

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.01: 621.923.9

DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-320-331



# **Исследование метода шлифования сапфировых** труб с применением двух шлифовальников

# © И.В. Савицкий, В.А. Войтенко

Луганский государственный университет им. Владимира Даля, г. Луганск, Луганская Народная Республика

**Резюме:** Цель – изучить закономерности формирования микрорельефа, распределения и величины остаточной шероховатости внутренней и внешней поверхностей сапфировой трубы во время ее шлифования свободно вращающимися шлифовальными конусами при помощи моделирования. Для изучения абразивной обработки сапфировой трубы использовался метод численного моделирования при помощи программного алгоритма, выполненного в компьютерной среде MATLAB. Предложена математическая модель взаимодействия рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемого изделия применительно к двухстороннему шлифованию сапфировых труб свободно вращающимися шлифовальными конусами со связанным абразивом. Данная модель учитывает случайный характер распределения зерен абразива по размерам и форме, хаотичность их размещения в зоне контакта с поверхностью образца, отражая тем самым закономерности их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью при различных комбинациях параметров процесса шлифования. Установлено, что наиболее интенсивный линейный съем материала наблюдается на начальных стадиях шлифования. На внутренней стенке трубы отмечается больший темп удаления объема материала по сравнению с внешней при скорости вращения 2500 об/мин, зернистости абразива 26 мкм, конусности инструментов 1:8 и 1:5 и силе их прижатия к поверхности заготовки на единицу площади около 10 кПа. Выявлено, что остаточная шероховатость после 300 мин обработки имеет неравномерное распределение вдоль оси вращения заготовки с явно выраженным максимумом в ее центральной части, составляющем 64,8 мкм на внешней стенке заготовки и 49,14 мкм - на внутренней. Разработанная математическая модель позволяет исследовать закономерности формирования микрорельефа, распределения и величины остаточной шероховатости для различных условий шлифования, что в дальнейшем дает возможность оптимально подобрать режим обработки и механическую нагрузку на абразивный инструмент. Данная модель также дает возможность определять скорость линейного съема материала и требуемое время шлифования.

**Ключевые слова:** лейкосапфир, шлифование, шлифовальный конус, связанный абразив, образующая профиля, микрорезание

**Для цитирования:** Савицкий И.В., Войтенко В.А. Исследование метода шлифования сапфировых труб с применением двух шлифовальников. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2021. Т. 25. № 3. С. 320–331. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-320-331

# Studying a grinding method of sapphire pipes using two grinders

## Ivan V. Savitsky, Vladimir A. Voytenko

Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Lugansk People's Republic

Abstract: This paper examines the thermophysics of a drilling process of polymeric composite materials such as carbon-fibre-reinforced plastics (CFRP) and fibreglass by tubular diamond drill bits. Features of the COMSOL Multiphysics engineering software package were used. We employed Fourier heat equations, which express the intensity of heat gain by a mobile source in a moving coordinate system. The research was performed using the proprietary method of modelling spatial thermal action upon drilling polymer composite materials (fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastics) in the COMSOL Multiphysics software environment. A tubular diamond drill bit with a diameter of 10 mm with two slots was chosen as a model cutting tool. Solid plates with a thickness of 5.5 mm made of layered fibrous polymer composite materials (fibreglass, carbon-fibre-reinforced plastic) were used as a preform. As a result of computer calculations, we obtained temperature fields of fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastic during diamond drilling with the tubular tool. When studying the thermal behaviour of fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastics, maximum temperature fields were located. The study revealed that the temperature reaches 413.6 K and 448.7 K during CFRP and fibreglass drilling, respectively. It was shown that the distance of heat transfer from the edge of the hole into the preform was 6.42 and 6.40 mm for CFRP and fibreglass, respectively. A method of modelling the thermal effects when cutting polymer composite

materials developed in the COMSOL Multiphysics environment allows complex analytical calculations of temperatures induced by drilling to be simplified. In addition, it helps avoid overheating of a preform during drilling, allows the depth of heat distribution inside the preform from the edge of the formed hole in different polymer composite materials to be assessed. These measures lead to increasing the machining quality of polymer composite materials.

Keywords: leucosapphire, grinding, grinding cone, bonded abrasive, profile generatrix, microcutting

**For citation:** Savitsky IV, Voytenko VA. Studying a grinding method of sapphire pipes using two grinders. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):320–331. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-320-331

### **ВВЕДЕНИЕ**

Лейкосапфир является востребованным материалом в различных производственных областях, благодаря его физикомеханическими свойствам, таким как высокая химическая инертность, биологическая пассивность, механическая прочность, высокая температура плавления, достаточная прозрачность и устойчивость одновременно к УФ-излучению, а также диэлектрическим особенностям [1].

