

ляет с единых позиций оценивать технологические возможности машиностроительного производства и предлагает варианты модульного построения наиболее рациональных для предприятия технологических процессов, металлорежущих станков и инструментов.

Литература

1. Попок Н.Н. Концепция мобильной реорганизации машиностроительного производства // Наука и технологии на рубеже XXI века / Мат. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2000. — С. 3–8.
2. Попок Н.Н. Теоретические и технологические основы мобильного номенклатурного производства с интенсификацией механической обработки поверхности деталей типа тел вращения. Автореферат дис..., д-р техн. наук. — Мн., 2003.
3. Попок Н.Н., Новоселов Ю.А. Показатель сущностной сложности изделий как критерий выбора машиностроительных изделий для освоения их производства // Машиностроение. — Минск: Выш. школа. — 2000. — Вып. 16. — С. 31–37.
4. Попок Н.Н. Рациональный выбор изделия для производства на машиностроительном предприятии // Машиностроитель. — 2001. — № 4. — С. 43–45.
5. Попок Н.Н., Новоселов Ю.А. Методология продольного сложно-функционального формирования поверхностей материальных объектов // Материалы, технологии, инструменты. — 2000. — Т. 5. — № 2. — С. 27–30.
6. Попок Н.Н. Комплексное моделирование и оптимизация обработки материалов резанием в гибком автоматизированном производстве. — Новополоцк: ПГУ, 1997. — 101 с.
7. Исследование путей интенсификации процессов дискретного формообразования профильных и прерывистых поверхностей при синтезе способов их обработки // Отчет о НИР (заключительный), ПГУ / Данилов В.А., Терентьев В.А. — Новополоцк, 1997. — 100 с.
8. А.с.1291311. Способ нарезания зубчатых изделий / Терентьев В.А., Трофимов А.И. — Оpubл. БИ, 1987. № 27.
9. А.с.1611613. Роторный зубодолбежный станок / Терентьев В.А., Трофимов А.И., Кошников В.А. — Оpubл. БИ, 1990. № 45.
10. Попок Н.Н., Терентьев В.А. Универсальные блочно-модульные режущие инструменты // Современные направления развития производственных технологий и робототехники: Мат. междунар. науч.-техн. конф. — Могилев, ММИ, 1999. — С. 146.
11. Пат. 563 ВУ МПК: 7В23В1/00, 27/12. Многолезвийный блочно-модульный режущий инструмент / Попок Н.Н., Терентьев В.А. — № и 20010239; Заявлено 5.10.01; Оpubл. 11.12.01 / Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 2002. — № 2. — с. 32.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ

Изложены научные основы синтеза и интенсификации технологий формообразования сложных поверхностей резанием. Приведены примеры реализации технологии формообразования для создания оригинального металлорежущего оборудования.

Сложные поверхности широко применяются в конструкциях деталей машин и приборов, рабочих органов двигательных и энергетических установок, различных инструментов. Основным методом их получения служит формообразование резанием, которое, благодаря присущим ему свойствам управляемости и гибкости, яв-

ляется наиболее экономичным средством обеспечения требуемого качества. Технико-экономические показатели способов обработки изделий со сложными поверхностями обычно ниже, чем деталей простой геометрической формы. Особенно это характерно для незамкнутых пространственно развитых поверхностей, при обра-

*В.А. Данилов,
канд. техн. наук,
зав. кафедрой
«Металлорежущие
станки и
инструменты».*

*Полоцкий
государственный
университет*

ботке которых еще велика доля ручного труда. Поэтому актуальной является проблема интенсификации процессов обработки сложных поверхностей.

Она связана, в частности, с необходимостью освоения в отечественном машиностроении производства прогрессивных конструкций изделий со сложными поверхностями — профильных моментопередающих соединений, изделий с плоским зубчатым контуром и др. Указанные обстоятельства и многообразие применяемых в технике сложнопрофильных изделий обуславливают потребность в универсальных принципах синтеза эффективных схем формообразования сложных поверхностей резанием и создания реализующего их конкурентоспособного станочного оборудования — основных компонентов технологий формообразования.

Из возможных направлений решения этой проблемы важная роль принадлежит функциональному проектированию станочного оборудования, так как допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих стадиях его проектирования, технологической подготовки и организации производства. Актуальной является разработка этапов функционального проектирования, обуславливающего технико-экономический уровень создаваемых станков: синтез схем формообразования поверхностей; выбор методов их обработки; синтез структуры формообразующих систем металлорежущих станков. Выделение указанных этапов обусловлено их качественным различием: если на первом исследуются геометрические и кинематические схемы образования поверхности, на втором — разрешающие возможности различных технологических методов в отношении определенных показателей эффективности, то на третьем — структура компонентов формообразующей (обрабатываемой) системы станка. Вместе с тем, решаемые на всех этапах задачи объединены общей целью — создание эффективной технологии формообразования, что обуславливает необходимость их комплексного рассмотрения на основе научнообоснованного подхода к созданию прогрессивного станочного оборудования и режущих инструментов для интенсификации процессов формообразования сложных поверхностей резанием [1].

