

УДК 621.91.04

**СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ ОБЩИХ СХЕМ ОБРАБОТКИ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СТАНКОВ****д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрены компоненты общих схем обработки поверхностей резанием, влияющие на производительность и точность формообразования. Определены направления повышения эффективности общих схем обработки за счет оптимизации схемы профилирования и рационального выбора направления и траектории относительного перемещения инструмента и заготовки. Проанализированы возможные схемы профилирования криволинейных поверхностей инструментами с прямолинейным, выпуклым и вогнутым характеристическим образом. Показана эффективность управления им в процессе обработки ориентацией инструмента. Даны рекомендации по выбору общих схем обработки по критериям непрерывности процесса обработки и оптимального контакта, повышению их эффективности при обработке криволинейных поверхностей, образованных множеством эллиптических, параболических и гиперболических точек.

Введение. Общая схема обработки определяется формой характеристического образа инструмента, схемой профилирования поверхности и траекторией относительного перемещения инструмента и заготовки [1]. Любая поверхность может быть обработана различными схемами. Например, цилиндрическая поверхность вращения формируется при сообщении прямой линии вращательного движения вокруг параллельной ей оси (точение широким резцом) или прямолинейным перемещением окружности (обработка протягиванием). Многообразие общих схем обработки поверхностей существенно расширяется при частичном и многоцикловом их формообразовании, например при обработке сложных поверхностей строчками, которые могут иметь различное расположение относительно формируемой поверхности. Синтез или выбор из возможных общих схем обработки рациональной является важным этапом функционального проектирования станка, поскольку допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих стадиях его конструирования и изготовления. Общие принципы синтеза общих схем обработки рассматриваются в данной работе.

На практике при проектировании станка общая схема обработки поверхности принимается часто по аналогии с известной, т.е. полагается заданной. Это может быть причиной неудовлетворительных технико-экономических показателей эффективности станка, так как схема обработки эффективная в одном случае, например, при обработке штампов концевой сферической фрезой, оказывается малопродуктивной в другом, в частности, при обработке этим инструментом пространственно развитых поверхностей большого радиуса кривизны, из-за нерациональной схемы профилирования поверхности. Обоснованным в любом случае должен быть и выбор траектории исполнительного движения. Например, станки для обработки винтовых поверхностей лопастных изделий обычно реализуют схему обработки концентричными винтовыми строчками по аналогии с представлением об образовании винтовой поверхности линией, совершающей винтовое движение. При обработке строчками данная схема приемлема лишь для широколопастных изделий, поскольку при переходе к узколопастным изделиям производительность обработки существенно снижается. Приведенные примеры свидетельствуют о существенном влиянии общей схемы обработки на эффективность способа, необходимости синтеза рациональных общих схем обработки и реализации формообразующей системы станка разных схем в зависимости от конструкции изделия. Общая схема обработки должна приниматься исходя из ее влияния на основные показатели эффективности – производительность и точность формообразования.

Анализ влияния общей схемы обработки на производительность и точность формообразования. В общем случае профиль номинальной поверхности образуется как касательная к множеству образующих элементарных поверхностей, отстоящих друг от друга на определенное расстояние, например, величину межстрочечной подачи. Вследствие точечного контакта указанных образующих формируется погрешность профилирования в виде выступов (гребней) над номинальной поверхностью, форма и высота которых зависят от расстояния между точками контакта указанных образующих и их кривизны. Высота выступов численно характеризует точность формообразования.

В этой связи важно установить влияние на производительность и точность формообразования основных параметров общей схемы обработки – направления относительного перемещения инструмента и заготовки, формы характеристического образа инструмента и цикличности процесса обработки.

Рассмотрим поставленную задачу для следующих возможных моделей формообразования:

- 1) поверхность обрабатывается за один цикл;
- 2) поверхность обрабатывается циклично при конгруэнтности номинальной поверхности множеству элементарных поверхностей;

3) поверхность обрабатывается циклично, номинальная поверхность не конгруэнтна множеству элементарных поверхностей.

Первый и второй варианты обеспечивают полное, а третий – частичное формообразование заданной поверхности.

