

УДК 621.7.09

DOI:10.30987/2223-4608-2020-4-32-38

Д.Н. Охлупин, директор
(ООО «ТехноТерм-Саратов», г. Саратов, Проспект им. 50 лет Октября, д. 110 А, корп. 6),
А.В. Королев, д.т.н.
(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина», 410054, г. Саратов, Политехническая, 77),
И.В. Синева, к.ф.-м.н.
(ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, Астраханская, 83 корп. 5)
E-mail: science7@bk.ru

Полирование поликристаллического алмазного покрытия деталей

Приведены результаты экспериментального исследования процесса полирования поликристаллического алмазного покрытия деталей металлической щеткой. Показано влияние режима полирования на шероховатость получаемой поверхности. Выполнен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: полирование; поликристаллический алмаз; покрытие; шероховатость поверхности; режим обработки.

D.N. Okhlupin, Director
(PC "Techno-Therm-Saratov", Building 6, 110A, 50 Years of October Avenue, Saratov)
A.V. Korolyov, Dr. Sc. Tech.
(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytekhnicheskaya Str., Saratov, 410054)
I.V. Sineva, Can. Sc. Phys-Math.
(FSBEI HE "Chernyshevsky National Research State University of Saratov", Building 5, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov 410012)

Polishing of polycrystalline diamond coating of parts

The results of the experimental investigation of polycrystalline diamond coating polishing in parts by a metal brush are shown. A polishing mode impact upon roughness of the surface obtained is shown. The analysis of results obtained is carried out.

Keywords: polishing; polycrystalline diamond; coating; surface roughness; processing mode.

В последнее время наметился существенный прогресс в полировке поликристаллических алмазных покрытий. Особый интерес представляют способы полирования инструментами, изготавливаемыми из переходных металлов. Это обеспечивает возникновение в зоне обработки термохимического процесса, позволяющего существенно повысить производительность процесса полирования [1 - 5] по сравнению с ранее применяемыми способами полирования алмаза пастами [6 - 8] или сухого полирования в неподвижной абразивной среде [9].

Недостатком химико-термического метода полирования является высокий съем припуска, при котором может быть удалено исходное покрытие малой толщины (1...2 мкм) и низкая производительность из-за ограниченной воз-

можности осуществления многоместной обработки деталей напроход при наличии очень малой величины разноразмерности обрабатываемых заготовок. Кроме того, способ термохимического полирования использует только одно «слабое» свойство алмаза – способность растворяться в переходных металлах. Другим «слабым» свойством является хрупкость. Предложенный способ полирования поликристаллического алмазного покрытия металлической щеткой направлен на изучение эффективности способа полирования поликристаллического алмазного покрытия, использующего оба этих свойства алмаза.

Схема предложенного способа приведена на рис. 1. Обрабатываемая заготовка 1 размещена на установочно-зажимном приспособлении 2, например: в машинных тисках. В каче-

стве инструмента используется круговая металлическая щетка 3.

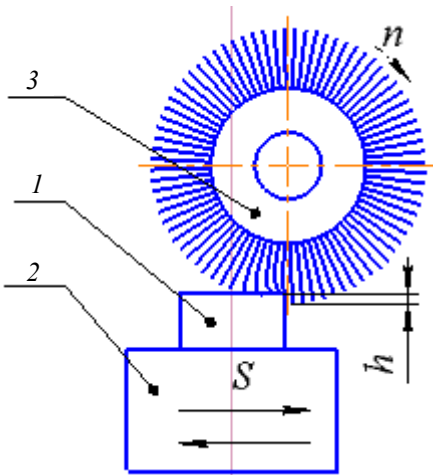


Рис. 1. Схема способа полирования поверхности поликристаллического алмаза

Круговую металлическую щетку 3 подают по нормали к обрабатываемой поверхности заготовки 1 на глубину h и придают ей вращение от специального привода (не показано) с частотой n . Заготовке 1 вместе с приспособлением 2 сообщают подачу S вдоль плоскости обрабатываемой поверхности в сторону круговой металлической щетки 3. После первого рабочего хода осуществляют второй рабочий ход с подачей S , но в противоположном направлении.