Решение задач первого из указанных этапов базируется на теории формообра-

зования поверхностей резанием, в разработку которой существенный вклад внесли белорусские научные школы академиков НАН Е.Г. Коновалова и П.И. Ящерицына.

В наших исследованиях [1] теория формообразования получила дальнейшее развитие в части решаемых задач. Так, исходя из вида отображения производящих элементов инструмента на номинальную поверхность изделия, формы контакта и характера их взаимодействия для возможных моделей определены условия и схемы их полного и частичного формообразования одной или множеством элементарных поверхностей. Это является базой для синтеза рациональных методов генерации и схем обработки поверхностей, в частности, совмещенных методов формообразования производящих линий — основы синтеза комбинированных методов обработки.

Для оценки эффективности схем формообразования наряду с применяемыми количественными показателями (производительность, точность) важны качественные (упорядоченность, универсальность, сложность реализации) и функциональные характеристики (рис. 1). Учет взаимосвязи этих характеристик, а также зависимости сложности кинематики формообразования и инструмента от выбора материального носителя формы производящих линий номинальной поверхности изделия, позволяет задать рациональное распределение функции формообразования между кинематической и инструментальной подсистемами станка [2], что важно для их проектирования.

Проблема синтеза и интенсификации технологий формообразования рассматривается на основе системного подхода и предложенной структурной модели способа обработки (рис. 2), в соответствии с которой его основными компонентами являются: схема формообразования поверхности, определяемая общей схемой обработки, методом формообразования поверхности в пространстве и времени и кинематической схемой обработки; технологический метод обработки как совокупность процессов, связанных с удалением материала инструментом определенного типа; формообразующая система, обеспечивающая необходимый поток информации, материалов и энергии [3, 4]. Структура и взаимосвязь указанных компонентов показаны на рис. 2.

