

Определяем значения наибольшего и наименьшего припусков:

$$Z_{1\min} = L_{2\min} - L_{5\max} = 255,5 - 252,5 = 3 \text{ мм};$$

$$Z_{2\min} = -L_{1\min} + L_{6\max} + L_{2\min} - L_{5\max} = -47,7 + 48,3 + 255,5 - 252,5 = 3,6 \text{ мм};$$

$$Z_{3\min} = -L_{3\max} + L_{9\min} + L_8 - L_4 + L_{2\min} - L_{5\max} = -83,545 + 85 + 163 - 167 + 255,5 - 252,5 = 0,455 \text{ мм};$$

$$Z_{4\min} = L_{5\min} - L_{10\max} = 251,5 - 248,5 = 3 \text{ мм};$$

$$Z_{1\max} = L_{2\max} - L_{5\min} = 256,5 - 251,5 = 5 \text{ мм};$$

$$Z_{2\max} = -L_{1\max} + L_{6\min} + L_{2\max} - L_{5\min} = -48,3 + 47,7 + 256,5 - 251,5 = 4,4 \text{ мм};$$

$$Z_{3\max} = -L_{3\min} + L_{9\max} + L_8 - L_4 + L_{2\max} - L_{5\min} = -83,49 + 85,035 + 163 - 167 + 256,5 - 251,5 = 2,545 \text{ мм};$$

$$Z_{4\max} = L_{5\max} - L_{10\min} = 252,5 - 247,5 = 5 \text{ мм};$$

Аналогичным образом проводится анализ и в направлении оси Oх.

**Выводы:**

1. Несмотря на достаточно большую сложность размерного анализа он позволяет с достаточной долей вероятности определять технологические операционные размеры, размеры заготовок, припуски и допуски на определяемые размеры.

2. В целом он позволяет значительно сократить объем технологической подготовки производства и снизить сроки адаптации технологических процессов к конкретным условиям производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Размерный анализ технологических процессов: курс лекций / Г.Я.Беляев. – Минск: БНТУ, 2010. – 164 с.
2. Грахов, В.Б. Размерный анализ обработки основных отверстий корпусных деталей: методические указания к расчётно-графической работе / В.Б.Грахов, В.Б.Фёдоров. – Екатеринбург: УГТУ, 2005. – 31 с.

**УДК 621.91.04**

**Данилов В.А., Данилов А.А.**

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ С КРУГЛЫМИ И МНОГОГРАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ НА МНОГООПЕРАЦИОННЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ**

*Белорусский национальный технический университет»*

*Минск, Беларусь*

*Показана эффективность модульного построения технологии комплексной обработки круглых и многогранных поверхностей деталей машин, обоснованы рациональные методы их формообразования, обеспечивающие при совмещенной обработке повышение производительности и снижение себестоимости. Исходя из рассмотренных общих принципов выбора метода профилирования поверхности, установлены преимущества полигонального точения многогранных поверхностей по сравнению с другими методами их обработки в сочетании с круглым точением. Приведены примеры зарубежного и отечественного станочного оборудования для полигонального точения многогранных поверхностей, рациональные варианты построения обрабатывающих систем модернизируемых и проектируемых станков для отдельной и совмещенной комплексной обработки круглых и многогранных поверхностей за один установ заготовки. Даны рекомендации по относительному расположению режущих инструментов и заготовки, исходя из минимизации их влияния на точность обработки.*

**Постановка задачи.** Необходимость повышения конкурентоспособности продукции машиностроения обуславливает актуальность разработки и применения экономически эффективных технологий механической обработки. Современным направлением развития технологий мелкосерийного и серийного производства является повышение уровня концентрации опера-

ций для обеспечения комплексной обработки разнопрофильных поверхностей, например, круглых и многогранных. По сравнению с традиционной технологией, предусматривающей обработку этих поверхностей соответственно на токарных и фрезерных станках, их комплексная обработка на одном станке позволяет сократить количество оборудования, приспособлений, численность рабочих, затраты на подготовку производства, повысить точность изготовления при снижении трудоемкости и длительности производственного цикла.