В первом случае поверхность образуется одновременно по всей ширине одним (рис. 1, а) или несколькими (рис. 1, б) производящими элементами, из-за чего обработанная поверхность конгруэнтна номинальной. При этом производительность формообразования образующей длиной $l_i = f(L_i)$, где L_i – длина направляющей, составит

$$Q_i = \frac{1}{T_i} \int_0^{L_i} f(L_i) dL_i, \quad (1)$$

где F_i – площадь образуемой поверхности; $T_i = L_i / v$ – время формообразования; v – скорость формообразующего движения.

Тогда

$$Q_i = vF_i / L_i \approx vl_{i\text{ср}}, \quad (2)$$

где $l_{i\text{ср}} = F_i / L_i$ – средняя длина образующей элементарной поверхности.

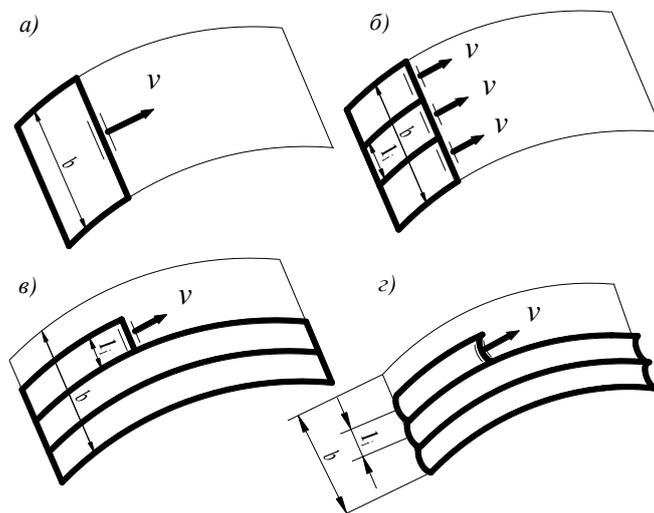


Рис. 1. Общие схемы обработки сложных поверхностей:
а, б, в – при полном формообразовании; г – при частичном формообразовании

Из (2) следует, что при нескольких производящих элементах производительность формообразования каждого из них пропорциональна длине образующей элементарной поверхности и не зависит от положения ее направляющей.

Производительность формообразования Q всех k элементов составит

$$Q = \sum_{i=1}^k Q_i = vb, \quad (3)$$

где $b = \sum_{i=1}^k l_i$ – длина образующей номинальной поверхности.

Так как величина b для разных положений образующей различная, производительность формообразования всех производящих элементов при обработке поверхности за один цикл зависит от направления их относительного перемещения – ее максимум соответствует наибольшей длине образующей номинальной поверхности.

Во втором случае (рис. 1, в) время обработки T включает кроме времени рабочих T_p и холостых T_x ходов также межцикловые потери T_{Π} , поэтому

$$T = T_p + T_x + T_{\Pi}. \quad (4)$$

Обычно обработка сложной поверхности осуществляется одним инструментом за n циклов, следовательно $T_{\Pi} = nt_{\Pi}$, где t_{Π} – потери за один цикл, $n = b/l_{icp}$. Отношение T_p/T есть коэффициент цикловой непрерывности $K_{ц}$, величина которого определяется зависимостью:

$$K_{ц} = T_p / (T_x + bt_{\Pi} / l_{icp}). \quad (5)$$

Если v_x, l_x и v, l_p – соответственно скорость и длина холостого и рабочего ходов, то

$$T_p = \sum(L_{pi} / v); \quad T_x = \sum(L_{xi} / v_x); \quad (6)$$

$$K_{ц} = 1 / (1 + \mu c + bvt_{\Pi} / F), \quad (7)$$

где $\mu = v / v_x$; $c = \sum L_{xi} / \sum L_{pi}$; F – площадь номинальной поверхности.

Из (7) следует, что коэффициент цикловой непрерывности зависит от длины образующей номинальной поверхности и, следовательно, от положения траектории движения формообразования. Время обработки и производительность формообразования в данном случае составят:

$$T = L(1 + \mu c) / v + bt_{\Pi} / l_{icp}; \quad (8)$$

$$Q = l_{icp} v / (1 + \mu c + bvt_{\Pi} / F), \quad (9)$$

или с учетом (7)

$$Q = K_{ц} l_{icp} v. \quad (10)$$

Таким образом, при цикловой обработке одним формообразующим элементом максимальное значение Q_{\max} имеет место при минимальной длине образующей номинальной поверхности, что соответствует максимальному значению $K_{ц}$. Следовательно, коэффициент цикловой непрерывности характеризует эффективность схемы формообразования и является количественной характеристикой первого критерия для выбора общей схемы обработки – критерия непрерывности. При прочих равных условиях для определенного направления траектории движения формообразования данный коэффициент принимает максимальное значение. Такое направление и является оптимальным по критерию непрерывности.

Третий случай – наиболее общий и чаще имеет место, когда характеристический образ инструмента касается образующей номинальной поверхности (рис. 1, з). Поэтому неизбежна погрешность формообразования в виде отклонения обработанной поверхности от номинальной поверхности изделия. Её величина зависит от соответствия формы характеристического образа и траектории движения формообразования производящим линиям номинальной поверхности. В этой связи при синтезе общих схем обработки важен выбор рациональной формы характеристического образа инструмента.

Для любой сложной поверхности осуществимо множество общих схем обработки. Например, выпуклая поверхность может быть образована инструментом с выпуклым, прямым или вогнутым характеристическим образом при различных направлениях его перемещения. Поэтому определение рациональной схемы связано с анализом возможных сочетаний форм образующей номинальной поверхности и характеристического образа инструмента, а также направлений их относительного перемещения.

Производительность формообразования пропорциональна длине проекции образующей элементарной поверхности на номинальную поверхность и, следовательно, определяется формой образующих этих поверхностей и допусковым отклонением обработанной поверхности от номинальной, например, высотой гребней при строчечной обработке. Поэтому синтез и анализ схем обработки должен выполняться исходя из зависимости производительности и погрешности формообразования от формы образующих элементарных и номинальной поверхностей.

Производительность формообразования при заданной погрешности Δ выражается в этом случае зависимостью (10), где l – межстрочечная подача (перемещение характеристического образа инструмента вдоль образующей номинальной поверхности между двумя последовательно обрабатываемыми строчками). При обработке с заданной производительностью важно обеспечить минимальную высоту гребней, а также постоянные их форму и высоту на всей поверхности. Выполнение первого условия позволяет уменьшить трудоемкость последующей обработки, а второго – получать на различных участках поверхности близкие по значению параметры качества обработки, влияющие через технологическую наследственность на качество обработанной поверхности.

Решение первой задачи за счёт уменьшения межстрочечной подачи связано со снижением производительности, поэтому при синтезе общей схемы обработки важно задать рациональную схему профилирования формируемой поверхности.

Оптимизация схемы профилирования. Так как частичное формообразование сложной поверхности строчками достигается при различных сочетаниях форм образующих номинальной и элементарной поверхностей, то общая схема обработки должна выбираться с учетом влияния формы указанных образующих на погрешность формообразования.

Характерные для строчечной обработки схемы профилирования сложных поверхностей приведены на рисунке 2, где $K_1 = 1/r$ – кривизна образующей L_1 номинальной поверхности; $K_2 = 1/R$ – кривизна характеристического образа L_2 ; $K^+(K^-, K^o)$ – кривизна производящей линии положительная (отрицательная, равна нулю); $r(R)$ – радиус кривизны линий $L_1(L_2)$; l – межстрочечная подача; Δ – погрешность формообразования. Форма контакта определяется кривизной линий L_1 и L_2 , а в схемах 2 и 4 – также соотношением значений r и R ($r < R$ или $r > R$).

При межстрочечной подаче l создается погрешность формообразования в виде гребней, высота Δ которых относительно номинальной поверхности описывается для приведенных на рисунке 2 схем соответствующими уравнениями.

Форма контакта	Схема формообразования	Погрешность формообразования 2
$K_1^+ - K_2^-$	1 	$\Delta = (r + R) \cos \frac{l}{2r} - r - \sqrt{R^2 - (r + R)^2 \sin^2 \frac{l}{2R}}$ $\Delta \approx cl^2 \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)$ $c = \frac{1}{8}$
$K_1^+ - K_2^-$ $ K_1 > K_2 $	2 	<ol style="list-style-type: none"> $r < R$; $\Delta \approx cl^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$ $r > R$; $\Delta \approx -cl^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$ $\Delta = (r - R) \cos \frac{l}{2r} - r + \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \sin^2 \frac{l}{2R}}$ $\Delta = (R - r) \cos \frac{l}{2r} + r - \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \sin^2 \frac{l}{2R}}$
$K_1^+ - K_2^0$ $K_1^- - K_2^0$	3 	$\Delta = r \left(\frac{1}{\cos \frac{l}{2r}} - 1 \right)$ $\Delta \approx \frac{cl^2}{r}$
$K_1^- - K_2^+$ $ K_1 < K_2 $	4 	<ol style="list-style-type: none"> $R < r$; $\Delta \approx cl^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$ $R > r$; $\Delta \approx -cl^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$ $\Delta = (R - r) \cos \frac{l}{2r} + r - \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \sin^2 \frac{l}{2R}}$ $\Delta = (r - R) \cos \frac{l}{2r} - r + \sqrt{R^2 - (R - r)^2 \sin^2 \frac{l}{2R}}$

Рис. 2. Схемы приближенного профилирования поверхностей

Учитывая, что с достаточной точностью $\sin \alpha = \alpha$, $\cos \alpha = 1 - \alpha^2 / 2$; $\sqrt{1 \pm a} = 1 \pm a / 2$, где $a \ll 1$, получим обобщенную для рассматриваемых схем зависимость:

$$\Delta = 0.125l^2 (K_1 + K_2). \quad (11)$$

Из неё следует, что для обеспечения заданной точности формообразования значение межстрочечной подачи должно удовлетворять условию:

$$l \leq 2\sqrt{2\Delta / |K_1 + K_2|}. \quad (12)$$

Тогда максимальная производительность формообразования составит

$$Q = 2K_y v \sqrt{2\Delta / |K_1 + K_2|}. \quad (13)$$

Формула (13) выражает количественную связь между показателями эффективности (производительностью и точностью) и параметрами общей схемы обработки (формой и положением производящих линий номинальной и элементарной поверхностей). Из неё следует, что производительность при заданных погрешности и скорости формообразования определяется коэффициентом непрерывности K_y и формой образующих номинальной и элементарной поверхностей.

Из выражения (13) следует второй критерий выбора общей схемы обработки – критерий оптимального контакта. Он характеризует соответствие форм образующих номинальной поверхности изделия и элементарных поверхностей в зоне формообразования. По данному критерию оптимальной является общая схема обработки, при которой выражение $|K_1 + K_2|$ принимает минимальное значение. Выполнимость критерия оптимального контакта обеспечивается выбором рационального сочетания форм образующих номинальной и элементарных поверхностей, а также управлением формой характеристического образа инструмента, т.е. оптимизацией схемы профилирования формируемой поверхности [2].

Повышение точности профилирования за счет управления характеристическим образом инструмента. Как следует из (13), постоянство производительности формообразования Q при заданной погрешности Δ возможно при стабилизации величины $|K_1 + K_2|$. Для выполнения этого условия при переменной кривизне формируемой поверхности необходимо соответствующим образом изменять кривизну характеристического образа инструмента, что обеспечивается путем непрерывного изменения ориентации инструмента относительно направления его перемещения. В этом случае трансформируется характеристический образ, что позволяет приблизить его к заданной поверхности для обеспечения требуемой точности формообразования.

Такой метод обеспечения рациональной формы характеристического образа инструмента реализован, например, в способе строчечной обработки [3] сложных поверхностей торцевой фрезой 1, ось вращения которой расположена под углом α к направлению относительного перемещения S_1 (рис. 3).

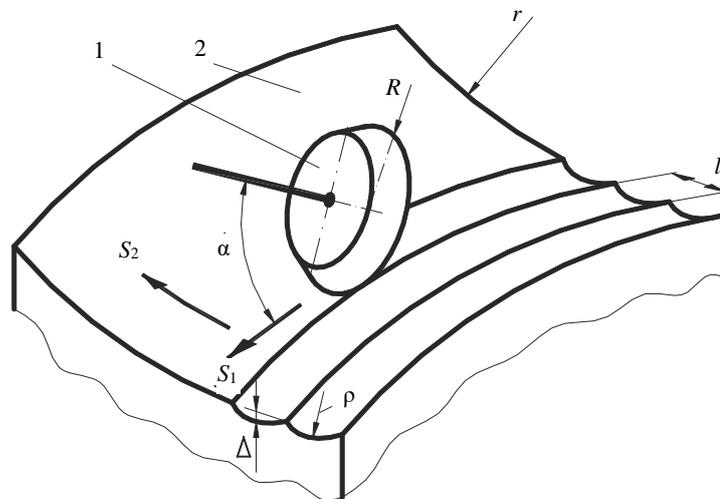


Рис. 3. Схема формирования сложной поверхности при управлении характеристическим образом инструмента

Характеристический образ инструмента в данном случае представляет собой эллипс, контактирующий в точке с номинальной поверхностью заготовки 2. Поэтому при межстрочечной подаче S_2 на ширине строчки, равной l , образуются гребни, высота Δ которых определяется по зависимости (11).

В пределах ширины строчки эллипс с достаточной для практических расчетов точностью аппроксимируется окружностью, радиус ρ которой определяется по формуле:

$$\rho = R / \cos \alpha, \quad (14)$$

где R – радиус инструмента; α – угол наклона оси инструмента к направлению его перемещения.

Тогда погрешность формообразования составит

$$\Delta = 0.125l^2 (\cos \alpha / R \pm 1/r), \quad (15)$$

где r – радиус кривизны образующей номинальной.

Из (15) следует, что при обработке поверхности переменной кривизны торцевой фрезой (см. рис. 3), ось которой наклонена к направлению подачи под постоянным углом α , погрешность формообразования Δ переменна вдоль строчки, что исключает возможность обеспечить одинаковое качество обработки и, следовательно, одинаковую технологическую наследственность на всех участках обработанной поверхности.

Требуемая точность формообразования может быть обеспечена за счет уменьшения межстрочечной подачи, однако это связано со снижением производительности формообразования. Более эффективным решением является управление формой образующих элементарных поверхностей [13], что достигается при изменении угла α согласно зависимости:

$$\alpha = \arccos R(8\Delta/l^2 \pm 1/r). \quad (16)$$

В этом случае трансформация характеристического образа инструмента обеспечивает постоянное значение $|K_1 + K_2|$, условия для наилучшего приближения обработанной поверхности к номинальной поверхности изделия и стабилизации шероховатости обработанной поверхности.

Рассмотренный метод управления формой характеристического образа инструмента является универсальным и может быть использован для повышения точности частичного формообразования различных поверхностей.

Рекомендации по выбору общих схем обработки. В зависимости от геометрических параметров номинальной поверхности изделия общая схема обработки может быть выбрана по указанным выше критериям непрерывности и оптимального контакта. В общем случае, когда выполнение каждого из них возможно лишь при различных направлениях относительного перемещения инструмента и изделия, для выбора общей схемы формообразования служит обобщенный критерий, которому соответствует максимум значения $K_y / |K_1 + K_2|$.

Установленные критерии позволяют обоснованно выбирать направление и траекторию относительного перемещения инструмента и изделия и тем самым оптимизировать общую схему обработки.

Эффективность выбора направления исполнительного движения количественно характеризуется отношением K_Q значений производительности формообразования, соответствующих различным (1 и 2) направлениям относительного перемещения:

$$K_Q = Q_2 / Q_1 = l_2 K_{y2} / (l_1 K_{y1}), \quad (17)$$

или

$$K_Q = \frac{1 + \mu + b_1 v_{TII} / F}{1 + \mu + b_2 v_{TII} / F} \sqrt{\frac{|K_1 + K_2|_1}{|K_1 + K_2|_2}}. \quad (18)$$

Рациональное сочетание форм образующих номинальной и элементарных поверхностей при выборе направления строчек определяется на основе исследования номинальной поверхности изделия с учетом того, что условием выполнения критерия оптимального контакта является минимум модуля алгебраической суммы кривизн $|K_1 + K_2|$ указанных образующих при обеспечении проходимости инструмента. Например, для наиболее часто встречающегося случая обработки сложных поверхностей, когда элементарные образующие могут быть только выпуклыми, за образующую номинальной поверхности следует принимать линию минимальной (с учетом знака) кривизны в зоне контакта с образующей эле-

ментарной поверхности. Если образующая номинальной поверхности может быть только выпуклой, то у элементарной поверхности она должна быть вогнутой или прямой. Данное условие может быть обеспечено не только профилированием инструмента, но и выбором направления строчек.

Известно, что в каждой точке криволинейной поверхности существуют два главных нормальных сечения, которым соответствуют наибольшая K_1 и наименьшая K_2 величины кривизны нормального сечения, произведение которых определяет тип точки: параболическая ($K_1 K_2 = 0$); эллиптическая ($K_1 K_2 > 0$) и гиперболическая ($K_1 K_2 < 0$). Через каждую такую точку проходят две взаимно перпендикулярные линии кривизны. Следовательно, для повышения производительности направление строчек необходимо задавать вдоль линий кривизны, имеющих большую с учетом знака кривизну. Это общее правило относится к выбору схем обработки поверхностей различной формы. Рассмотрим его применительно к основным типам сложных поверхностей, представленных на рисунке 4.

Поверхность изделия образована множеством параболических точек, тогда одно из ее нормальных сечений – прямая, а другое – выпуклая или вогнутая линия. Если обрабатывается вогнутая поверхность (рис. 4, а), направляющие элементарных поверхностей (строчек) должны быть расположены вдоль прямолинейных сечений, так как их кривизна, равная нулю, больше кривизны вогнутых криволинейных сечений, которая отрицательна. Если же поверхность изделия – выпуклая (рис. 4, б), направление строчек должно задаваться вдоль кривых линий, поскольку их кривизна больше, чем прямых.

Поверхность изделия образована множеством эллиптических точек (все ее нормальные сечения выпуклые или вогнутые). В первом случае (рис. 4, в) кривизна всех сечений положительна, поэтому направление строчек целесообразно задавать вдоль более выпуклых линий, кривизна которых больше. Во втором случае (рис. 4, г) кривизна всех сечений отрицательна, строчки должны быть направлены вдоль менее вогнутых линий, кривизна которых с учетом знака больше, чем у более вогнутых.

Поверхность изделия образована множеством гиперболических (седловых) точек (рис. 4, д). Поскольку поверхность изделия в каждой точке выпукло-вогнутая, строчки должны располагаться вдоль выпуклых линий, имеющих положительную кривизну.

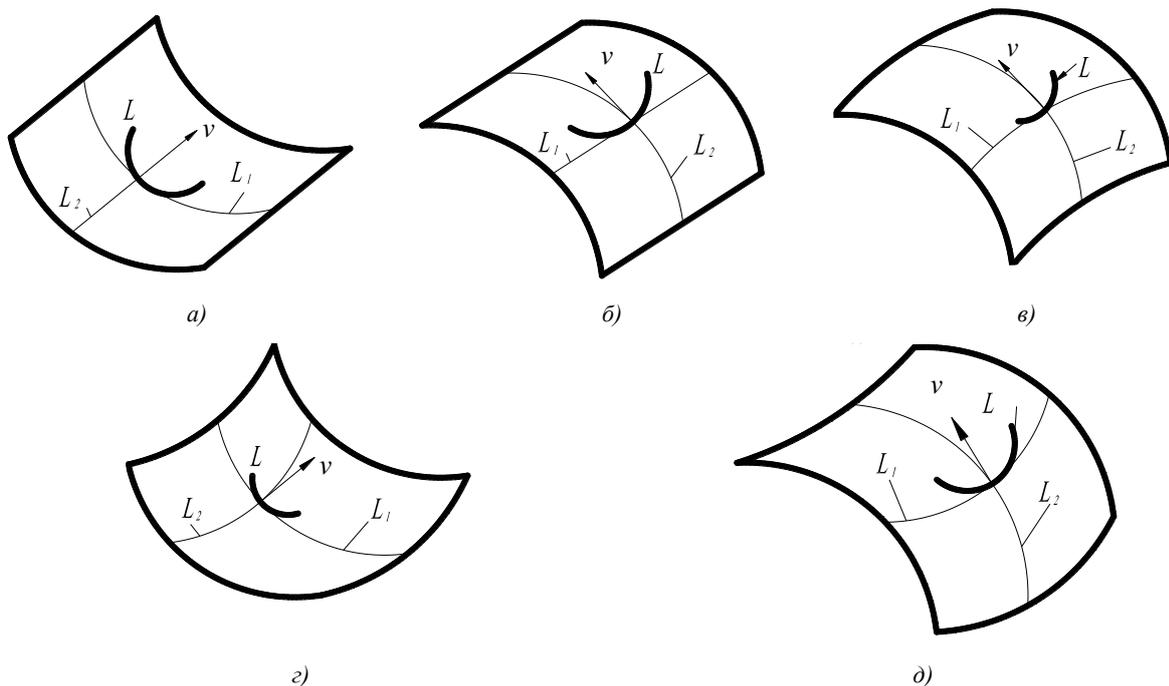


Рис. 4. Общие схемы частичного формообразования поверхностей:

а (б) – вогнутой (выпуклой), образованной множеством параболических точек; в (г) – выпуклой (вогнутой), образованной множеством эллиптических точек; д – образованной множеством гиперболических точек; L_1 – образующая формируемой поверхности; $L(L_2)$ – образующая (направляющая) элементарной поверхности

Приведенные рекомендации справедливы при непрерывных процессах формообразования и при равенстве для сравниваемых вариантов значений коэффициента цикловой непрерывности. В иных случаях направление строчек должно приниматься с учетом обобщенного критерия. Если поверхность изделия представляет сочетание рассмотренных типов поверхностей, определенные её участки следует обраба-

тывать по соответствующим рациональным схемам. Возможность реализации множества необходимых схем обработки должна быть обеспечена при проектировании формообразующей системы станка.

Выводы

1. Производительность и точность формообразования зависят от схемы профилирования формируемой поверхности, направления и траектории исполнительного движения – основных компонентов общей схемы обработки. Совершенство указанных компонентов характеризуется критериями непрерывности процесса обработки и оптимального контакта инструмента с формируемой поверхностью.

2. Выполнимость указанных критериев при синтезе общей схемы обработки обеспечивается на основе исследования геометрии формируемой поверхности и возможных схем контакта с ее образующей характеристического образа инструмента.

3. Стабилизация формы контакта и повышение точности формообразования достигается управлением в процессе обработки характеристическим образом инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий: междунар. науч.-практ. журнал. – 2003. – № 1. – С. 61 – 71.
2. Данилов, В.А. Управление формообразованием при обработке резанием / В.А. Данилов, В.А. Терентьев, Л.А. Данилова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2004. – № 1. – С. 40 – 51.
3. Способ обработки сложных поверхностей: а. с. 1255303 СССР, МКИ⁴ В23С 3/16 / В.А. Данилов, Л.А. Данилова (СССР); Новополоц. политехн. ин-т; опубл. 07.09.86 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 33. – С. 48.

Поступила 15.06.2011

SYNTHESIS OF RATIONAL COMMON SCHEMES OF TREATMENT IN LATHERS DESIGNING

V. DANILOV

Is considered the components of common schemes of treatment that influence on productivity and accuracy of forming. Are defined directions of rising of efficiency of common schemes of treatment at the expense of optimization of schemes of profiling and rational choice of direction and trajectory of relative displacement of the tool and workpiece. Are analyzed possible schemes of profiling cam surfaces with tools that have straight-line, corbelled and hollow characteristic shape. Efficiency of operation with it during treatment is shown. Recommendations in choosing of common schemes of treatment according to criterions of continuity of treatment and optimal contact, raising of their efficiency during cam surfaces treatment that are created by variety of elliptical, parabolical and hyperbolical points are given.