

УДК 621.923.02

Шероховатость поверхности твердосплавных пуансонов при шлифовании алмазными кругами, изготовленными по технологии многослойного композиционного электролитического покрытия

М.А. Шавва¹, С.В. Грубый²¹ ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

The surface roughness carbide punches grinding by diamond circles, produced by multilayer composite electrolytic coatings technology

M.A. Shavva¹, S.V. Grubiy²¹ Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT, 107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: katapu@mail.ru; grusv@yandex.ru



Приведена методика расчета шероховатости поверхности в направлении скорости вращения заготовки и поперечной подачи круга при алмазном шлифовании твердосплавных пуансонов кругами с многослойным композиционным электролитическим покрытием. Рассмотрены зависимости продольной и поперечной составляющих шероховатости поверхности от режимов резания: частоты вращения шлифовального круга, частоты вращения заготовки, глубины резания и поперечной подачи круга. Предложена методика определения режимов резания, обеспечивающая уменьшение составляющих шероховатости в продольном и поперечном направлениях. Установлены и экспериментально проверены режимы резания при алмазном шлифовании твердосплавного пуансона. Подтверждены параметры шероховатости поверхности $R_{\max} = 0,12$ мкм и $R_a = 0,03$ мкм.

Ключевые слова: алмазное шлифование, шероховатость поверхности, алмазные круги, композиционное электролитическое покрытие



The method of surface roughness calculation in the direction of workpiece rotation and in the direction of grinding wheel cross-feed at multi-layer composite electrolytic coating wheels diamond grinding, is presented. Relationship between the components surface roughness and cutting modes: the grinding wheel rotational speed, workpiece rotational speed, depth of cut and cross-feed wheel, is considered. Cutting conditions determination method for minimization of roughness components in longitudinal and transverse direction, is introduced. Diamond grinding cutting conditions for carbide punch to ensure surface finish $R_{\max} 0,12$ mkm and $R_a 0,03$ mkm were established and experimentally tested.

Keywords: diamond grinding, surface roughness, diamond wheel, composite electrolytic coating

В современном производстве изделий машино- и приборостроения актуальной задачей является изготовление пресс-форм из твердых сплавов с применением операции прецизионного шлифования. Твердосплавные пресс-формы используют, например, для выполнения оптических элементов: линз [1], линз Френеля [2, 3], офтальмологических изделий и др.

Поверхности пресс-форм, которые необходимо обрабатывать с шероховатостью 12-го класса и выше (ГОСТ 2789–73, параметры шероховатости: $Rz < 0,2$ мкм, $R_{max} < 0,2$ мкм и $Ra < 0,04$ мкм) и прецизионной точностью, имеют сложную форму [3], что значительно снижает производительность обработки при применении традиционной технологии, предусматривающей предварительное, окончательное шлифование и финишное полирование [1].

Для повышения производительности и качества обработки предложено использовать шлифовальные круги (ШК), на рабочую поверхность которых нанесен алмазосодержащий слой, выполненный по технологии многослойного композиционного электролитического покрытия [4–7]. При изготовлении ШК на основу из нержавеющей стали последовательно наносят: адгезионный активированный слой; сплав, обеспечивающий гашение силового воздействия; инертный сплав для заравнивания монокристаллов; активированный слой; защитный высокотвердый сплав и слой монокристаллов алмазов [4].

Технология изготовления ШК позволяет получать следующие характеристики: равномерное распределение зерен с концентрацией до 400 %; вылет зерен из связки на половину среднего размера; погрешность формы режущей поверхности ШК, соответствующую таковой для основы. Благодаря этим характеристикам погрешность формы обработанной поверхности будет зависеть только от кинематической погрешности станка. Поэтому для получения шероховатости поверхности пресс-форм не ниже 13-го класса и погрешности формы обрабатываемой поверхности не более 5 мкм рассматриваемые алмазные ШК необходимо применять на сверхточных станках [8].

При обработке твердосплавных пуансонов на сверхточных станках алмазными кругами, выполненными по технологии многослойного композиционного электролитического покрытия, основной задачей является выбор режи-

мов и условий резания, обеспечивающих заданную шероховатость обработанной поверхности [9, 10].

