

8. Galashev A. Y. Computer study of the Raman spectra and infrared optical properties of gallium nitride and gallium arsenic nanoparticles with SiO<sub>2</sub> core and shell // J. Nanopart. Res. – 2014. – N 16. – P. 2351–2368.
9. Режим доступа: <http://www.almazoptics.com/Quartz.htm>. Quartz, crystal quartz, crystalline quartz - Almaz Optics, Inc.
10. Режим доступа: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>. Properties of the III-nitride semiconductors.
11. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN / V.Yu. Davydov, Yu.E. Kitaev, I.N. Goncharuk et al. // Phys. Rev. – V. 58. – N 19. – P. 12899–12907.
12. Harima H. Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – 14. – P. 967–993.
13. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с.
14. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method / O. Yu. Filatov, O. Y. Filatov, U. Heisel et al. // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – V. 7718. – P. 77181J–77181J-9.
15. Filatov O. Y., Poperenko L. V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surface Sci. – 2006. – 253. – N. 1. – P. 163–166.
16. Филатов Ю. Д., Юрчишин О.Я. Моделирование процесса прецизионного формообразования плоских поверхностей // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Сер. Машинобудування. – К. – 2010. – № 58. – С. 241–244.

Поступила 30.05.16

УДК 621. 922. 34: 666. 233: 620.178.16.

**Ю. П. Линенко-Мельников**, канд. техн. наук<sup>1</sup>, **И. Ю. Агеева**, канд. физ.-мат. наук,  
**С. Е. Агеев**, канд. техн. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

<sup>2</sup> *Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина*

## **МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**

*Предложен метод исследования контактного взаимодействия в системе инструмент – заготовка при шлифовании, основанный на применении волоконной оптики. Приведена схема измерительной системы, описана аппаратура и созданные устройства, приведены результаты исследования. Показано, что предложенный метод позволяет фиксировать биение рабочей поверхности алмазного инструмента на холостом ходу и под нагрузкой, наблюдать за состоянием алмазных зёрен при шлифовании. Разработанные устройства обладают высокой чувствительностью к фиксации быстропротекающих процессов в зоне контакта алмазных кругов с заготовкой на созданном экспериментальном стенде для исследования врезного шлифования.*

**Ключевые слова:** алмазный инструмент, шлифование, устройство с использованием волоконной оптики, измерительная система, труднодоступное место, быстрое контактное взаимодействие, экспериментальный стенд.

## **Введение**

Наиболее интересны для исследования быстропротекающие процессы в труднодоступных местах. К таким процессам относится взаимодействие в зоне контакта при шлифовании, особенно, использование алмазного инструмента, так как алмазные зёрна, в отличие от других абразивов, прочно закреплены в металлических связках, обеспечивающих их удержание от выпадения при шлифовании.

Контактное взаимодействие в системе алмазный инструмент – заготовка обусловлено многими факторами, основными из которых являются усилие подачи и площадь контакта, величина зазора и глубина внедрения алмазных зерен при резании, биение рабочей поверхности инструмента, жёсткость системы СПИД. Разработка методов и средств исследования контактного взаимодействия представляет научный и практический интерес и остаётся актуальной задачей. Наиболее полно механика контактного взаимодействия рассмотрена в работе [1], однако приведенные данные нельзя использовать для решения указанной задачи, так как они относятся к статическим условиям. Работы [2]; [3] представляют интерес при теоретическом определении наибольшей допустимой производительности шлифования. Методом, описанным в работе [4], измеряют форму и размеры алмазного круга без его съёма со шлифовального станка, однако при этом о вибрациях и контактном взаимодействии можно судить лишь косвенно. Представляет интерес работа [5], где предложен метод определения количества режущих зёрен по количеству тепловых импульсов, полученных при шлифовании терморпары. Здесь отражается динамическое взаимодействие в системе, но не фиксируется взаимное перемещение заготовки и круга.

