УДК 621.9 EDN: KBXPCC

# ПРИМЕНЕНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**А.Е. Образцов** obrazcow2@mail.ru
**В.М. Утенков** utencov@bmstu.ru
**П.М. Кузнецов** kuznetsovpm@bmstu.ru

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**

**Аннотация**

Обработка хрупких материалов — одна из сложных технологических операций. В исследованиях, посвященных вопросам обработки материалов, уделяется внимание поиску технологического решения механообработки труднообрабатываемых оптических элементов. Одним из современных решений является резание с применением осциллирующих движений режущей кромки инструмента. Такой метод позволяет улучшить качество получаемой поверхности оптических элементов и увеличить толщину срезаемого слоя. В качестве источника осциллирующих движений используют пьезоэлемент или магнитострикционный преобразователь. Рассмотрен микропривод, который включает в себя актюаторы из пьезокерамики. Выбор такого микропривода обусловлен энергоэффективностью привода, быстрой реакцией пьезоэлемента, низким нагревом, высокими жесткостью и точностью. Предложена схема микропривода, описана его работа, приведен пример траекторий движений инструмента, реализована конструкция, которая испытана при обработке образцов. Полученные детали проверены на высокоточном измерительном оборудовании. По результатам проведенного эксперимента доказана состоятельность применяемого метода для обработки оптических элементов на получистовой операции с использованием осциллирующих движений. Улучшено качество обработанной поверхности благодаря уменьшению шероховатости по сравнению с обычным резанием. Приведены графики изменения параметров для всех образцов

**Ключевые слова**

*Осциллирующие движения инструмента, хрупкие материалы, микропривод, качество, обрабатываемая поверхность, ультразвуковая обработка, ультразвуковые колебания инструмента*

Поступила 09.06.2025
Принята 19.02.2026
© Автор(ы), 2026

**Введение.** Обработка хрупких материалов является сложной задачей. В процессе резания зарождаются микротрещины, которые развиваются, приводя к сколам и снижению выхода годной продукции. Как правило, такие материалы применяют в производстве оптических элементов разного назначения. Это могут быть как обычные линзы из оптического стекла, так и нелинейно-оптические элементы из кристаллов KDP, DKDP. В большинстве случаев акцентируется внимание на глубине резания, но редко затрагиваются вопросы хрупкого разрушения.

Силы резания при обычных режимах обработки имеют постоянные значения. Для пластичных материалов их значения не играют такой критической роли, как для хрупких материалов. Существуют исследования, посвященные обработке оптических элементов с применением и без использования осциллирующих движений режущей кромки и улучшению качества обработанной поверхности.

*Цель настоящей работы* — привести результаты экспериментов по обработке десяти образцов из германия с применением осциллирующих движений режущей кромки и без их использования. Для минимизации влияния внешних вибраций и дополнительного демпфирования внутренних вибраций применены опоры на гидростатике. Заготовки крепятся с помощью вакуумного патрона, установленного на аэростатическом шпинделе *ASD-PH63M* (Levicron GmbH, Германия).

**Материалы и методы.** *Проблемы обработки оптических материалов и их решения.* Высокое качество оптических элементов определяется точностью формы, шероховатостью поверхности и отсутствием микротрещин. Однако их изготовление из хрупких оптических материалов, например, оптического стекла, требует прецизионных технологий, обеспечивающих нанометровую шероховатость и отсутствие повреждений.

Основная проблема при обработке хрупких оптических материалов — трещинообразование вследствие низкой пластичности. Механическая обработка на традиционных режимах (при глубине резания более 50 мкм) приводит к хрупкому разрушению, оставляя дефекты. Избежать этого позволяет использование квазипластического режима резания, при котором материал удаляется за счет деформации, а не хрупкого разрушения. Этот метод требует соблюдения глубины резания (субмикронный уровень).

Современные исследования в области обработки оптических материалов указывают на то, что их механическая обработка может осуществляться по принципам, аналогичным для пластичных металлов**.** Это предполагает пластическое деформирование материала в зоне резания с минимальным образованием трещин. Ключевое условие для реализации такого метода

обработки — соблюдение режимов, при которых формирование стружки происходит вследствие пластической деформации, а не хрупкого разрушения. Метод получил название «пластичный режим обрабоки» или «квазипластичность» [1].

Квазипластичность — искусственное создание условий, при которых хрупкий материал временно ведет себя как пластичный, что позволяет достичь качества поверхности, недоступного при классических способах. При резании с нанометровыми толщинами срезаемого слоя контактное взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью создает условия, при которых происходит направленное квазипластичное удаление поверхностного слоя материала с формированием шероховатости в пределах нескольких нанометров и минимальным дефектным слоем [2].

При стружкообразовании хрупких материалов в условиях обычного резания под действием участка передней поверхности резца, расположенной непосредственно у режущей кромки, образуются трещины, распространяющиеся в направлении движения резания. На этом этапе стружкообразования происходит непрерывное увеличение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей равномерно-подвижной трещины. Развитие трещины продолжается до тех пор, пока основным параметром, влияющим на процесс формирования стружки, не станет напряжение изгиба, вызывающее быстрое уменьшение силы резания вследствие отделения элемента стружки от поверхности. На втором этапе происходит «зачистка» обработанной поверхности. Этот этап характеризуется отделением мелких элементов стружки по той же схеме. Таким образом, процесс стружкообразования при обычном резании хрупких материалов определяется явлением хрупкого отрыва, обусловленным периодическим процессом развития опережающей трещины. В этом случае работа стружкообразования пропорциональна поверхности разрушения, о площади которой можно судить по степени измельчения стружки. Резание, определяемое процессом хрупкого отрыва материала, сопровождается появлением трещиноватого (поврежденного) слоя на обработанной поверхности. При развитии формируются микротрещины, перпендикулярные обработанной поверхности [3].