Цель работы — выявление теоретических зависимостей для расчета шероховатости поверхности при обработке твердосплавных пуансонов алмазными кругами и разработка методики подбора режимов резания для обеспечения требуемого качества поверхности.

Обработка поверхности твердосплавного пуансона. Твердосплавный пуансон представляет собой деталь цилиндрической формы, на торце которой находится осевой параболоид. Торцевая поверхность и поверхность параболоида отвечают за формирование поверхности детали, получаемой при штамповке. В связи с этим торцевая и параболическая поверхности должны соответствовать высоким требованиям, предъявляемым к их шероховатости и погрешности формы. Погрешность формы детали состоит из погрешности формы параболической поверхности с отклонением от профиля не более 5 мкм, погрешности формы торцевой поверхности с отклонением от плоскостности и осевым биением относительно оси вращения не

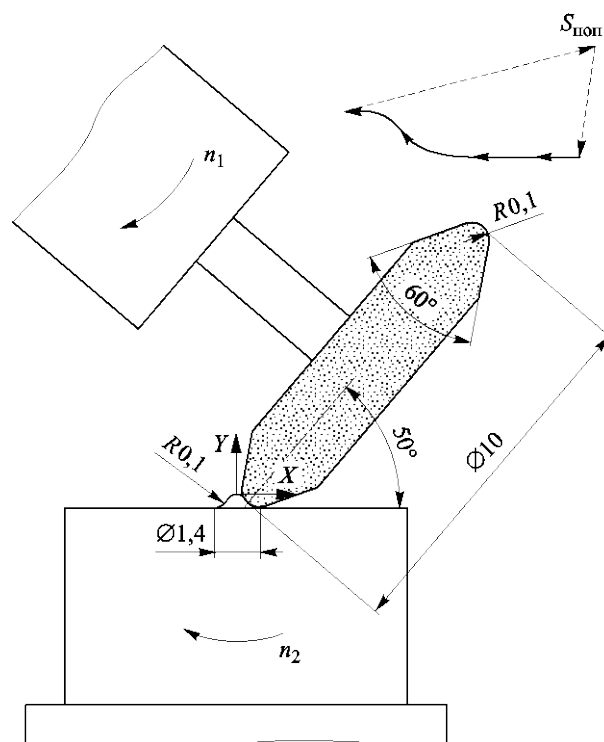


Рис. 1. Схема обработки поверхности пуансона кругом, выполненным по технологии многослойного композиционного электролитического покрытия

более 2 мкм.

Технологическая схема финишной обработки пуансонов из твердого сплава марки ВК8 кругами, выполненными по технологии многослойного композиционного электролитического покрытия, показана на рис. 1.

Торцевая и параболическая поверхности пуансона обрабатываются радиусной частью ШК. На рис. 1 обозначены следующие параметры: n_1 и n_2 — частоты вращения ШК и заготовки, мин^{-1} ; $S_{\text{поп}}$ — поперечная подача ШК, мм/мин. Для обеспечения заданной формы обрабатываемой поверхности ШК наклонен на угол $\alpha = 50^\circ$.

Расчет шероховатости обработанной поверхности. Расчет шероховатости поверхности выполнен в направлении скорости вращения заготовки и поперечной подачи ШК, т. е. в продольном и поперечном направлениях.

Схема расчета шероховатости поверхности в продольном направлении приведена на рис. 2. На схеме обозначены следующие точки и параметры: O_1 — центр ШК; O_3 — центр заготовки; O_2 — центр ШК при повороте заготовки на угол $\beta = 2\pi n_2/n_1$; B — точка пересечения окружности ШК и окружности заготовки в начальный момент взаимодействия; C — точка пересечения окружности ШК при повороте на угол β и продолжения отрезка O_1B , отрезок BC составляет толщину срезаемого слоя за один оборот ШК a_2 ; D — точка пересечения окружностей ШК в начальный момент взаимодействия с заготовкой и после поворота на угол β ; t — глубина резания; r_1 — радиус ШК; r_2 — радиус заготовки.

Для определения шероховатости в продоль-

ном направлении необходимо найти координаты точки D . Для этого зададим уравнение окружности ШК

$$x^2 + y^2 = r_1^2. \quad (1)$$

Уравнение окружности ШК с центром в точке O_2

$$(x - x_{O_2})^2 + (y - y_{O_2})^2 = r_1^2, \quad (2)$$

где $x_{O_2} = (r_1 + r_2 - t) - (r_1 + r_2 - t) \cos \beta$; $y_{O_2} = (r_1 + r_2 - t) \sin \beta$.