Монокристаллический сапфир находит свое применение в качестве материала для труб, которые в дальнейшем используются во многих отраслях промышленности и науки. Например, в конструкцию исследовательских реакторов и ядерных энергетических установок входят металлокерамические узлы в виде труб и змеевиков, которые удобно выполнять из лейкосапфира, благодаря вышеперечисленным достоинствам данного материала.

Сапфировые трубы получают методом Степанова путем вытягивания через формообразователь или изготавливают из монокристаллов, выращенных методом Киропулоса. Выбор технологии чаще всего зависит от требуемых размеров изделия. Так, например, методом Степанова получают трубы небольших диаметров до 40 мм. Их минимальный внутренний диаметр может быть достаточно узким и составлять около 800 мкм, что полезно при изготовлении прозрачных капилляров. Из кристаллов, полученных методом Киропулоса, вырезают крупногабаритные трубы диаметром до 250 мм.

Обычный способ Степанова, применяемый для выращивания сапфировых труб с малым внутренним диаметром из расплава, связан с определенными затруднениями, заключающимися в поддержании постоянного

диаметра внутреннего отверстия. Формообразователь, в котором внутренняя полость создается тонким цилиндрическим стержнем, позволяет стабилизировать внутренний диаметр трубки, однако в данном случае важным фактором является вероятностный характер изменения температуры внешней среды. Это влечет за собой отклонения формы изделия от заданных параметров, а в худшем случае захват кристаллом формообразующего стержня либо обрыв мениска. Более применимым для получения сапфировых труб большого диаметра является способ некапиллярного формообразования (NCS - от англ. Noncapillary Shaping), который был разработан для выращивания высококачественных профилированных кристаллов с большой площадью поперечного сечения [2].

Лейкосапфировые трубки нашли свое применение в PVT-установках (PVT - фотовольтаика, от англ. photovoltaics), предназначенных для термофизических исследований, и используются в виде прозрачных цилиндров при большом давлении и высокой температуре. Прозрачные цилиндры из лейкосапфира применяются в вакуумной и плазменной электронике, в частности, в газоразрядных лампах. служащих источниками ИКизлучения в оптико-электронных системах [3-5]. Данные системы работают под высокими удельными электрическими нагрузками и требуют интенсивного отвода тепла [6], а их требуемый диапазон излучения лежит, как правило, в пределах длин волн от 0,2 до 6 мкм. Прозрачность лейкосапфира в данном диапазоне достигает 88%. Так как газоразрядные лампы могут эксплуатироваться в заведомо неблагоприятных условиях, надежность и стабильность их характеристик не должны зависеть от окружающей среды, например, если предполагается, что лампа



должна использоваться при повышенных механических или химических воздействиях. Кроме того, токовые выводы должны сохранять герметичность в зоне соединения металла с сапфировой прозрачной стенкой, что, в свою очередь, зависит от качества обработки ее поверхности.

Таким образом, характеристики электронной аппаратуры, в которой присутствуют функциональные элементы, использующие в своей конструкции сапфировые изделия в форме трубок, зависят также от качества исполнения этих изделий, в том числе и от микрорельефа поверхности, полученного в результате шлифования и доводки [7].

Как известно, в традиционных методах обработки тел вращения процесс шлифования сопровождается поперечной подачей абразивного инструмента с приложением определенного механического усилия [8–13], необходимого для достижения требуемой глу-

бины контакта. При этом в кристалле неизбежно возникают напряжения и деформации, что в целом может отрицательно повлиять на качество готового изделия. Подобное воздействие частично ослабляется в случае двухстороннего шлифования при одновременном использовании двух абразивных инструментов, одинаково прижимающихся к заготовке с внутренней и внешней сторон [14]. Стоит отметить, что введение дополнительного вращающего привода усложняет конструкцию оборудования, а также приводит к усилению нежелательных вибраций и необходимости контролировать синхронное вращение двух шлифовальных инструментов [15, 16]. Данная проблема решается с использованием ранее предложенного метода, основанного на применении свободно вращающихся шлифовальных конусов [17], как изображено на рис. 1.

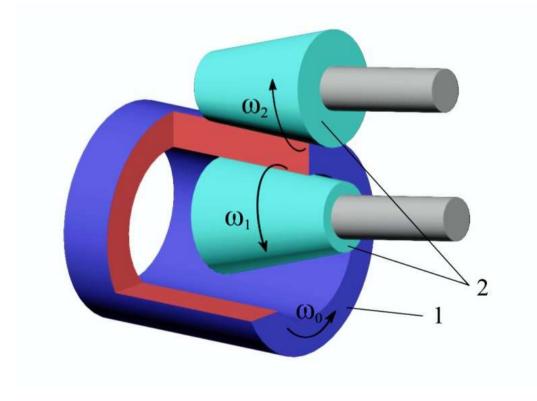


Рис. 1. Схема двухстороннего шлифования сапфировой трубы (1) абразивным инструментом (2) конической формы
Fig. 1. Diagram of twin grinding of a sapphire tube (1) by a cone shape abrasive tool (2)

•

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.