Характеристики процессов формообразования

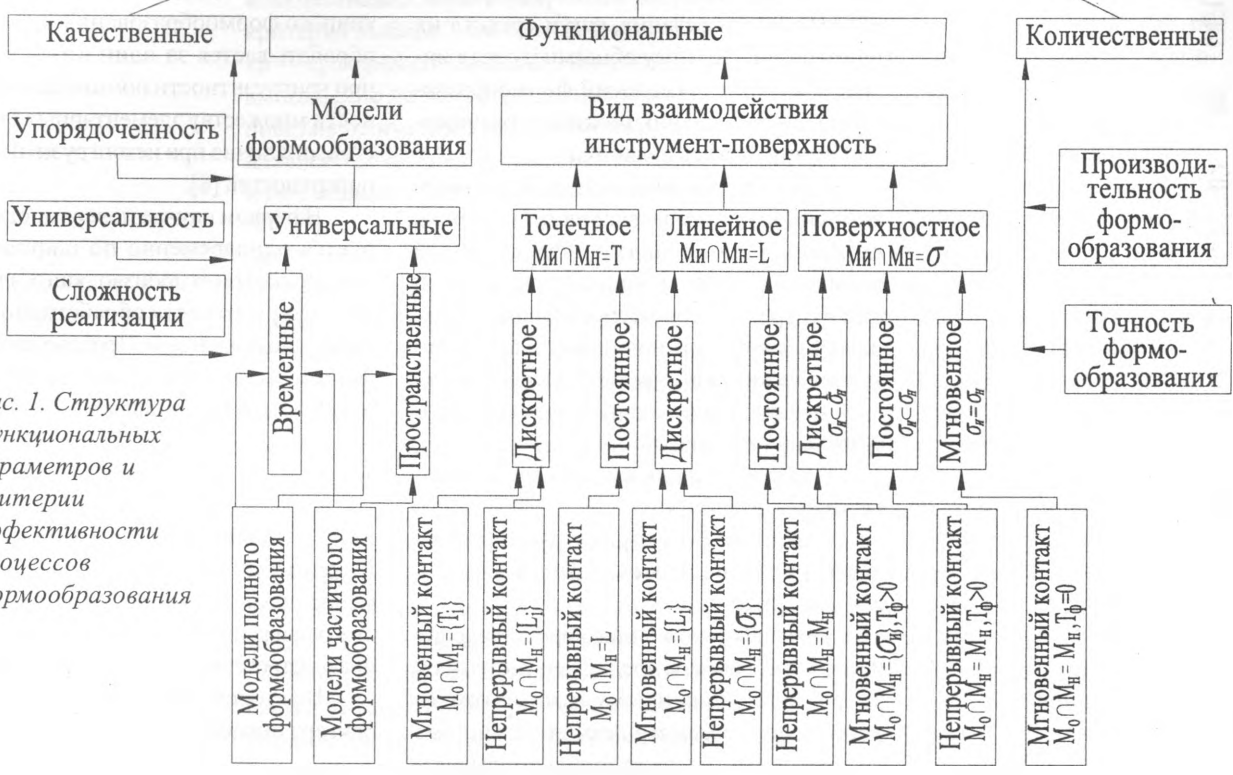
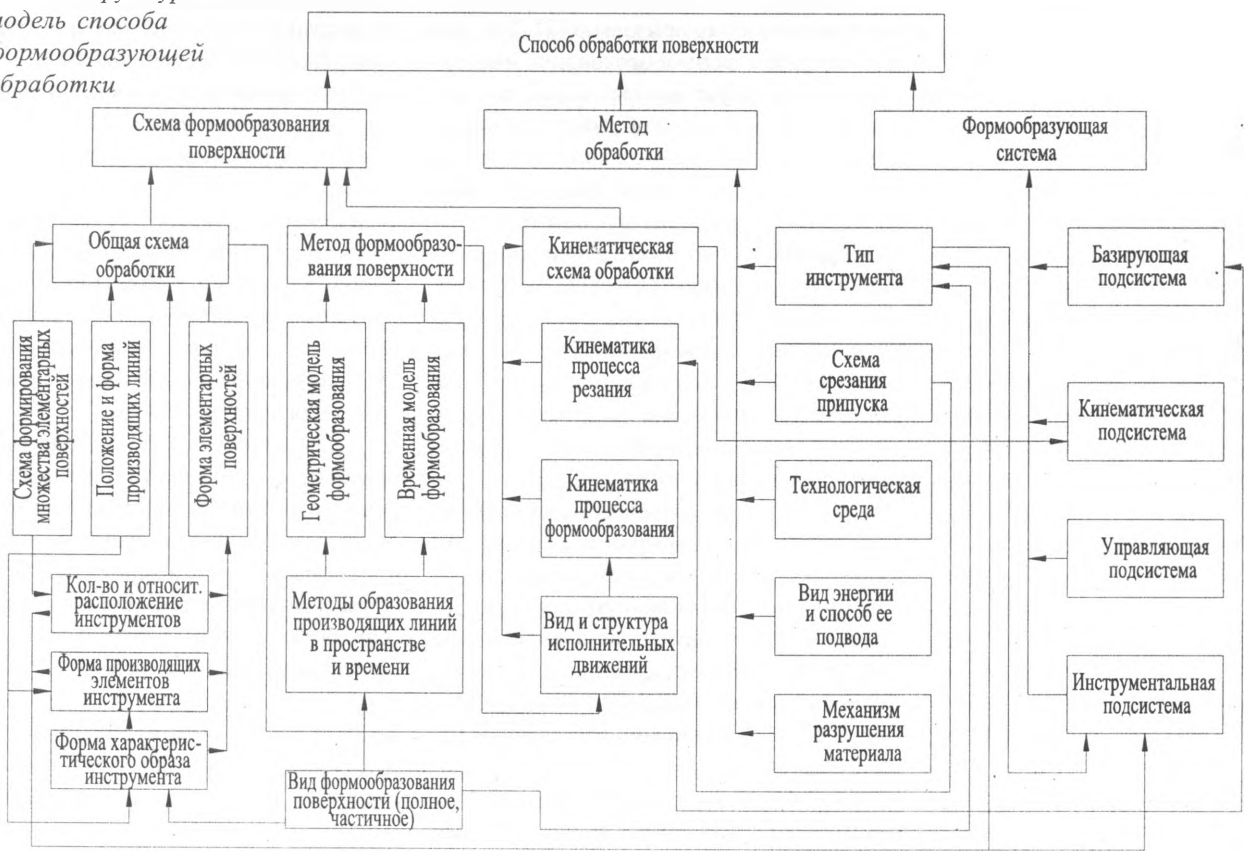


Рис. 1. Структура функциональных параметров и критерии эффективности процессов формообразования

Рис. 2. Структурная модель способа формообразующей обработки



Структура способа обработки обуславливает необходимость комплексного подхода к рассматриваемой проблеме путем оптимизации как процессов формообразования и резания, так и средств их реализации. Поэтому общими путями интенсификации технологий формообразования на стадии функционального проектирования станков являются:

- выбор рациональной схемы информационного преобразования от заготовки до заданной поверхности, определяющей геометрическую и временную модели формообразования, распределение функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами;
- синтез рациональной схемы формообразования поверхности;
- разработка или выбор эффективно-го метода обработки;
- оптимизация структуры формообразующих компонентов обрабатываемой системы [5, 6].

Для информационного представления способов обработки предложен системный метод, согласно которому каждый компонент способа рассматривается как система с иерархической структурой и описывается формализованным языком соответствующего уровня в виде структурной формулы, состоящей из множества определителей его существенных признаков [7]. Так, для любой схемы формообразования ими являются: метод формообразования поверхности; общая схема ее обработки; кинематика формообразования и кинематическая схема обработки. Поэтому ее структурная формула состоит из трех определителей данных признаков, что значительно упрощает анализ рассматриваемых схем. Структурные формулы эффективны как при анализе, так и при синтезе кинематических схем обработки. Они служат также основой для построения математических моделей формообразования, кинематической структуры и компоновки станков.