Уравнение окружности заготовки с центром в точке O_3

$$(x - r_1 - r_2 + t)^2 + y^2 = r_2^2. \quad (3)$$

Тогда координаты точки D вычисляются как координаты точки пересечения окружностей, определяемых уравнениями (1) и (2):

$$x_D = 0,5x_{O_2} + 0,5\sqrt{x_{O_2}^2 - 4\left[0,25(y_{O_2}^2 + x_{O_2}^2) - \frac{r_1^2 y_{O_2}^2}{y_{O_2}^2 + x_{O_2}^2}\right]}; \quad (4)$$

$$y_D = \sqrt{r_1^2 - x_D^2}. \quad (5)$$

Шероховатость поверхности $R_{\text{max прод}}$, определяемую высотой остаточного профиля в продольном направлении $h_{R_{\text{max}}}$ по рис. 2 и выражениям (3)–(5), можно представить как

$$R_{\text{max прод}} = \sqrt{y_D^2 + (r_1 + r_2 - t - x_D)^2} - r_2 + t.$$

Схема расчета шероховатости в поперечном направлении приведена на рис. 3. При движении в направлении подачи ШК зерна оставляют канавки на обработанной поверхности. После первого оборота заготовки расстояние между канавками составляет l_f . За один оборот заго-

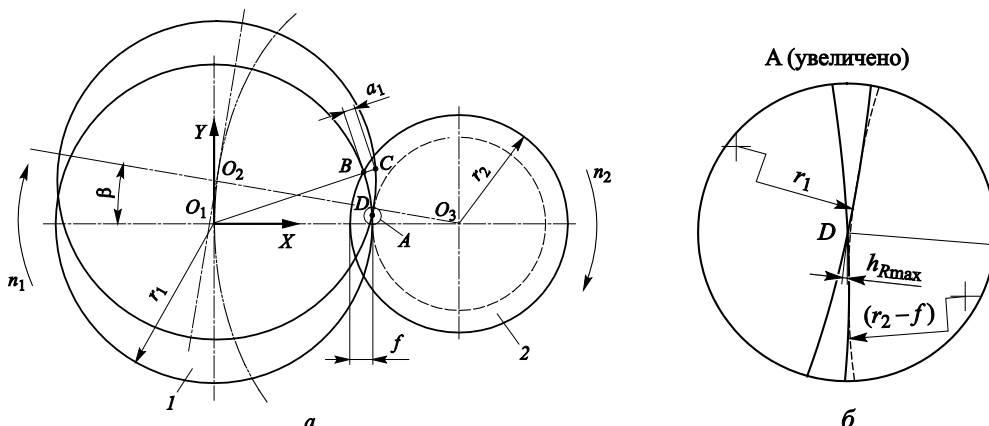


Рис. 2. Схема расчета шероховатости поверхности в продольном направлении: 1 — ШК; 2 — заготовка