## **Методика исследований**

Разработанный нами метод основан на применении волоконной оптики [6]; [7]. Световоды позволяют эффективнее использовать оптический диапазон электромагнитных колебаний в практике точного эксперимента. Способность света отражаться от твёрдых тел с изменением качеств вследствие преломления и поглощения делает эту область электромагнитных колебаний основным носителем воспринимаемой исследователем информации. Световоды позволяют также локализовать находящийся в труднодоступных местах изделий и механизмов объект изучения и передать сведения о кинетике протекающих процессов в удобное для регистрации место.

В рассматриваемом случае разработали метод и устройство для исследования поверхности алмазного круга с заготовкой, а также для исследования биения рабочей поверхности вращающегося инструмента под нагрузкой и без неё. При этом торцы световодов шлифовали вместе с обрабатываемой заготовкой или располагали на заданном расстоянии от поверхности круга. В первом случае неизбежен скол торцов световодов. Результаты испытания макета разработанного устройства показали, что несмотря на произвольное разрушение торцов световодов при шлифовании датчика алмазными зёрнами углы сколов не превышали допустимых значений, так как отношение полезного сигнала к помехам составляло 2:1.

## **Разработанные устройства**

Принципиальная схема первого устройства для исследования кинетики взаимодействия поверхности вращающегося объекта (алмазный круг) с заготовкой, а также микроперемещений рабочей поверхности инструмента в радиальном направлении показана на рис. 1.

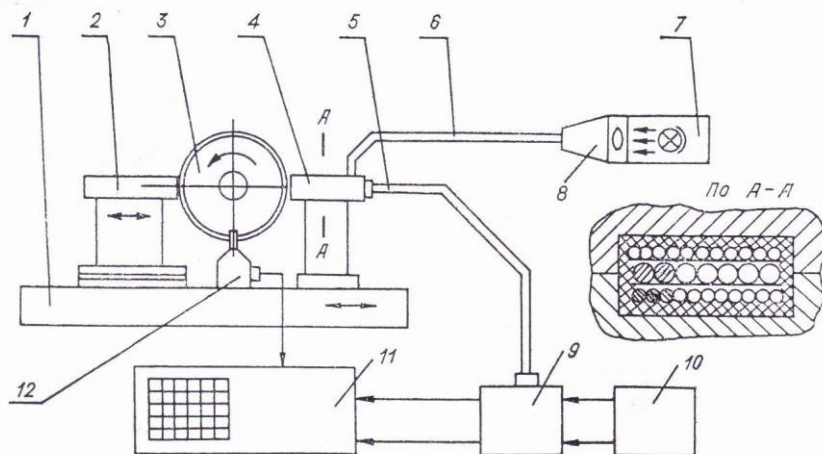


Рис. 1. Схема устройства с использованием волоконной оптики: 1 – стол станка; 2 – заготовка; 3 – алмазный круг; 4 – образец датчик микро перемещений; 5, 6 – жгуты световодов; 7, 8 – источник и усилитель света; 9, 10 – ФЭУ и источник его питания; 11, 12 – осциллограф и прерыватель для его запуска

Одним из важнейших элементов устройства является образец: датчик с уложенными внутри в три слоя световодами, вытянутыми в одну линию по ширине круга (сечение А–А на рис. 1). Воспринимающий отражённый свет центральный слой световодов выполнен из волокон диаметром 30 мкм со световой защитой от боковых слоёв световодов диаметром 20 мкм, подающих световой поток в рабочую зону. Как показали испытания макета, вторым важным элементом является источник света, световой поток от которого необходимо увеличить на порядок, так как отражённый свет с учётом потерь в жгуте слишком слаб. Применение мощных киноламп (300 Ватт) не привело к положительным результатам вследствие сильного нагрева и рассеяния светового потока. Положительный результат получили при использовании усилителя светового потока – фотона из конических световодов с соотношением площадей торцов, равным 10. Для перевода световой энергии в электрическую применяли ламповый многоканальный фотоэлектронный умножитель ФЭУ с блоком питания от высоковольтного источника. От источника света по световодам поток энергии передаётся в зону контакта с кругом. Отраженный от рабочей поверхности инструмента световой поток по отводящим световодам попадает в блок ФЭУ, соединенный с быстродействующим лучевым осциллографом С8-13. Электрические сигналы, усиленные в осциллографе, который переключается на режим запоминания, фиксируются на его светящемся экране. Для получения идентичной информации и её последующей расшифровки необходим отсчет от какой-либо точки на поверхности круга. С этой целью на станке установлен прерыватель для внешнего запуска горизонтальной развёртки осциллографа, а также образования на экране метки после каждого оборота инструмента.

