

УДК 621.9.04

**В. А. Данилов**, доктор технических наук, профессор,  
**А. А. Данилов**, кандидат технических наук  
Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск,  
Республика Беларусь, +375 (017) 293 93 58, danilofva@mail.ru

## СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ

Рассмотрены универсальные принципы синтеза рациональных схем обработки сложных поверхностей деталей машин резанием, включающие: оптимизацию структуры движений формообразования путем замены возвратно-поступательного движения инструмента вращательным; введение дополнительного движения для оптимизации условий резания; совмещение движений профилирования и резания для упрощения кинематики формообразования; обоснование распределения движений между инструментом и заготовкой для повышения производительности обработки. Представлены разработанные на этой основе и признанные изобретениями способы обработки сложных поверхностей деталей машин.

**Ключевые слова:** кинематика формообразования; схема обработки; синтез; структура движения; движения профилирования и резания.

Рис. 6. Библиогр.: 8 назв.

**V. A. Danilov**, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**A. A. Danilov**, PhD in Technical Sciences  
Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk,  
the Republic of Belarus, +375 (017) 293 93 58, danilofva@mail.ru

## SYNTHESIS OF RATIONAL KINEMATIC SCHEMES OF COMPLEX SURFACES PROCESSING BY CUTTING

Universal principles of synthesis of rational schemes of machining complex surfaces of machine parts by cutting have been considered. They include the structure optimization of forming movements by replacing the reciprocating motion of the tool with a rotational one; introduction of additional motion to optimize cutting conditions; combination of profiling and cutting movements to simplify the forming kinematics; the justification of the movements' distribution between the tool and the workpiece to increase machining productivity. Methods of machining complex surfaces of machine parts developed on this basis and recognized as inventions have been presented.

**Key words:** kinematics of forming; machining scheme; synthesis; motion structure; profiling and cutting motions.

Fig. 6. Ref.: 8 titles.

**Введение.** Кинематическая схема обработки поверхности, как совокупность движений инструмента и заготовки, является одним из основных компонентов технологии формообразования поверхности, поскольку определяет ее технологические возможности по форме обрабатываемых поверхностей и сложность формообразующей системы станка, а также обеспечивает реализацию кинематики формообразования поверхности и кинематики резания. Важность синтеза рациональной кинематики формообразования при проектировании станка обусловлена тем, что она, являясь основой кинематической схемы обработки, в значительной степени определяет сложность его кинематики, производительность и универсальность. Поэтому разработка кинематической схемы обработки поверхности является одной из основных задач функционального проектирования металлорежущего станка. Важность этого этапа проектирования обусловлена тем, что допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих этапах конструирования станка. Синтез рациональной схемы обработки актуален для сложных поверхностей, допускающих множество возможных

решений. Заслуживает внимания решение этой задачи на основе универсальных принципов синтеза кинематики формообразования и рациональных схем обработки поверхностей резанием, к которым относятся [1]:

- оптимизация структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения реверсивных движений исполнительных органов;

- совмещение различных по назначению исполнительных движений и перенесение функции кинематики формообразования на инструмент для упрощения кинематической схемы обработки и кинематики проектируемого станка;

- введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования и решения других задач;

- задание рационального сочетания направлений движений инструмента и заготовки;

- обоснование взаимного расположения траекторий исполнительных движений;

- рациональное распределение элементарных движений, образующих движение формообразования, между инструментом и заготовкой и др.

Разработка технологий формообразования с использованием этих принципов обеспечивает возможность интенсификации процессов механической обработки изделий машиностроения на стадии проектирования станочного оборудования.

Рассмотрим применение этих принципов при разработке прогрессивных схем обработки резанием различных сложных поверхностей деталей машин.