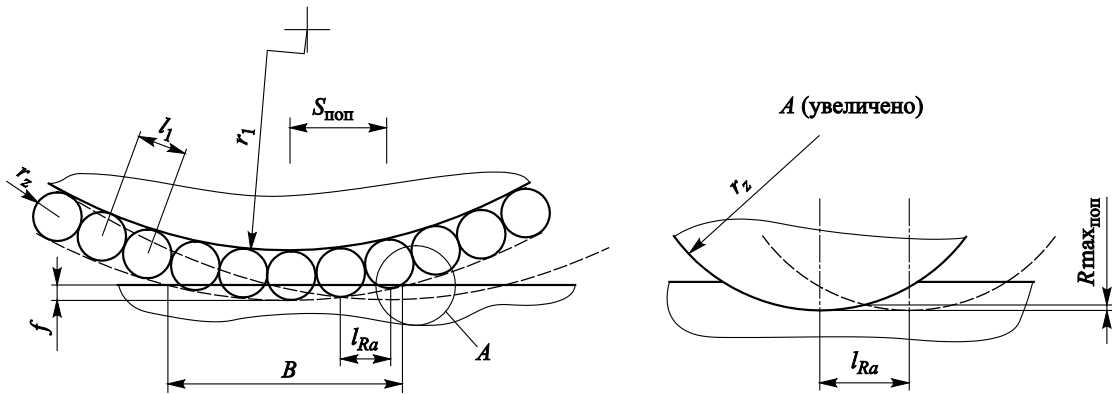


Рис. 3. Схема расчета шероховатости поверхности в поперечном направлении

товки ШК смещается на расстояние, равное $S_{\text{поп}}/n_2$. После того как ШК переместился на величину $B = 2R \sin\{\arccos[(R-t)/R]\}$, где R — радиус округления ШК (см. рис. 1), расстояние между канавками составило l_{Ra} . Время, за которое ШК перемещается на ширину B , можно определить как $B/S_{\text{поп}}$. Число оборотов, выполненное заготовкой за это время, составляет $Bn_2/S_{\text{поп}}$.

Тогда расстояние между канавками, формирующее шероховатость в направлении поперечной подачи,

$$l_{Ra} = l_f S_{\text{поп}} / (B n_2).$$

Согласно рис. 3, параметр шероховатости поверхности в направлении поперечной подачи

$$R_{\text{max_поп}} = \frac{l_{Ra}^2}{8r_z} = \frac{[l_f S_{\text{поп}} / (B n_2)]^2}{8r_z},$$

где r_z — радиус округления алмазного зерна, принимаемый в долях от среднего размера зерна x_{cp} , т. е. $r_z \approx 0,1x_{\text{cp}}$ [11, 12].

На рис. 4 приведены расчетные зависимости

продольной и поперечной составляющих шероховатости поверхности от частоты вращения заготовки и глубины резания.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости продольной составляющей шероховатости поверхности от частоты вращения ШК и поперечной составляющей шероховатости поверхности от поперечной подачи ШК.

Расчеты выполнены при следующих условиях резания:

- Средний размер зерна x_{cp} , м $1 \cdot 10^{-7}$
- Угол при режущей вершине зерна, град 85
- Коэффициент заделки зерна в связку 0,5
- Расстояние между зернами, м $2 \cdot 10^{-7}$
- Радиус ШК r_1 , м $5 \cdot 10^{-3}$
- Радиус обрабатываемой заготовки r_2 , м $1,4 \cdot 10^{-3}$
- Радиус округления ШК $r_{\text{кр}}$, м $1 \cdot 10^{-4}$

Для рис. 4 и 5, а поперечная подача ШК $S_{\text{поп}} = 0,5$ мм/мин, а для рис. 5, а и б частота вращения заготовки $n_2 = 200$ мин⁻¹, глубина резания $t = 10$ мкм.

Анализ графиков, приведенных на рис. 4–5,

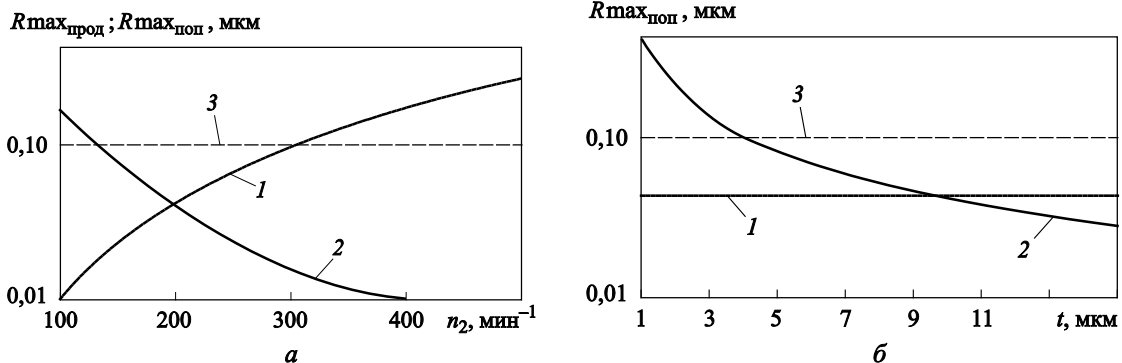


Рис. 4. Расчетные зависимости продольной $R_{\text{max_прод}}$ (1) и поперечной $R_{\text{max_поп}}$ (2) составляющих шероховатости поверхности от режимов резания:

а — частоты вращения заготовки n_2 при $n_1 = 60\,000$ мин⁻¹ и $t = 10$ мкм; б — глубины резания t при $n_1 = 60\,000$ мин⁻¹ и $n_2 = 200$ мин⁻¹; 3 — заданное ограничение по максимальной шероховатости поверхности

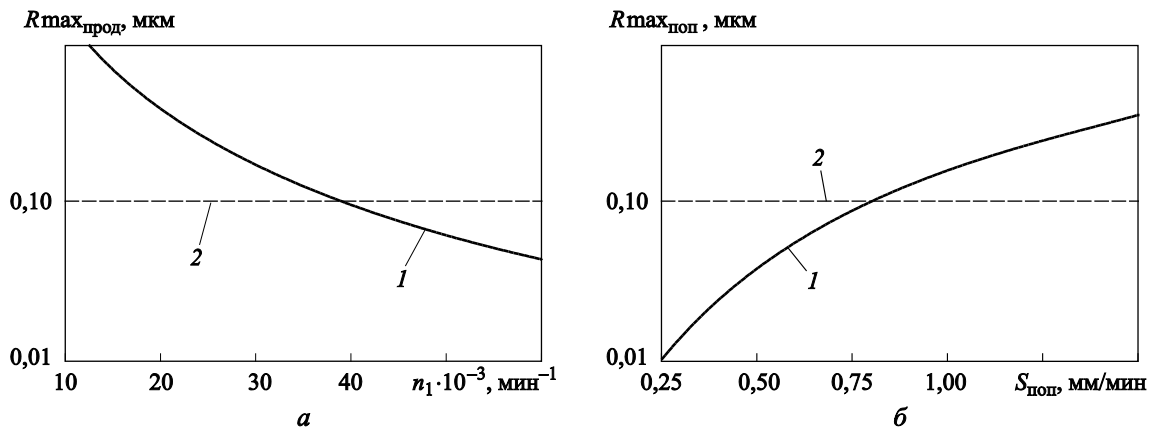


Рис. 5. Расчетные зависимости (1):

a — продольной составляющей шероховатости поверхности $R_{\max_{\text{прод}}}$ от частоты вращения ШК n_1 ,
б — поперечной составляющей шероховатости поверхности $R_{\max_{\text{поп}}}$ от поперечной подачи ШК $S_{\text{поп}}$;
 2 — заданное ограничение по максимальной шероховатости поверхности

показывает, что для получения шероховатости обрабатываемой поверхности в продольном и поперечном направлениях в пределе $R_{\max} < 0,1$ мкм при указанных ранее параметрах резания необходимо обеспечить следующие режимы шлифования: частота вращения заготовки — не более 200 мин^{-1} ; частота вращения ШК — не менее $60\,000 \text{ мин}^{-1}$; глубина резания — 10 мкм ; поперечная подача ШК — не более $0,5 \text{ мм/мин}$ при радиусе округления режущей части ШК, равном $0,1 \text{ мм}$.

Экспериментальные исследования. В лаборатории ООО «Ресурс точности» проведена технологическая отработка режимов алмазного шлифования твердосплавных пуансонов. Фотографии зоны шлифования приведены на рис. 6.

Обработка пуансонов проведена на ультра-

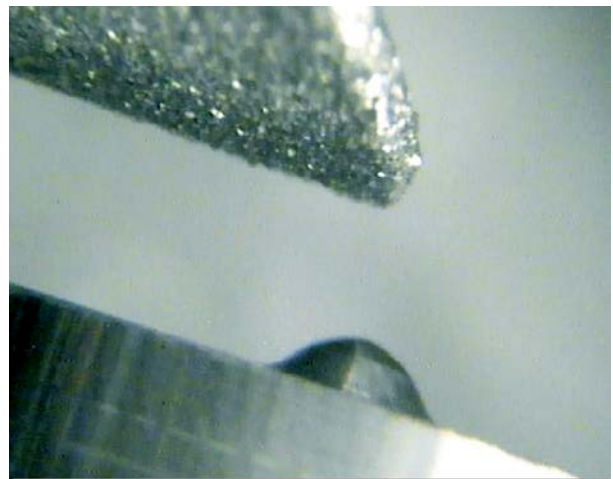
прецизионном станке модели «Асферика-Ф3». Основные узлы станка (шпиндель, направляющие по осям *X* и *Z*) оснащены аэростатическими опорами, приводы — встроенными синхронными маловиброактивными двигателями. На станке реализовано одновременное управление по двум линейным координатам [13].

