

УДК 681.7.023; 681.7.03; 681.7.06

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ АЛМАЗНОГО МИКРОТОЧЕНИЯ

В.М. Медунецкий<sup>а</sup>, С.В. Солк<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, vm57med@yandex.ru

<sup>б</sup> ОАО «НИИ оптико-электронного приборостроения», Сосновый Бор, Россия, solk@sbor.net

На основе опыта применения технологии алмазного микроточения в Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения и анализа литературных источников рассмотрены области использования и направления дальнейшего развития технологии алмазного микроточения. Отмечается, что на сегодняшний день технология в основном применяется для формообразования рабочих поверхностей оптических элементов, изготовления киноформ, деталей точной механики, а также декоративной обработки. К новым областям применения алмазного микроточения относятся: изготовление рабочих поверхностей пресс-форм; технологии, позволяющие совместить технологические процессы формообразования и сборки оптико-механических систем; исследование технологической наследственности путем анализа дифракционной структуры поверхности, обработанной алмазным микроточением; получение рабочих поверхностей оптических элементов с астигматизмом заданной величины и направления, используемых в глубокоохлаждаемых оптико-механических системах. Приведены перспективные направления развития алмазного микроточения: создание станков на основе новых кинематических схем, химическая и электрохимическая дополировка рабочих поверхностей оптических элементов после алмазного микроточения с целью уменьшения шероховатости и создания нерегулярного рельефа для работы в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра, разработка технологии алмазного микроточения для новых материалов и совершенствование известных технологий на основе современных представлений о состоянии поверхностного слоя, создание упорядоченного нанорельефа для генерации поверхностных электромагнитных волн для управления свойствами поверхности.

**Ключевые слова:** алмазное микроточение, совмещенные технологии, исследование технологической наследственности, пресс-форма, поверхностные электромагнитные волны, химическая и электрохимическая полировка.

## APPLICATION EXPERIENCE AND PROSPECTS OF DIAMOND MICRO-TURNING TECHNOLOGY

V. Medunetskiy<sup>с</sup>, S. Solk<sup>д</sup>

<sup>с</sup> Saint Petersburg National University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, vm57med@yandex.ru

<sup>д</sup> PLC «Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering», Sosnovy Bor, Russia, solk@sbor.net

The paper deals with application and further progress of diamond micro-turning technology (DT) based on the experience obtained in S&R Institute for Optoelectronic Instrument Engineering and compiled from literary sources. It is pointed out that the diamond turning technology is nowadays mainly used for shaping of the optical elements (OE) working surfaces, manufacturing of kinoforms, elements of fine mechanics and decorative processing. New DT applications are: shaping of the die mold working surfaces, combined technologies, making it possible to combine the shaping technologies and assembling of the optical mechanical systems (OMS), research into technological hereditary, consisting in studies of the surface diffraction structure machined by diamond turning, shaping of the OE working surfaces with astigmatism of the desired value and direction being used in the deeply cooled OMS. Perspective lines of DT development are given, such as production of machines based on the new kinematic schemes, chemical and electrochemical polishing of the OE working surfaces after DT with the aim to decrease roughness and to make irregular relief in visible and near-infrared spectral ranges, development of DT technologies for creation of new materials and improvement of the known technologies taking into account the concepts about the state of the surface layer, creation of regular nanorelief for generation of the surface electromagnetic waves to provide the surface properties control.

**Keywords:** diamond micro-turning, combined technologies, research into technological hereditary, die mold, surface electromagnetic waves, chemical and electrochemical polishing.

### Введение

Одним из наиболее эффективных способов обеспечения требуемых качественных показателей высокоточной промышленной продукции является использование современных прогрессивных технологий. В оптической промышленности при производстве оптических элементов (ОЭ) и оптических систем (ОС) такой технологией является алмазное микроточение (АМТ). Под АМТ понимается лезвийная обработка различных материалов на сверхпрецизионных станках режущим инструментом из природных монокристаллических алмазов. Несмотря на высокую стоимость используемого оборудования, жесткие требования к помещениям АМТ (вибрационные, температурные, акустические, противопопылевые ограничения), специфические требования к режущему инструменту, данная технология получила существенное развитие [1].

Можно отметить, что с каждым годом растет число материалов, для которых разработана технология АМТ. Это медь, алюминий и их сплавы, серебро, золото, платина, свинец, гальванический никель, германий, кремний, селенид цинка, полиметилметакрилат (ПММК) и многие другие. Совершенствуются станки АМТ, режущий инструмент, контрольно-измерительное оборудование.

В настоящей работе рассматриваются области применения АМТ, как традиционные, широко используемые в промышленности, так и новые, на сегодняшний день недостаточно известные, разработанные сравнительно недавно. Рассмотрены перспективные направления развития АМТ.

### Традиционные области применения АМТ

По сравнению с альтернативными технологиями в первую очередь с традиционным полированием, а также с ионной обработкой, вакуумными, термопластическими и другими технологиями, АМТ обладает значительными преимуществами, которые и определяют основные области его применения.

1. Изготовление ОЭ с рабочими поверхностями сложной формы. Посредством АМТ можно изготовить такие сложные поверхности, получение которых другими способами крайне сложно или практически невозможно: асферические поверхности высших порядков, *W*-аксиконы, аксиконы с асферическими, например, параболическими поверхностями.
2. Изготовление лазерных зеркал. При АМТ отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности зернами абразива, что существенно повышает стойкость отражающей поверхности к лазерному излучению высокой мощности.
3. Изготовление металлооптических элементов (МОЭ). АМТ осуществляется на сверхпрецизионных станках (радиальное и осевое биение шпинделя, точность направляющих – доли микрометра). Это позволяет получать на конструкционных материалах, в первую очередь металлах и их сплавах, не только высококачественные оптические поверхности сложной формы, но и базовые поверхности, элементы крепления, а также элементы, обеспечивающие контроль, сборку и юстировку этих элементов. Базовые поверхности позволяют однозначно ориентировать обрабатываемую деталь на станке, что дает возможность совместить геометрическую ось детали с осью вращения шпинделя станка. После обработки рабочей поверхности нет необходимости в операции центрирования. Такие МОЭ широко используются в «насыпных» объективах. Возможность изготовления базовых поверхностей с микрометрическими допусками позволяет получить неюстируемые системы высокого качества. Известны конструкции глубокоохлаждаемых ОЭ [2], устанавливаемые в корпус объектива с «натягом» 5–15 мкм (конструкции с упругими кинематическими элементами), не вызывающие деформации оптической поверхности. Эти конструкции используются в нерасстраиваемых системах, работающих в условиях высоких ударных и вибрационных нагрузок.
4. Изготовление киноформной оптики для инфракрасных (ИК) систем. Киноформы являются эффективным средством коррекции хроматических аберраций, что крайне важно для ИК линзовых систем [3, 4]. Это связано с ограниченностью количества материалов ИК диапазона. Технология АМТ позволяет совместить получение асферической поверхности и дифракционной структуры на ней в рамках единого технологического процесса.
5. Изготовление деталей, относящихся к области точной механики. Высокая точность станков АМТ позволяет изготавливать детали с минимальными значениями некруглости, нецилиндричности, неплоскостности обработанных поверхностей, с их точным взаимным расположением, а также эталоны для контрольно-измерительных приборов.
6. Декоративная обработка деталей из металлических и полимерных материалов.
7. Технология АМТ позволяет сразу получать зеркальную поверхность, что дает возможность применять интерференционные методы контроля на всех стадиях обработки, исключив трудоемкие и недостаточно точные контактные методы.

Отметим, что технология АМТ весьма высокопроизводительна. В ряде случаев алмазным точением оптический элемент может быть изготовлен за несколько часов, в то время как процесс полирования занимает не меньше месяца.

### Новые области применения АМТ

В последние годы в Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения (ОАО «НИИ ОЭП») был разработан и апробирован ряд методик и технологий, использующих АМТ.

1. Изготовление ОЭ при разработке новых ОС для проверки теоретических расчетов. ОЭ изготавливают посредством АМТ, даже если в дальнейшем они будут изготавливаться по другой технологии, например, вакуумным прессованием [5]. Это обусловлено тем, что изготовление элемента АМТ из ряда материалов, например, ПММК, гораздо быстрее и дешевле изготовления пресс-форм (ПФ) с последующим прессованием того же ОЭ.
2. Изготовление ПФ [6]. Для получения десятков тысяч ОЭ методом прессования ПФ изготавливаются из специальных сортов сталей и имеют рабочие поверхности оптического качества. Стоимость таких ПФ может составлять десятки тысяч долларов. Конструкция ПФ не поддается точному расчету и обычно требует поэтапной доработки из-за усадки материала и других факторов. На стадии проектирования и изготовления макетного образца бывает важно изготовить и испытать хотя бы один образец устройства. Применение АМТ позволяет изготовить ПФ из алюминиевых или медных сплавов, при-

- годных для вакуумного прессования нескольких образцов ОЭ. Следует отметить, что использование стали для изготовления ПФ невозможно из-за быстрого разрушения алмазного резца.
3. Изготовление ОЭ с рабочими поверхностями, имеющими астигматизм заданной величины и направления [7]. Дисбаланс заготовки ОЭ при АМТ вызывает астигматическую ошибку волнового фронта излучения, отраженного от рабочей поверхности. В ряде случаев, вводя дисбаланс заданной величины и направления (на практике на заготовку в заданной точке крепится груз с расчетной массой), можно получить направленный «астигматизм». Например, в глубоко охлаждаемых объективах при рабочих температурах часто возникает астигматизм, связанный с анизотропией свойств материала, из которого изготавливаются оптические элементы. Вводя искусственный астигматизм при нормальной температуре, можно улучшить форму оптической поверхности при рабочей температуре.
  4. Изготовление оптико-механических систем (ОМС) по совмещенным технологиям [6]. В оптическом приборостроении технологический процесс изготовления ОМС, например, объектива, включает этапы изготовления ОЭ, механических деталей и сборки. На стадии сборки возможна расточка корпуса объектива и оправ линз, центрировка ОЭ. Формообразование рабочих поверхностей ОЭ к моменту сборки всегда завершено. При использовании АМТ с целью упрощения технологии и повышения точности взаимного расположения поверхностей в ряде случаев целесообразно совместить сборку с формообразованием ОЭ.
  5. Исследование технологической наследственности [6]. Поверхность, обработанная АМТ, представляет собой дифракционную решетку, параметры которой зависят от режимов резания (скорости резания, подачи и глубины резания) и используемого инструмента (радиуса заточки резца). Заготовки из одних и тех же материалов, обработанные на станке АМТ при одинаковых режимах одним и тем же резцом, имеют разные характеристики шероховатости, если образцы имеют разную технологическую наследственность, т.е. прошли разную механическую и термическую предварительную обработку. При оценке качества обработанной поверхности могут быть использованы методики и приборы, применяемые для контроля дифракционных структур.

#### Перспективные направления развития АМТ

На основе анализа литературных источников и опыта проектирования, конструирования и изготовления ОЭ и оптико-механических систем опытных образцов приборов в ОАО «НИИ ОЭП» можно обозначить следующие перспективные направления развития АМТ.

1. Создание мелкомасштабного упорядоченного нанорельефа на поверхности металла. АМТ может использоваться для создания структур, необходимых для генерации поверхностных электромагнитных волн [6, 8]. Такие структуры могут использоваться как для определения оптических свойств поверхности металла, так и для управления этими свойствами.
2. Разработка технологий АМТ для оптических стекол, карбида кремния и других материалов. Количество материалов, формообразование которых возможно посредством АМТ, постоянно растет. Так, в работе [9] описывается технология изготовления АМТ зеркал из магния. Но в этой и других подобных работах разработка технологии АМТ сводится к выбору режимов резания, вида смазывающе-охлаждающей жидкости и способу ее подачи для станка определенного типа. В то же время в литературе описываются и другие подходы к организации технологического процесса АМТ на новых принципах. Например, в [10] предлагается обрабатывать хрупкие материалы, например, оптическое стекло, АМТ при нагреве заготовки до температуры, близкой к точке размягчения. При этом должна образовываться сливная непрерывная стружка. В частности, в работе [11] предлагается осуществлять выбор режимов резания и параметров режущего инструмента на основе термодинамического анализа напряженно деформированного состояния поверхностного слоя рабочей поверхности ОЭ.
3. Создание следующих поколений станков АМТ на основе новых кинематических схем. На сегодняшний день и в России, и за рубежом выпускаются станки АМТ токарного и фрезерного типа, предназначенные для формообразования осесимметричных поверхностей. Информация о станках, позволяющих получать поверхности, задаваемые разными уравнениями в разных сечениях, либо отсутствует, либо носит противоречивый характер. Исключения составляют, пожалуй, станки для изготовления тороидальных поверхностей, но и то лишь в силу своей относительной (две сферические поверхности разного радиуса) простоты. В то же время применение неосесимметричных поверхностей крайне эффективно в брахитах и других ОС.
4. Дополнительная обработка металлических поверхностей с целью уменьшения их шероховатости. Поверхности, обработанные с применением АМТ, имеют невысокую шероховатость. Так, детали из алюминиевого сплава АМг-6 и бескислородной меди МОб, проточенные на станках МО 200 и МО 600 ПЛ [1], имеют среднеквадратичную шероховатость  $Rq$  0,003–0,008 и 0,002–0,006 мкм соответственно. В то же время шероховатость имеет регулярный рельеф, что вызывает дифракционные эффекты для

излучения видимого и ближнего ИК диапазонов. На практике МОЭ с такой шероховатостью используются в ОС, работающих в спектральном диапазоне 3–14 мкм.

Для работы ОЭ в видимом и ближнем ИК диапазонах света необходимо уменьшение шероховатости и создание нерегулярного рельефа рабочих поверхностей. Проведенные эксперименты показали, что при дополировке МОЭ со сферическими, плоскими и асферическими рабочими поверхностями малоразмерным и полноразмерным инструментом происходит «матирование» обрабатываемых поверхностей, после чего требуется полноценная полировка. Проведенные эксперименты по дополировке с использованием технологий химического и электрохимического полирования позволяют говорить о возможности их использования. Перспективной представляется также ионная обработка поверхностей [12].

#### Опыт применения алмазного микроточения при обработке оптических деталей

Рассмотрим возможности АМТ на примере ряда ОЭ, изготовленных в ОАО «НИИ ОЭП». Традиционно формообразование подобных деталей осуществлялось либо полированием полноразмерным и малоразмерным инструментом, либо ионной обработкой. Сложность процесса полирования заключается в отсутствии зон для выхода инструмента. Ионная обработка не предназначена для формообразования большой площади обрабатываемой поверхности. Также следует учитывать плохую обрабатываемость для этих технологий использованных материалов. В ОАО «НИИ ОЭП» были разработаны методики и соответственно технологии, которые позволили решить вышеуказанные проблемы [13].

На рис. 1, а, показана линза сложной конструкции из ПММК, имеющая три рабочих поверхности: *A*, *B* и *C*. Поверхность *A* – сферическая, поверхности *B* и *C* – асферические высших порядков. Поверхности *B* и *C* обрабатываются за один установ, и поэтому при диаметре линзы 200 мм несовпадение фокусов ( $F'_{B,C}$ ) этих поверхностей составляет доли микрометра.

На рис. 1, б, показан *W*-аксикон диаметром 350 мм из алюминиевого сплава 1201 с рабочими поверхностями *D* и *E*. Прямолинейность образующих составляет менее микрометра. Угол  $\alpha$  составляет  $90^\circ$ , при точности изготовления не хуже 10 угл. с. Поверхность *G* – плоская, изготавливается за один установ с рабочими поверхностями и используется для предварительной юстировки аксикона. При использовании специализированных станков возможно изготовление *W*-аксиконов не с прямолинейными образующими, а имеющими сложную, например, параболическую, форму.

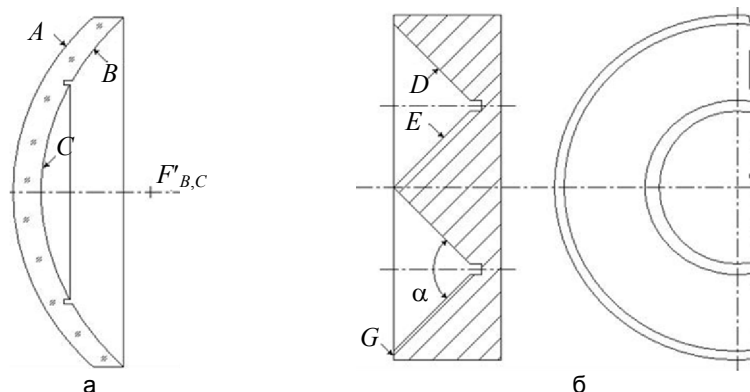


Рис. 1. Конструкции оптических элементов: из ПММК (а); *W*-аксикон из алюминиевого сплава (б)

Из алюминиевого сплава АМг-6 было изготовлено зеркало диаметром 150 мм с внутренним отверстием диаметром 30 мм и толщиной 15 мм. Масса зеркала составляла около 400 г. Рабочая поверхность зеркала – парабола с фокусным расстоянием 150 мм. Формообразование велось на станке токарного типа МО-200. Финишная обработка осуществлялась при глубине резания 0,005 мм, скорости вращения шпинделя станка 700 об/мин и скорости подачи суппорта 0,003 мм на оборот. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался спирт технический этиловый марки «А». В качестве режущего инструмента использовался резец из природного монокристаллического алмаза массой 0,5 кар. Передний угол заточки резца отрицательный –  $4^\circ$ , задний –  $10^\circ$ , радиус режущей кромки 5 мм. Среднеквадратичное отклонение полученной поверхности составило  $0,15\lambda$  для  $\lambda = 0,6328$  мкм, а среднеквадратичная шероховатость  $Rq$  не превышала 0,006 мкм. Формообразование вместе с юстировкой станка и проведением контрольно-измерительных операций заняло три рабочих смены (24 ч). Конструкция резцов, используемых для АМТ, приведена на рис. 2.

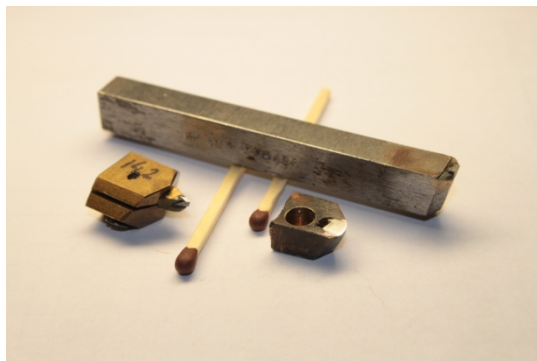


Рис. 2. Резцы из природных монокристаллических алмазов для АМТ

Зеркало предназначено для использования в оптико-электронном приборе космического базирования, рабочий спектральный диапазон которого составлял 8–14 мкм. Данные условия и определили выбор используемых материалов и технологии. Зеркало устанавливалось на платформу, изготовленную также из АМг-6, что делало конструкцию термонарасстраиваемой. Конструкция зеркала предусматривает наличие гладких отверстий для крепления его к платформе и не требует оправы, наличие которой привело бы к увеличению массы конструкции как минимум в 1,5 раза. Использование технологии полирования малоразмерным инструментом или технологии ионной обработки для достижения тех же параметров рабочей поверхности зеркала, по предварительным оценкам, заняло бы не менее 10 рабочих смен. Данный пример показывает существенное преимущество технологии АМТ.

Сравнительные характеристики различных технологических процессов приведены в таблице. Для детали, изготовленной посредством АМТ, приведены измеренные характеристики, для остальных случаев использовался метод экспертных оценок и результаты измерений аналогичных деталей. Шероховатость поверхности после ионной обработки не приведена, так как авторам не известны случаи формообразования металлических поверхностей такого размера с использованием данной технологии.

Характеристика	Алмазное микроточение	Полирование малоразмерным инструментом	Ионная обработка
Продолжительность формообразования и контроля, ч	24–30	80–100	100–120
Стоимость (без учета стоимости амортизации оборудования), тыс. руб.	20–30	60–90	90–120
Коэффициент отражения 8–14 мкм, %	97–98	95–96	–

Таблица. Сравнительные характеристики технологических процессов формообразования зеркала диаметром 150 мм с шероховатостью поверхности  $Rq$  0,006 мкм и точностью формы 0,15λ для  $\lambda = 0,6328$  мкм из сплава АМг-6

### Заключение

Применение технологии алмазного микроточения позволяет изготавливать оптические элементы с асферическими поверхностями и дифракционными структурами, что делает возможным эффективное исправление аберрации. Это позволяет получать требуемые характеристики оптических систем, используя меньшее количество линз и зеркал [3]. Технологические возможности алмазного микроточения позволяют широко применять облегченные металлооптические элементы с рабочими, базовыми и юстировочными поверхностями. Все это ведет к уменьшению габаритов и массы оптико-механических систем, упрощению конструкции и технологии сборки, повышению коэффициента пропускания оптических систем.

Чтобы обеспечить высокие технические характеристики приборов, необходимо учитывать возможности и ограничения конкретных станков алмазного микроточения уже на стадии выполнения оптического расчета системы и конструирования прибора.

### Литература

1. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
2. Мирошников М.М., Любарский С.В., Любарский Н.Х. Оптические зеркала для космической инфракрасной астрономии // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 4. С. 36–40.
3. Ган М.А. 50 лет киноформной оптики. Итоги и перспективы развития // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 7. С. 9–16.

4. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80–87.
5. Сабинин В.Е., Солк С.В. Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 61–64.
6. Солк С.В., Сабинин В.Е. Новые области применения технологии алмазного микроточения // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 11. С. 82–85.
7. Solk S., Shevtsov S., Iakovlev A. Designing of optical elements manufactured by diamond turning // Proc. of SPIE. 2000. V. 4231. P. 181–188.
8. Макин В.С., Макин Р.С. Взаимодействие осесимметрично поляризованного лазерного излучения с конденсированными средами // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 4. С. 670–675.
9. Солк С.В., Яковлев А.А. Технология изготовления малогабаритных зеркал из магниевых сплавов // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 3. С. 84–85.
10. Добровольский Г.Г., Саксеев П.Ю. Алмазное микроточение кремния и германия (обзор) // Сверхтвердые материалы. 2004. № 1. С. 46–51.
11. Клименко С.А., Манохин А.С. Термодинамический анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя изделия, обработанного алмазным микроточением // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. 2010. В. 9. С. 74–81.
12. Черезова Л.А., Михайлов А.В. Применение ионной обработки в нанотехнологиях получения высокоточных поверхностей оптических деталей // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 5. С. 51–54.
13. Арутюнян В.В., Шевцов С.Е. Формообразование оптических поверхностей методом алмазного микроточения на материалах, применяемых в ИК диапазоне спектра // Контенант. 2013. Т. 12. № 2. С. 60–63.

- Медунецкий Виктор Михайлович* – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, [vm57med@yandex.ru](mailto:vm57med@yandex.ru)
- Солк Сергей Вольдемарович* – кандидат технических наук, докторант, ОАО «НИИ оптико-электронного приборостроения», Санкт-Петербург, Россия, [solk@sbor.net](mailto:solk@sbor.net)
- Viktor Medunetskiy* – D.Sc., Professor, Saint Petersburg National University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, [vm57med@yandex.ru](mailto:vm57med@yandex.ru)
- Sergei Solk* – PhD, doctoral candidate, PLC «Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering», Saint Petersburg, Russia, [solk@sbor.net](mailto:solk@sbor.net)

УДК 621.9

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЯМЫХ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС СТУПЕНЧАТЫМ ДОЛБЯКОМ

Н.М. Расулов<sup>а</sup>, Г.Р. Гусейнов<sup>а</sup>, У.М. Надиров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан, [n\\_ugurlu@mail.ru](mailto:n_ugurlu@mail.ru)

Трудоемкость формирования зубчатых поверхностей традиционными методами достаточно высока. Разработка новых, относительно эффективных методов их обработки имеет важное научно-практическое значение.

Разработан новый способ – скоростное зубодобление прямых зубьев цилиндрических колес косозубым ступенчатым долбяком, зубья которого расположены ступенчато, вдоль собственной оси. После наладки технологической системы инструменту и заготовке сообщается непрерывное станочное зацепление. Инструмент получает одновременно и радиальное перемещение. При этом, несмотря на отсутствие осевого относительного перемещения заготовки и инструмента в целом, режущие кромки последнего совершают осевое перемещение, что обеспечивается конструкцией инструмента и кинематикой нарезания, и снимают материал. После достижения требуемой глубины нарезки производится однократное перемещение инструмента вдоль оси заготовки. Обеспечивается калибровка поверхности, и уменьшаются погрешности обработки, так как каждый зуб долбяка имеет возможность участвовать в формировании любого зуба колеса.

Спроектированы и изготовлены ступенчатые долбяки разной конструкции, было создано модернизированное оборудование на базе вертикально-фрезерного станка мод. 6Р13. Опробование и промышленные испытания разработанного метода проведены на машиностроительном заводе им. Г. Мусабекова.

Установлено, что нарезание зубьев ступенчатым долбяком обеспечивает 8–9 степень точности по [1] при значительном сокращении машинного времени по сравнению с традиционным зубодоблением. На специальном станке можно нарезать зубчатые поверхности, обладающие точностью не ниже 8 степени.

**Ключевые слова:** зуб, долбяк, обработка, согласованное вращение, скрещивание, угол.