Сапфировая заготовка приводится во вращение внешним приводом с круговой частотой  $\omega_0$ . Вращение абразивных конусов осуществляется за счет сил трения и микрорезания, возникающих в зоне контакта с обрабатываемым изделием. Их средние круговые частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  зависят от радиуса их оснований, угла конусности и радиуса заготовки, внутреннего и внешнего, соответственно.

Такой способ шлифования является перспективным с точки зрения качества получаемых изделий, энергоэффективности и простоты оборудования, но требует дополнительных теоретических исследований.

Целью данной работы является изучение закономерностей формирования микрорельефа, распределения и величины остаточной шероховатости внутренней и внешней поверхностей сапфировой трубки при помощи математической модели взаимодействия рабочих поверхностей шлифовальных конусов и обрабатываемого изделия.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТОРОННЕГО ШЛИФОВАНИЯ САПФИРОВЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КОНУСОВ

Рабочая поверхность шлифовального инструмента имеет зернистую структуру, а поверхность обрабатываемой трубки — начальную шероховатость, которая характеризуется величиной  $R_z$ , средней высотой неровностей профиля. Контакт между шлифовальным конусом и заготовкой осуществляется посредством сцепления выступов материала и зерен абразива, находящихся в некоторой ограниченной области с площадью S, на которую действует давление W, обусловленное силой прижатия F инструмента к обрабаты-

ваемой детали [18], как показано на рис. 2.

В случае использования двух шлифовальных конусов, прижимающихся к заготовке с силами  $F_1$  и  $F_2$ , минимум механического напряжения, оказываемого на кристалл, достигается при соблюдении условия:  $F_1 = -F_2$ . Давление в области прижатия шлифовальных конусов к заготовке можно рассчитать согласно выражениям:

$$W_1 = F_1/S_1;$$
 (1)

$$W_2 = F_2 / S_2, (2)$$

где  $S_1$ ,  $S_2$  — площади контакта шлифовальных конусов с заготовкой.

Шлифовальный инструмент имеет форму усеченного конуса с радиусами верхнего и нижнего основания  $R_1$  и  $R_2$ , соответственно, и высотой h. Его конусность в общем случае определяется выражением:

$$k = 2(R_2 - R_1)/h.$$
 (3)

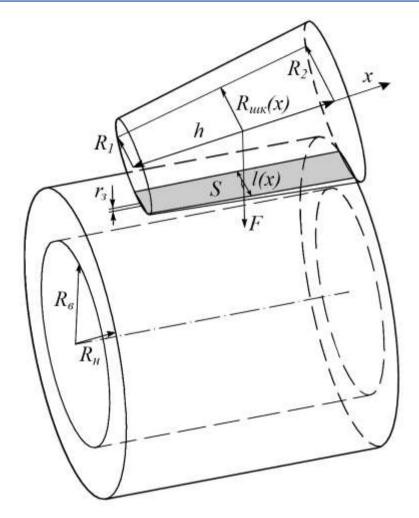
Площадь элементарного участка области контакта шлифовальных конусов с заготовкой при малой конусности может быть приблизительно найдена как произведение элементарной высоты  $\Delta h$  на хорду l, образованную пересечением окружностей поперечного сечения заготовки и шлифовальника:

$$\Delta S \approx l \cdot \Delta h$$
. (4)

Задавшись геометрическими параметрами внешнего и внутреннего шлифовального конуса и средним радиусом зерен абразива  $r_3$ , величины хорд для внешней и внутренней сторон трубки будут находиться из соотношений [14]:

$$l_1(x) = 2 \sqrt{R_{\text{ШКH}}^2(x) - \left(R_{\text{ШКH}}(x) - r_3 \left(1 - \frac{2R_{\text{ШКH}}(x) - r_3}{2(R_{\text{ШКH}}(x) - r_3 + R_{\text{H}} + R_z)}\right)\right)};$$
 (5)

$$l_2(x) = 2 \sqrt{R_{\text{IIIKB}}^2(x) - \left(R_{\text{IIIKB}}(x) - r_3\left(1 + \frac{2R_{\text{IIIKB}}(x) - r_3}{2(r_3 + R_B - R_{\text{IIIKB}}(x) - R_Z)}\right)\right)},$$
 (6)



Puc. 2. Схема взаимодействия шлифовального конуса с поверхностью заготовки Fig. 2. Interaction diagram of the grinding cone and the workpiece surface

где  $R_{\rm H}$  и  $R_{\rm B}$  — наружный и внутренний радиусы заготовки, радиусы сечений шлифовальных конусов  $R_{\rm IIIKH}(x)$ ,  $R_{\rm IIIKB}(x)$ :

$$R_{\text{ШКH}}(x) = R_{1\text{H}} + k_1 x/2;$$
 (7)

$$R_{\text{ШКB}}(x) = R_{1\text{B}} + k_2 x/2,$$
 (8)

где переменная x является аргументом

функций  $R_{\text{шкн}}(x)$  и  $R_{\text{шкв}}(x)$  и определена в диапазоне от 0 до h на координатной оси, отложенной вдоль высоты конусов,  $R_{1\text{н}}$  и  $R_{1\text{в}}$  – радиусы одного из оснований наружного и внутреннего конусов, соответствующие точке отсчета x=0.

Таким образом, площадь области контакта абразивного инструмента с поверхностью заготовки для внешней и внутренней сторон:

$$S_1 = 2 \int_0^h \sqrt{R_{\text{ШКH}}^2(x) - \left(R_{\text{ШКH}}(x) - r_3 \left(1 - \frac{2R_{\text{ШКH}}(x) - r_3}{2(R_{\text{ШКH}}(x) - r_3 + R_{\text{H}} + R_z)}\right)\right)} dx; \tag{9}$$

$$S_2 = 2 \int_0^h \sqrt{R_{\text{ШКВ}}^2(x) - \left(R_{\text{ШКВ}}(x) - r_3 \left(1 + \frac{2R_{\text{ШКВ}}(x) - r_3}{2(r_3 + R_B - R_{\text{ШКВ}}(x) - R_Z)}\right)\right)} dx.$$
 (10)

Удаляемый объем материала заготовки в единицу времени зависит от линейной скорости движения зерен абразива относительно поверхности образца в зоне контакта, которая на каждом участке вдоль образующей шлифовальных конусов будет различна. Поэтому остаточная шероховатость будет иметь неравномерное распределение.

Если предположить, что в каждый момент времени с каждым выступом обрабатываемой поверхности взаимодействует только одно зерно абразива, можно построить модель, согласно которой объем снимаемого материала с выбранного участка поверхности трубки будет определяться относительной линейной скоростью зерен на данном участке в данный момент времени. При этом скорость вращения шлифовального инструмента будет меняться с учетом сил тренияскольжения или микрорезания, возникающих при взаимодействии индентора (зерна абразива) с микровыступами заготовки. Таким образом, параметры каждого последующего акта внедрения зерен будут зависеть от результатов предыдущего [15-18].

Давление, оказываемое со стороны индентора на микровыступ, зависит от силы, действующей на абразив, и площади контакта с поверхностью микровыступа равной примерно  $S_{\kappa} = \pi R_z^2$ . Согласно второму закону Ньютона, сила  $F_z$ , оказываемая индентором на поверхность материала, равна произведению массы шлифовального инструмента  $m_{\scriptscriptstyle \mathrm{III}}$  на испытываемое им ускорение  $a_{\scriptscriptstyle \mathrm{III}}$ , так как работа по снятию материала совершается за счет изменения импульса  $P_{\rm III}$  свободно вращающегося шлифовального вследствие его инерции. Учитывая, что ускорение представляет собой первую производную скорости по времени, а импульс  $P_{\rm III}$  равен произведению массы и скорости, можно записать:

$$F_z = m_{\text{III}} dV_z(t)/dt = dP_{\text{III}}(t)/dt, \qquad (11)$$

где масса  $m_{\rm III}$  является постоянной дифференцирования. С учетом связи линейной скорости вращения с радиусом  $R_{\rm IIIK}$  и круговой частотой  $\omega$ , временную зависимость импуль-

са  $P_{\mathrm{III}}$  можно записать в следующем виде:

$$P_{\text{III}}(t) = \omega(t) \cdot M_{\text{IIIK}}, \tag{12}$$

где  $M_{\rm шк}$  — момент инерции шлифовального конуса (зависит от его геометрических размеров), а функция  $\omega(t)$  будет иметь вид:

$$\omega(t) = \omega_0 \frac{2R_{\mathrm{T}}}{kx(t) + 2R_{\mathrm{I}}},\tag{13}$$

где  $\omega_0$  – круговая частота вращения заготовки;  $R_{\rm T}$  – радиус заготовки; x(t) – ранее описанная величина x, которая в каждый момент времени t принимает случайное значение из промежутка от 0 до h вследствие хаотичности распределения зерен абразива и дисперсии их размеров.

Принимая допущение, что изменение импульса  $\Delta P$  происходит за достаточно короткий промежуток времени  $\Delta t$ , давление индентора  $W_Z$  на участок выступа поверхности заготовки можно приблизительно рассчитать, пользуясь выражением:

$$W_{\rm Z} \approx \frac{\Delta P/\Delta t}{S_{\kappa}}$$
 (14)

Микрорезанье будет происходить только в том случае, если оказанное давление  $W_Z$  будет превосходить сдвиговое напряжение упругопластического перехода, составляющее  $H_{sp}=21,8~\Gamma\Pi a$ . Глубину внедрения зерен абразива в толщу материала получим из соотношения [19–21]:

$$r = \frac{F_z^{3/4} H_{sp}^{1/8} (1 - 2\nu)}{1{,}44 \cdot K_{tc}^{5/6} \sqrt{2\pi^5}},\tag{15}$$

где  $F_z$  — нагрузка со стороны индентора;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $K_{ic}$  — трещиностой-кость сапфира.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ САПФИРОВЫХ ТРУБ В СРЕДЕ MATLAB

Моделирование двухстороннего шлифования сапфировой трубки свободно вращающимися шлифовальными конусами производилось с помощью программного алгорит-



ма, выполненного в компьютерной среде MATLAB. Данная среда позволяет реализовывать специальные программные алгоритмы для решения конкретных задач в определенных направлениях на распространенном языке C++. Также она включает в себя обширный список команд и встроенных функций.

Разработанный программный алгоритм моделирования двухстороннего шлифования тонкостенной сапфировой трубы свободно вращающимися шлифовальными конусами состоит из следующих шагов:

- объявление независимых переменных, среди которых задаются такие входные данные, как внешний и внутренний радиусы сапфировой трубки, длина обрабатываемого участка, средняя высота неровностей профиля шероховатости, частота вращения заготовки, время шлифования, радиусы внешнего и внутреннего шлифовального инструмента, их конусность, давление прижатия внешнего шлифовального конуса и зернистость абразива;
- генерация матрицы высот и впадин поверхности для внешней и внутренней сторон заготовки в виде случайных величин в пределах класса исходной шероховатости, количество строк определяется длиной обрабатываемого участка и зернистостью абразива, количество столбцов длиной окружности соответствующей стороны трубки и средней высотой неровностей профиля шероховатости;
- расчет исходной площади контакта инструмента с внешней и внутренней поверхностями заготовки с использованием выражений (9) и (10) путем численного интегрирования, расчет нагрузки на внутреннюю поверхность трубки из соотношений (1), (2) и условия, где  $F_1 = -F_2$ , вычисление исходной угловой скорости (13) и начального импульса (12) шлифовальных конусов;
- цикл расчета объема удаляемого материала на каждом участке поверхности заготовки с использованием выражения (15);
- установка контрольных точек времени для фиксации промежуточных результатов моделирования процесса шлифования;
- расчет распределения шероховатости на каждом участке поверхности вдоль обра-

зующей цилиндра по методу скользящей средней;

– вывод результатов моделирования в виде графиков профиля поверхности и распределения шероховатости вдоль образующей цилиндра на каждом участке поверхности.

Вычисление величины снимаемого материала по (15) производится с принятым ранее допущением, что в каждый момент времени происходит только одно взаимодействие зерна абразива с каким-либо выступом поверхности в зоне контакта, изменяя при этом скорость вращения и импульс шлифовального конуса. Характер и результат каждого акта взаимодействия определяется давлением  $W_z$ , которое, согласно выражению (14), зависит от изменения импульса  $\Delta P$ . Время  $\Delta t$  определяется линейной скоростью вращения инструмента относительно заготовки и размерами выступа, заданными на стадии генерации матрицы поверхности обрабатываемого материала.

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанная модель позволяет исследовать закономерности формирования микрорельефа, распределения и величины получаемой шероховатости и, как следствие, дает возможность оптимально подобрать режим обработки и условия шлифования. Конусность шлифовального инструмента оказывает существенное влияние на скорость снятия материала, а площадь контакта на форму распределения средней величины остаточной шероховатости вдоль образующей конуса. Размеры зерен абразива являются определяющими для формирования совокупной режущей кромки, которая, в свою очередь, определяет качество шлифования.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования абразивной обработки сапфировой трубы. Моделирование проводилось при следующих исходных параметрах: частота вращения заготовки  $f_{rot}=2500$  об/мин, размер зерен абразива  $r_{\rm 3}=26$  мкм с разбросом до  $\pm 3$  мкм, начальная средняя величина выступов шероховатости  $R_z=0.1$  мм, наружный и внутренний радиусы заготовки —  $R_n=30$  мм и  $R_v=25$  мм, радиусы больших оснований наружного и

внутреннего шлифовальных инструментов —  $R_{1n}=6,1$  мм и  $R_{1v}=7,5$  мм, их конусность —  $k_n=1:8$  и  $k_v=1:5$  при высоте между основаниями h=21 мм. Начальная нагрузка на наружный инструмент —  $W_{0n}=10$  кПа.

На рис. 2 изображены микрорельефы участков поверхности внешней и внутренней сторон трубки до обработки и после 120 и 300 мин шлифования.

На рис. З изображены графики распределения шероховатости вдоль оси вращения заготовки, построенные по методу скользящей средней, взятой от средних величин высоты неровностей профиля на каждом из участков поверхности.

Как видно из рис. 2, наиболее интенсивный линейный съем материала наблюдается в первые минуты шлифования. Далее, по мере сокращения высоты неровностей, требуемое время на снижение шероховатости растет по экспоненциальному закону.

Наибольший темп удаления объема материала наблюдается на внутренней стенке трубы. Это происходит по двум причинам. Во-первых, внутренний шлифовальник имеет большую конусность и, как следствие, большую разность скоростей. Во-вторых, область соприкосновения внутренней стороны трубы с абразивной поверхностью имеет большую площадь.

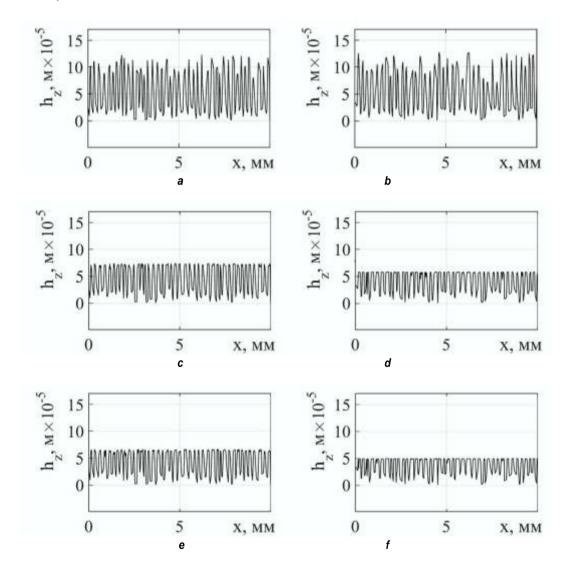
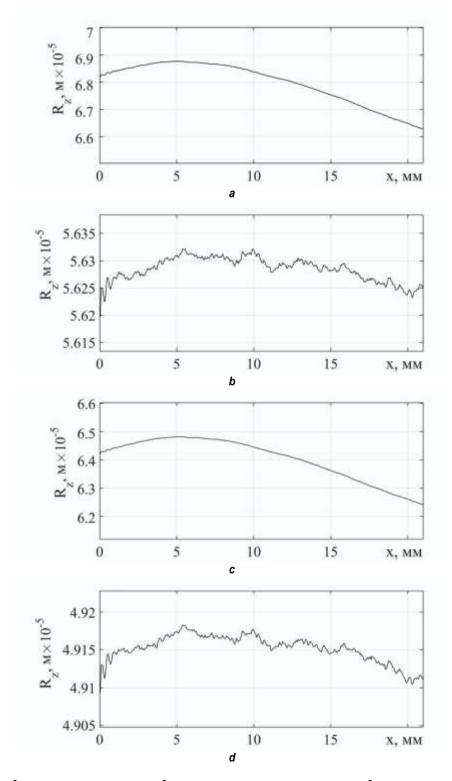


Рис. 3. Профиль шероховатости участка поверхности внешней (a), (c), (e) и внутренней (b), (d), (f) стороны трубки до обработки (a), (b), после 120 мин (c), (d) и после 300 мин (e), (f) шлифования Fig. 3. Roughness profile of the surface area of the outer (a), (c), (e) and inner (b), (d), (f) sides of the tube before processing (a), (b), after 120 min (c), (d) and after 300 min (e), (f) of grinding



Согласно рис. 3, остаточная шероховатость имеет неравномерное распределение вдоль оси вращения заготовки. Это связано с неравномерностью распределения макси-

мально достижимой скорости движения зерен абразива относительно обрабатываемой поверхности, а также с различием площади зоны контакта.



Puc. 4. Распределение шероховатости вдоль оси вращения заготовки на каждом участке поверхности на внешней (a), (c) и внутренней (b), (d) стороне трубки после 120 мин (a), (b) и 300 мин (c), (d) шлифования Fig. 4. Roughness distribution along the rotation axis of the workpiece at each surface area on the outer (a), (c) and inner (b), (d) sides of the tube after 120 min (a), (b) and 300 min (c), (d) of grinding

На графиках (см. рис. 3)  $\boldsymbol{a}$  и  $\boldsymbol{c}$  видно, что средняя величина высоты неровностей профиля  $R_z$  имеет пиковое значение 68,8 мкм и 64,8 мкм для 120 и 300 мин шлифования, соответственно, в области, где средняя относительная скорость была минимальна. Графики  $\boldsymbol{b}$  и  $\boldsymbol{d}$  демонстрируют меньшее отклонение величины Rz от его среднего значения 56,27 мкм и 49,14 мкм также для 120 и 300 мин шлифования, которое, безусловно, меньше, чем аналогичная величина для внешней стороны заготовки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двухстороннее шлифование сапфировых труб, с применением свободно вращающихся шлифовальных конусов, является эффективным способом их доводки до требуемых геометрических параметров. Исследование закономерностей двухстороннего шлифования с учетом свойств абразива и обрабатываемого материала может быть реализовано путем проведения численного эксперимента с ис-

пользованием предложенной математической модели, включающей в себя выражения для линейного съема обрабатываемого материала, относительную скорость движения поверхности заготовки и зерен связанного абразива, а также учитывающей их хаотичное распределение. Математическая модель использует коэффициенты, требующие уточнения эмпирическим путем с проведением натурного эксперимента для адекватного расчета микрорезания в процессе взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности. Результаты численного эксперимента позволяют выбрать оптимальную комбинацию параметров режима Двухстороннего шлифования сапфировых труб с применением свободно вращающихся шлифовальных конусов, таких как частота вращения заготовки, конусность инструмента, сила их прижатия поверхности материала, размер зерен абразива для обеспечения заданной скорости съема материала и требуемого качества поверхности.

#### Список литературы

- 1. Теплова Т.Б., Самерханова А.С. Тенденция развития применения твердых высокопрочных материалов в микроэлектронике, медицине и ювелирных изделиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 10. С. 339–347.
- 2. Курлов В.Н., Рассоленко С.Н. Управление формой и качеством кристаллов сапфира при выращивании методом некапиллярного формообразования // Выращивание кристаллических изделий способом Степанова, пластичность и прочность кристаллов: тез. докл. Всерос. совещания (г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2003 г). СПб.: Изд-во Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, 2003. С. 6.
- 3. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Импульсные газоразрядные источники ИК-излучения для оптико-электронных систем (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333–348.
- 4. Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н., Константинов Б.А. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей // Светотехника. 1998. № 3. С. 2224–2225.
- 5. Гавриш С.В. Разрядные источники излучения с сапфировой оболочкой // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 42–51.
- 6. Гавриш С.В. Влияние условий теплосъема на параметры импульсного газоразрядного источника ИКизлучения // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 86–93.
- 7. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин

- и приборов. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1972. 134 с. 8. Бочкин О.И., Брук В.А., Никифорова-Денисова С.Н. Механическая обработка полупроводниковых материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Высшая школа», 1983. 112 с.
- 9. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Изд-во «Машгиз», 1961. 379 с.
- 10. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Изд-во «Машиностроение», 1974. 280 с.
- 11. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. Л.: Изд-во «Машиностроение», 1984. 103 с.
- 12. Грабченко А.И., Федорович В.А., Шахбазов Я.А., Русанов В.В. Пути повышения эффективности процесса обработки абразивными шлифовальными кругами // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. Вып. 74. Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. С. 70–83.
- 13. Matsui S., Tamaki I. Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism // Technology Reports of the Tohoku University. 1976. Vol. 41. Iss. 1. P. 73–88.
- 14. Савицкий И.В., Войтенко В.А. Увеличение точности обработки сапфировых трубок путем уменьшения механических напряжений // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2020. № 3. С. 61–68.
- 15. Кудинов В.А., Тодоров Н.Т. Закономерности разви-



- тия колебаний и волнистости круга и изделия при врезном шлифовании // Станки и инструмент. 1970. № 2. С. 1–3.
- 16. Кудинов В.А., Гришин В.М. Динамические частотные характеристики процесса шлифования // Станки и инструмент. 1972. № 1. С. 7–9.
- 17. Савицкий И.В., Войтенко В.А. Новый метод шлифования цилиндрических поверхностей // Проблемы и перспективы международного трансфера инновационных технологий: сб. ст. по итогам Междунар. науч.практ. конф. (г. Воронеж, 24 августа 2020 г.). Стерлитамак: Изд-во АМИ, 2020. С. 56–59.
- 18. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 112 с.

- 19. Клунникова Ю.В. Исследование влияния абразивной обработки на процесс образования дефектов в кристаллах сапфира // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. С. 2.
- 20. Evans A.G., Wilshau T.R. Quasi-static solid particle damage in brittle solids: observations, analysis and implications // Acta Metallurgica. 1976. Vol. 24. Iss. 10. P. 936–956.
- 21. Kirchner H.P., Ragosta J.A. Relation of load to radial crack length for spherical indentations in hot-pressed ZnS // Journal of the American Ceramic Society. 1983. Vol. 66. № 4. P. 293–296. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb15717.x

#### References

- 1. Teplova TB, Samerhanova AS. Development trend of using high-strength solid materials in microelectronics, medicine and jewelry. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2006;10:339–347. (In Russ.)
- 2. Kurlov VN, Rassolenko SN. Controlling sapphire crystal shape and quality when growing by the method of non-capillary shaping. *Vyrashchivanie kristallicheskih izdelij sposobom Stepanova, plastichnost' i prochnost' kristallov: tezisy dokladov Vserossijskogo soveshchaniya = Growing crystalline products by Stepanov's method, crystal plasticity and strength: abstracts of the reports of All-Russian Meeting* 22–24 October 2003, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Publishing House of the loffe Institute SB RAS; 2003, p. 6. (In Russ.)
- 3. Gavrish SV, Loginov VV, Puchnina SV. Pulsed gasdischarge IR radiation sources for optical-electronic systems (a review). *Uspekhi Prikladnoi Fiziki = Advances in Applied Physics*. 2018;6(4):333–348. (In Russ.)
- 4. Gavrish SV, Gaidukov ÉN, Konstantinov BA. Discharge sources of infrared radiation for special purposes. *Svetotehnika = Light & Engineering.* 1998;3:2224–2225. (In Russ.)
- 5. Gavrish SV. Discharge sources of radiation with a sapphire shell. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*. 2011;4:42–51. (In Russ.)
- 6. Gavrish SV. Heat sink conditions influence on pulsed discharge IR radiation source parameters. *Prikladnaya fizika* = *Applied Physics*. 2018;5:86–93. (In Russ.)
- 7. Korolev AV. Selection of the optimal geometric shape of the contacting surfaces of machine parts and devices. Saratov: Saratov University Publ.; 1972, 134 p. (In Russ.)
- 8. Bochkin OI, Brook VA, Nikiforova-Denisova SN. *Mechanical treatment of semiconductors*. Moscow: Vysshaya shkola; 1983, 112 p. (In Russ.)
- 9. Korsakov BC. *Machining Precision*. Moscow: Mashgiz; 1961, 379 p. (In Russ.)
- 10. Korchak SN. *Productivity of steel parts grinding*. Moscow: Mashinostroenie; 1974, 280 p. (In Russ.)
- 11. Lurie GB. *Progressive methods of external cylindrical grinding*. Leningrad: Mashinostroenie; 1984, 103 p. (In Russ.)
- 12. Grabchenko AI, Fedorovich VA, Shahbazov YaA, Rusanov VV. Ways to improve machining efficiency when treating with abrasive grinding wheels. In: *Rezanie i in-*

- strument v tekhnologicheskih sistemah: Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskij sbornik = Cutting and tools in technological systems: International scientific and technical collection of articles. 74. Har'kov: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute; 2008, p. 70–83.
- 13. Matsui S, Tamaki I. Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism. *Technology Reports of the Tohoku University*. 1976;41(1):73–88.
- 14. Savitsky IV, Voytenko VA. Increasing the accuracy of sapphire tube processing by reducing mechanical stress. Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii. 2020;3:61–68. (In Russ.)
- 15. Kudinov VA, Todorov NT. Development regularities of vibration and wheel and product waviness under plungecut grinding. *Stanki i instrument*. 1970;2:1–3. (In Russ.)
- 16. Kudinov VA, Grishin VM. Dynamic frequency characteristics of grinding. *Stanki i instrument*. 1972;1:7–9. (In Russ.)
- 17. Savitskiy IV, Voitenko VA. A new grinding method of cylindrical surfaces. *Problemy i perspektivy mezhdunarodnogo transfera innovacionnyh tekhnologij: sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Problems and prospects of the international transfer of innovative technologies: collected articles based on the results of the International scientific and practical conference.* 24 August 2020, Voronezh. Sterlitamak: International Research Agency Publ.; 2020, p. 56–59. (In Russ.)
- 18. Demkin NB. The actual contact area of solid surfaces. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ.; 1962, 112 p. (In Russ.)
- 19. Klunnikova YuV. Research of abrasive treatment influence on process of defects formation in sapphire crystals. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2016;2:2. (In Russ.)
- 20. Evans AG, Wilshau TR. Quasi-static solid particle damage in brittle solids: observations, analysis and implications. *Acta Metallurgica*. 1976;24(10):936–956.
- 21. Kirchner HP, Ragosta JA. Relation of load to radial crack length for spherical indentations in hot-pressed ZnS. *Journal of the American Ceramic Society*. 1983;66(4):293–296. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb15717.x

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Савицкий Иван Викторович,

аспирант кафедры микро- и наноэлектроники, Луганский государственный университет им. Владимира Даля, 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20/А, Луганская Народная Республика; В e-mail: ivan-savitskiy@mail.ru

#### Войтенко Владимир Афанасьевич,

доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой микро- и наноэлектроники, Луганский государственный университет им. Владимира Даля, 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20/A, Луганская Народная Республика; e-mail: vlvoytenko@gmail.com

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.02.2021; одобрена после рецензирования 23.04.2021; принята к публикации 30.06.2021.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Ivan V. Savitsky,

Postgraduate student of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, 20/A Molodezhny Block, Lugansk 91034, Lugansk People's Republic;

□ e-mail: ivan-savitskiy@mail.ru

#### Vladimir A. Voytenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, 20/A Molodezhny Block, Lugansk 91034, Lugansk People's Republic;

e-mail: vlvoytenko@gmail.com

#### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### Information about the article

The article was submitted 03.02.2021; approved after reviewing 23.04.2021; accepted for publication 30.06.2021.