Эксперименты выполнены при следующих режимах шлифования: частота вращения заготовки — 200 мин^{-1} ; частота вращения ШК — $60\,000 \text{ мин}^{-1}$; глубина резания — 10 мкм ; поперечная подача ШК — $0,5 \text{ мм/мин}$ при радиусе округления режущей части ШК 100 мкм . Условия резания соответствовали, принятым для расчета.

Метрологический контроль обработанной поверхности проведен на интерферометре Zygomaxim GP 200. На рис. 7 показаны харак-



a



б

Рис. 6. Фотографии зоны шлифования твердосплавного пуансона в масштабе 1:1 (*a*) и 20:1 (*б*)

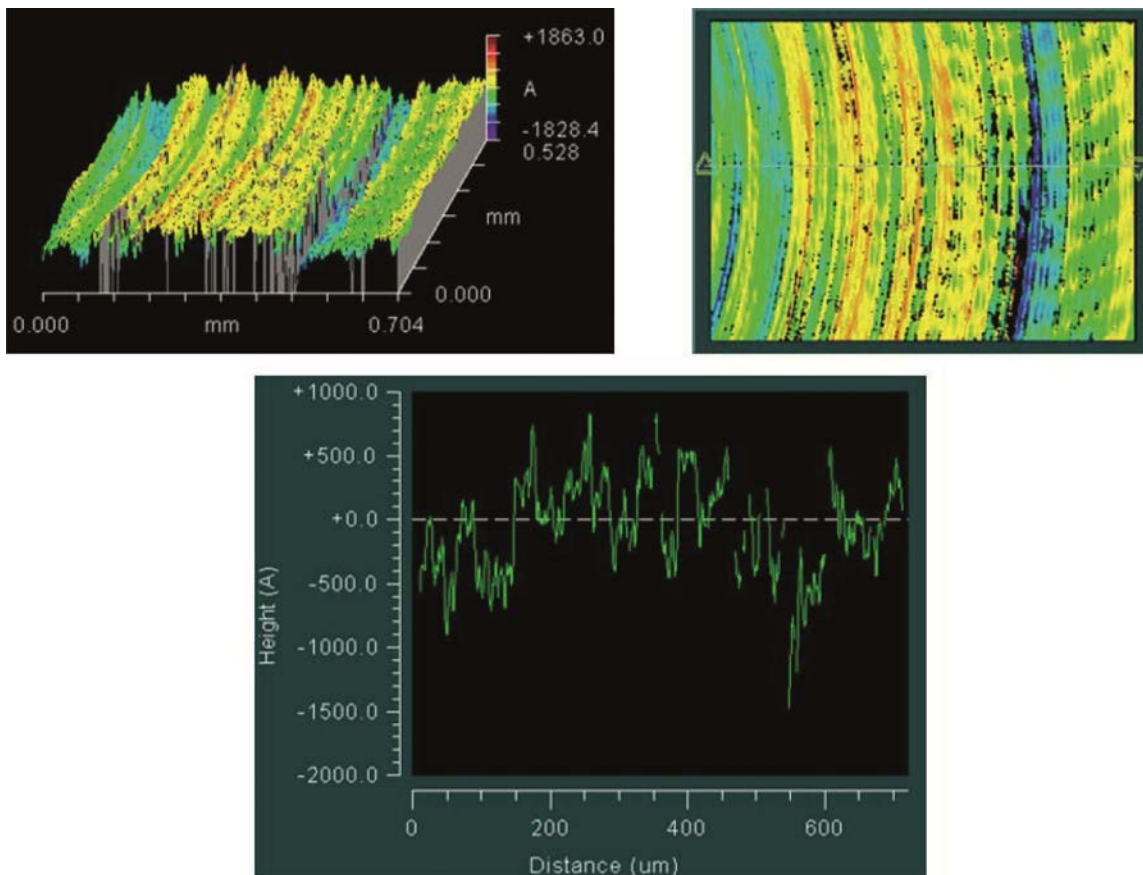


Рис. 7. Профилограммы обработанной поверхности твердосплавного пуансона

терные профилограммы.