**Методология и методы исследования.** *Оптимизация структуры исполнительного движения.* Образующая и направляющая любой поверхности могут быть получены сочетанием различных движений. Например, при токарной обработке профиль отверстия в виде окружности формируется методом следа одним вращательным движением заготовки. При обработке же отверстия в неподвижной заготовке вращающимся инструментом методом касания (фрезерованием или шлифованием) для формирования окружности требуются два прямолинейных реверсивных движения, образующих движение подачи. Данные схемы образования одной и той же линии (окружности) различаются сложностью их реализации и влиянием на динамику работы механизмов станка. Поэтому задание из множества возможных рационального сочетания элементарных движений и минимизация их количества представляют один из путей оптимизации кинематики формообразования и кинематической схемы обработки поверхности.

Предпочтительны схемы обработки без реверсивных движений исполнительных органов станка, несущих режущий инструмент и заготовку, обеспечивающие более высокую производительность и точность обработки по сравнению со схемами с реверсивными движениями, благодаря исключению изменяющихся по направлению инерционных нагрузок и постоянству направлений движущих сил и сил трения в обрабатываемой системе станка. Реверсивное движение может быть исключено геометрическим или кинематическим методом [2]. При обработке сложных поверхностей это возможно геометрически путем выбора системы координатных перемещений инструмента относительно заготовки, а кинематически — сложением противоположно направленных движений, одно из которых осуществляется с постоянной, а другое — с переменной скоростью или заменой реверсивного движения вращательным. Рассмотрим более простой в реализации последний вариант применительно к обработке изделий типа некруглых валов профильных моментопередающих соединений деталей машин.

По классической схеме точения некруглой поверхности [3] ее профиль формируется при сообщении заготовке  $I$  (рисунок 1,  $a$ ) вращения  $B_1$ , а резцу — возвратно-поступательного (реверсивного) движения  $O_2$ , т. е. сложным движением формообразования со скоростью резания  $\Phi_v(B_1O_2)$ .

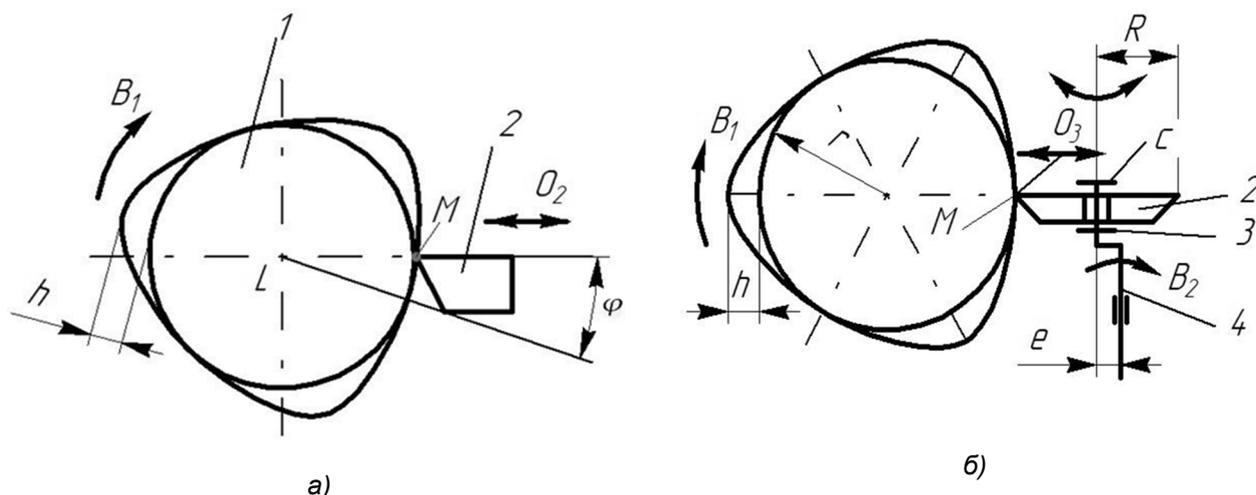


Рисунок 1. — Схемы профилирования некруглых цилиндрических поверхностей призматическим резцом (а) и круглым резцом (б)

При этом частота возвратно-поступательного движения узла станка, несущего резец, в  $m$  раз больше частоты вращения заготовки, где  $m$  — количество выступов профиля некруглой поверхности, в результате чего создаются знакопеременные инерционные нагрузки, отрицательно влияющие на точность обработки и долговечность узлов станка.