Реализация этого направления связана с разработкой эффективных технологий комплексной обработки разнопрофильных поверхностей в рамках одной операции и созданием соответствующего станочного оборудования. Примером такого оборудования применительно к обработке деталей типа тел вращения с круглыми, плоскими, некруглыми и иными поверхностями являются современные многооперационные токарные и токарно-фрезерные станки, обеспечивающие в максимальной степени концентрацию операций при обработке деталей данного типа за счет реализации за один установ методов круглого и некруглого точения, обработки осевыми инструментами, фрезерования и т.п. Данное оборудование позволяет реализовать прогрессивный модульный принцип построения процессов механической обработки [1], обеспечивающий сокращение трудоемкости подготовки производства, номенклатуры необходимого станочного оборудования и оснастки, повышение производительности обработки.

Модульное построение технологии механической обработки основано на выделении у множества различных по назначению деталей с разными размерами общего конструктивного модуля в виде сочетания определенных типов поверхностей, например, круглых и многогранных с различным числом и профилем граней (рисунок 1), обработка которых возможна за один установ. Для обработки поверхностей конструктивного модуля при проектировании операции разрабатывается технологический модуль, реализуемый соответствующими средствами технологического оснащения [1].



Рис. 1. Образцы деталей с круглыми и многогранными поверхностями

Особенностью построения модульного технологического процесса является проектирование операций механической обработки не отдельных, а всех поверхностей конструктивного модуля, что влияет на кинематику и компоновку станочного модуля. Проектирование операции модульного технологического процесса изготовления детали типа тела вращения с разнопрофильными поверхностями включает:

- выбор рациональных методов формообразования и обработки разнопрофильных поверхностей модуля;
- выбор или проектирование соответствующего станка, режущих инструментов и приспособления;

– обоснование режимов резания при отдельной или комплексной обработке разнопрофильных поверхностей модуля.

Рассмотрим некоторые аспекты решения этих задач.

#### **Выбор метода обработки многогранных поверхностей при комплексной обработке.**

Комплексная обработка круглой и многогранной поверхностей может достигаться комбинацией различных методов обработки. Например, на станке модели OKUMA ES-L8 II-M (Япония) круглые поверхности формируют точением, а многогранные фрезерованием торцом инструмента по методу интерполяции за счет согласованных системой ЧПУ вращения заготовки и поступательного перемещения фрезы. Такое сочетание методов формообразования круглой и многогранной поверхностей не позволяет выполнять их одновременно, так как вращение заготовки при точении круглой поверхности является главным движением, а при обработке многогранной поверхности – круговой подачей. Для одновременной высокопроизводительной обработки указанных поверхностей важно, чтобы угловая скорость заготовки в обоих процессах была одного порядка. Это условие выполняется, если круглая и многогранная поверхности профилируются одним методом, например, касания или следа, что соответствует их обработке фрезерованием или сочетанием методов точения (круглым и некруглым, круглым и полигональным). Последний вариант используется на токарных станках фирм Fastcut (Китай), TRISHUL (Индия), станке модели U-300 (Тайвань) и других станках с функцией полигонального точения, которое является экономичной альтернативой фрезерованию многогранных поверхностей.

Эффективность модульной технологии существенно зависит от сочетания применяемых схем формообразования и обработки разнопрофильных поверхностей, что обуславливает актуальность выбора или синтеза рациональных. Рассмотрим эту задачу применительно к лезвийной обработке при профилировании многогранной поверхности методом следа, реализация которого возможна множеством кинематических схем, различающихся количеством и видом элементарных движений, образующих движение формообразования [2]. При выборе метода профилирования некруглой поверхности следует учитывать следующее:

Во-первых, то, что формирование производящих линий поверхности (образующей и направляющей) возможно геометрическим и кинематическим методами, от выбора которого зависит сложность реализации технологии формообразования. Например, формирование контурной линии, ограничивающей профиль поверхности или ее участка (границы) в виде дуги окружности геометрическим методом осуществляется простым движением формообразования со скоростью резания  $\Phi_v(V)$ , образованным одним элементарным вращательным движением производящего элемента (вершины резца) вокруг центра этой окружности, расположенного на оси вращения. При этом погрешность формообразования (отклонение от окружности) линии определяется точностью пар вращения шпиндельного узла станка, что упрощает реализацию схемы обработки, но не позволяет управлять точностью формообразования.