Перспективным направлением [4–7] в области обработки хрупких материалов является лезвийная обработка с наложением колебательных движений на режущий инструмент в ультразвуковом диапазоне. Эта технология позволяет не только значительно уменьшить силы резания и улучшить процесс удаления стружки, но и обеспечить переход от хрупкого к пластичному режиму удаления материала, тем самым достигается

существенное повышение качества обрабатываемой поверхности с минимальными дефектами и уменьшением показателя шероховатости. Дополнительным преимуществом метода является снижение износа режущего инструмента и возможность обработки сложных форм без нарушения целостности.

*Микропривод для обработки с осциллирующими движениями.* Полноценная обработка с применением осциллирующих движений режущего инструмента впервые проведена в конце 1950-х годов и использовалась в различных процессах обработки, включая традиционную обработку (токарную, сверлильную, шлифовальную, фрезерную) и нетрадиционную (лазерную, электроэрозионную и химическую). Создавая вибрации нужной частоты, амплитуды и формы сигнала, снижают среднюю силу резания, получают более тонкую, легкоудаляемую стружку. В результате повышается эффективность обработки, увеличивается срок службы инструмента, улучшаются качество и точность получаемой поверхности, а также уменьшается образование заусенцев [8–13]. Кроме того, при обработке твердых и хрупких материалов, таких как керамика и оптическое стекло, глубина резания на режиме квазипластичного удаления увеличивается [14] и, как следствие, повышается производительность процесса формообразования. Закономерное колебание режущего инструмента с определенными частотой, амплитудой и формой сигнала называется осциллирующим движением режущего инструмента.

Привод, отвечающий за формирование осциллирующих движений, состоит из источника вибраций, механизма крепления инструмента, вспомогательных компонентов. В зависимости от рабочих частот источников создания вибраций приводы делятся на резонансные и нерезонансные [15]. Для резонансного привода рабочая частота устанавливается на уровне собственного виброгенерирующего компонента (источника вибрации), что позволяет получать частоту с повышенной амплитудой и большей энергоэффективностью по сравнению с нерезонансным источником. Однако траекторию колебаний невозможно точно контролировать из-за природы резонансных колебаний и запаздывания по фазе между возбуждением и механическим откликом. Для нерезонансного привода рабочая частота является переменной, исключая собственную. По сравнению с резонансными приводами нерезонансные обеспечивают более высокую точность вибрации и позволяют выполнять управление траекториями вибрации [16].

В настоящее время для формирования осциллирующих движений используется привод, где источником вибрации выступает пьезоэлемент либо

магнитострикционный преобразователь. Наибольшее применение нашли приводы, в составе которых применяется пьезокерамика (пьезоэлемент) и используется явление обратного пьезоэффекта для преобразования электрической энергии в механическую [17]. По сравнению с другими типами приводов они имеют низкую стоимость, простую конструкцию, небольшие размеры, быструю реакцию, высокую точность управления. У таких приводов отсутствуют магнитное и электрическое поля, а также электромагнитные помехи или электромагнитный шум, что повышает стабильность и обеспечивает большое разнообразие применяемых конструкторских решений. В зависимости от назначения применяют многослойные, тонкопластинчатые, трубчатые и биморфные пьезоэлементы [18, 19]. Учитывая силу перемещения, жесткость и частотную характеристику, в реальных вибрационных системах обычно выбирают пьезоэлектрические приводы пакетного типа, состоящие из множества пьезоэлектрических керамических пластин, механически соединенных последовательно и электрически подключенных параллельно.

Магнитострикционные приводы применялись активно для генерации вибрационных перемещений, но с развитием пьезокерамики стали менее популярны. Принцип работы магнитострикционного привода состоит в следующем, когда на электромагнитную катушку подается пульсирующее напряжение, электромагнитная сила взывает вибрацию сердечника, так происходит механическое перемещение [20]. Генераторы виброперемещений являются надежным источником вибрации, но имеют низкую энергоэффективность, вызванную высокими потерями электроэнергии на вихревые токи. Эти электрические потери преобразуются в тепловые, что в некоторых случаях приводит к повреждению привода [21]. В связи с этим при их использовании необходимо применять систему охлаждения, которая увеличивает габаритные размеры [22]. В настоящее время магнитострикционные приводы применяют в вибрационных системах с низкими частотами вибраций и большой амплитудой колебаний.

Передаваемая вибрация от источника может поступать напрямую либо через механизм — обычно гибкую опору, занимающую малый объем, установленную при условии отсутствия трения и с зазором, который используют для управления перемещением вибрации в нерезонансных вибросистемах [23].