Принципиальная схема второго устройства показана на рис. 2. Это устройство создали для исследования более мелких структур поверхности быстровращающегося объекта, а именно, износа и разрушения алмазного зёрна инструмента при шлифовании.

На рис. 2 показана схема устройства объекта 1 (алмазный круг), закреплённого на держателе 2 (вал с механизмом вращения). На этом же держателе жестко закреплён экран 3 со щелью 4, обеспечивающий синхронизацию момента подачи светового импульса независимо от крутильных колебаний и вибраций вращающегося объекта. Наблюдали за микроучастком 5 (алмазным зерном или группой зерен на рабочей поверхности круга) с помощью микроскопа 6, оптическая ось которого направлена на исследуемый микроучасток.

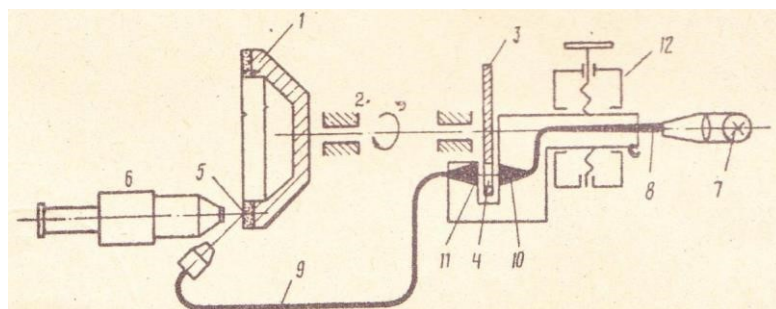


Рис. 2. Схема устройства для исследования поверхности вращающегося объекта. 1 – алмазный круг; 2 – шпиндель станка; 3 – экран со щелью; 4 – алмазное зерно; 5 – группа зёрен; 6 – микроскоп; 7 – источник света; 8, 9 – жгуты световодов; 10, 11 – торцы световодов возле щели; 12 – механизм перемещения

Источник 7 света оптически связан с исследуемым микроучастком 5 через первый жгут световодов 8, щель 4 в экране и второй жгут световодов 9. Торцы 10 и 11 первого и второго жгутов световодов могут перемещаться с помощью

механизма 12, что позволяет наблюдать разные точки на поверхности объекта.

механизма 12, что позволяет наблюдать разные точки на поверхности объекта.

### Результаты исследований и их обсуждение

При испытании устройства на оправке шпинделя станка закрепляли алмазный круг прямого профиля АС6 250/200-МО20-100 размером 200x30x3x76 мм. Его радиальное биение измеряли индикатором часового типа (с ценой деления 1 мкм) непосредственно на станке путём поворота круга на равные углы, (рис. 3,а).

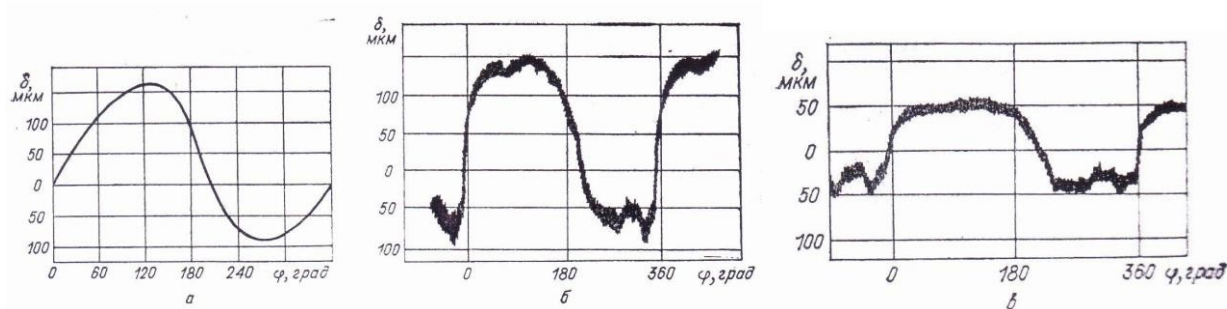


Рис. 3. Осциллограммы биения рабочей поверхности круга на станке: а – измеренное индикатором часового типа; б – при вращении на холостом ходу (1600 об/мин); в – под нагрузкой, при шлифовании