Недостатком геометрического метода являются ограниченные технологические возможности, например, он не позволяет сформировать окружность, центр которой не расположен на оси вращательного движения. Образование такой окружности в соответствии с профилем грани обработанной поверхности обеспечивается кинематическим методом за счет сложного исполнительного движения, создаваемого, двумя элементарными движениями, например, вращением  $V_1$  заготовки и осциллирующим движением  $O_2$  инструмента, т.е. исполнительным движением  $\Phi_v(V_1O_2)$ , или двумя согласованными вращательными движениями  $V_1$  и  $V_2$ , образующими исполнительное движение  $\Phi_v(V_1V_2)$  и т.д. Такое движение позволяет профилировать грани многогранной поверхности по дуге окружности, центр которой не расположен на оси вращения заготовки [3].

Во-вторых, важным обстоятельством, влияющим на выбор схемы профилирования поверхности, является то, что зачастую допускается приближенное формирование заданной линии. Основанием для этого является установленное техническими требованиями к обработанной детали допустимое отклонение размера или формы (некруглость, непрямолинейность и т.п.). Это позволяет в пределах требуемой точности обработки заменять одну контурную линию другой, более технологичной, например, кривую линию – множеством отрезков прямых при линейной интерполяции или кривых линий (дуг окружности при круговой интерполяции, параболы при параболической интерполяции, эллипса при кинематическом профилировании и

т.п.), если такая замена упрощает кинематическую схему обработки или позволяет применить более производительный метод обработки.

На этом принципе основано полигональное точение многогранников, при котором грани профилируются не прямыми линиями, а дугами эллипса, при условии, что неплоскостность обработанной грани не превышает допускаемую величину. Выполнимость этого условия возможна при определенных значениях геометрических и кинематических параметров схемы обработки, расчет которых является одной из задач проектирования формообразующей системы станка и технологической операции полигонального точения.

В-третьих, предпочтительны схемы формообразования, основанные на соответствии траектории (закономерности) относительного перемещения инструмента и заготовки типу формируемой поверхности, что позволяет упростить кинематику и повысить точность формообразования, стабилизировать условия и характеристики процесса резания. Например, точка, совершающая одновременно вращательное движение вокруг некоторой оси и возвратно-поступательное движение в плоскости вращения, формирует синусоидальную кривую, что положено в основу точения синусоидальных цилиндрических поверхностей [4]. По сравнению с применяемым в станках с ЧПУ принципом интерполяции при формировании тех же поверхностей достигается более высокая точность и производительность обработки.

В-четвертых, контурные кривые многогранных поверхностей относительно центра поперечного сечения являются линиями переменной кривизны, что при обработке их точением обуславливает изменение кинематических (рабочих) углов режущей части инструмента, которое в процессах резания не должно превышать допускаемую величину. С учетом этого требования определяются геометрические параметры режущей части проектируемого инструмента.

Исходя из изложенного, сравним методы обработки многогранных поверхностей некруглым и полигональным точением (рис. 2.).

Некруглое точение граненых поверхностей (рис. 2., а) основано на сообщении резцу 2 возвратно-поступательного движения  $O_2$ , согласованного с вращением заготовки  $B_1$  вокруг оси  $L_1$ . Этот метод обработки применяется на специальных станках для некруглого точения (станок по патенту США № 3302498, на модернизированных универсальных токарных станках с использованием механизма построителя [4] или копировального устройства [5], токарно-затыловочных станках [6], на токарных станках с системой ЧПУ, обеспечивающей согласование указанных движений с требуемой точностью [7]). Характерным для всех этих вариантов реализации профильного точения является низкая производительность обработки из-за неудовлетворительных динамических условий работы механизмов станка, вследствие знакопеременных инерционных нагрузок, обусловленных осциллирующим движением исполнительного органа с инструментом. Недостатком некруглого точения многогранных поверхностей, ограничивающим область его применения, является также значительное изменение рабочих углов режущей части резца в процессе профилирования, диапазон изменения которого увеличивается с уменьшением числа граней поверхности и кривизны их профиля.

Несмотря на этот недостаток метод некруглого точения находит применение благодаря следующим преимуществам: простота реализации, возможность обработки на одном станке по общей схеме формообразования сопряженных наружных и внутренних некруглых поверхностей, что важно при мелкосерийном и ремонтном производстве некруглых деталей; широкие технологические возможности по форме образуемого профиля при несложной перенастройке станка; высокая точность профилирования синусоидальных поверхностей при гармоническом перемещении поперечного суппорта, согласованного с вращением заготовки. Гармонический закон указанного перемещения исполнительного органа технически просто обеспечивается механизмом-построителем кривошипно-шатунного или кулачкового типов, а также системой ЧПУ. В последнем случае упрощается реализация комплексной обработки некруглых и круглых поверхностей деталей типа тел вращения.

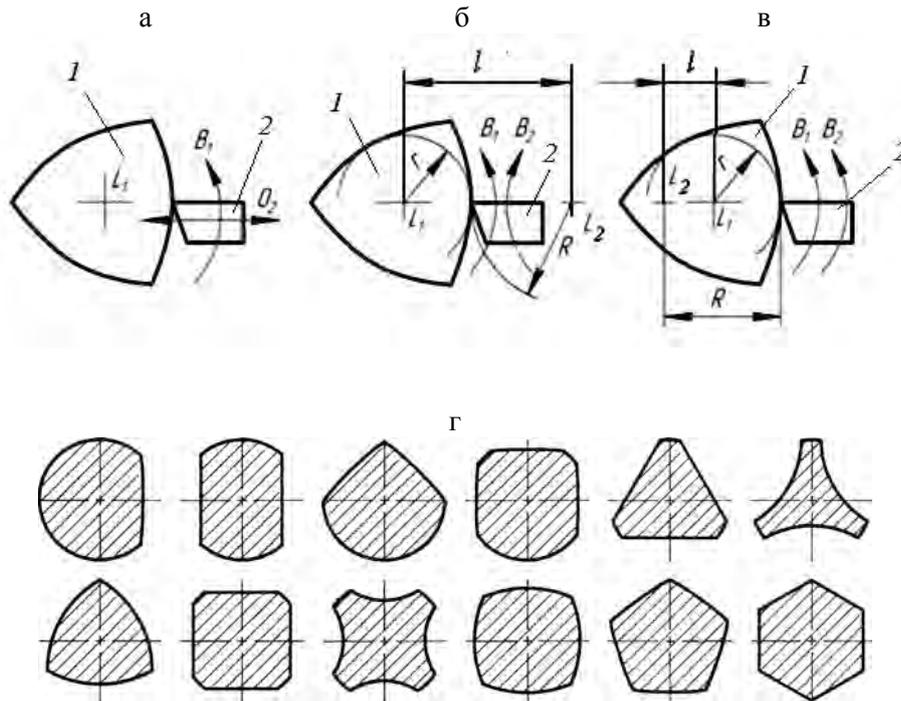


Рис. 2. Профилирование многогранных поверхностей методом следа при обработке: некруглым точением (а); полигональным точением инструментом внешнего касания (б) и охватывающим инструментом (в); профили поверхностей, обработанных полигональным точением (г)

Указанные недостатки некруглого точения при обработке поверхностей с профилем в виде многоугольника (квадрата, шестиугольника, двух параллельных лысок) проявляются в меньшей степени при применении полигонального точения (рис. 2., б, в), которое основано на кинематическом профилировании формируемой поверхности согласованными вращательными движениями  $V_1$  и  $V_2$  соответственно заготовки 1 и режущих элементов 2 вокруг осей  $L_1$  и  $L_2$ . Полигональное точение применяется при обработке многогранных поверхностей по встречной (рис. 2., б) и попутной (рис. 2., в) схемам резания соответственно резцовыми головками внешнего и внутреннего касания. В обоих случаях ось вращения резцовой головки  $L_2$  устанавливают параллельно оси вращения  $L_1$  заготовки 1 на расстоянии

$$l = R \pm r, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус резцовой головки;

$r$  – радиус окружности, вписанной в многогранную поверхность;

знак «плюс» соответствует обработке резцовой головкой внешнего касания, а знак «минус» – охватывающей резцовой головкой.

Обе схемы в зависимости от настройки формообразующей системы позволяют обрабатывать многогранные поверхности с выпуклыми, вогнутыми и близким к плоским гранями (рис. 2, г) у деталей призматической и пирамидальной формы. Преимуществом полигонального точения по сравнению с некруглым точением является более высокая производительность обработки благодаря отсутствию реверсивных движений исполнительных органов станка, а также возможность обработки деталей, как с симметричным, так и с несимметричным профилем, что обеспечивается соответствующей конструкцией режущего инструмента.

Более простой в реализации является схема полигонального точения резцовой головкой внешнего касания. При отношении угловых скоростей резцовой головки и заготовки, равном 2, траектория относительного движения вершины резца и заготовки в прямоугольной системе координат  $XOY$  с центром  $O$  на оси вращения заготовки описывается уравнением [3]

$$\frac{x^2}{r^2} = \frac{y^2}{(r + 2R)^2} = 1, \quad (2)$$

т.е. представляет собой эллипс, который на участке с минимальной кривизной при определенном значении радиуса  $R$  с требуемой точностью приближается к прямой, что и является основанием для применения данной схемы для обработки многогранников.

Коррекция формируемого профиля многогранной поверхности достигается изменением относительного положения осей  $L_1$  и  $L_2$  заготовки и инструмента, которые могут быть параллельны друг другу, пересекаться или скрещиваться. Если указанные оси пересекаются, то с увеличением угла между ними кривизна профиля обработанных граней уменьшается. С увеличением же угла скрещивания между этими осями кривизна профиля граней увеличивается. Указанные способы изменения кривизны профиля граней позволяют управлять точностью формообразования многогранных поверхностей [3].

Недостатком схем профилирования многогранных поверхностей методом следа является изменение в широком диапазоне рабочих углов режущей части инструмента, что необходимо учитывать при проектировании операции полигонального точения.

#### **Оборудование для комплексной обработки круглых и многогранных поверхностей.**

При модульной технологии, благодаря меньшему количеству необходимых для обработки детали технологических переходов, требуется более простой и дешевый, чем обрабатывающий центр, станок, что важно для снижения ее себестоимости. Для комплексной обработки деталей с круглыми и многогранными поверхностями (см. рис. 1.) в крупносерийном производстве целесообразно использовать специализированные станки с функциями круглого и полигонального точения, которые могут выполняться раздельно или одновременно (параллельно). Это требование является определяющим при выборе или проектировании необходимого станочного оборудования. Выше приведены модели импортных станков с функцией полигонального точения, некоторые из которых, например станки фирмы Fastcut (Китай) применяются в отечественной промышленности.

Полигональное точение многогранных поверхностей инструментами внешнего и внутреннего касания реализуются также на широкоуниверсальном зубошлицефрезерном станке модели BC50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [8], который однако не позволяет выполнять одновременную обработку круглых и многогранных поверхностей. Создание отечественных станков с такими возможностями требует проведения соответствующих исследований и опытно-конструкторских работ. Одной из задач является обоснование структуры обрабатывающей системы станка.

Станочное оборудование для комплексной обработки круглых и многогранных поверхностей может быть создано путем модернизации универсального токарного станка с ЧПУ при его оснащении дополнительным обрабатывающим модулем, шпиндель которого, несущий инструмент для полигонального точения, кинематически связан со шпинделем заготовки электромеханической или мехатронной цепью [9]. Такое построение обрабатывающей системы характерно для современных многооперационных токарных станков, у которых инструментальный шпиндель для полигонального точения смонтирован в револьверной головке или в отдельном узле.

Возможная схема обрабатывающей системы модернизированного токарного станка с ЧПУ или специализированного станка для последовательной обработки поверхностей модуля изображена на рис. 3.

Заготовка 1 установлена на шпинделе 2, приводимом во вращение  $V_1$  двигателем 3. Круглые поверхности на заготовке 1 обрабатываются резцом 4, закрепленным в резцедержателе 5, который установлен на поперечном суппорте 6. На этом суппорте смонтирован также дополнительный обрабатывающий модуль 7 с инструментальным шпинделем 8, несущим резцовую головку 9 для полигонального точения многогранных поверхностей. Шпиндель 8 приводится во вращение  $V_2$  двигателем 10, при этом угловые скорости и направления вращений шпинделей 2 и 8 синхронизированы системой ЧПУ. В многооперационном станке с револьверной головкой, оснащенной приводным шпинделем, оба инструмента 4 и 5 устанавливаются в ней.