Синтез рациональных общих схем обработки сложных поверхностей резанием включает сравнение возможных схем и выбор из них эффективной при проектировании станка на основе зависимостей общих показателей эффективности — технологической производительности и точности формообразования от основных параметров общей схемы обработки — направления относительного перемещения инструмента и заготовки, формы характе-

ристического образа инструмента и цикличности процесса формообразования. Такие зависимости установлены для следующих основных моделей полного и частичного формообразования: поверхность обрабатывается за один цикл; циклично при конгруэнтности номинальной поверхности множеству элементарных поверхностей; циклично при неконгруэнтности этих поверхностей [8].

В первом случае поверхность формируется одновременно по ширине одним или множеством производящих элементов при конгруэнтности обработанной поверхности номинальной. Производительность формообразования Q всех K производящих элементов составляет

$$Q = \sum_{i=1}^K Q_i = vb,$$

где b — длина образующей номинальной поверхности; v — скорость движения формообразования, зависящая от направления этого движения, так как каждому направлению соответствует определенное значение b .

Во втором случае из-за циклового характера обработки

$$Q = K_H vb_i,$$

где b_i — длина образующей элементарной поверхности, K_H — коэффициент цикловой непрерывности процесса формообразования. Значение K_H зависит от положения элементарных поверхностей и выражается зависимостью $K_H = 1/(1 + \mu + bVt_H / F)$, где μ — отношение скоростей рабочего и холостого ходов; F — площадь номинальной поверхности; t_H — время между циклами. Коэффициент цикловой непрерывности влияет на эффективность схемы формообразования и является количественной характеристикой первого критерия для выбора общей схемы обработки — критерия непрерывности.

Третий случай — наиболее общий и имеет место при частичном формообразовании поверхности с погрешностью Δ в виде межстрочечных гребней, зависящей от формы контакта номинальной и элементарных поверхностей. Для возможных при обработке сложных поверхностей форм контакта этих поверхностей

$$\Delta = 0,125b_i^2 (K_1 + K_2),$$

где $K_1(K_2)$ — кривизна образующей номинальной (элементарной) поверхности [9]. Поэтому в данном случае

$$Q = CK_H K_K \sqrt{\Delta},$$

где K_K — коэффициент формы контакта, количественно характеризующий второй критерий выбора общей схемы обработки — критерий оптимального контакта. Его выполнение достигается заданием на основе аналитического исследования рационального сочетания формы образующих номинальной и элементарных поверхностей [9], что обеспечивается выбором направления движения формообразования [8], соответствующим профилированием инструмента и управлением его характеристическим образом [10]. Если выполнение каждого из критериев возможно при различных положениях элементарных поверхностей, то используется комплексный критерий, выполнению которого соответствует максимальное значение произведения $K_H K_K$.

Максимальная производительность формообразования с заданной точностью возможна лишь при стабилизации значения ($K_I + K_s$), что при частичном формообразовании любых поверхностей достигается управлением характеристическим образом инструмента [11]. Предложенные кинематические, геометрические и комбинированные методы его модификации за счёт управления параметрами установки инструмента и траекторией его производящих элементов положены в основу прогрессивных методов фрезоточения и вихревого точения поверхностей вращения и различных методов обработки сложных поверхностей [2].

Синтез общих схем обработки на основе совмещения методов частичного (C''_n, K_s, O''_b) и полного ($K_n, C''_n, O''_b, K_p + C''_n$) формообразования производящих линий позволяет повысить эффективность процессов обработки благодаря объединению преимуществ базовых методов — надёжного стружкодробления и высокой точности формообразования. На этом принципе созданы новые методы ротационного резания комбинированными инструментами [12], обеспечивающие повышение производительности и расширение области его эффективного применения.

Совмещение методов частичного формообразования повышает точность профилирования при многократном профилировании поверхности за время одного прихода множеством семейств вспомогательных линий, смещённых относительно друг друга вдоль формируемой линии

кинематическим или геометрическим методами [13]. В обоих случаях число кривых, формирующих профиль поверхности, возрастает в P раз, благодаря чему огранка профиля уменьшается в P^2 раз по сравнению с традиционными методами обработки. Совмещение процессов частичного и полного формообразования эффективно в схемах многоинструментальной и многопозиционной обработки, а одновременная обработка различными или одинаковыми режущими инструментами заданной поверхности в однопозиционных схемах позволяет кроме повышения производительности решать и определённые технологические задачи, например, обеспечение надёжного стружкодробления при полном формообразовании профиля поверхности [14], создание рациональной схемы нагружения в обрабатывающей системе [15] и др.

Важным требованием к многопозиционной обработке одним инструментом нескольких заготовок при параллельном или последовательном совмещении процессов полного или частичного формообразования является обеспечение в каждой позиции одинаковых условий резания [16], что достигается сочетанием геометрического и кинематического методов. Данный принцип реализован в предложенных схемах ротационного и планетарного точения, нарезания червячных колес, фрезерования поверхностей вращения.