Затем датчик микроперемещений 4 устанавливали на расстоянии 0,2 мм от рабочей поверхности круга и на экране осциллографа в виде развёртки записывали кривую её радиального перемещения при частоте вращения инструмента 1600 об./мин (рис. 3, б). Следующую запись получали при контакте круга с заготовкой и её шлифовании (рис. 3, в); результаты опытов показали высокую точность измерений. Так, при перемещении образца-датчика в радиальном направлении относительно поверхности круга на 0,1 мм уровень кривой развёртки на экране осциллографа вертикально изменяется на 50 мм.

Многократная запись этой кривой при постоянных оборотах шпинделя продемонстрировала идентичные результаты. С изменением частоты вращения круга с 31 до 1600 об./мин и, соответственно, линейной скорости с 0,41 до 16,70 м/с зафиксировано изменение формы и уровня кривой развёртки, что обусловлено появлением дополнительных колебаний быстровращающейся массы шпинделя, оправки и инструмента. Кривые на рис. 3 носят общий характер. В то же время, кривая на рис. 3,б отличается от кривой на рис. 3, а, так как записана в динамике при продолжительности одного оборота круга 0,038 с. Кривая представляет собой форму и уровень развёртки, усреднённые по ширине инструмента. Существенный уровень кривой биения изменяется при шлифовании заготовки, установленной со стороны, диаметрально противоположной датчику (рис. 3, в). В этом случае радиальное биение, зависящее от приложенной нагрузки, состояния подшипников шпинделя и жёсткости системы СПИД, уменьшилось вдвое.

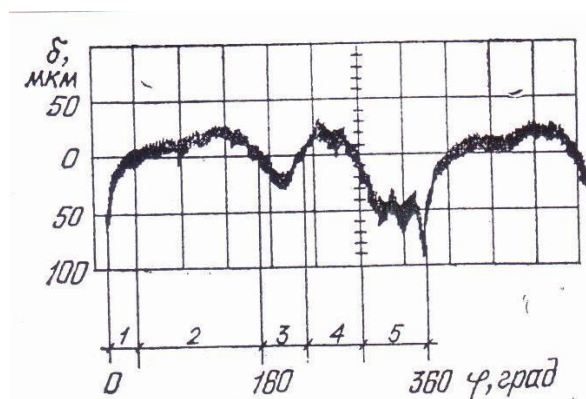


Рис. 4. Осциллограмма перемещения в зоне контакта образца датчика с рабочей поверхностью круга при шлифовании образца вместе со световодами

системы с наиболее плотным контактом в ней (7 мс) и, наконец, зазор между образцом датчика и кругом в течение 7 мс без нагрузки.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что рабочая поверхность алмазного круга нагружена крайне неравномерно. Съём материала осуществляется не всей рабочей поверхностью, а только частью (55%). Это приводит к снижению производительности процесса шлифования и повышению силовой нагрузки на отдельные участки 2 и 4 круга на рис. 4. На этих участках стружка от легированной стали вдавливалась в связку круга, а при попадании на алмазные зёрна обволакивала их. При срыве таких «чешуек» с поверхности круга на них видны оставшиеся от алмазных зёрен отверстия (рис. 5). При скоплении шлама в межзёрненном пространстве его объём уменьшался, и снижалась производительность шлифования.