Образуемый движением  $\Phi_v(B_1O_2)$  синусоидальный профиль описывается в полярной системе координат уравнением [2]  $\rho = r + l(1 - \cos m\varphi)$ , где  $r$  — радиус вписанной в профиль окружности;  $l = 0,5h$ ,  $h$  — высота выступов профиля;  $\varphi$  — угол поворота заготовки.

Из-за возвратно-поступательного движения резца этот способ некругового точения имеет относительно низкую производительность, так как рекомендуемая частота вращения заготовки не превышает  $100 \text{ мин}^{-1}$ .

При исключении возвратно-поступательного движения вращательным поверхностью с таким же профилем образуется круглым резцом 2 (см. рисунок 1, б) [4] с режущей кромкой в виде окружности радиусом  $R$ , центр  $C$  которой совмещен с осью 3, совпадающей с геометрической осью этого резца. Он установлен на оси 3 с возможностью свободного вращения, при этом ось 3 жёстко связана с параллельной ей осью 4 и отстоит от нее на расстояние  $e$ , в 2 раза меньшее высоты выступа  $h$ .

В процессе обработки оси 4, несущей ось 3 с круглым резцом 2, сообщают вращение  $B_2$  с частотой  $n_2$ , согласованное с вращением  $B_1$  заготовки, при этом отношение частот  $n_2$  и  $n_1$  вращательных движений  $B_2$  и  $B_1$  задают в соответствии с числом  $m$  и формой выступов вала:  $n_2 / n_1 = m$  при обработке поверхности с прямыми выступами и  $n_2 / n_1 \neq m$  — с винтовыми выступами. Центр  $C$  окружности, ограничивающей режущую кромку круглого резца 2, вращаясь совместно с осью 4, движется по окружности радиусом, равным  $e$ , вследствие чего точка  $A$  режущей кромки, формирующей обработанную поверхность, совершает гармоническое движение  $O_3$  перпендикулярно оси вращения заготовки с амплитудой, равной  $h$ , при неизменном по направлению вращении  $B_2$ . В результате сочетания движений  $B_1$  и  $O_3$  формируется некруглый профиль обработанной поверхности с равномерно расположенными по окружности выступами высотой  $h = 2e$ .

Благодаря исключению реверсивного движения органа станка, несущего режущий инструмент, устраняются факторы, ограничивающие производительность обработки и отрицательно влияющие на точность профилирования при обработке синусоидальной поверхности резцом, совершающим вместе с суппортом реверсивное движение  $O_2$  (см. рисунок 1, а). Тем самым обеспечиваются условия для интенсификации процесса обработки профильных поверхностей.

Благодаря установке резца 2 на оси 3 с возможностью свободного вращения вокруг своей геометрической оси, скорость результирующего движения резания определяется преимущественно частотой вращения заготовки. Это позволяет по сравнению с известной

схемой ротационного точения некруглых цилиндрических поверхностей [2] при заданной скорости резания увеличить частоту вращения заготовки и, следовательно, технологическую производительность [4].

*Совмещение исполнительных движений.* Совмещение исполнительных движений, например движений формообразования и деления, позволяет упростить кинематическую схему обработки поверхности и, следовательно, кинематику станка. На этом принципе основаны схемы обработки зубчатых колес на зубодолбежных и зубофрезерных станках с образованием профиля зубьев методом обката, характерным для которых является совмещение движения профилирования нарезаемых зубьев с движением деления. Благодаря этому нарезание зубьев осуществляется непрерывно, что повышает производительность обработки.

Совмещение движений за счет перенесения функции формообразования с кинематики станка на режущий инструмент позволяет упростить ее, но усложняет конструкцию режущего инструмента и ограничивает возможности управления формообразованием. Например, нарезание узких колес методом обката гребенчатой фрезой (рисунок 2, а), когда заготовке 2 сообщается вращение  $B_2$ , согласованное с её перемещением  $\Pi_3$  вдоль оси вращения фрезы, осуществляется разделенными движением резания  $\Phi_v(B_1)$  и профилирования  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$ . Возможность независимого регулирования скорости каждого из этих движений позволяет управлять высотой огранки в виде несрезанной части припуска, образуемой на боковых сторонах обработанных зубьев, и повысить качество обработки.