Таким образом, синтез общих схем обработки сложных поверхностей включает задание на основе аналитического исследования: цикличности процесса формообразования; формы и положения производящих линий; формы элементарных поверхностей; характеристического образа инструмента, метода его управления, формы производящих элементов; схемы формирования элементарных поверхностей с учетом принципов совмещения процессов формообразования, многопозиционной и многоинструментальной обработки.

Важность синтеза рациональной кинематики формообразования при проектировании станка обусловлена тем, что она, как основа кинематической схемы обработки, в значительной степени влияет на сложность его кинематики, производительность и универсальность. К основным принципам синтеза относятся:

– перенесение функции кинематики формообразования на инструмент [14, 17];

– синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения геометрическим или кинематическим методами реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными [18, 19];

– совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности [17, 20];

– введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования, схемой или условиями резания [21, 22];

– задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений [23, 24, 25];

– рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для повышения его универсальности [26].

Изложенные принципы построения общих схем обработки и кинематики формообразования составляют основу модели синтеза кинематических схем обработки сложных поверхностей, которая в структурном виде представлена на рис. 3. Исходя из нее созданы прогрессивные способы обработки разных типов сложных поверхностей: некруглых зубчатых колес и колес с бочкообразными зубьями при обычном и диагональном зубофрезеровании [27], изделий с плоским зубчатым контуром [22, 28], некруглых цилиндрических поверхностей [29, 30], винтовых поверхностей постоянного и переменного шага [23, 25] и др., более 50 из которых признаны изобретениями.

Возможность обработки заданной поверхности разными методами обуславливает необходимость их сравнительного анализа для выбора эффективного, что относится ко второму из указанных этапов функционального проектирования станка. Сравнение методов обработки должно основываться не на отдельных частных случаях, а на их физических возможностях. Известные методики (А.О. Этин, М.Е. Юхвид и др.) не учитывают особенности формообразования сложных поверхностей, геометрия которых накладывает ограничения на параметры инструмента, его ориентацию и точность формообразования. В этой связи критерии сравнения методов обработки сложных поверхностей должны определяться в зависимости от точ-

ности формообразования, отражать цикловой характер процессов обработки и другие характерные для них факторы. По предложенной методике [31], кроме производительности и точности формообразования при сравнении методов обработки учитываются кинематические и динамические условия работы инструмента, определяющие требования к станочному оборудованию.

Основой сравнительного анализа служит кинематический анализ методов обработки, при котором определяются следующие показатели:

1. Кинематические и геометрические параметры схемы резания:

– путь $\ell = R_{cp} \varepsilon$, проходимый режущей кромкой без перерыва в резании по траектории среднего радиуса R_{cp} при угле ε её контакта с обработанной поверхностью;

– путь ℓ_o , проходимый всеми z режущими кромками без перерыва в резании, который при обработке сложной поверхности площадью F с межстрочечной подачей S_o и подачей на зуб S_z составляет $\ell_o = \ell F / (S_o S_z)$;

– число одновременно работающих зубьев $z' = 0,5\varepsilon z / \pi$;

– длина образующей поверхности резания, значения которой мгновенное m_i и максимальное m_{max} определяются из схемы резания, а среднее

$$m_{cp} = \frac{1}{\ell_{max}} \int_0^{\ell_{max}} m(\ell) d\ell,$$

где ℓ_{max} — максимальный путь, проходимый режущей кромкой в контакте с заготовкой;

– длина $m_o = mz'$ образующих поверхностей резания, образованных одновременно работающими зубьями;

– ширина среза $b = m / \cos \lambda$, где λ — угол наклона главной режущей кромки; среднее b_{cp} , максимальное b_{max} значения ширины среза и общая ширина среза b_o , снимаемая одновременно работающими зубьями, определяются по предыдущей зависимости соответственно при m_{cp} , m_{max} и m_o ;

– толщина среза a , мгновенное a_i и максимальное a_{max} значения которой определяются из схемы резания, а среднее значение $a_{cp} = t S_o S_z / (\ell m_{cp})$, где t — припуск на обработку.

2. Время обработки $T_{об}$. При цикловой обработке строчками $T_{об} = Ft(1+\mu) / (v a_{cp} m_{o,cp})$, где v — скорость резания; m — отношение подач рабочего и холостого ходов, учитывающее цикловой характер обработки.

Рис. 3. Модель синтеза кинематических схем обработки сложных поверхностей



3. Показатели неравномерности процесса резания:

- коэффициент неравномерности толщины среза $K_a = a_{cp} / a_{max}$;
- коэффициент неравномерности ширины среза $K_b = b_{cp} / b_{max}$;
- коэффициент неравномерности площади среза, характеризующий динамику процесса резания, $K_{ab} = K_a K_b$.

4. Коэффициент непрерывности P процесса резания. Он характеризует одновременность работы режущих элементов инструмента и определяется отношением пути, проходимогo ими в заготовке, к общему пути и через числа зубьев z и z' выражается зависимостью $P = z'/z$.

Чем больше значение коэффициента непрерывности, тем меньше мощность и

время, затрачиваемые на холостые движения инструмента по перемещению режущих элементов вне зоны резания, тем выше доля времени резания и технологическая производительность.