При измерении получены следующие параметры шероховатости обработанной поверхности: $Ra = 0,03$ мкм, $Rmax = 0,120$ мкм.

Незначительное увеличение экспериментального значения шероховатости по параметру $Rmax$ по сравнению с заданным ограничением $Rmax = 0,1$ мкм, принятым на рис. 4–5, объясняется дополнительным неучтенным влиянием технологической системы.

Выводы

1. На основании расчетов и экспериментальных исследований даны следующие рекомендации по режимам алмазного шлифования

твердосплавных пуансонов параболической формы с диаметром основания 1,4 мм кругами с многослойным композиционным электролитическим покрытием:

- частота вращения заготовки — не более 200 мин^{-1} ;
- частота вращения ШК диаметром 10 мм — не менее $60\,000 \text{ мин}^{-1}$;
- глубина резания — не менее 10 мкм;
- поперечная подача ШК — не более 0,5 мм/мин при радиусе округления режущей части ШК, равной 0,1 мм.

2. Дальнейшие исследования необходимо направить на изучение влияния износа алмазных зерен ШК на шероховатость обработанной поверхности [14, 15].

Литература

- [1] Yin L., Vancoille E., Ramesh K., Huang H., Pickering J.P., Spowage A.C. Ultraprecision grinding of tungsten carbide for spherical mirrors. *Journal Engineering Manufacturing*, 2004, vol. 218, no. 4, pp. 419–429
- [2] Suzuki H., Furuki T., Okada M., Yamagata Y., Morita S. Precision grinding of structured tungsten carbide mold. *Advanced Material and Research*, 2012, vol. 497, pp. 15–19.

- [3] Yan Q., Syoji K., Tanaka T., Zhang Z. and Kuriyagawa T. Analyses of Grinding Force Characteristic on High Speed Creep Feed Grinding Tungsten Carbide. *Abrasive technology: current development and applications I: The Third International Conference on Abrasive Technology*, Brisbane, Australia, November 22–24, 1999, Singapore, River Edge, NJ, World Scientific, 1999. 556 p.
- [4] Ding W., Linke B., Zhu Y., Li Z., Fu Y., Su H., Xu J. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, vol. 30, no. 1, pp. 109–134.
- [5] Yuan H.-P., Gao H., Guo D.-M. Electrolytic dressing mechanism of electroplated multilayer abrasive wheel with nickel-cobalt alloy. *Journal of Dalian University of Technology*, 2012, vol. 52(2), pp. 197–202.
- [6] Venkata R.R. *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processed*. London, Springer Science & Business Media, 2010. 380 p.
- [7] Chung H.-H., Yang K.L., Liao H.-T. The Study of Nanometer-Grade Grinding Surface for Precision Molds. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2006, vol. 27, no. 6, pp. 707–715.
- [8] Боровский Г.В., Шавва М.А., Захаревич Е.М., Грубый С.В., Маслов А.Р. Ультрапрецизионная обработка хрупких оптических материалов. *Вестник машиностроения*, 2015, № 9, с. 6–9.
- [9] Binu T., Eby D., Manu R. Modeling and optimization of surface roughness in surface grinding OFSiC advanced ceramic material. *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, December 12–14, 2014, IIT Guwahati, Assam, India, 2014, pp. 1–7.
- [10] Shrivastava P.K., Dubey A.K. Intelligent Modeling of Surface Roughness during Diamond Grinding of Advanced Ceramics. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, July 6–8, 2011, London, UK, 2011, vol. 1, pp. 825–830.
- [11] Курдюков В.И. *Основы абразивной обработки*. Курган, Курганский государственный университет, 2014. 195 с.
- [12] Юсупов Г.Х., Колегов С.А., Пузырева Т.Ю. *Производительное алмазное шлифование*. Москва, ТНТ, 2012. 228 с.
- [13] *Ультрапрецизионный станок модели «Асферика-Ф3»*. URL: http://ultraprecision.ru/?page_id=15 (дата обращения 09 мая 2018).
- [14] Шавва М.А., Грубый С.В. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11, с. 137–156. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/731997.html> (дата обращения 1 апреля 2018).
- [15] Новиков Ф.В., Минчев Р.М. Аналитическое определение шероховатости поверхности при абразивной обработке отверстий. *Вестник НТУ «ХПИ»*, 2015, № 41(1150), с. 102–107.