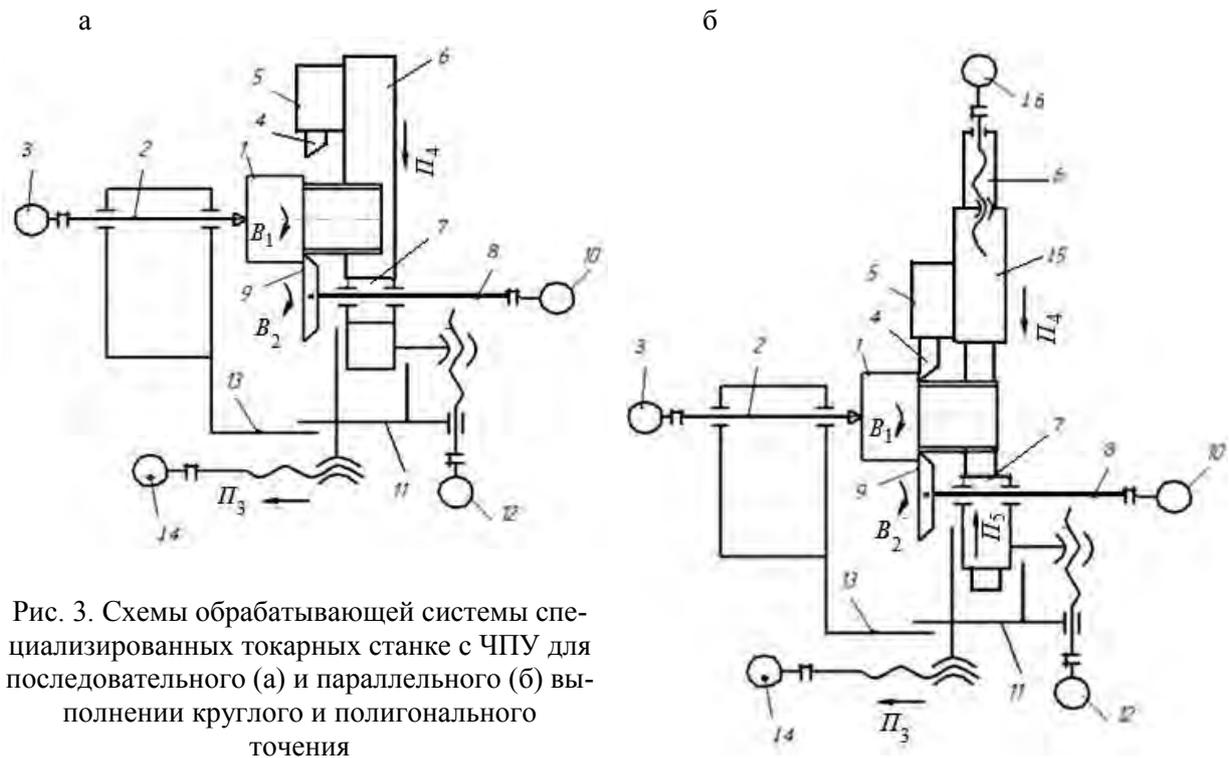


Рис. 3. Схемы обрабатывающей системы специализированных токарных станке с ЧПУ для последовательного (а) и параллельного (б) выполнении круглого и полигонального точения

Переход от одного вида точения к другому, а также настройка на размер обработанной поверхности осуществляется по программе перемещением  $\Pi_4$  поперечного суппорта 6 в радиальном направлении по направляющим продольного суппорта 11 от двигателя 12. Формирование детали по длине при круглом и полигональном точении обеспечивается перемещением  $\Pi_3$  продольного суппорта 11 по направляющим 13 посредством двигателя 14. Формообразование конусообразных деталей с круглыми поверхностями и пирамидальных деталей с многогранными поверхностями достигается за счет согласования системой ЧПУ движений  $\Pi_3$  и  $\Pi_3$ .

Наряду с последовательной обработкой круглой и некруглой поверхностей при соответствующей конструкции станка [10] возможна их одновременная обработка. В этом случае, благодаря совмещению во времени процессов обработки обоих типов поверхностей и сокращению вспомогательного времени, существенно повышается производительность станка по сравнению с раздельной обработкой поверхностей.

Для реализации совмещенной схемы обработки круглой и многогранной поверхностей конструкция станка должна обеспечивать возможность независимого перемещения обоих режущих инструментов в плоскости вращения заготовки в соответствии с циклом обработки детали, что возможно при наличии у станка двух исполнительных органов с индивидуальными приводами перемещения режущих инструментов в плоскости вращения  $B_1$ , например, как показано на рис. 3., б. Станок отличается от рассмотренного выше (см. рис. 3., а), тем, что на поперечных направляющих 6 продольного суппорта 11 смонтированы два поперечных суппорта 7 и 15, первый из которых несет инструментальный шпиндель 8 с резцовой головкой 9 для полигонального точения многогранных поверхностей, а второй – резцедержатель 5 или револьверную головку с резцом 4 для точения круглых поверхностей. Оба поперечных суппорта имеют возможность независимого перемещения в плоскости вращения заготовки по направляющим 6, соответственно от двигателей 12 и 16, связанных с системой ЧПУ, что обеспечивает возможность настройки положения обоих инструментов относительно оси вращения заготовки в соответствии с размерами поверхностей и режимом работы станка по схемам раздельной или совмещенной обработки круглых и многогранных поверхностей.

Круглая поверхность обрабатывается на заготовке 1 резцом 4 в результате вращения  $B_1$  заготовки и поступательного перемещения  $\Pi_3$  продольного суппорта 11 со скоростью подачи. Одновременно из обработанной резцом 4 цилиндрической поверхности формируется многогранная поверхность в результате вращения  $B_1$  заготовки и вращения  $B_2$  резцовой головки 9.

Соотношение угловых скоростей указанных движений обеспечивается системой программного управления в зависимости от количества резцов в головке, числа и формы граней.

Если длина многогранной поверхности меньше длины круглой поверхности, то после обработки многогранной поверхности на заданную длину движение подачи  $\Pi_3$  продольного суппорта 11 отключается и с помощью двигателя 12- резцовая головка отводится от заготовки. Затем снова включается движение подачи  $\Pi_3$  и производится точение резцом 4 круглой цилиндрической поверхности на требуемую длину.

За счет периодического перемещения от двигателя 16 суппорта 15 в плоскости вращения заготовки возможна обработка ступенчатых деталей с круглыми и многогранными поверхностями. При одновременной работе двигателей 12 и 14 осуществляется точение круглых конических и фасонных в продольном направлении поверхностей или пирамидальных поверхностей с многоугольным профилем, параметры которых обеспечиваются системой программного управления.

При одновременной работе различных инструментов важно исключить или максимально уменьшить взаимное влияние реализуемых процессов резания на качество обработки, что достигается соответствующей ориентацией режущих инструментов относительно друг друга и заготовки (рис. 4.).

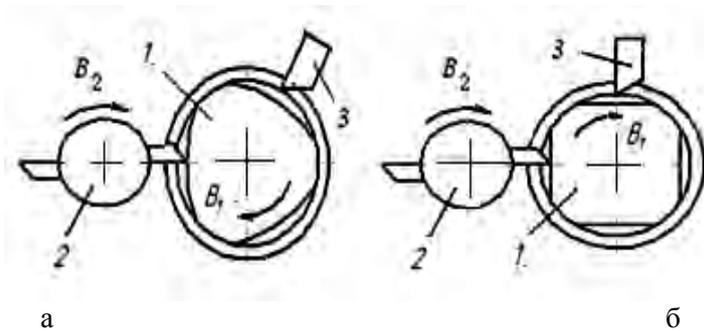


Рис. 4. Рациональные схемы относительного расположения резца и резцовой головки при совмещенной обработке круглой поверхности и поверхности с тремя (а) и четырьмя (б) гранями

Параметры ориентации устанавливаются из анализа схемы обработки, направлений сил, действующих на заготовку со стороны инструментов и вызывающих упругие деформации элементов обрабатывающей системы. В возможных схемах (см. рис. 4.), минимизация взаимного влияния инструментов на погрешность обработки достигается благодаря тому, что деформации заготовки 1 под действием сил взаимодействия с инструментами 2 и 3 осуществляются в разных направлениях. Благодаря этому, например, при совместной обработке круглой и многогранной поверхностей по схеме, согласно рис. 4., б, деформации заготовки 1 под действием силы резания со стороны резцовой головки 2, обрабатывающей многогранную поверхность, происходят в направлении, при котором их влияние на точность круглой поверхности, обрабатываемой резцом 3, несущественно. Обусловлено это тем, что заготовка смещается относительно резца в направлении, касательном к окружности, которую формирует резец 3.