Для обоснования эффективности предложенного способа выполнены экспериментальные исследования. В качестве объекта исследований использовалась технологическая операция доводки поверхности детали «Призма» производства АО «Алтайский завод прецизионных изделий» после операции формирования твердого алмазоподобного покрытия типа ta-C на трех рабочих гранях детали. Образцами служили сами детали «Призма».

Износостойкое покрытие ta-C Diamor наносится в ООО «ТехноТерм-Саратов» на высокотехнологичной установке DREVA 600 LAM немецкого производства. В данной установке используется лазерно-дуговая технология осаждения тетраэдрически связанных аморфных слоев углерода на поверхность детали в высоковакуумной установке. Образование слоя поддерживается плазмой, которая образуется в единичном режиме с помощью источников покрытия и плазмы полых катодов или при их параллельной работе. К плоским граням детали после осуществления алмазного покрытия предъявляются высокие требования к точностным параметрам и к шероховатости поверхности, которая не должна превышать по параметру $Ra = 0,04$ мкм.

Шероховатость поверхности использовалась в качестве основного контролируемого показателя в процессе экспериментальных исследований и измерялась по параметру Ra портативным прибором Marsurf PS1. На каждой обработанной поверхности образца измерение производилось 3 раза, в дальнейшем определялось среднее значение показателя. Контроль глубины покрытия осуществлялся приготовлением микрошлифов на приборе CALOTEST® с последующим измерением параметров микрошлифа на микроскопе Olympus BX51.

Экспериментальные исследования осуществлялись на заточном станке 3М642. Образец закреплялся в машинных тисках. Перед окончательным зажимом детали обрабатываемая поверхность устанавливалась горизонтально с помощью уровня. В качестве инструмента использовалась стальная круговая металлическая щетка.

Для проведения экспериментальных исследований использовался полный факторный эксперимент 2^3 . Область определения варьируемых факторов при обработке на заточном станке приведена в табл. 1.

1. Варьируемые факторы и области их определения

| № п/п | Наименование фактора, размерность | Обозначения факторов | Кодовые обозначения | Границы области определения | |
|-------|--------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|---------|
| | | | | Нижний | Верхний |
| 1 | Частота вращения инструмента, об/мин | n | X_1 | 2240 | 4500 |
| 2 | Поперечная подача, мм/ход | S_x | X_2 | 0,5 | 1,0 |
| 3 | Скорость продольной подачи, мм/мин | v_s | X_3 | 260 | 520 |

Каждый опыт осуществлялся дважды: при прямом и обратном рабочем ходе в одном и том же режиме. Показатель шероховатости фиксировался на каждом рабочем ходе.

В качестве математической модели были приняты линейные зависимости показателя обработки от варьируемых факторов. Обработка результатов эксперимента осуществлялась по общепринятой методике [10]. Для проверки гипотезы однородности дисперсии использовался критерий Кохрена. Значимость

коэффициентов регрессии определяли по t – критерию Стьюдента. Адекватность модели оценивали по критерию Фишера. Во всех этих случаях уровень значимости принимался равным 5 %.

На рис. 2 представлена зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля Ra обработанной поверхности (далее – шероховатости поверхности) от частоты вращения инструмента.

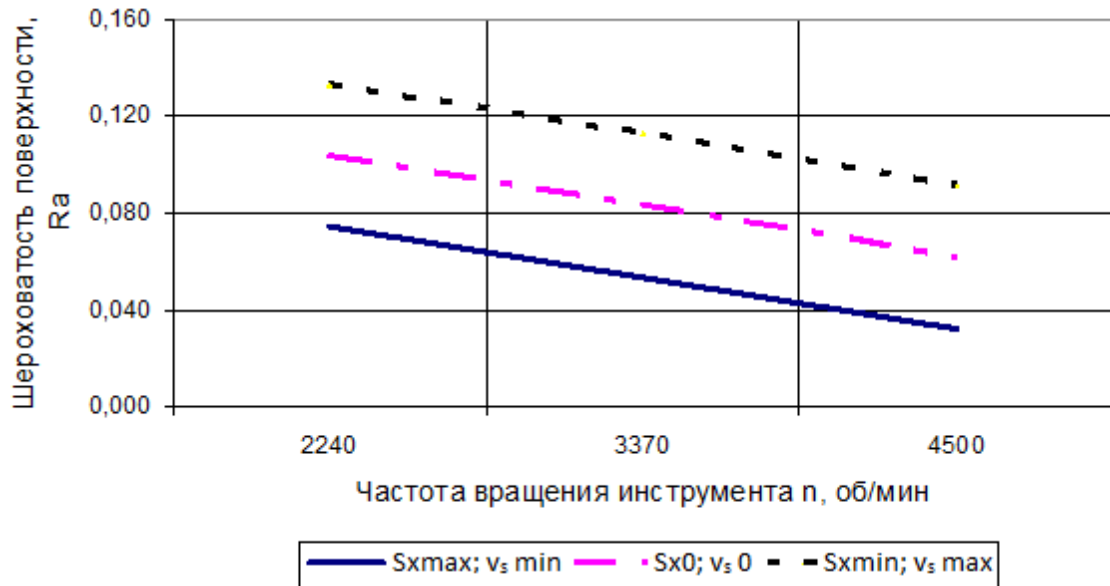


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента n (об/мин) при различных сочетаниях поперечной подачи инструмента S_x (мм/ход) и скорости продольной подачи v_s (мм/мин)

Как показано на рис. 2, с возрастанием частоты вращения инструмента шероховатость поверхности уменьшается. Это объясняется тем, что частота вращения инструмента оказывает двойное влияние на шероховатость получаемой поверхности. С одной стороны, с возрастанием частоты вращения инструмента увеличивается сила удара щетинок металлической щетки о вершины микронеровностей. А так как поликристаллический алмаз, покрывающий поверхность образца, является хрупким материалом, то с увеличением силы ударов происходит более интенсивное скалывание вершин микронеровностей. Это является одним из действующих факторов, обеспечивающих снижение шероховатости обрабатываемой поверхности.

Кроме того, с возрастанием частоты вращения инструмента повышается энергия трения щетинок металлической щетки с обрабатываемой поверхностью. Это приводит к повышению температуры в рабочей зоне. С повышением температуры возрастает интенсив-

ность химико-термического процесса, происходящего на обрабатываемой поверхности, в результате которого происходит фазовый переход с образованием графита. Химико-термический процесс более интенсивно идет на вершинах микронеровностей, чем во впадинах, поэтому происходит уменьшение шероховатости поверхности.

Хотя оба процесса – механический, приводящий к скалыванию вершин микронеровностей, и химико-термический, приводящий к графитизации обрабатываемой поверхности, осуществляются одновременно, влияние каждого из этих процессов на формирование микрорельефа обработанной поверхности различен. На взгляд авторов, при первом (черновом) проходе механический фактор превалирует над химико-термическим. Поэтому на первом проходе интенсивно скалываются вершинки микрорельефа, что приводит к резкому снижению шероховатости исходной поверхности.

Исходное значение шероховатости поверх-

ности образцов составляло $Ra = 0,30$ мкм, а после первого прохода, как показано на рис. 2, оно находилось в зависимости от режима обработки в пределах $Ra = 0,038 \dots 0,125$ мкм, то, следовательно, снижение шероховатости поверхности происходит в несколько раз. И это происходит всего за 4...6 с. Скорость химико-термического процесса не настолько велика, чтобы за такое короткое время столь существенно уменьшить шероховатость поверхности.

На рис. 3 показан график зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra от поперечной подачи инструмента S_x . С увеличением поперечной подачи шероховатость об-

работанной поверхности уменьшается. Это объясняется тем, что с возрастанием поперечной подачи увеличивается сила воздействия щетинок на обрабатываемую поверхность, число щетинок инструмента, вступающих в контакт с обрабатываемой поверхностью, и их длина прилегания к этой поверхности. Разновысотность щетинок не устраняется даже шлифованием. В этой связи, по мере увеличения поперечной подачи число работающих щетинок возрастает и увеличивается число ударов щетинок о вершинки микронеровностей. Это способствует снижению шероховатости поверхности.

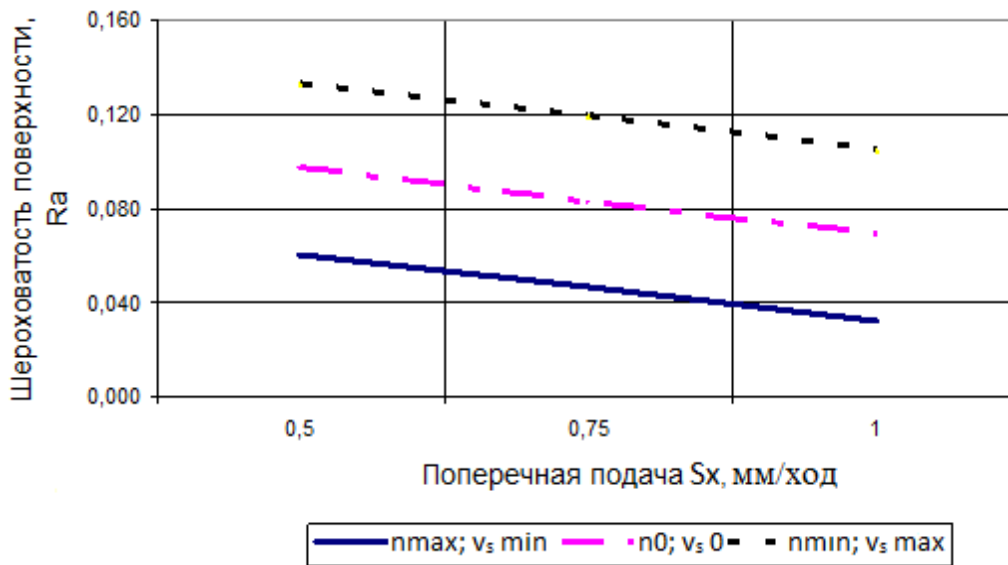


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от поперечной подачи инструмента при различных сочетаниях частоты вращения инструмента n (об/мин) и скорости продольной подачи v_s , (мм/мин)

Щетинки, которые уже вступили в контакт с поверхностью образца, изгибаются, что способствует возрастанию площади их контакта с поверхностью образца. Это увеличивает интенсивность химико-термической обработки и способствует снижению шероховатости поверхности. Влияние этого фактора на результат обработки менее значителен, чем влияние частоты вращения инструмента. С увеличением поперечной подачи в 2 раза от (0,5...1 мм/ход) шероховатость поверхности по параметру Ra снижается в 1,26 раза, при $n \min; v_s \max$ и в 1,8 раза при $n \max; v_s \min$.

На рис. 4 приведена зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra от скорости продольной подачи образца. Влияние скорости продольной подачи образца на шероховатость обработанной поверхности отличается от влияния других факторов тем, что с возрастанием значения этого фактора шерохо-

ватость поверхности возрастает. Объясняется это тем, что с увеличением скорости продольной подачи уменьшается время контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, что приводит к снижению числа ударов щетинок инструмента о выступы микронеровностей. Кроме того, с возрастанием скорости продольной подачи улучшаются условия охлаждения рабочей зоны и уменьшается температура в зоне обработки. Одновременное снижение механического и химико-термического воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность с возрастанием скорости продольной подачи способствует увеличению шероховатости поверхности.

Степень влияния этого фактора на шероховатость обработанной поверхности примерно равно влиянию поперечной подачи, но действует в противоположном направлении.

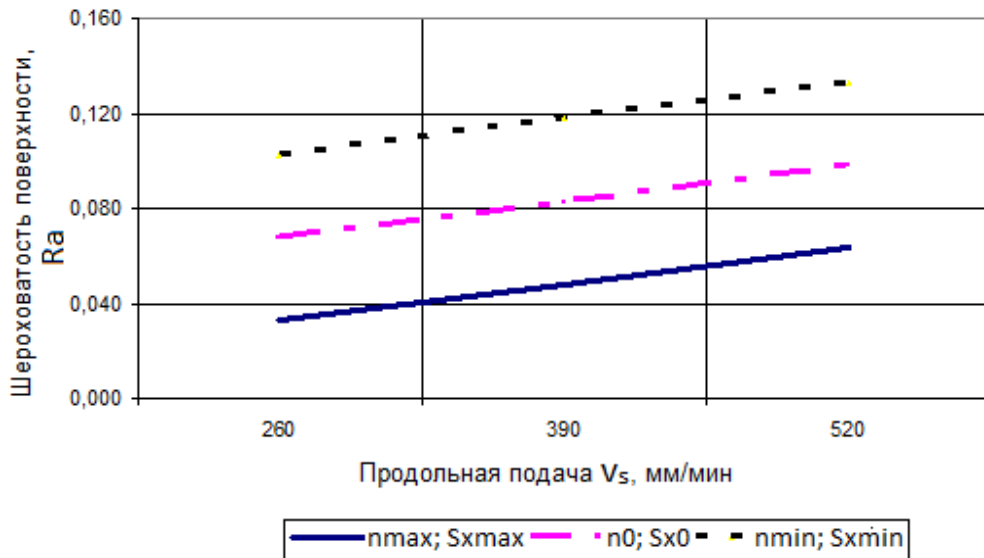


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от скорости продольной подачи инструмента при различных сочетаниях частоты вращения инструмента n (об/мин) и поперечной подачи S_x (мм/ход)

Заслуживает внимания и высокая нестабильность результатов обработки. Так, среднее квадратическое отклонение (СКО) величины шероховатости Ra по результатам опытных данных составило $\sigma = 0,011$ мкм. Среднее значение шероховатости обработанной поверхности по параметру $Ra = 0,083$ мкм. Поле рассеивания случайной величины обычно принимают равным 6σ , в данном случае составляет $6\sigma = 0,066$ мкм. Таким образом, поле рассеивания среднего значения шероховатости близко к самому значению среднего. В отдельных точках опыта разница повторяемых значений шероховатости достигает 2-х раз и более.

Для повышения стабильности полученных результатов и снижения шероховатости осуществляли второй рабочий ход в обратном направлении. На рис. 5 показана зависимость параметра шероховатости Ra от частоты вращения инструмента n , полученной в результате второго (чистового) рабочего хода. Из сравнения рис. 2 и 5 видно, что, шероховатость поверхности после второго рабочего хода в целом существенно уменьшилась – в 1,6 - 2,0 раза. Особенно значительно шероховатость уменьшилась при малых исходных значениях шероховатости. Это объясняется тем, что при втором рабочем ходе основное влияние на шероховатость поверхности оказывает химико-термический процесс, происходящий в зоне обработки. Щетинки инструмента скользят по гладкой поверхности, и поэтому влияние механического фактора снижается. Следовательно, снижение шероховатости поверхности на втором проходе осуществля-

ется преимущественно за счет графитизации поверхности покрытия, которое на вершинах микронеровностей идет более активно, чем во впадинах.

На рис. 6 показана зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra от поперечной подачи S_x инструмента. С увеличением поперечной подачи инструмента шероховатость поверхности снижается. При изменении величины поперечной подачи в два раза снижение шероховатости поверхности по параметру Ra составляет 20 % при минимальном значении частоты вращения инструмента и максимальной скорости продольной подачи и более 80 % при максимальной частоте вращения инструмента и минимальной скорости продольной подачи. Это объясняется тем, что с возрастанием поперечной подачи увеличивается число щетинок инструмента, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, и увеличением площади контакта, так как щетинки при большой глубине прогибаются и более плотно прилегают к обрабатываемой поверхности.

С увеличением площади контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью возрастает температура в зоне обработки. Все это активизирует химико-термический процесс, происходящий в зоне обработки, и способствует снижению шероховатости поверхности.

На рис. 7 показана зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra от скорости продольной подачи образца v_s . С возрастанием скорости продольной подачи шероховатость обработанной поверхности возрастает. Механизм этого влияния тот же, что и при

первом проходе – с увеличением скорости продольной подачи уменьшается время контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью и улучшаются условия охлаждения зоны обработки. Это приводит к снижению

как механического, так и химико-термического воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность, и способствует увеличению шероховатости поверхности.

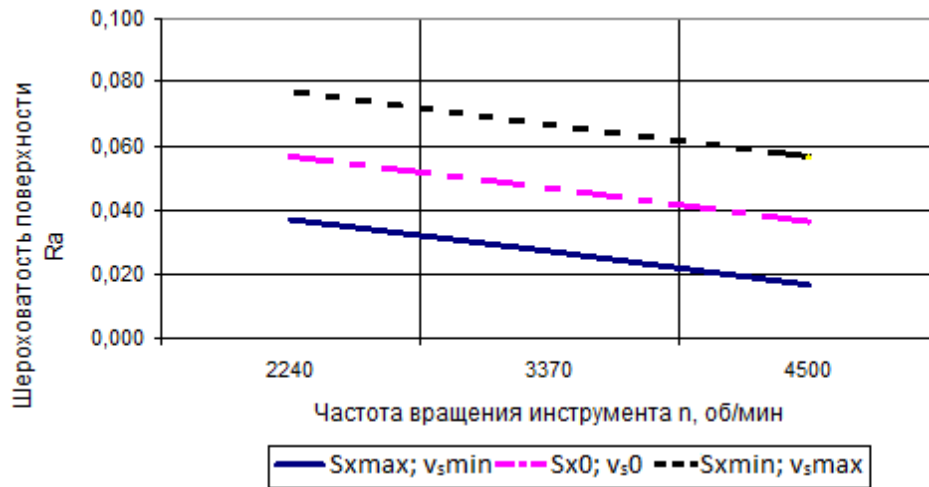


Рис. 5. Влияние частоты вращения инструмента на шероховатость обработанной поверхности после второго рабочего хода при различных сочетаниях поперечной подачи инструмента S_x (мм/ход) и скорости продольной подачи v_s (мм/мин)

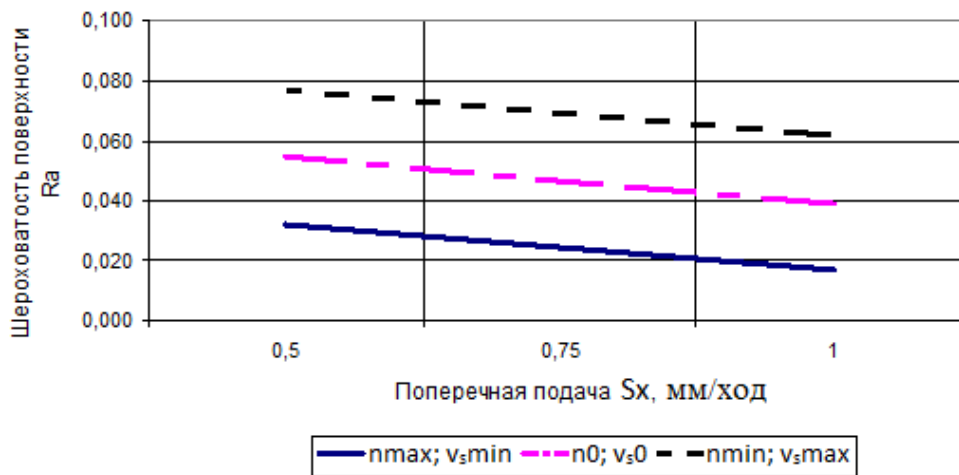


Рис. 6. Влияние поперечной подачи инструмента на шероховатость обработанной поверхности после второго прохода при различных сочетаниях частоты вращения инструмента n (об/мин) и скорости продольной подачи v_s (мм/мин)

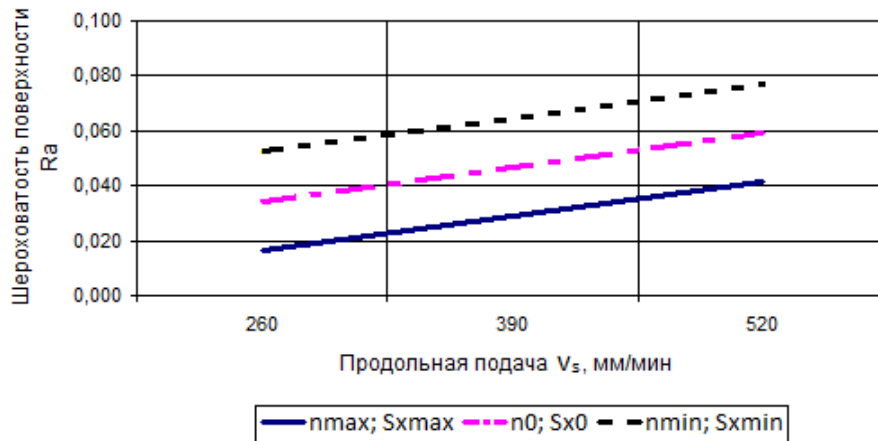


Рис. 7. Влияние скорости продольной подачи на шероховатость обработанной поверхности после второго прохода при различных сочетаниях частоты вращения инструмента n (об/мин) и поперечной подачи S_x (мм/ход)

На втором проходе существенно снижается дисперсия рассеивания значений шероховатости поверхности в различных точках опытов. Среднее значение СКО после второго прохода уменьшилось почти в 2 раза и составило $\sigma = 0,0057$ мкм. Но и шероховатость поверхности по параметру Ra тоже снизилась примерно на ту же величину и в среднем составила $Ra = 0,047$ мкм.

При исходной толщине поликристаллического алмазного покрытия деталей 2,8...3,2 мкм после полирования толщина покрытия находилась в пределах 1,8...2 мкм, что соответствует техническим условиям на изготовление данных деталей.

Выводы

Процесс полирования поликристаллического алмазного покрытия металлической щеткой обеспечивает возможность с высокой производительностью обеспечить низкое значение шероховатости поверхности покрытия небольшой толщины. Это достигается тем, что в процессе такой обработки происходит одновременное действие двух факторов – механического скалывания вершин хрупкого материала щетинками инструмента и химико-термического воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность, в результате чего происходит графитизация вершин микронеровностей. Рекомендующим режимом обработки является следующий: частота вращения металлической щетки – 3000...4000 об/мин; поперечная подача – 0,5...1 мм/ход; скорость продольной подачи – 300...400 мм/мин. Обработку следует осуществлять в 2 прохода: в прямом и обратном направлениях. Особенностью процесса полирования металлической щеткой является также то, что обработку деталей можно осуществлять в многоместном приспособлении напроход, что дополнительно повышает производительность процесса полирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чепуров, А.И. Взаимодействие алмаза с ультрадисперсными частицами железа в среде водорода: микроморфология поверхности / А.И. Чепуров, В.М. Сонин, А.А. Чепуров, Е.И. Жимулев, С.С. Косолюбов, Н.В. Соболев // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 447. – № 3. – С. 322-325.
2. Chepurov A., I., Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Pomazansky B.S., Zemnukhov A.L. Dissolution of diamond crystals in a heterogeneous (metal-sulfide-silicate) medium at 4 GPA and 1400 °C // Journal of Mineralogical and Petrological Science. – 2018. – Т. 113. – № 2. – С. 59-67.

3. Сонин, В.М. Взаимодействие железа с дефектами структуры на гранях синтетических кристаллов алмаза в атмосфере водорода / В.М. Сонин // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40. – № 1. – С. 25-27.

4. RU2369473. Способ полирования поверхности поликристаллических алмазов. В24В 1/00. Оpubл. 10.10.2009.

5. RU 2483856. Способ полировки алмазных пластин. В24В 37/04, В24В 1/00. Оpubл. 10.06.2013. Бюл. № 16.

6. Чем шлифуют алмазы: <http://www.bolshoyvopros.ru/questions/246754-chem-shlifujut-almazy.html> (дата обращения 12.10.2019).

7. Полировка алмазов: http://www.brilliant-info.ru/polishing_diamond.html (дата обращения 12.10.2019).

8. Григорьева, Е.Э. Технология обработки алмазов в бриллианты. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов / Е.Э. Григорьева // Наука и образование. – 2010. – Т.1. – № 2(9). – С. 77.

9. Кирсанов, С.В. Влияние «сухого» полирования твердосплавных образцов на характеристики износостойкого покрытия / С.В. Кирсанов, И.М. Гончаренко, А.С. Бабаев // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – №4 (193). – С. 12-15.

10. Спиридонов, А.А. Планирование экспериментов при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

REFERENCES

1. Chepurov, A.I. *Interaction of diamond with ultra-disperse iron particles in hydrogen environment: surface micromorphology* / A.I. Chepurov, V.M. Sonin, A.A. Chepurov, E.I. Zhimulev, S.S. Kosolobov, N.V. Sobolev // *Proceedings of the Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 447. – No.3. – pp. 322-325.
2. Chepurov A., I., Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Pomazansky B.S., Zemnukhov A.L. *Dissolution of diamond crystals in a heterogeneous (metal-sulfide-silicate) medium at 4 GPA and 1400 °C* // *Journal of Mineralogical and Petrological Science*. – 2018. – Т. 113. – № 2. – С. 59-67.
3. Sonin, V.M. *Interaction of iron with structure fault upon facets of diamond synthetic crystals in hydrogen environment* / V.M. Sonin // *Inorganic Materials*. 2004. – Vol.40. – No.1. – pp. 25-27.
4. RU2369473. *Method for Polycrystalline Diamond Surface Polishing*. В24В 1/00. Published: 10.10.2009.
5. RU 2483858. *Method for Diamond Plate Polishing*. В24В 37/04, В24В 1/00. Published: 10.06.2013. Bull. No.16.
6. *How diamonds are polished*: <http://www.bolshoyvopros.ru/questions/246754-chem-shlifujut-almazy.html> (address date: 12.10.2019).
7. *Diamond polishing*: http://www.brilliant-info.ru/polishing_diamond.html (address date: 12.10.2019).
8. Grigorieva, E.E. *Technology of diamond processing into brilliant. Chronicles of electronic resource united fund* / E.E. Grigorieva // *Science and Education*. – 2010. – Vol.1. – No.2 (9). – pp. 77.
9. Kirsanov, S.V. *“Dry” polishing impact of hard-alloy samples upon wear-resistant coating properties* / S.V. Kirsanov, I.M. Goncharenko, A.S. Babaev // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2013. – No.4 (193). – pp. 12-15.
10. Spiridonov, A.A. *Experiment Planning at Engineering Process Investigations* / A.A. Spiridonov. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 184.

Рецензент д.т.н. А.Н. Васин