5. Точность формообразования. При цикловой обработке сложных поверхностей она характеризуется преимущественно отклонением обработанной поверхности от проектной в виде межстрочечных гребней, высота h которых зависит от параметров инструмента, геометрии номинальной поверхности и величины межстрочечной подачи.

По предложенной методике сравнительный анализ методов обработки сложных поверхностей проводится с учетом разрешающей способности инструмента

по следующим критериям, достаточно полно характеризующим возможности различных методов на этапе проектирования станков: производительности формообразования $K_T = T_{ot}/T_{op}$; неравномерности процесса резания $K_{un} = K_{un}/K_{om}$; непрерывности процесса резания $K_p = P/P_p$; точности формообразования $K_h = h/h_j$.

Предложенная методика носит универсальный характер и может быть использована для анализа разных технологических методов обработки и выбора эффективного при проектировании станочного оборудования и разработке технологий обработки различных поверхностей.

Заключительный этап функционального проектирования связан с синтезом кинематики станка, которая обеспечивает реализацию принятых методов формообразования и резания и является основой его кинематической схемы и компоновки.

Заслуживает внимания модульный принцип построения кинематической структуры, основанный на типовой структуре движений исполнительных органов

или определенных звеньев станка, например, звеньев соединения внешней и внутренней связей [32]. В зависимости от используемых конструктивных элементов и связей между ними возможны три типа кинематических модулей — механические M , немеханические \bar{M} и комбинированные K , а в соответствии со структурой исходного движения — бездифференциальные \bar{D} и дифференциальные D , составляющие класс базовых модулей (рис. 4). У первых конечные звенья имеют несоставные движения, образующие исходное движение вида $B_1\bar{B}_2$ или B_1B_2 . У дифференциальных модулей движение одного из конечных звеньев — составное, поэтому исходное движение имеет вид $B_1(B_2' + B_2'')$, $B_1(B_2' + \bar{B}_2'')$ или $\bar{B}_1(B_2' + \bar{B}_2'')$ [15]. Исходя из структуры движений установлены типовые структуры базовых модулей и соответствующие им передаточные функции. Соединением базовых модулей образуются составные модули с требуемыми функциональными возможностями.

Базовые и составные модули служат основой анализа и синтеза кинематических групп металлорежущих станков различного технологического назначения. Например, применительно к станкам для обработки поверхностей переменного шага, в зависимости от структуры исполнительного движения (двух-, трех- или четырех элементарные) и распределения элементарных движений между исполнительными органами, установлены четыре класса структур внутренних связей кинематических групп, создающих винтовое движение вида

$$\Phi(B_1P_2), \Phi(B_1, P_2' + P_2''), \Phi(B_1' + B_1'', P_2)$$

или

$$\Phi(B_1' + B_1'', P_2' + P_2'') [33],$$

а также функциональные возможности данных структур по закону и диапазону R_H изменения шага винтового движения. Выявлены структуры, обеспечивающие изменение шага в диапазоне $R_H > R_{H_0}$, где R_{H_0} — диапазон изменения передаточного отношения органа настройки, что позволяет существенно расширить технологические возможности станка [2].

Для станков с неравномерными движениями исполнительных органов наряду с оптимизацией внутренней связи важно задать рациональную структуру внешней связи [34], обеспечивающую

Рис. 4. Структура и характеристики типовых кинематических модулей

Тип модуля	Базовое Движение	Структура модуля	Передаточное Отношение модуля
Базовые модули			
$\bar{D}M1$	$B_1\bar{B}_2$	$1 - i_o - i_y - 2$	$\pm a i_o i_y$
$\bar{D}M1$	$B_1\bar{B}_2, \bar{B}_1\bar{B}_2$	$1 - M_1 - i_y - M_2 - 2$	$\pm a i_y$
$\bar{D}M2$	$B_1\bar{B}_2$	$1 - PP - i_y - M - 2$	$\pm a i_y$
$\bar{D}K1$	$B_1\bar{B}_2$	$1 - M_1 - M_1 - i_o - i_y - 2$	$\pm a i_o i_y$
$DM1$	$\bar{B}_1(B_2' + \bar{B}_2'')$ $B_1(B_2' + \bar{B}_2'')$	$1 - i_o - \sum_{[i_y]} - 2$	$\pm a i_o \pm b i_y$
$DM2$	$\bar{B}_1(B_2' + \bar{B}_2'')$ $B_1(B_2' + \bar{B}_2'')$	$1 - i_o - \sum_{[i_y]} - 2$	$i_o(\pm a \pm b i_y)$
$DK1$	$B_1(B_2' + \bar{B}_2'')$	$1 - i_o - \sum_{[PP - i_y - M]} - 2$	$\pm a i_o \pm b i_y$
$DK2$	$B_1(B_2' + \bar{B}_2'')$	$1 - i_o - \sum_{[M - i_y - PP]} - 2$	$\pm i_o(\pm b i_y \pm a)$
Составные модули			
$S2\bar{D}M1$	$B_1\bar{B}_2$	$1 - i_{o1} - i_{v1} - 3 - i_{o2} - i_{v2} - 2$	$\pm a i_{o1} i_{o2} i_{v1} i_{v2}$
$S2DM1$	$(B_1' + \bar{B}_1')(B_2' + \bar{B}_2')$	$1 - \sum_{[i_{v1}]} - i_{o1} - 3 - i_{o2} - \sum_{[i_{v2}]} - 2$	$\frac{\pm c i_{o2} \pm d i_{v2}}{\pm a i_{o1} \pm b i_{v1}}$
$S(DM1 + DM2)$	$(B_1' + \bar{B}_1')(B_2' + \bar{B}_2')$	$1 - \sum_{[i_{v1}]} - i_{o1} - 3 - i_{o2} - \sum_{[i_{v2}]} - 2$	$\frac{i_{o2}(\pm c \pm d i_{v2})}{\pm a i_{o1} \pm b i_{v1}}$
$S(\bar{D}M1 + DM2)$	$\bar{B}_1(B_2' + \bar{B}_2'')$	$1 - i_{o1} - i_{v1} - 3 - i_{o2} - \sum_{[i_{v2}]} - 2$	$\frac{\pm a i_{o1} \pm b i_{v1}}{\pm c i_{o2} i_{v2}}$