Для проведения эксперимента выбран источник вибрации на основе пьезокерамики [24]. Такой источник вибрации характеризуется:

– низким энергопотреблением (пьезоэффект непосредственно преобразует электрическую энергию в движение, расходуя ее только на пере-

мещение); статической работой, в том числе при больших нагрузках; не потребляет электроэнергии;

– максимально быстрым временем отклика (ускорение достигает более чем $10^4$ g); отсутствием износа (приводы на основе пьезоэлементов не имеют трущихся частей — зубчатых передач, вращающихся валов);

– смещением, основанным на динамике твердотельного состояния и отсутствии признаков изнашивания;

– совместимостью с чистыми помещениями, что идеально для применения в условиях сверхвысокого вакуума (приводы представляют собой керамические элементы без смазывания и изнашивания).

В основе перемещения пьезокерамики лежит пьезоэлектрический эффект, который объясняется смещением ионов в кристаллах, имеющих несимметричную элементарную ячейку. Прямой пьезоэффект проявляется при сжатии кристалла, при котором ионы в каждой элементарной ячейке смещаются, вызывая в ней электрическую поляризацию. Обратный пьезоэффект возникает, когда на кристалл действует внешнее электрическое поле, вследствие чего ионы в каждой элементарной ячейке перемещаются, это приводит к механической деформации всего кристалла [25].

Проведенный сравнительный анализ способов формирования осциллирующих движений режущего инструмента выявил преимущество пьезокерамических актюаторов для прецизионной обработки хрупких оптических материалов. Ключевыми критериями выбора послужили: высокая энергоэффективность, отсутствие паразитных магнитных полей, компактность конструкции, способность функционировать в условиях повышенных механических нагрузок, а также возможность создания высокочастотных колебаний, критически важных для обеспечения качества обработки.

Особое внимание в настоящей работе уделено анализу управляющих сигналов, поскольку их форма непосредственно определяет кинематику движения режущей кромки и, как следствие, результаты обработки. Для выбора рациональной формы управляющего сигнала проведен эксперимент.

Установлено, что гармонический сигнал обеспечивает наиболее плавное движение инструмента, минимизируя паразитные вибрации и ударные воздействия. Прямоугольные сигналы, хотя и могут быть полезны на некоторых режимах обработки, зачастую приводят к нежелательным ударным нагрузкам из-за резких фронтов.

Формирование эллиптической траектории движения режущей кромки продемонстрировали гармонические сигналы, что подтверждается результатами метрологического контроля.

Измерения перемещений проводились на оптиметре ИКВ-1 (ООО НПП «ТИК», г. Пермь) и измерительной цифровой головке ИГЦМ (ООО «ИМЦ «Микро», Санкт-Петербург), приведенных на рис. 1.



*а* *б*

**Рис. 1.** Оптиметр ИКВ-1 (*а*) и измерительная цифровая головка ИГЦМ (*б*)

Измерения перемещений пьезоактюатора подтвердили ограниченность аналогового оптиметра ИКВ-1 для высоких частот. Цифровая головка ИГЦМ фиксировала амплитуды в ультразвуковом диапазоне (20 кГц). Для защиты оборудования длительность циклов ограничивалась 5 с, сохраняя погрешность ± 0,1 мкм. Зависимости перемещений от напряжения, подаваемого на пьезоактюатор, для прямоугольного и гармонического сигналов приведены на рис. 2.

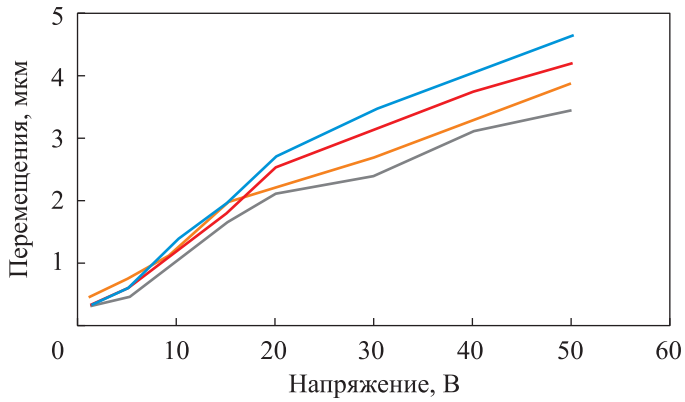



**Рис. 2.** Зависимости перемещений от напряжения, подаваемого на пьезоактюатор, для прямоугольного сигнала с частотой 100 ( — ) и 20 000 Гц ( — ) и гармонического сигнала с частотой 1000 ( — ) и 20 000 Гц ( — )

**Результаты.** Результаты анализа экспериментальных данных выявили закономерное уменьшение амплитуды перемещения с увеличением частоты (гистерезис, инерционность, электрические потери). Отметим ударные нагрузки, создаваемые прямоугольным сигналом, и большую пиковую амплитуду, чем у гармонического сигнала.

Для проведения следующего эксперимента отобраны десять линз (пять штук для каждого способа обработки) из германия диаметром 16 мм. Обработка проводилась алмазным резцом с применением и без использования осциллирующих движений. Глубина резания 5 мкм, подача 1 мкм/об, скорость вращения шпинделя 3000 мин$^{-1}$, частота осциллирующих движений 20 кГц, амплитуда 10 мкм в продольном $(Ds_2)$ и 5 мкм в поперечном $(Ds_1)$ направлениях. Поверхность проверяли на контрольно-измерительном оборудовании *MarSurf LD 260* (Mahr GmbH, Германия). Схема перемещения режущей кромки микроприводом и ее траектория приведены на рис. 3.

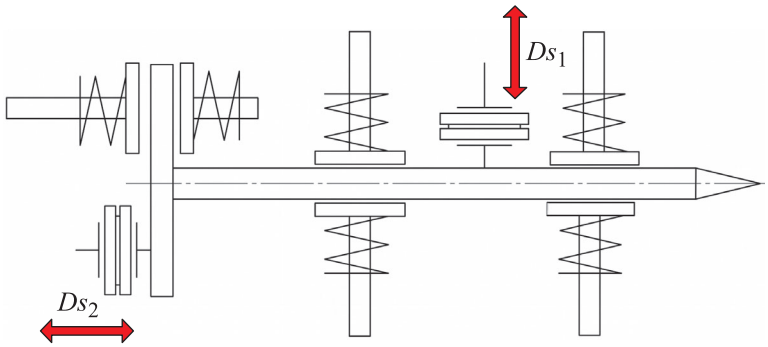



**Рис. 3.** Схема перемещения режущей кромки микроприводом и ее траектория

Резец устанавливается в микропривод и жестко крепится к актюаторам. Для повышения жесткости системы дополнительно вводятся подпружиненные опоры. Регулируя амплитуду управляющего сигнала, изменяют значение деформации пьезоэлемента, что меняет перемещение.

Эллиптическая траектория режущей кромки (рис. 4, *а*), полученная в результате синхронного движения актюаторов микропривода в направлениях $Ds_1$ и $Ds_2$, и ее геометрия (рис. 4, *б*) приведены ниже. Скриншот схемы работы микропривода приведен на рис. 5.

Для корректной работы микропривода к генератору сигналов подключают стабилизатор напряжения для защиты от помех. С помощью задающего генератора назначают частоту и амплитуду. Далее устанавливают необходимую форму сигнала. Корректируя параметры для каждого

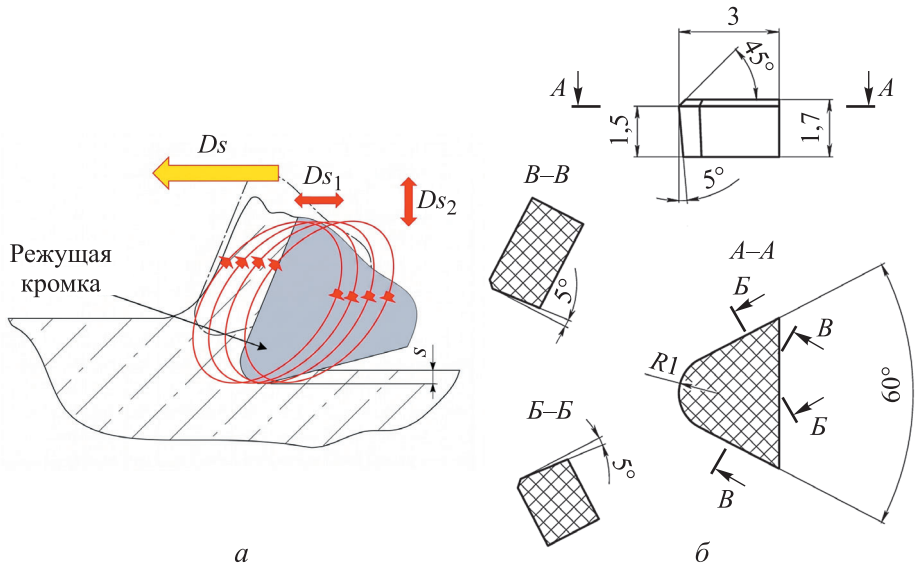



**Рис. 4.** Эллиптическая траектория режущей кромки (*а*) и ее геометрия (*б*)

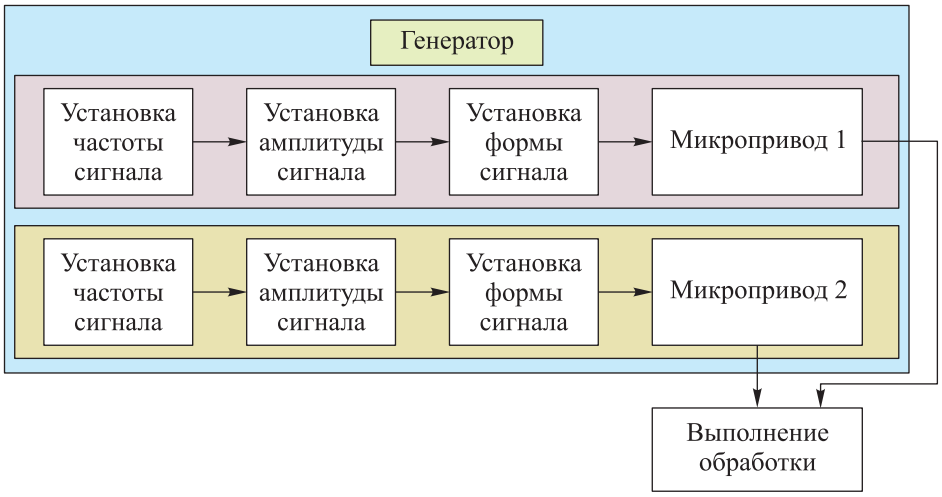
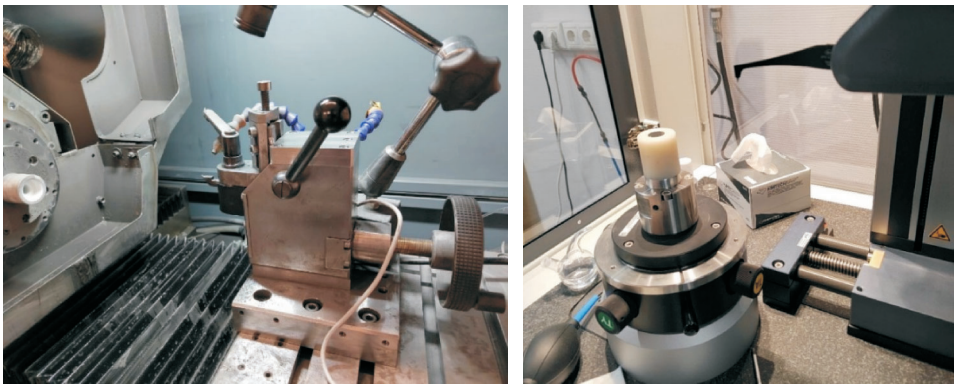



**Рис. 5.** Скриншот схемы работы микропривода

микропривода, определяют траекторию режущей кромки инструмента, для нашего случая эллиптическую. После 10 с от начала запуска микропривода начинают обработку образцов: резец крепят в микроприводе и выполняют настройку, после обработки проводят измерения (рис. 6).

Результаты обработки десяти образцов по показателю *PV* (*Peak-to-Valley* — разность минимального (впадина) и максимального (пик) значений отклонения на измеряемом профиле) с применением осциллирующих движений и без них приведены на рис. 7. Отметим значительное

влияние осциллирующих движений инструмента на качество обработки. При традиционном методе обработки среднее значение *PV* поверхности составляло 0,69 мкм, в то время как при применении осцилляций этот показатель уменьшился до 0,44 мкм. При полученном уменьшении значения показателя *PV* (на 36 %) наблюдается существенное улучшение качества обрабатываемой поверхности.



*а* *б*

**Рис. 6.** Обработка образцов: крепление резца с применением микропривода (*а*) и процесс измерения (*б*)

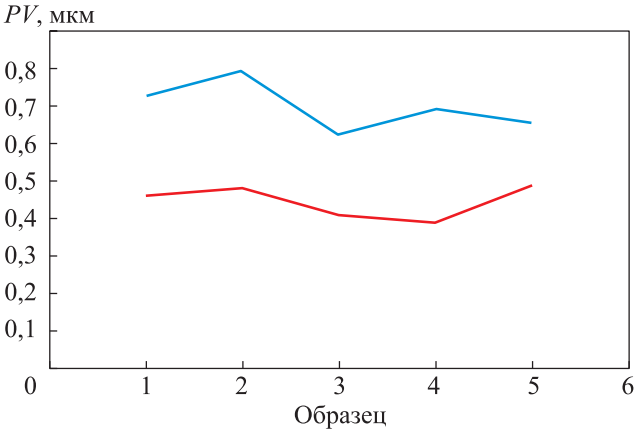



**Рис. 7.** Результаты обработки образцов по показателю *PV* с применением осциллирующих движений ( — ) и без них ( — )

В результате анализа точности формообразования выявлена аналогичная положительная динамика. При номинальном радиусе выпуклости линзы 666,8 мм обработка без осциллирующих движений дала среднее значение радиуса 660,49 мм, тогда как использование осциллирующих движений позволило достичь значения 668,92 мм. Такой результат сви-

детельствует о повышении точности воспроизведения геометрии. Статистические результаты обработки десяти образцов с применением осциллирующих движений и без них, полученные по отклонению от радиуса выпуклости линзы, приведены на рис. 8.

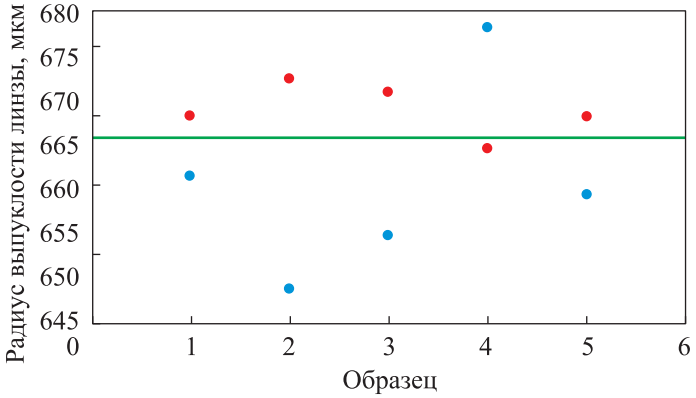



**Рис. 8.** Статические результаты обработки образцов, полученные по отклонению от радиуса выпуклости линзы с применением осциллирующих движений (•) и без них (•)

**Обсуждение результатов.** Проведенный анализ экспериментальных данных демонстрирует существенное влияние осциллирующих движений инструмента на ключевые показатели качества обработки хрупких оптических материалов. Полученное улучшение качества поверхности (снижение на 36 % значения показателя *PV*) свидетельствует о переходе к преимущественно квазипластичному режиму резания, что особенно значимо для обработки хрупких оптических материалов, склонных к образованию микротрещин и сколов.