При частичном перенесении функции кинематики формообразования на режущий инструмент данная схема обработки упрощается: нарезание того же зубчатого колеса червячной фрезой (см. рисунок 2, б) осуществляется только одним совмещенным движением формообразования  $\Phi_{vs}(B_1B_2)$ , поскольку движение  $\Pi_3$  обеспечивается конструкцией режущего инструмента (червячной фрезы) — расположением режущих зубьев по винтовой линии.

В результате кинематическая схема обработки и, соответственно, кинематическая схема станка упрощаются, но конструкция инструмента усложняется, исключается возможность управлять высотой отклонений обработанной поверхности от номинальной поверхности боковых поверхностей зубьев в виде несрезанной части припуска, удаляемых последующей их обработкой шевингованием или шлифованием.

В обоих случаях за счет вращения  $B_2$  заготовки одновременно с профилированием нарезаемых зубьев непрерывно осуществляется процесс деления — последовательная обработка всех нарезаемых зубьев без остановки вращения заготовки. Таким образом, движение деления  $D(B_2)$  совмещено с движением  $\Phi_v(B_1B_2)$  профилирования зубьев.

Совмещение движений наиболее эффективно, если оно возможно без усложнения конструкции режущего инструмента. Рассмотрим это на примере нарезания зубчатого колеса с бочкообразными зубьями, у которого движение, создающее бочкообразную по длине форму зубьев, совмещено с вращением заготовки, участвующим в их профилировании.

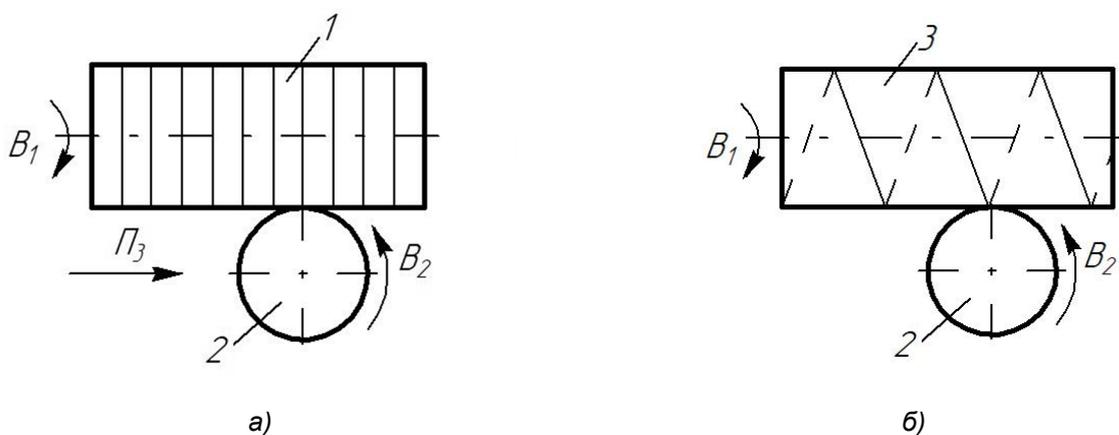


Рисунок 2. — Схемы нарезания зубчатого колеса при разделенных (а) и совмещенных (б) движениях профилирования и резания