Возможность настройки относительного расположения инструментов и заготовки должна обеспечиваться конструкцией станка.

#### **Выводы**

1. Совершенствование технологии обработки деталей с круглыми и многогранными поверхностями достигается при модульном ее построении, включающем объединение этих поверхностей в один конструктивный модуль с возможностью комплексной их обработки за один установ заготовки.

2. Комплексная обработка поверхностей конструктивного модуля достигается при совместном выполнении процессов формообразования круглых и многогранных поверхностей, что ограничивает возможные сочетания методов их обработки и обуславливает выбор из них рациональных при проектировании технологической операции.

3. Повышение точности формообразования круглой и многогранной поверхностей при комплексной их обработке возможно за счет оптимизации относительного расположения инструментов и заготовки путем минимизации взаимного влияния процессов обработки разными инструментами на точность формообразования.

4. Компоновка проектируемого станка для комплексной обработки должна обеспечивать принятую последовательность выполнения круглого и полигонального точения, а также возможность настройки требуемого относительного расположения инструментов и заготовки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005.
2. Данилов, В.А. Анализ и реализация методов формообразования некруглых поверхностей профильных моментопередающих соединений / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 8-17.
3. Данилов, В.А. Управление профилированием многогранных поверхностей при обработке резанием / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Машиностроение: Республиканский межведомственный сб. научных трудов, Вып. 29. – Мн: БНТУ, 2015 – С. 112-119.
4. Синкевич, В.М. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов / В.М. Синкевич, Е.П. Микитюк // Вестник машиностроения. – 1990.–№11. – С. 60-63.
5. Ворона В. В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей: автореф. дис. канд. техн. наук / В.В. Ворона. – Челябинск, 2008 г. – 19с.
6. Тимченко, А.И. Синтез, анализ и выбор процессов формообразования РК-профильных поверхностей для массового, серийного и единичного (ремонтного) производств / А.И. Тимченко // Вестник машиностроения. – 1991. – № 1.
7. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночного соединения в условиях серийного производства: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Н.В. Зенин. – Москва, МГТУ им Н.Э. Баумана, 2007. – 16 с.
8. Данилов, В. А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер – механик. – 2003. – № 3 (20). – С. 26-31.
9. Данилов, А.А. Синтез и анализ кинематической структуры станка для обработки некруглых валов / А.А. Данилов // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. – 2014, выпуск 75. Промышленность. – С. 84 – 87.
10. Станок для комплексной обработки разнопрофильных поверхностей / Данилов А.А., Данилов В.А. // Решение Национального центра интеллектуальной собственности о выдаче патента на полезную модель по заявке и 20131041 от 12.03.2014 г.

**УДК 621.763**

**Девойно Д.Г., Девойно О.Г., Жарский В.В., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилипчук А.П.**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ СПЕКАНИИ**

*Белорусский национальный технический университет, ООО «Рухсервомотор»,*

*УО Военная академия Республики Беларусь*

*Минск, Беларусь*

*Для повышения качества слоев, формируемых в процессе селективного лазерного спекания (СЛС) предлагается формировать градиентную структуру из материалов с разными физико-механическими свойствами. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований формирования цилиндрической поверхности из слоев сплавов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01.*

Селективное лазерное спекание (СЛС, SLS – Selective Laser Sintering) позволяет создавать уникальные изделия, изготовление которых традиционными методами практически невозможно или требует специальной оснастки (рисунок 1). Например, теплообменники со сложной структурой каналов охлаждения, литейная оснастка для создания корпусов новых двигателей и насосов, фильтрующие элементы, индивидуальные медицинские протезы и др. При помощи данных технологий появилась возможность изготавливать детали с прямоугольной либо любой другой формой внутренних полостей (рисунок 2), а также т.н. градиентные структуры [1-5].