References

- [1] Yin L., Vancoille E., Ramesh K., Huang H., Pickering J.P., Spowage A.C. Ultraprecision grinding of tungsten carbide for spherical mirrors. *Journal Engineering Manufacturing*, 2004, vol. 218, no. 4, pp. 419–429
- [2] Suzuki H., Furuki T., Okada M., Yamagata Y., Morita S. Precision grinding of structured tungsten carbide mold. *Advanced Material and Research*, 2012, vol. 497, pp. 15–19.
- [3] Yan Q., Syoji K., Tanaka T., Zhang Z. and Kuriyagawa T. Analyses of Grinding Force Characteristic on High Speed Creep Feed Grinding Tungsten Carbide. *Abrasive technology: current development and applications I: the Third International Conference on Abrasive Technology*, Brisbane, Australia, 22–24 November 1999, Singapore, River Edge, NJ, World Scientific, 1999. 556 p.
- [4] Ding W., Linke B., Zhu Y., Li Z., Fu Y., Su H., Xu J. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, vol. 30, no. 1, pp. 109–134.

- [5] Yuan H.-P., Gao H., Guo D.-M. Electrolytic dressing mechanism of electroplated multilayer abrasive wheel with nickel-cobalt alloy. *Journal of Dalian University of Technology*, 2012, vol. 52(2), pp. 197–202.
- [6] Rao R.V. *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processed*. London, Springer Science & Business Media, 2010. 380 p.
- [7] Chung H.-H., Yang K.L., Liao H.-T. The Study of Nanometer-Grade Grinding Surface for Precision Molds. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2006, vol. 27, no. 6, pp. 707–715.
- [8] Borovskiy G.V., Shavva M.A., Zaharevich E.M., Grubby S.V., Maslov A.R. Ultraprecisionnaya obrabotka hrupkikh opticheskikh materialov [Ultraprecision machining of brittle optical materials]. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 9, pp. 6–9.
- [9] Binu T., Eby D., Manu R. Modeling and optimization of surface roughness in surface grinding OFSiC advanced ceramic material. *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, 12–14 December 2014, IIT Guwahati, Assam, India, 2014, pp. 1–7.
- [10] Shrivastava P.K., Dubey A.K. Intelligent Modeling of Surface Roughness during Diamond Grinding of Advanced Ceramics. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 6–8 July 2011, London, UK, 2011, vol. 1, pp. 825–830.
- [11] Kurdyukov V.I. *Osnovy abrazivnoy obrabotki* [Basics of blasting]. Kurgan, Kurganskiy gosudarstvennyy universitet publ., 2014. 195 p.
- [12] Yusupov G.H., Kolegov S.A., Puzyreva T.Yu. *Proizvoditel'noe almaznoe shlifovanie* [Productive diamond grinding]. Moscow, TNT publ., 2012. 228 p.
- [13] *Ultraprecizionnyy stanok modeli «Asferika-F3»* [Ultra-precision machine for aspherical surfaces]. Available at: http://ultraprecision.ru/?page_id=15 (accessed 09 May 2018).
- [14] Shavva M.A., Grubby S.V. Analiz vzaimosvyazi iznosa kruga i sil rezaniya pri almaznom shlifovanii [Analysing a Relationship between Wheel Wear and Cutting Forces during Diamond Grinding]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 11, pp. 137–156. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/731997.html> (accessed 1 April 2018).
- [15] Novikov F.V., Minchev R.M. Analiticheskoe opredelenie sherohovatosti poverhnosti pri abrazivnoy obrabotke otverstiy [Analytical determination of surface roughness in the abrasive machining of holes]. *Vestnik NTU «HPI»* [Bulletin of NTU «HPI»]. 2015, no. 41(1150), pp. 102–107.

Статья поступила в редакцию 05.06.2018

Информация об авторах

ШАВВА Мария Александровна (Москва) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: katapu@mail.ru).

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

Information about the authors

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 9, с. , doi:

Please cite this article in English as:

. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 9, pp. , doi: