alisin, V.V. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 400.
2. *Friction, Wear and Lubrication*. Reference book / In 2 Books. Book1; under the editorship of Kragelsky, I.V., Alisin, V.V. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 358.
3. **Kharlamov, Yu.A.** *Coated Parts Cutting*. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 68.
4. **Klimenko, S.A., Mukovoz, Yu.A., Polonsky, L.G., Melnichuk, P.P.** *Wear-Resistant Protective Coating Turning*. – Kiev: Engineering, 1997. – pp. 142.
5. **Kulagin, S.P., Leonov, S.L., Novoselov, Yu.K., Tatarkin, E.Yu.** *Quality Technological Support in Manufacturing Parts with Wear-Resistant Coatings*. – Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 1993. – pp. 209.
6. **Hasui, A., Morigaki, O.** *Weld Deposition and Sputtering* / transl. from Japanese. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – pp. 240.
7. **Borisov, Yu.S., Borisov, A.L.** *Plasma Powder Coatings*. – Kiev: Engineering, 1986. – pp. 223.
8. **Sonin, V.I.** *Gas Thermal Material Sputtering in Mechanical Engineering*. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – pp. 216.
9. **Karpunin, M.G., Lyubinetzky, Ya.G., Maidanchik, B.I.** *Machine Life and Effectiveness*. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 312.

Рецензент д.т.н. А.О. Горленко