На втором этапе испытаний фиксировали перемещения в зоне контакта образца датчика с рабочей поверхностью круга. Отличие заключалось в том, что образец шлифовали вместе со световодами. Получили кривую (рис. 4), отражающую колебания в зоне контакта. На ней выделяются пять характерных участков, которым соответствует перемещение образца на круг и врезание в течение 5 мс; сжатое состояние системы (съём припуска в течение 14 мс); кратковременная (5 мс) разгрузка зоны контакта; повторное сжатие

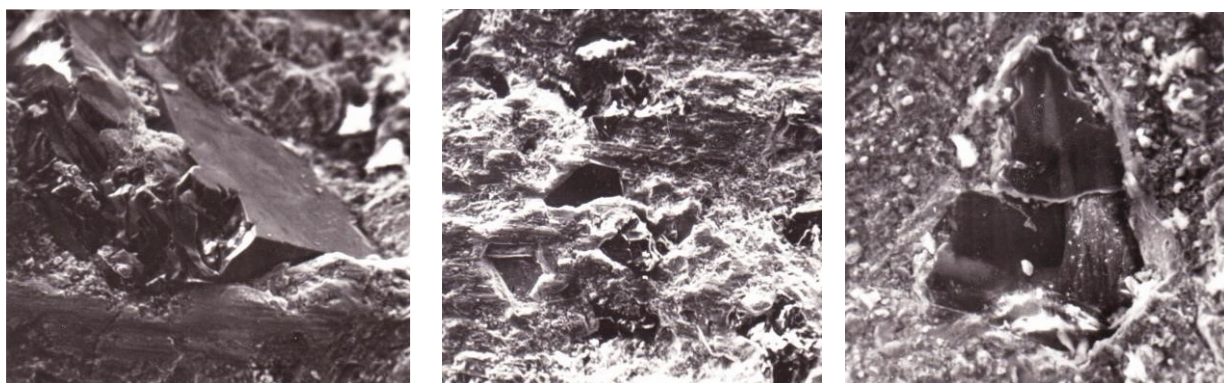


Рис. 5. Общий вид: а – алмазного зерна в стальной «чешуйке» на рабочей поверхности алмазного круга; б – отверстия от алмазных зёрен в стальной «чешуйке»; в – алмазного зерна в стальной «чешуйке», снятой с рабочей поверхности круга;  $\times 110$

С помощью устройства, показанного на рис. 2 визуально наблюдали за состоянием алмазных зёрен и рабочей поверхностью связки алмазного круга. Во время шлифования твёрдого сплава, твёрдость которого примерно в 6 раз ниже твердости алмаза, наблюдали срезание зёрен WC; при этом проявлялись микросколы рабочей поверхности алмазных зерен (рис. 3, а), когда рабочая поверхность выступала из связки более чем наполовину высоты или вместе с окутавшей её «чешуйкой» стали (рис. 3, в). Последнее проявлялось наиболее интенсивно после высыхания поверхности круга. Соль, растворенная в СОЖ, выкристаллизовывалась между «чешуйкой» и связкой круга. При этом «чешуйка» отделялась от связки круга вместе с алмазным зерном, что способствовало увеличению расхода алмазов.

Для уменьшения расхода инструмента целесообразно вводить в СОЖ (2% нитритно-нитратный водный раствор) компоненты, способствующие уменьшению трения между связкой круга и обрабатываемым материалом, как, например, кремнийорганическую

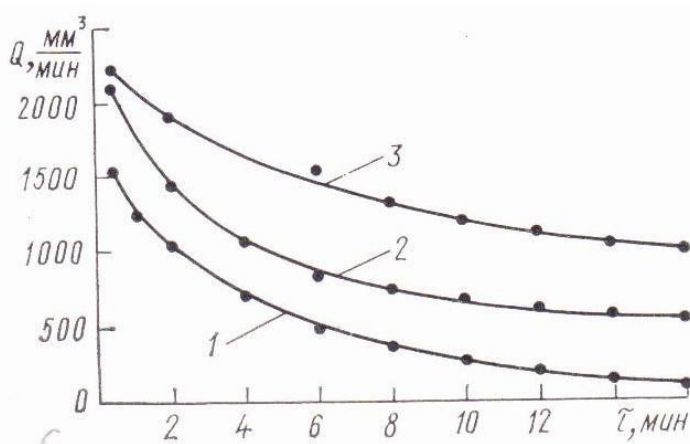


Рис. 6. Зависимости производительности от времени шлифования твёрдого сплава BK15 алмазным кругом без добавок в СОЖ (1) с добавлением парафина (2) и жидкости ГКЖ-94 (3);  $v = 21$  м/с;  $P = 3$  МПа

жидкость ГКЖ-94, сульфид молибдена MoS<sub>2</sub>, нитрид бора BN, парафин, графит, тальк. Лучшие результаты получили при использовании жидкости ГКЖ-94. Во всех случаях при шлифовании твёрдого сплава BK15 производительность постепенно снижалась вследствие засаливания и неэффективной очистки рабочей поверхности круга (рис. 6). Как видно на рис. 4 при входе круга в контакт с заготовкой и выходе из нее происходит динамичное взаимное перемещение в зоне контакта. Это обеспечивает

интенсивную очистку круга от засаливания, что более всего проявляется при врезном шлифовании. Для проведения опыта создали экспериментальный стенд, кинематическая схема которого показана на рис. 7.

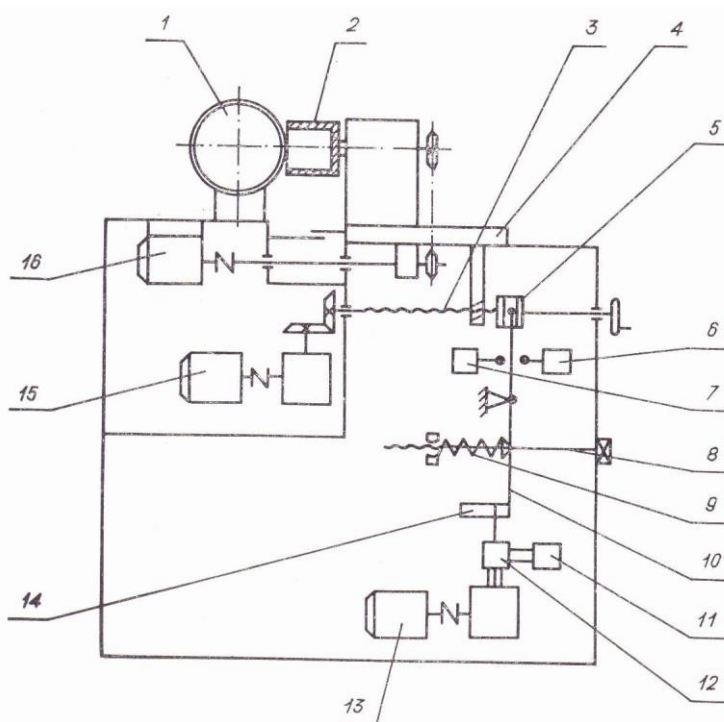


Рис. 7. Кинематическая схема экспериментального стенда: 1 – круг; 2 – заготовка; 3 – ходовой винт; 4 – стол; 5 – обойма; 6, 7 – концевые выключатели; 8, 9 – механизм регулирования усилия подачи; 10 – рычаг; 11 – электромагнит; 12 – муфта; 13 – привод прерывистой подачи; 14 – кулачок; 15 – привод подачи стола; 16 – привод вращения заготовки

Исследовали влияние непрерывной и прерывистой подачи при различной продолжительности времени холостого вращения круга. В механизм упругой подачи от пружины стенда введено устройство, автоматически регулирующее заданное усилие подачи заготовки на круг [3]. Стенд также снабжен устройством, обеспечивающим как постоянное, так и прерывистое контактирование круга с заготовкой при регулируемой продолжительности процесса [4]. На стенде можно устанавливать как обычные, так и трубчатые заготовки, вращающиеся с заданной частотой и существенно сокращающие затраты времени на исследование.

Усилие подачи регулировали на стенде винтом от 30 до 2000 Н. Прерывистого шлифования с кратковременным отведением заготовки от круга достигали посредством реле времени, установленного на пульте и выдающего команды на электромагнит. Затем включается однооборотная муфта, которая через кулачок, рычаг и обойму воздействует на ходовой винт и отводит его вместе со столом и заготовкой на установленное расстояние от круга. Скорость вращения кратковременных отводов заготовки составляла  $30 - 0,1 \text{ мин}^{-1}$ . Частота вращения трубчатой заготовки от двигателя постоянного тока изменялась бесступенчато с 10 до 1000 об./мин.

Для исследований изготовили круги 1A1 200X X15X3X75 из алмазов AC6 160/125 100 %-ной концентрации на связках: M1-10 (M04- 2), MO16 и M2-01 (M1). Обработывали кольцевую заготовку, наплавленную порошковой лентой ПЛ-АН111 по технологии Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, при постоянной и прерывистой подаче с кратковременным отведением заготовки от круга через 5 с. Режущие свойства кругов определяли при усилии подачи 300 Н и эффективной мощности 2,6 кВт. Частота вращения алмазного круга составляла 2300 об./мин, заготовки – 30 об./мин. (рис. 8).

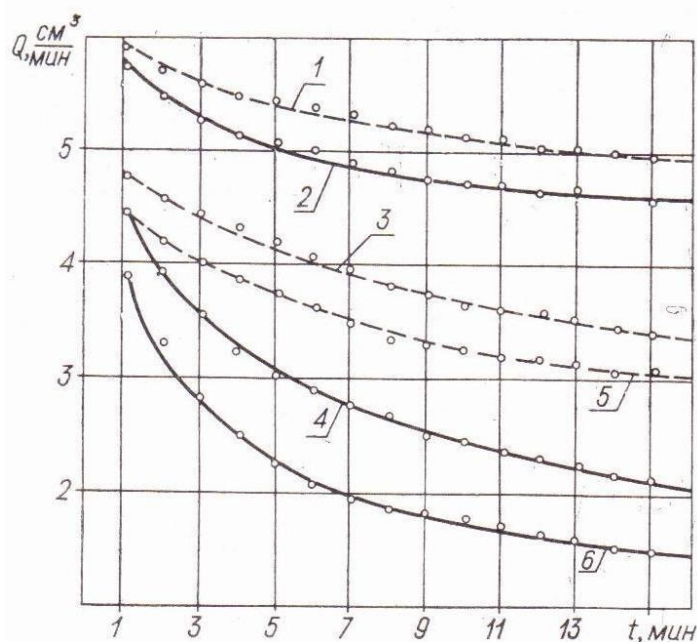


Рис. 8. Зависимости производительности шлифования от времени постоянного (—) и прерывистого (-----) контактирования кругов на связках: M1-10 (1, 2), MO16 (3, 4) и M2-01 (5, 6) с заготовкой. Усилие подачи 300 Н

Была достигнута следующая удельная энергоёмкость процесса шлифования алмазными кругами на связках при постоянной и прерывистой подаче: M1-10 – соответственно 33,6 и 31,2;

MO16 – 57,6 и 42,0

M2-01 – 76,8 и 46,8.

Результаты наблюдения под бинокулярным микроскопом показали, что количество режущих зёрен на рабочих поверхностях алмазных кругов и их выступание из связки не одинаково, что обусловлено разной удерживающей способностью связок и засаливанием инструмента. Рабочая поверхность круга на связке M1-10 (M04-2) имела меньше участков, покрытых частицами обрабатываемого материала, по сравнению с кругом на связке M2-01 (M1), что и обуславливает его более высокие режущие свойства.

### Выводы

1. Приведенные данные свидетельствуют, что рабочая поверхность алмазного круга нагружена крайне неравномерно. Съём материала осуществляется не всей рабочей



поверхностью, а только частью (55%). Это приводит к снижению производительности процесса и повышению силовой нагрузки на отдельных участках круга.

2. Разработанный метод, основанный на использовании волоконной оптики, обладает высокой чувствительностью для фиксирования кратковременных быстропротекающих процессов, что позволяет исследовать кинетику контактного взаимодействия в системе инструмент – заготовка при шлифовании в зависимости от различных факторов.

3. Для повышения производительности врезного шлифования необходимо в состав СОЖ добавлять такие компоненты, как кремний, органическая жидкость ГКЖ- 94, дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$ . При этом снижается налипание «чешуек» стали на связку круга и возможно использование прерывистой подачи для интенсивного очищения круга от шлама.

4. При алмазном врезном шлифовании обеспечивается наибольшее количество алмазных зерен в работе и высокая производительность шлифования. Для очищения от засаливания эффективно прерывистое контактирование с заготовкой.

*Запропоновано метод дослідження контактної взаємодії в системі інструмент – заготівка при шліфуванні, що базується на використанні волоконної оптики. Наведено схему вимірювальної системи, описано апаратуру та створені устрої, подано результати дослідження. Показано, що запропонований метод дає змогу фіксувати биття робочої поверхні алмазного інструменту на холостому ході та з навантаженням, спостерігати за станом алмазних зерен при шліфуванні. Розроблені пристрої мають високу чутливість для фіксування швидкоплинних процесів у зоні контакту алмазних кругів із заготовкою на створеному експериментальному стенді для дослідження врізного шліфування.*

**Ключові слова:** алмазний інструмент, шліфування, пристрій із застосуванням волоконної оптики, вимірювальна система, важкодоступне місце, швидка контактна взаємодія, експериментальний стенд.

#### RESEARCH METHOD KINETICS OF FAST PROCESSES WITH THE USE OF FIBER OPTICS

*A method based on usage of fibre optics is suggested for studying of contact interaction in a system tool – half-finished product during grinding. The schema of measuring system is produced, equipment and generated tools are described, results of investigation are presented. It is demonstrated that given method allows to fix the biting of operating surface of diamond tool during idle running and been loaded, to observe the conditions of diamond grains during grinding process. The developed equipment has high sensitivity to fix fast process in area of contact between diamond circle and half-finished product in the test bench projected for exploration of cutting-in grinding.*

**Key words:** diamond tools, grind process, tools having fibrous optics components, measuring system, hard-to-get-to places, quick contact interaction, test bench.

#### Литература

1. Чеповецкий И. Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. – К.: Наук. думка, 1978. – 219 с.
2. Линенко-Мельников Ю. П., Мишнаевский Л. Л.-мл. Теоретические исследования наибольшей допустимой величины производительности процесса алмазного шлифования // Резание и инструмент. – Х.: ХПИ, 1989. – С. 87–91.
3. Линенко-Мельников Ю. П., Мишнаевский Л. Л.-мл. Анализ изменения величины выступления алмазных зёрен на работающем шлифовальном круге // Сверхтвёрдые матер. – 1989. – № 2. – С. 40–44.

4. Бейли М. В., Секстон Дж. С. Методика измерения износа и формы круга в рабочих условиях // Сверхтвёрдые матер. – 1982. – № 3. – С. 40–42.
5. Редько С. Г. Количество абразивных зёрен шлифовального круга, участвующих в резании // Станки и инструмент. – 1960. – С.10–12.
6. Кубяк Р. Ф. Волоконная оптика в науке и технике. – К.: Знания, 1971. – 48 с.
7. Гарф М. Э., Кубяк Р. Ф. Использование волоконной оптики для наблюдения за развитием усталостных трещин // Пробл. прочности. – 1973. – № 5. – С. 105–107.
8. А.с. 1163226, СССР; Заявка № 3602475/24–25 МПК G 01 N 21 /89 (1983, 10). Устройство для исследования поверхности вращающегося объекта / Ю. П. Линенко-Мельников, Р.Ф. Кубяк. – Заявл. 10.06.83; Оpubл. 23.06.85; Бюл. № 23.
9. А.с. 963816, СССР, МКИ<sup>4</sup> В 24.7.00. Станок для врезного глубинного упругого шлифования / В. Е. Окунь, В. В. Евдокименко, Г. И. Рудник, Ю. П. Линенко-Мельников. – Оpubл. 07.10.72; Бюл. № 37.
10. А.с. 931393 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 24.7.02. Станок для врезного глубинного шлифования алмазно-абразивным инструментом / Г. И. Рудник, Ю. П. Линенко-Мельников, В. В. Евдокименко. – Оpubл. 30.05.82, Бюл. № 20.
11. Линенко-Мельников Ю. П., Рудник Г. И. Влияние характера контактирования на производительность врезного алмазного шлифования // Сверхтвёрдые матер. – 1991. – № 3. – С. 47–50.

*Поступила 27.05.16*