

*The paper considers the process of generating the design-manufacturing elements when machining the engineering part at metal-cutting tools. These elements form the current state of the work-piece at the particular manufacturing operation.*

**Key words:** technical system, design-manufacturing element, work-piece state, machining technique.

УДК 621.9

Д. С. Люба, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАНЕТАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Рассмотрены вопросы формирования траектории при планетарном шлифовании. Представлено моделирование кинематических схем процессов шлифования сочетанием двух элементарных движений. Показана методика наложения траекторий движения абразивных зерен при различной направленности движения шлифовальных кругов при планетарном шлифовании. Описаны методики создания программного обеспечения для решения задач движения зерен при планетарном шлифовании.*

**Ключевые слова:** моделирование, шлифование, планетарный механизм, кинематика движения, траектория.

Исходя из задач и требований, предъявляемых к плоским деталям из труднообрабатываемых материалов, можно считать, что на данном этапе развития торцового шлифования наиболее эффективным методом является планетарное шлифование. Планетарное шлифование позволяет совместить предварительную и чистовую обработку деталей, а также получить поверхность высокого качества. Для торцового шлифования сплошным инструментом характерно снятие припуска в процессе многократных проходов с небольшой продольной подачей и высокой скоростью детали. Поэтому шлифование на таких режимах рекомендуется применять в основном для финишной обработки в условиях снятия небольших припусков.

При планетарном шлифовании обработка ведется с глубиной до 3 мм при скорости подачи детали 0,02...5 м/мин. Этот метод обеспечивает высокую производительность, размерную стойкость инструмента, отличается меньшими градиентами температур, что благоприятно сказывается на тепловых напряжениях и качестве обработанной поверхности. При этом увеличивается эффективность использования смазочно-охлаждающей жидкости за счет возможности подачи ее как непосредственно в зону резания, так и на свободную необрабатываемую поверхность, что повышает интенсивность теплоотвода. Вместе с тем данный метод обработки не требует квалифицированного обслуживания, так как качество обработки здесь определяется в основном возможностями станка, что позволяет осуществлять механизацию и автоматизацию процесса шлифования. Планетарное шлифование позволяет произвести обработку за один-два прохода без предварительных лезвийных операций, уменьшить припуски, резко сократить вспомогательное и подготовительно-заключительное время, упростить инструментальные наладки. Кроме того при планетарном шлифовании возможно применение абразивного инструмента, обладающего более высокими режущими способно-

стями и стойкостью, что, в свою очередь, влечет за собой ужесточение режимов резания и сокращение машинного времени. Поэтому за счет применения планетарного шлифования обеспечивается интенсификация процесса обработки и в конечном счете повышается производительность труда.

Одним из направлений, позволяющих значительно расширить технологические возможности процесса планетарного шлифования, является создание и совершенствование инструмента. Обеспечить рациональные условия процесса шлифования планетарным инструментом – значит выбрать параметры обработки, при которых качество обрабатываемой поверхности соответствует техническим условиям и обеспечивается высокая производительность при минимальной ее себестоимости.

При проектировании планетарного инструмента были поставлены следующие задачи: обеспечить минимальный вес и габариты, чтобы использовать его на средних по размеру шлифовальных станках без их модернизации; использовать стандартные шлифовальные круги типа 6А2; максимальные результирующие скорости резания не должны превышать скорости, допускаемые ГОСТ 4785–84 для данных кругов; обеспечить шлифование со знакопеременными деформациями сдвига в поверхностном слое детали за счет вращения соседних шлифовальных кругов в разные стороны.

Для реализации указанных отличительных особенностей планетарного абразивного шлифования была разработана конструкция планетарного устройства для обработки плоских поверхностей [1]. Устройство представляет собой наружный шлифовальный круг типа АЧК, внутри которого расположен планетарный механизм с установленными на нем одинаковыми внутренними шлифовальными кругами типа 6А2. Вращение наружного и внутренних шлифовальных инструментов в противоположных направлениях и с различной частотой вращения обеспечивает последовательное внедрение режущих кро-

мок абразивных зерен в обрабатываемую поверхность, возрастает траектория их пересечения. Это способствует более полному использованию режущей способности алмазных зерен. В результате сложного движения абразивного зерна вектор результирующей скорости резания меняет направление относительно него, тем самым обеспечивает процесс резания разными гранями зерна, а шлифование ведется со знакопеременными деформациями сдвига в поверхностном слое обрабатываемой детали [2]. При этом припуск между отдельными зернами распределяется более равномерно, возрастает траектория их пересечения, что позволяет осуществить сложение движений.

При конструировании планетарного торцового устройства учитывалась прерывистость контакта инструментов с обрабатываемой поверхностью в зоне резания. При этом длина срезаемой стружки уменьшается вследствие пересечения траекторий, оставляемых режущими кромками абразивных зерен кругов и чередования ранее прорезанных рисок с выступами оставшегося обрабатываемого материала. Сетка траекторий обеспечивает прерывистость резания и уменьшение температуры нагрева абразивных зерен. Чем меньше шаг траекторий, тем меньше температура нагрева, что в конечном итоге положительно влияет на стойкость инструмента.

Качество обработанной поверхности определяется комплексом параметров микрорельефа: размерами, формой, взаиморасположением микронеровностей. Одной из важнейших характеристик микрорельефа, оказывающей существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхностей, является направление следов обработки, называемое «рисунком». Из известных в настоящее время станков наибольшими возможностями в смысле изменения «рисунка» неровностей обладают доводочные станки с растровым и циклоидальным рабочим движением. Все известные конструкции станков для плоского шлифования имеют приводы вращательного движения инструмента и прямолинейное возвратно-поступательное движение стола с обрабатываемой деталью. В некоторых схемах детали или инструменту сообщается дополнительное осциллирующее движение. Однако эти станки применяются для обработки деталей относительно небольших размеров.

Моделирование кинематических схем процессов шлифования осуществляется сочетанием двух элементарных движений – вращательного и поступательного (прямолинейного). Изменение кинематических параметров в достаточно широких пределах позволяет получать следующие траектории относительного перемещения детали и инструмента.

1. Циклоида (обычная, удлиненная, укороченная) получается при совмещении вращения инструмента и возвратно-поступательного перемещения стола станка в продольном направлении (без осциллирующих перемещений в поперечном направлении).

2. Циклоида, наложенная на синусоиду, получается при совмещении в попутном направлении вращения инструмента и возвратно-поступательного

перемещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

3. Эллипс и окружность получаются при совмещении вращения инструмента и возвратно-поступательного перемещения во встречном направлении при определенных соотношениях скоростей этих движений и амплитуды возвратно-поступательного перемещения.

Таким образом, плоское планетарное шлифование с реверсивным вращением инструментов позволяет изменять «рисунок» траектории и в широких пределах изменять одну из важнейших характеристик микрорельефа – направление неровностей. Установлено, что планетарное устройство для обработки плоских поверхностей за счет беспорядочного и разновысотного расположения шлифующих зерен на рабочей поверхности кругов не будет снимать слои в определенной геометрической последовательности. Многие из зерен попадают на выступающие участки микропрофиля шлифуемой поверхности, поэтому после одного оборота круга на поверхности детали остаются шероховатости, снимаемые при новых встречах круга с определенным участком детали. Эти шероховатости при планетарном шлифовании уменьшаются по высоте за счет увеличения количества встреч кругов с обрабатываемым участком, тогда как при обычном шлифовании уменьшение шероховатости происходит либо за счет дополнительного прохода, либо за счет уменьшения продольной подачи.

Один из способов кинематического образования кривых траектории движения абразивных зерен заключается в следующем. Полагаем, что траектория зерна, расположенного на внешнем радиусе алмазного слоя внутреннего круга, вращается без скольжения по другой траектории алмазного зерна, расположенного на внешнем радиусе наружного круга. Какое-либо зерно, расположенное в любом месте алмазного слоя внутреннего круга будет описывать при этом новую траекторию. Считаем, что при образовании траекторий алмазное зерно вращающегося внутреннего шлифовального круга находится на окружности с радиусом  $r$ , а зерно наружного шлифовального инструмента находится на его внутренней стороне алмазного слоя. В некоторый момент времени абразивное зерно внутреннего круга будет находиться в точке  $M$  на окружности радиуса  $r$  с полярными координатами  $M(r, \varphi)$  и декартовыми координатами  $M(x, y)$  в системе координат с началом в точке  $O$  – центре вращения внутреннего круга (рис. 1, а). Деталь движется в зоне резания со скоростью равной скорости подачи. Если принять скорость подачи равной нулю, то траекторией точки  $M$  режущего зерна будет окружность, выражаемая параметрической зависимостью (1) при условии, что  $\rho = r$  и  $\varphi = \omega_{\text{внутр}} t$ , где  $\omega_{\text{внутр}}$  – угловая скорость вращения внутреннего круга;  $t$  – время:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \omega_{\text{внутр}} t; \\ y &= r \sin \omega_{\text{внутр}} t. \end{aligned} \quad (1)$$

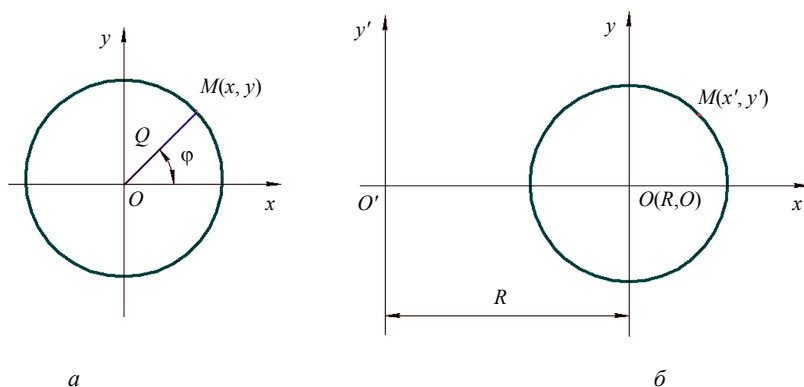


Рис. 1. Схемы траектории движения зерна:  
а – в декартовых и полярных координатах; б – при параллельном переносе системы координат

Совершим параллельный перенос системы координат  $Oxy$ , при этом поместим центр окружности в точку  $O(R; 0)$ , где  $R$  – межцентровое расстояние между центрами наружного и внутреннего кругов (рис. 1, б), и, поворачивая систему координат  $O'x'y'$  на угол  $\psi$ , который определяется угловой скоростью вращения наружного круга  $\omega_k$ , т. е.  $\psi = \omega_k t$ , после преобразований получим в параметрической форме траектории движения абразивного зерна внутреннего торцового шлифовального круга при планетарном шлифовании:

$$\begin{aligned} x &= (r \cos \omega_{\text{внутр}} t + R) \cos \omega_k t - r \sin \omega_{\text{внутр}} t \cdot \sin \omega_k t; \\ y &= (r \cos \omega_{\text{внутр}} t + R) \sin \omega_k t + r \sin \omega_{\text{внутр}} t \cdot \cos \omega_k t, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $(x, y)$  – координаты точки  $M$  в момент времени  $t$  в неподвижной системе координат  $Oxy$ ;  $t \in \left[0, \frac{2\pi}{\omega_k}\right]$ .

Рассмотрим частный случай траектории движения, описанной выражением (2), когда наружный и внутренний шлифовальные круги вращаются в одном направлении. При этом  $R = 57,5$  мм;  $r_{\text{внутр}} = 31,5$  мм;  $\omega_{\text{внутр}} = 99,46$  рад/с;  $\omega_k = 80$  рад/с. Тогда выражения траектории движения абразивного зерна примут вид

$$\begin{aligned} x &= (31,5 \cos(99,46t) + 57,5) \cdot \cos(80t) - \\ &\quad - 31,5 \sin(99,46t) \sin(80t); \\ y &= -(31,5 \cos(99,46t) + 57,5) \cdot \sin(80t) - \\ &\quad - 31,5 \sin(99,46t) \cos(80t). \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты расчетов представлены графически на рис. 2.

При вращении наружного и внутреннего шлифовального кругов в разных направлениях и при условии, что  $R = 81,25$  мм;  $r_{\text{внутр}} = 31,5$  мм;  $\omega_{\text{внутр}} = -124,44$  рад/с;  $\omega_k = 80$  рад/с выражения (2) примут вид

$$\begin{aligned} x &= (31,5 \cos(124,44t) + 81,25) \cos(80t) + \\ &\quad + 31,5 \sin(124,44t) \sin(80t), \\ y &= -(31,5 \cos(124,44t) + 81,25) \sin(80t) + \\ &\quad + 31,5 \sin(124,44t) \cos(80t). \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты расчетов представлены графически на рис. 2.

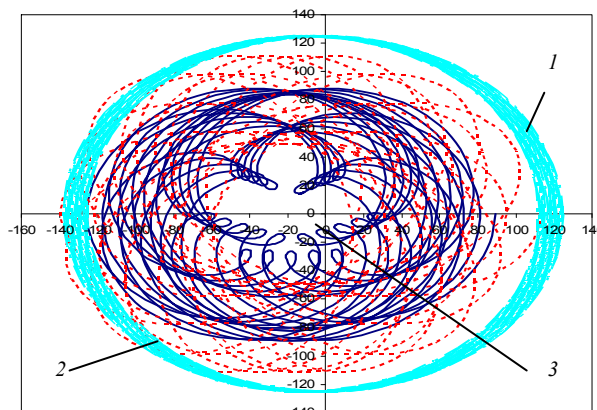


Рис. 2. Траектория движения абразивных зерен наружного и внутренних шлифовальных кругов: число оборотов  $40\pi$ ;  $V_{\text{кр}} = 10$  м/с;  $V_{\text{д}} = 1,5$  м/мин; 1 – вращение наружного круга; 2 – движение с наружным шлифовальным кругом в одном направлении; 3 – движение с наружным шлифовальным кругом в противоположных направлениях

Аналогично определяется форма траектории наружного шлифовального круга.

При наложении траекторий движения абразивных зерен наружного и внутренних шлифовальных кругов и задании движения обрабатываемой детали со скоростью 1,5 м/мин получим окончательные траектории, представленные на рис. 2.

Таким образом, изменение направления вращения внутреннего круга относительно наружного шлифовального круга приводит к различной форме эписциклоид – траектории абразивного зерна, расположенного на внутреннем шлифовальном круге. Увеличение межцентрового расстояния между кругами и большая скорость вращения наружного шлифовального круга приводит к возрастанию угловой скорости внутренних шлифовальных кругов, поэтому изменяется как форма траектории абразивного зерна внутреннего шлифовального круга, так и радиус кривизны траекторий. Изменение направления вращения внутреннего шлифовального круга приводит к различной форме траекторий. Это объясняется,

во-первых, различным зубчатым зацеплением планетарной передачи, что заставляет вращаться внутренние круги в противоположных направлениях, и, во-вторых, различными их угловыми скоростями. Увеличение угловой скорости наружного шлифовального круга приводит к возрастанию угловых скоростей внутренних шлифовальных кругов, в результате радиус кривизны траектории движения абразивного зерна, расположенного на внутреннем шлифовальном круге, независимо от направления его вращения, увеличивается.

Форма траектории наружного шлифовального круга не зависит от направления вращения внутренних шлифовальных кругов, числа оборотов наружного круга, является постоянной для любых параметров планетарной передачи. Установлено, что наибольшее влияние на траекторию движения абразивного зерна наружного шлифовального круга оказывает радиус круга. С его увеличением прямопропорционально увеличивается и траектория движения в декартовой системе координат. Скорость вращения наружного шлифовального круга сказывается на числе оборотов режущего зерна, и существенного влияния на форму траектории не оказывает.

Результатом исследований стало моделирование траектории движения единичного абразивного зерна, расположенного на каждом круге в программе на C++ Builder 5 в двухмерной плоскости. Это позволило наложить микрорезание отдельно взятым на рабочей поверхности круга абразивным зерном и образование обрабатываемой поверхности при применении планетарного устройства.

При изучении процесса планетарного шлифования особое внимание было уделено исследованию влияния режимов обработки на микрогеометрию обработанной поверхности из стали 4X5M. В результате выполненных исследований [2] было установлено, что величина  $R_a$  при работе планетарным устройством на 35...40 % меньше, чем у сплошного инструмента. Это явление может быть объяснено более равномерной работой режущих зерен планетарного устройства, так как возрастает число встреч алмазных зерен с обрабатываемой поверхностью. Вместе с тем следует отметить, что при планетарном шли-

фовании наблюдается более интенсивное сглаживание вершин микронеровностей, что способствует созданию более стабильного режущего профиля.

Множество факторов, изменяющихся во времени, приводят к нестабильности процесса шлифования. Кроме того на производительность и качество обработки существенное влияние оказывает метод шлифования. В этой связи создание процессов интенсивного бездефектного шлифования на базе новых конструктивных и технологических решений представляет собой научную проблему, имеющую большое значение. Одним из таких решений является применение планетарного торцового шлифования, которое позволяет одновременно изменить кинематику движения, реализовать прерывистое шлифование.

Таким образом, при исследовании кинематики формообразования поверхности при плоском торцовом алмазном шлифовании выявлены технологические возможности планетарного торцового шлифования, предложены пути повышения качества и производительности. Получены алгоритм и программа по определению траектории движения зерна в зависимости от заданных факторов шлифования. Также разработаны конструкции планетарных устройств, расширяющие технологические возможности обработки плоских поверхностей. Оптимизация процесса торцового алмазного шлифования планетарным устройством подтверждена разработанной программой и методикой выбора режимов резания планетарного шлифования и характеристик кругов при обработке различных материалов.

#### Библиографические ссылки

1. Патент РФ на изобретение № 2220039 / МПК 7 В 24 В 7/00, 41/047. Устройство для абразивной обработки плоских поверхностей / Ф. Ю. Свитковский, Т. Н. Иванова, П. М. Варламов, А. Ю. Кузнецов, Д. С. Люпа, Россия. Заявл. 28.02.2002, опубл. 27.12.2003. Бюл. № 36.
2. Люпа Д. С., Иванова Т. Н. Исследование физико-механических свойств поверхности при планетарном шлифовании // Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». – Волжский : Волжский институт строительства и технологий (филиал) ВолгГАСУ, 2006. – С. 108–111.

*D. S. Lyupa*, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Simulation of Planetary Grinding

*Questions of generating the trajectory for planetary grinding are considered. The paper presents simulation of kinematic schemes for grinding processes as the combination of two elementary movements. It also describes the technique of superposing the trajectories of abrasive grains' motion at different directions of grinding wheels motion at planetary grinding. Techniques of software development are presented to solve problems of grains' motion at planetary grinding.*

**Key words:** simulation, grinding, planetary gear, kinematics of motion, trajectory.