Наблюдаемое улучшение точности формообразования (приближение к номинальному значению радиуса выпуклости) позволяет сделать вывод о стабилизации процесса резания при использовании осциллирующих движений. Данный эффект может быть объяснен следующими факторами: снижение режущих сил за счет периодического контакта инструмента с материалом; улучшение условий удаления стружки из зоны резания; уменьшение влияния вибраций и динамических нагрузок на процесс формообразования.

Особого внимания заслуживает воспроизводимость результатов, подтвержденная статистической обработкой данных по образцам. Незначительный разброс значений (см. рис. 7) свидетельствует о стабильности процесса при использовании осциллирующих движений.

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей, отмечающих положительное влияние метода обработки с применением колебательных движений на качество поверхности хрупких оптических материалов. Однако в данном случае дополнительно подтверждена эффективность метода на этапе получистовой обработки хрупких оптических материалов.

Перспективным направлением дальнейших исследований представляется оптимизация параметров осциллирующих движений (амплитуды, частоты, траектории) для различных типов хрупких материалов в целях достижения максимального качества поверхности при сохранении высокой производительности обработки.

**Заключение.** Показана эффективность применения осциллирующих движений режущего инструмента для улучшения качества обработки поверхности хрупких оптических материалов. В результате экспериментов установлено, что использование высокочастотных колебаний позволяет достичь значительного уменьшения показателя *PV* и повысить точность обрабатываемых изделий. Полученные результаты свидетельствуют о переходе преимущественно к квазипластичному режиму резания даже для таких труднообрабатываемых материалов, как монокристаллический германий.

Представляется перспективным дальнейшее исследование влияния различных параметров осциллирующих движений. В частности, целесообразно изучить эффекты от использования различных частот в ультразвуковом диапазоне, а также проанализировать влияние амплитуды колебаний на процесс резания.

Для полного понимания физических основ процесса необходимы комплексные исследования, включающие в себя анализ взаимодействия режущей кромки с материалом в условиях высокочастотных колебаний, изучение термомеханических нагрузок и их влияния на структурные изменения обрабатываемого материала.

Практическая реализация метода требует решения ряда технических задач, связанных с проектированием специализированного оборудования, обеспечивающего стабильность параметров колебаний в процессе обработки. Важным аспектом является также разработка систем мониторинга и контроля качества в реальном времени, позволяющих оперативно корректировать параметры обработки для достижения лучшего результата.

Полученные результаты открывают новые возможности для совершенствования технологии обработки хрупких оптических материалов.

Дальнейшее развитие данного направления позволит не только повысить качество, но и расширить линейку обрабатываемых материалов, а также создать более эффективные и экономичные технологические процессы для производства высокоточной оптической техники.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Теплова Т.Б. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности. *Горные науки и технологии*, 2010, № 8, с. 73–88. EDN: MWIVRJ

[2] Захаревич Е.М., Шавва М.А., Лапшин В.В. и др. Ультрапрецизионная алмазная обработка хрупких материалов в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя. *Технологии обработки материалов*, 2016, № 3, с. 60–65. EDN: WKRLYF

[3] Шавва М.А., Лапшин В.В., Грубый С.В. Сверхточная обработка хрупких оптических материалов в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 4, с. 52–59.
DOI: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2016-4-52-59

[4] Козочкин М.П., Солис Н.В. Определение угла сдвига стружки при ультразвуковом точении с помощью высокоскоростной видеосъемки. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2010, № 3, с. 60–65. EDN: MVJCGJ

[5] Сергиев А.П., Владимиров А.А., Швачкин Е.Г. К вопросу о виброрезании. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2015, № 4, с. 60–65. EDN: TVFGJT

[6] Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 10, с. 53–61.
DOI: https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61

[7] Сергиев А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В. и др. Физические основы процесса вибрационного резания при точении. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2017, № 3, с. 94–102. DOI: https://doi.org/10.12737/24626

[8] Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. *J. Manuf. Process*, 2017, vol. 26, pp. 295–322.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027

[9] Shen X.H., Zhang J.H., Yin T.J., et al. A study on cutting force in micro end milling with ultrasonic vibration. *Adv. Mater. Res.*, 2010, vol. 97-101, pp. 1910–1914. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.1910

[10] Adnan A.S., Subbiah S. Experimental investigation of transverse vibration-assisted orthogonal cutting of AL-2024. *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 294–302. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.11.004

[11] Shamoto E., Moriwaki T. Ultaprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, 1999, vol. 48, no. 1, pp. 441–444. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63222-3

[12] Shen X.H., Zhang J., Xing D.X., et al. A study of surface roughness variation in ultrasonic vibration-assisted milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 58, no. 5, pp. 553–561. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-011-3399-y

[13] Nath C., Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting. *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, 2008, vol. 48, no. 9, pp. 965–974.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.01.013

[14] Liu K., Li X.P., Rahman M., et al. A study of the cutting modes in the grooving of tungsten carbide. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2004, vol. 24, no. 5, pp. 321–326.
DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-003-1565-6

[15] Alam K., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V. Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone. *Med. Eng. Phys.*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 234–239.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.10.003

[16] Peng Y., Liang Z., Wu Y., et al. Characteristics of chip generation by vertical elliptic ultrasonic vibration-assisted grinding of brittle materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 62, no. 5-8, pp. 563–568. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-011-3839-8

[17] Shamoto E., Suzuki N., Moriwaki T., et al. Development of ultrasonic elliptical vibration controller for elliptical vibration cutting. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 2002, vol. 51, no. 1, pp. 327–330. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61528-5

[18] Suzuki N., Yan Z., Hino R., et al. Ultraprecision micro-machining of single crystal germanium by applying elliptical vibration cutting. *IEEE International Symposium on MicroNanoMechanical and Human Science*, 2006.
DOI: https://doi.org/10. 1109/MHS.2006.320323

[19] Brehl D.E., Dow T.A. Review of vibration-assisted machining. *Precis. Eng.*, 2008, vol. 32, no. 3, pp. 153–172. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.08.003

[20] Guo J., Suzuki H., Higuchi T. Development of micro polishing system using a magnetostrictive vibrating polisher. *Precis. Eng.*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 81–87.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.07.003

[21] Guo J., Morita S.Y., Hara M., et al. Ultra-precision finishing of micro-aspheric mold using a magnetostrictive vibrating polisher. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 371–374. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.141

[22] Loh B.G., Kim G.D. Correcting distortion and rotation direction of an elliptical trajectory in elliptical vibration cutting by modulating phase and relative magnitude of the sinusoidal excitation voltages. *Proc. Inst. Mech. Eng. B. J. Eng. Manuf.*, 2012, vol. 226, no. 5, pp. 813–823. DOI: https://doi.org/10.1177/0954405411431375

[23] Yin Z., Fu Y., Li H., et al. Mathematical modeling and experimental verification of a novel single-actuated ultrasonic elliptical vibrator. *Adv. Mech. Eng.*, 2017, vol. 9, no. 12.
DOI: https://doi.org/10.1177/1687814017745413

[24] Snyman J.A., Heyns P.S., Vermeulen P.J. Vibration isolation of mounted engine through optimization. *Mech. Mach. Theory.*, 1995, vol. 30, no. 1, pp. 109–118.
DOI: https://doi.org/10.1016/0094-114X(94)00023-E

[25] Chattopadhyay A., Li J., Haozhong G. Coupled thermo-piezoelectric-mechanical model for smart composite laminate. *AIAA J.*, 1999, vol. 37, no. 12, pp. 1633–1638. DOI: https://doi.org/10.2514/2.645

**Образцов Александр Евгеньевич** — аспирант кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Утенков Владимир Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Кузнецов Павел Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Образцов А.Е., Утенков В.М., Кузнецов П.М. Применение осциллирующих движений инструмента для повышения качества обрабатываемой поверхности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 3 (158), с. 102–119. EDN: KBXPCC

## THE USE OF OSCILLATING TOOL MOVEMENTS TO IMPROVE THE QUALITY OF THE MACHINED SURFACE

**A.E. Obraztsov** obrazcow2@mail.ru
**V.M. Utenkov** utencov@bmstu.ru
**P.M. Kuznetsov** kuznetsovpm@bmstu.ru

**BMSTU, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

Processing brittle materials is one of the complex technological operations. Studies addressing this issue focus on finding a technological solution for the mechanical processing of difficult-to-process optical elements. One of the modern solutions is cutting using oscillating movements of the tool's cutting edge. This method allows improving the quality of the resulting surface of optical elements and increasing the thickness of the cut layer. A piezoelectric element or a magnetostrictive transducer is used as a source of oscillating movements. The article examines a microdrive that includes actuators made of piezoceramics. The choice of such a microactuator is determined by the actuator's

**Keywords**

*Oscillating tool motions, brittle materials, microdrive, quality, machined surface, ultrasonic machining, ultrasonic vibrating tool*

energy efficiency, the fast response of the piezoelectric element, low heat generation, and high stiffness and accuracy. A microactuator scheme is proposed, its operation is described, an example of tool movement trajectories is provided, and the design is implemented and tested during the processing of samples. The resulting parts are inspected using high-precision measuring equipment. Based on the results of the experiment, the validity of the applied approach for processing optical elements at a semi-violent operation using oscillating movements is proven. The quality of the machined surface is improved due to a reduction in roughness compared to conventional cutting. Graphs showing the changes in parameters for all samples are provided

Received 09.06.2025
Accepted 19.02.2026
© Author(s), 2026

## REFERENCES

[1] Teplova T.B. The method of quasi-plastic grinding of a solid brittle material intended for getting a surface with nanometeric relief roughness. *Gornye nauki i tekhnologii*, 2010, no. 8, pp. 73–88 (in Russ.). EDN: MWIVRJ

[2] Zakharevich E.M., Shavva M.A., Lapshin V.V., et al. Ultra precision diamond processing of brittle materials in thickness nanometer range of cutting layer. *Tekhnologii obrabotki materialov*, 2016, no. 3, pp. 60–65 (in Russ.). EDN: WKRLYF

[3] Shavva M.A., Lapshin V.V., Grubyy S.V. Ultra-precision machining of brittle optical materials in the nanometer range of the cut layer thickness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2016, no. 4, pp. 52–59 (in Russ.). DOI: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2016-4-52-59

[4] Kozochkin M.P., Solis N.V. Definition of the shear angle of chip at ultrasonic vibration turning by means of high speed video camera. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research], 2010, no. 3, pp. 60–65 (in Russ.).
EDN: MVJCGJ

[5] Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Shvachkin E.G. To the question of vibration cutting. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov], 2015, no. 4, pp. 60–65 (in Russ.). EDN: TVFGJT

[6] Pripisnov Ya.A., Grishina O.I. Modern methods of mechanical processing of composite materials (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 10, pp. 53–61 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61

[7] Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V., et al. Physical principles of vibration cutting in turning. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov], 2017, no. 3, pp. 94–102 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.12737/24626

[8] Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. *J. Manuf. Process*, 2017, vol. 26, pp. 295–322. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027

[9] Shen X.H., Zhang J.H., Yin T.J., et al. A study on cutting force in micro end milling with ultrasonic vibration. *Adv. Mater. Res*., 2010, vol. 97-101, pp. 1910–1914. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.1910

[10] Adnan A.S., Subbiah S. Experimental investigation of transverse vibration-assisted orthogonal cutting of AL-2024. *Int. J. Mach. Tools. Manuf*., 2010, vol. 50, no. 3, pp. 294–302. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.11.004

[11] Shamoto E., Moriwaki T. Ultaprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting. *CIRP Ann.-Manuf. Technol*., 1999, vol. 48, no. 1, pp. 441–444. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63222-3

[12] Shen X.H., Zhang J., Xing D.X., et al. A study of surface roughness variation in ultrasonic vibration-assisted milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2012, vol. 58, no. 5, pp. 553–561. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-011-3399-y

[13] Nath C., Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting. *Int. J. Mach. Tools. Manuf*., 2008, vol. 48, no. 9, pp. 965–974. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.01.013

[14] Liu K., Li X.P., Rahman M., et al. A study of the cutting modes in the grooving of tungsten carbide. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2004, vol. 24, no. 5, pp. 321–326. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-003-1565-6

[15] Alam K., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V. Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone. *Med. Eng. Phys*., 2011, vol. 33, no. 2, pp. 234–239. DOI: https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.10.003

[16] Peng Y., Liang Z., Wu Y., et al. Characteristics of chip generation by vertical elliptic ultrasonic vibration-assisted grinding of brittle materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2012, vol. 62, no. 5-8, pp. 563–568. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-011-3839-8

[17] Shamoto E., Suzuki N., Moriwaki T., et al. Development of ultrasonic elliptical vibration controller for elliptical vibration cutting. *CIRP Ann. Manuf. Technol*., 2002, vol. 51, no. 1, pp. 327–330. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61528-5

[18] Suzuki N., Yan Z., Hino R., et al. Ultraprecision micro-machining of single crystal germanium by applying elliptical vibration cutting. *IEEE International Symposium on MicroNanoMechanical and Human Science*, 2006. DOI: https://doi.org/10. 1109/MHS.2006.320323

[19] Brehl D.E., Dow T.A. Review of vibration-assisted machining. *Precis. Eng*., 2008, vol. 32, no. 3, pp. 153–172. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.08.003

[20] Guo J., Suzuki H., Higuchi T. Development of micro polishing system using a magnetostrictive vibrating polisher. *Precis. Eng*., 2013, vol. 37, no. 1, pp. 81–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.07.003

[21] Guo J., Morita S.Y., Hara M., et al. Ultra-precision finishing of micro-aspheric mold using a magnetostrictive vibrating polisher. *CIRP Ann. Manuf. Technol*., 2012, vol. 61, no. 1, pp. 371–374. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.141

[22] Loh B.G., Kim G.D. Correcting distortion and rotation direction of an elliptical trajectory in elliptical vibration cutting by modulating phase and relative magnitude of the sinusoidal excitation voltages. *Proc. Inst. Mech. Eng. B. J. Eng. Manuf*., 2012, vol. 226, no. 5, pp. 813–823. DOI: https://doi.org/10.1177/0954405411431375

[23] Yin Z., Fu Y., Li H., et al. Mathematical modeling and experimental verification of a novel single-actuated ultrasonic elliptical vibrator. *Adv. Mech. Eng*., 2017, vol. 9, no. 12. DOI: https://doi.org/10.1177/1687814017745413

[24] Snyman J.A., Heyns P.S., Vermeulen P.J. Vibration isolation of mounted engine through optimization. *Mech. Mach. Theory*., 1995, vol. 30, no. 1, pp. 109–118. DOI: https://doi.org/10.1016/0094-114X(94)00023-E

[25] Chattopadhyay A., Li J., Haozhong G. Coupled thermo-piezoelectric-mechanical model for smart composite laminate. *AIAA J*., 1999, vol. 37, no. 12, pp. 1633–1638. DOI: https://doi.org/10.2514/2.645

**Obraztsov A.E.** — Post-Graduate Student, Department of Metal Cutting Machines, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Utenkov V.M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Metal Cutting Machines, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kuznetsov P.M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Metal Cutting Machines, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Obraztsov A.E., Utenkov V.M., Kuznetsov P.M. The use of oscillating tool movements to improve the quality of the machined surface. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 3 (158), pp. 102–119 (in Russ.). EDN: KBXPCC