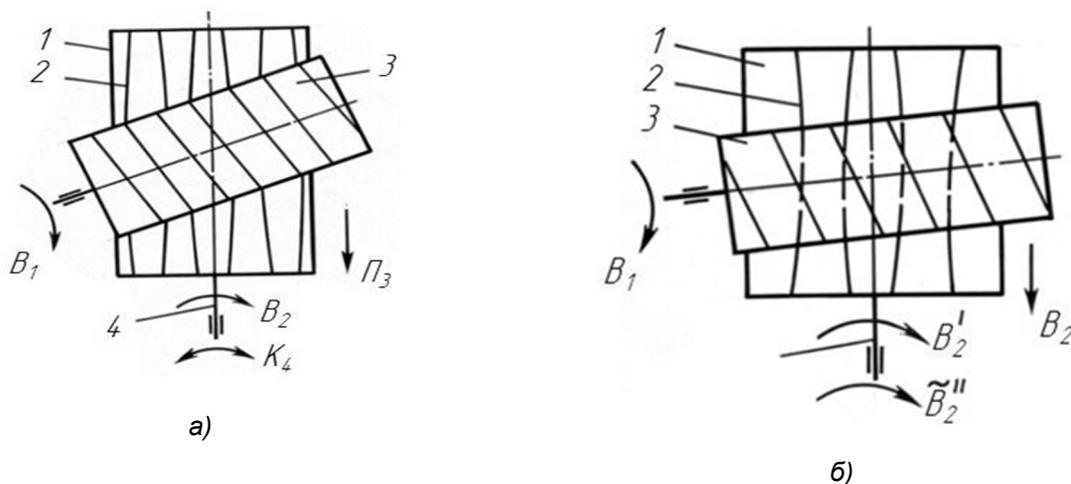
Широко применяется способ обработки колес с бочкообразными зубьями, основанный на непрерывном изменении по определенному закону расстояния между осями инструмента и заготовки, совершающих движение обката. Изменение межосевого расстояния обеспечивается сообщением одному из исполнительных органов станка (столу с заготовкой или стойке с фрезой) дополнительного поступательного, переменного по направлению перемещения с помощью механизма формообразования бочкообразных зубьев. Из-за дополнительной степени свободы узла станка снижается его жесткость. Кроме того, реверсивный характер этого движения отрицательно влияет на точность формы зубьев. Обусловлено это тем, что движение, обеспечивающее формирование бочкообразных зубьев, не совмещено по траектории с движением профилирования.

Схема обработки бочкообразных зубьев с совмещенными движениями изображена на рисунке 3, а. Для формирования таких зубьев 2 на равномерное вращение  $V_2$  заготовки 1, связанное с равномерным вращением  $V_1$  червячной фрезы 3, накладывается возвратно-вращательное (качательное) движение  $K_4$  вокруг оси 4 вращения заготовки, которое и связано с движением подачи  $P_3$  червячной фрезы вдоль этой оси в соответствии с формой зубьев по длине [2].

Угловая скорость  $\omega_1$  заготовки в данном случае  $\omega_1 = \omega_2 a / z + \Delta\omega$ , где  $\omega_2 a$  — угловая скорость (число заходов) червячной фрезы;  $z$  — число нарезаемых зубьев;  $\Delta\omega$  — изменение угловой скорости заготовки, обусловленное сообщением ей движения  $K_4$ .

Незначительное изменение угловой скорости заготовки для образования бочкообразных зубьев позволяет технически просто осуществить сложение движений  $V_2$  и  $K_4$ , из которых равномерное вращение  $V_2$  передается заготовке по цепи обката зубофрезерного станка, а движение  $K_4$  — от механизма формообразования бочкообразных зубьев станка, снабженного аналоговой или числовой системой управления.

Задание заготовке одновременно равномерного вращения и возвратно-вращательного движения эквивалентно сообщению ей неравномерного, постоянного по направлению вращения  $V_2 = V_2' + \tilde{V}_2''$ , (см. рисунок 3, б). Преимуществом такой кинематики формообразования бочкообразных зубьев является отсутствие реверсивного движения исполнительного органа станка. Благодаря этому обеспечивается одностороннее замыкание звеньев его кинематических цепей и, как следствие, по сравнению с традиционной схемой, повышение точности обработанных боковых поверхностей бочкообразных зубьев. Управление формообразованием бочкообразных зубьев (величиной бочкообразности) достигается в рассмотренных схемах обработки за счет параметров дополнительного вращательного движения  $\tilde{V}_2''$  заготовки.



**Рисунок 3. — Схемы обработки зубчатых колес с бочкообразными зубьями при совмещении исполнительных движений: а — схема с совмещенными вращательным и возвратно-вращательными движениями; б — схема с двумя совмещенными вращательными движениями**

*Введение дополнительных движений.* Для улучшения условий резания наряду с необходимыми для формообразования заданной поверхности движениями инструмента и (или) заготовке могут сообщаться дополнительные движения. На этом основаны осциллирующее сверление, точение, шлифование и другие известные прогрессивные методы обработки. Необходимость в дополнительном движении при обработке сложных поверхностей часто обусловлена требованием стабилизации рабочих углов режущего лезвия, изменяющихся из-за переменной кривизны формируемой поверхности. Например, для образования плоской линии 1 (рисунок 4) методом следа достаточно сообщить производящей точке С (вершине режущего лезвия 2) согласованные движения  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  так, что в каждый момент времени исполнительное движение  $\Phi(\Pi_1\Pi_2)$  направлено по касательной  $\tau$ . Однако передний  $\gamma_i$  и задний  $\alpha_i$  рабочие углы режущего лезвия непрерывно изменяются, что отрицательно влияет на качество обработки из-за переменных условий резания и ограничивает технологические возможности схемы обработки по форме образуемых поверхностей допустимым диапазоном изменения указанных углов.

Это ограничение исключается при сообщении режущему инструменту дополнительного движения  $K_3$  вокруг точки С, обеспечивающего стабилизацию рабочих углов режущего лезвия. Движение  $K_3$  является ориентирующим, параметры которого взаимосвязаны с движением формообразования  $\Phi(\Pi_1\Pi_2)$ .

Благодаря движению ориентации стабилизируются условия резания, что позволяет повысить качество обработки и расширить технологические возможности схемы формообразования по форме обрабатываемых поверхностей.

На рассмотренном принципе совершенствования кинематических схем обработки основана, например, схема обработки винтовых канавок переменного шага на цилиндрических изделиях (рисунок 5).

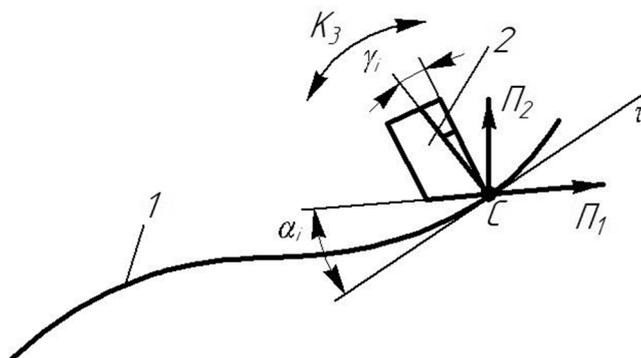


Рисунок 4. — Схема формообразования линии при сообщении режущему лезвию движения ориентации

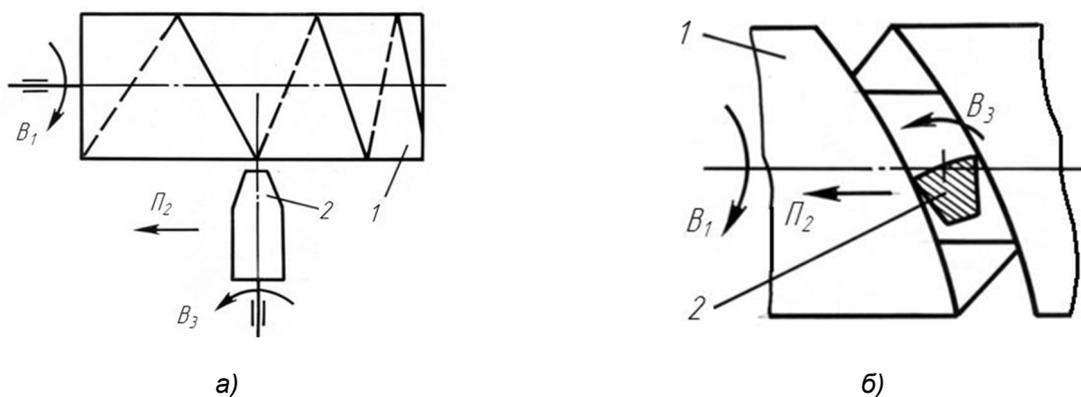


Рисунок 5. — Схема формообразования винтовых канавок переменного шага: а — схема обработки; б — схема ориентации режущего лезвия

При нарезании неподвижным относительно суппорта станка резцом вследствие переменности шага винтовой поверхности непрерывно изменяются передний и задний рабочие углы режущего лезвия на величину  $\delta$  угла наклона винтовой линии:  $\delta = \arctg(H + \Delta H) / \pi d - \arctg H / (\pi d)$ , где  $\Delta H$  — изменение шага нарезаемой винтовой канавки;  $d$  — диаметр изделия.

Изменение указанных углов существенно ограничивает возможный диапазон изменения шага обрабатываемой винтовой поверхности. Этот недостаток устраняется при сообщении резцу 2 (см. рисунок 5) вращения  $B_3$ , функционально связанного с его перемещением  $\Pi_2$  и вращением  $B_1$  заготовки 1 для обеспечения неизменной ориентации режущего лезвия относительно формируемой поверхности. Реализация данного принципа позволяет расширить технологические возможности станков для обработки изделий с винтовыми канавками переменного шага и зубчатых колес с бочкообразными зубьями.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Рассмотрим принцип рационального распределения движений между инструментом и заготовкой применительно к обработке некруглых цилиндрических поверхностей с профилем в виде треугольника Рело. Так как такой профиль ограничен дугами окружностей, то их формирование возможно круговым точением с периодическим движением деления, необходимым для последовательной обработки всех граней поверхности.

Известная схема формирования треугольника Рело круговым точением [5] включает последовательное формирование всех его сторон с переустановкой заготовки 1 (рисунок 6, а), при этом при обработке каждой из сторон 3 изделия заготовке сообщают вращение вокруг оси, проходящей через противоположно расположенную вершину  $B$  формируемого профиля в виде треугольника Рело, а резцу 2 — движение подачи вдоль оси вращения заготовки, при этом резец устанавливают на расстоянии от оси вращения заготовки, равном радиусу  $R$  кривизны его стороны (ширине треугольника Рело).

Известно, что вершины треугольника Рело совпадают с вершинами вписанного в него правильного треугольника. Так как угол при вершине правильного треугольника  $ABC$  равен  $60^\circ$ , то длина пути резания  $AC$  (стороны треугольника Рело), составляет только  $1/6$  длины траектории 4 вершины резца 2 за один оборот заготовки 1. Это обуславливает значительную прерывистость процесса обработки и малую долю машинного времени в цикле обработки поверхности, которое составляет  $1/6$  времени формирования стороны профиля в виде треугольника Рело, что является причиной низкой технологической производительности известной схемы обработки.

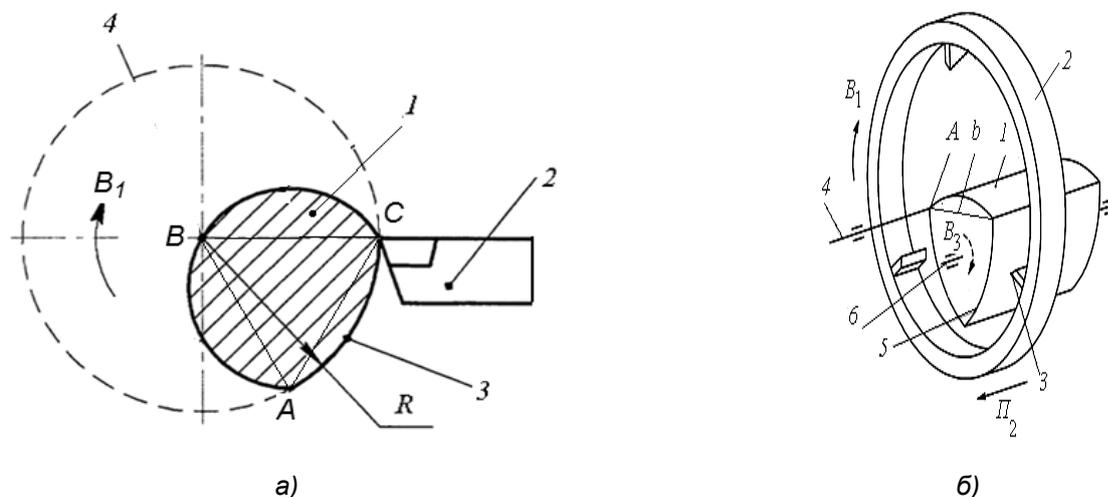


Рисунок 6. — Схемы формирования стороны профиля в виде треугольника Рело круговым точением при сообщении главного движения  $B_1$  заготовке (а) или режущему инструменту (б)

Отрицательное влияние имеет и то, что из-за срезания слоя металла с одной стороны заготовки в процессе обработки возникает переменная центробежная сила, что ограничивает частоту вращения заготовки и, соответственно, технологическую производительность. Следовательно, при сообщении вращения заготовке известная схема кругового точения поверхностей с профилем в виде треугольника Рело является нерациональной.

Недостатки рассмотренной схемы кругового точения устраняются при сообщении вращательного движения не заготовке, а режущему инструменту (см. рисунок 6, б) вокруг неподвижной заготовки, который в этом случае может быть оснащен  $z$  режущими лезвиями [6]. Такая схема обработки обеспечивает по сравнению с известной повышение технологической производительности в  $z$  раз, где  $z$  — число режущих лезвий инструмента. При  $z$ , равном и большем 6, обеспечивается непрерывность процесса обработки. Таким образом, рациональное распределение главного движения между инструментом и заготовкой обеспечивает интенсификацию кругового точения поверхностей с профилем в виде треугольника Рело. Схема обработки [6] реализуется на станках универсального назначения [7].

На рассмотренных универсальных принципах синтеза рациональных схем обработки основаны прогрессивные способы обработки разных типов сложных поверхностей: профильных цилиндрических поверхностей, зубчатых колес с бочкообразными зубьями при обычном и диагональном зубофрезеровании, винтовых поверхностей переменного шага, изделий с плоским зубчатым контуром, круговых винтовых поверхностей и др. [2; 7; 8], реализация которых позволила освоить производство импортозамещающих изделий машиностроения.

**Заключение.** Использование универсальных принципов синтеза рациональных схем обработки позволяет создавать прогрессивные технологии формообразования сложных поверхностей изделий машиностроения разного назначения, обеспечивающие интенсификацию процессов обработки по сравнению с известными технологиями. На этой основе разработаны признанные изобретениями способы обработки некруглых цилиндрических поверхностей с синусоидальным профилем [4], профилем в виде треугольника Рело [6] на станках универсального назначения, что важно для расширения применения в отечественном машиностроении профильных моментопередающих соединений деталей машин.

#### Список цитируемых источников

1. Данилов, В. А. Научные основы технологии формообразования сложных поверхностей резанием : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01, 05.02.08 / В. А. Данилов / Полоц. гос. ун-т. — Новополоцк, 2002. — 318 л.
2. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. — Минск : Наука и техника, 1995. — 264 с.
3. Синкевич, В. М. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов / В. М. Синкевич, Е. П. Микитюк // Вестник машиностроения. — 1990. — № 11. — С. 60—63.
4. Патент ВУ 21958. Способ точения из заготовки некруглого вала с сечением в виде равномерно расположенных по окружности выступов : опубл. 28.02.2018 / Данилов А. А., Данилов В. А.
5. Патент RU 2463129. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины : опубл. 10.10.2012 / Барботько А. И., Понкратов П. А., Разумов М. С.
6. Патент ВУ 22235. Способ получения детали с сечением в виде треугольника Рело из заготовки лезвийным режущим инструментом : опубл. 30.04.2018 / Данилов А. А., Данилов В. А.
7. Данилов, А. А. Технология формообразования наружных моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на универсальных станках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. А. Данилов ; Белорус. нац. техн. ун-т. — Минск, 2022. — 22 с.
8. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. — Минск : Беларус. навука, 2014. — 316 с.

Поступила в редакцию 22.10.2024.