управление по требуемому закону или стабилизацию скорости исполнительного движения в структурах с разделенными и совмещенными внешними и внутренними связями. Важное значение в станках данного типа имеет выбор положения звена соединения внешней и внутренней связей, так как от него существенно зависит характер движений исполнительных органов. Поэтому его обоснованный выбор необходим для оптимизации

кинематической структуры проектируемого станка.

Результаты исследования по проектированию процессов формообразования и кинематической структуры станков положены в основу модели синтеза кинематической системы станка (рис. 5), на базе которой разработаны формообразующие системы станков для обработки сложных поверхностей, реализующие прогрессивные схемы их обработки [35, 36].

Рис. 5. Модель синтеза кинематической подсистемы станка



На изложенном подходе основаны технологии и формообразующие системы станков для обработки профильных и прерывистых поверхностей [26, 36, 37, 38] деталей машин, некоторые из которых освоены в промышленности. К ним относятся: технология и станок-профилятор на базе автомата продольного точения для комплексной обработки деталей радиоаппаратуры с круглыми и некруглыми поверхностями [39]; широкоуниверсальный станок модели ВС50 и инструментальное оснащение к нему для кинематического профилирования сложных поверхностей; специальные станки моделей ВС50-9601 и ВС30П-9253 и инструментальное оснащение к ним [40] для высокопроизводительной обработки индукторов системы АБС автомобилей. Эти разработки выполнены совместно Витебским станкостроительным заводом им. Коминтерна и Полоцким государственным университетом по заданиям государственной научно-технической программы «Станки и инструмент» и региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области». Созданные станки успешно заменяют дорогостоящее импортное оборудование, а реализуемые ими технологии обеспечивают в 2,5...6 раз повышение производительности при требуемой точности обработки.

Литература

1. Данилов В.А. Научные основы технологии формообразования сложных поверхностей резанием: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / Полоцкий гос. ун-т. — Новополоцк, 2002. — 318 с.
2. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. — Мн.: Наука и техника, 1995. — 264 с.
3. Данилов В.А., Юровецкий Е.Б. Совершенствование способов обработки фасонных поверхностей деталей винторулевого комплекса // Сб. «Судовые движители и системы управления» — М., 1982. — С. 104–113.
4. Данилов В.А., Терентьев В.А. Системная модель способа зубообработки как средство его интенсификации на этапе синтеза // Машиностроение. — Мн., 2000. — Вып. 18. — С. 115–120.
5. Данилов В.А. Пути интенсификации обработки резанием // Машиностроение. — Мн., 1987. — Вып. 12. — С. 9–12.
6. Данилов В.А. Интенсификация технологий формообразования сложных поверхностей на этапе проектирования станочного оборудования // Машиностроение. — Мн., 2001. — Вып. 17. — С. 200–204.
7. Данилов В.А. Формализованное описание кинематических схем обработки резанием // Известия вузов. Машиностроение. — 1983. — № 6. — С. 156–158.
8. Данилов В.А. Влияние схемы формообразования на эффективность обработки резанием сложных поверхностей // Известия вузов. Машиностроение. — 1982. — № 6. — С. 105–108.
9. Данилов В.А., Данилова Л.А. Определение рациональных схем профилирования сложных поверхностей // Машиностроение. — Мн., 1986. — Вып. 11. — С. 63–67.
10. Данилов В.А., Данилова Л.А. Модификация многогранных поверхностей при обработке резанием // Известия вузов. Машиностроение. — 1988. — № 10. — С. 131–136.
11. Данилов В.А., Данилова Л.А. Пути повышения точности профилирования поверхностей вращения при обработке резцовыми головками // Техника машиностроения. — 1995. — № 3. — С. 45–50.
12. Данилов В.А. Схемы ротационного резания металлов комбинированными инструментами // Машиностроение. — Мн. 1990. — Вып. 15. — С. 12–17.
13. Данилов В.А. Пути повышения точности профилирования некруглых поверхностей эксцентричными лезвийными инструментами // Известия вузов. Машиностроение. — 1991. — № 7–9. — С. 107–110.
14. Данилов В.А., Данилова Л.А. Анализ схем точения некруглых валов // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1997. — № 3. — С. 60–64.
15. Данилов В.А. Способ обработки изделий типа роторов и статоров электродвигателей // Машиностроитель. — 1985. — С. 20.
16. Данилов В.А., Попок Н.Н. Технология совмещенного ротационного точения // Машиностроитель. — 1985. — № 4. — С. 29–30.
17. Данилов В.А., Данилова Л.А. Анализ схем формообразования многогранных поверхностей дисковыми эксцентричными инструментами // Известия вузов. Машиностроение. — 1987. — № 11. — С. 145–49.
18. Данилов В.А. Анализ схем обработки многогранных поверхностей по методу кинематического профилирования // Известия вузов. Машиностроение. — 1982. — № 2. — С. 102–07.

19. Данилов В.А. Обработка наружных поверхностей профильных моментопередающих соединений // *Машиностроитель*. — 1989. — № 11. — С. 31–33.
20. Данилов В.А. Совершенствование механической обработки бочкообразных зубьев совмещением исполнительных движений // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1987. — № 2. — С. 146–147.
21. Данилов В.А. Пути оптимизации кинематики формообразования сложных поверхностей при обработке резанием // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1983. № 11. — С. 104–107.
22. Данилов В.А., Данилова Л.А., Киселев Р.А. Анализ схем обработки поверхностей с периодически повторяющимся зубчатым профилем при непрерывном процессе деления // *Машиностроение*. — Мн., — 2000. — Вып. 16. — С. 109–114.
23. Данилов В.А. Совершенствование способов обработки винтовых канавок переменного шага // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1981. — № 7. — С. 136–139.
24. Данилов В.А. Схемы формообразования некруглых цилиндрических поверхностей при обработке резанием // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1984. — № 12. — С. 100–104.
25. Данилов В.А., Данилова Л.А. Совершенствование способов механической обработки лопастных изделий // *Техника машиностроения*. — 1996. — № 3. — С. 29–32.
26. Данилов В.А. Станки для обработки профильных поверхностей, передающих момент // *Техника машиностроения*. — 1998. — № 4. — С. 102–105.
27. Данилов В.А. Прогрессивные способы обработки колёс с бочкообразными зубьями // *Вестник машиностроения*. — 1996. — № 6. — С. 12–14.
28. Данилов В.А., Киселев Р.А. Прогрессивные схемы формообразования плоских прерывистых поверхностей // *Машиностроение*. — Мн., 2002. — Вып. 18. — С. 8–13.
29. Данилов В.А. Анализ и пути интенсификации способов обработки некруглых поверхностей профильных соединений // *Вестник машиностроения*. — 1991. — № 1. — С. 13–15.
30. Данилов В.А., Бажин М.В., Костюченко А.И. Механическая обработка профильных поверхностей на универсальных станках // *Химическое и нефтяное машиностроение*. — 1996. — № 5. — С. 68–70.
31. Данилов В.А. Сравнительный анализ методов фрезерования сложных поверхностей // *Машиностроение*. — Мн., 1985. — Вып. 10. — С. 102–106.
32. Данилов В.А. Синтез и оптимизация кинематической структуры станков с использованием типовых модулей // *СТИН*. — 1999. — № 7. — С. 9–15.
33. Данилов В.А. Анализ кинематической структуры станков с неравномерными движениями исполнительных органов // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1982. — № 8. — С. 124–129.
34. Данилов В.А. Некоторые пути совершенствования кинематической структуры станков для обработки сложных поверхностей // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1984. — № 8. — С. 152–157.
35. Данилов В.А. Диагональное зубофрезерование колёс с бочкообразными зубьями // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1989. — № 10. — С. 133–138.
36. Данилов В.А. Усовершенствованные станки для нарезания колёс с бочкообразными зубьями // *Машиностроитель*. — 1990. — № 5. — С. 14–15.
37. Данилов В.А. Модернизация токарных автоматов для обработки некруглых деталей // *СТИН*. — 1993. — № 2. — С. 19–22.
38. Данилов В.А., Бажин М.В., Костюченко А.И. Расширение технологических возможностей шлицефрезерных станков // *СТИН*. — 1996. — № 6. — С. 24–29.
39. Данилов В.А., Бажин М.В., Терентьев В.А., Сопиков И.Я. Комплексная обработка деталей на автоматах продольного точения // *Машиностроитель*. — 1990. — № 6. — С. 10–11.
40. Патент 553 ВУ, МКИ⁷ В23С3/28. Инструмент для обработки пазов на торцах деталей / Данилов В.А., Киселев Р.А. Заявка и 20010263; Заявл. 06.11.2001; Опубл. 30.06.2002.