

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.11

УДК 621.9

К.Р. Муратов, Е.А. Гашев, Д.М. Лагунов, Е.В. МатыгуллинаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛОКЕРАМИКИ**

В представленной статье проведены исследования финишной абразивной обработки деталей из минералокерамики ЦМ-332 (HRC 90–93). В ходе исследований установлено, что производительность абразива на основе синтетического алмаза в восемь и более раз выше по сравнению с производительностью абразива на основе электрокорунда и карбида кремния зеленого. При обработке минералокерамики предпочтительней использовать чугунный притир марки СЧ-28, который показал лучшую работоспособность как по величине суммарного съема, так и по величине удельного расхода алмазов и шероховатости доведенной поверхности. Для получения необходимой шероховатости по параметру $Rz = 0,8$ мкм рекомендуется использовать микропорошок алмаза зернистостью 10 мкм. Оптимальное количество микропорошка на поверхности притира диаметром 220–250 мм для зернистости АСМ10 следует считать 20–40 мг, для зернистости АСМ20 – 40–80 мг. Увеличение удельного давления с 25 до 50 кПа приводит к повышению суммарного съема, при этом уменьшается удельный расход алмазов, а также снижается шероховатость обработанной поверхности. Оптимальное время доводки минералокерамики без замены алмазного микропорошка 6–8 мин. Амплитуда и частота колебаний притира являются основными параметрами режима работы плоскодоводочного станка «Растр 220». Доводку минералокерамики более предпочтительно проводить при частоте колебаний притира (инструмента) 270 двойных ходов/мин и амплитудах до 10 мм. Плоскостность доведенных поверхностей напрямую зависит от геометрической точности рабочей поверхности притира. Для обеспечения высокой плоскостности поверхности притиров необходимо периодически осуществлять их правку методом трех плит.

Ключевые слова: минералокерамика, абразивная обработка, материал инструмента, удельное давление, амплитуда колебаний притира, частота колебаний притира, время доводки, зернистость микропорошков, шероховатость поверхности, суммарный съем материала.

K.R. Muratov, E.A. Gashev, D.M. Lagunov, E.V. Matygullina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH LAPPING PROCESS OF THE MINERAL CERAMICS

The paper presents the research lapping mineral ceramics CM-332 (HRC 90–93). During the investigations it was established that the performance synthetic diamond and more than 8 times higher compared to the performance of the abrasive based on corundum and silicon carbide green. When processing mineral ceramics is preferable to use a cast-iron lap marks SCH-28, which showed the best performance, as value the total removal material and value specific consumption of diamond and the surface roughness. To obtain the necessary roughness parameter $Rz = 0.8$, it is recommended to use a micropowder of diamond grit size of 10 microns. The optimum amount of micropowder on surface lap diameter 220-250 mm for grain ASM10 – 20-40 mg, for grain ASM20 – 40-80 mg. Increasing the surface pressure of 25 to 50 kPa increases the total removal material, reducing the specific consumption of

diamond, and reduces the surface roughness. The optimal time for lapping of the mineral ceramics without changing diamond micropowder 6-8 minutes. The amplitude and frequency of lap are the main parameters for lapping machine "Raster 220". Lapping mineral ceramics more preferably carried out at a frequency of oscillation lap (tool) 270 1/min. and an amplitude of 10 mm. Flatness of lapping surfaces depends on the geometrical accuracy of the working surface of lap. To ensure a high surface flatness of lap is necessary to periodically carry them by three plates editing method.

Keywords: mineral ceramics, lapping, tool material, surface pressure, amplitude of oscillation lap, frequency of oscillation lap, lapping time, grain micropowders, surface roughness, total removal of material.

Минералокерамика – это синтетический материал, в основу которого положен технический глинозем (Al_2O_3). Широкое применение в настоящее время получила минералокерамика марки ЦМ-332 – микролит. По твердости (HRC 91–93), тепло- и износостойкости он превосходит твердые сплавы. К недостаткам микролита относят низкую прочность и большую хрупкость. Инструменты, оснащенные пластинками микролита, не теряют своей твердости при нагревании в процессе работы до 1200 °С, поэтому их с большой эффективностью применяют в условиях безударной нагрузки при чистовой и получистовой обработке стальных и чугуновых деталей, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов при высоких скоростях с небольшими глубинами резания и подачами [1, 2]. Финишную абразивную обработку минералокерамики производят в несколько технологических операций: черновая, чистовая и доводочная. Данные технологические операции отличаются главным образом количеством сошлифованного материала и получаемой шероховатостью обработанной поверхности [3–6].

Исследуемые образцы минералокерамики нами предварительно шлифовались, после шлифования торцы образцов доводились на станке с растровой траекторией движения инструмента (притира) «Растр 220» [7, 8]. Проведены исследования для установления оптимальных значений следующих технологических параметров финишной абразивной обработки:

1. Режимы работы станка, определяющие параметры растровой траектории движения инструмента.

2. Материал абразива.

3. Зернистость абразива.

4. Количество абразивного материала.

5. Удельное давление.

6. Время обработки.

7. Материал доводочного инструмента.

Основными параметрами, характеризующими результат финишной обработки, являлись:

- 1) величина съема материала в единицу времени;
- 2) шероховатость обработанной поверхности;
- 3) отклонение от плоскостности обработанной поверхности.

Величина съема материала детали определялась как разность высот деталей до и после доводки. Измерения размеров проводились на вертикальном длинномере ИЗВ-2 с ценой деления шкалы 0,001 мм. Шероховатость обработанной поверхности оценивалась по параметрам Ra, Rz (мкм). Измерение проводилось на профилометре-профилографе типа А1, модели 252, ГОСТ 19299–73, изготовитель «Калибр». Отклонение от плоскостности обработанной поверхности определялось интерференционным методом с помощью плоских стеклянных пластин ПИ 120 по ГОСТ 2923–75. Отклонение от плоскостности определяют по величине искривления интерференционных полос. При контроле в белом свете искривление, равное ширине одной полосы, соответствует отклонению от плоскостности 0,27 мкм, двух полос – 0,54 мкм и т.д. Интерференционные полосы становятся видимыми при шероховатости контролируемой поверхности менее $Ra = 0,12$ мкм [10, 11].

Для рационального выполнения плоской растровой доводки минералокерамики необходимо установление оптимальных условий обработки, обеспечивающих при достаточной производительности и минимальном удельном расходе абразива необходимое качество обработанной поверхности – шероховатость Rz 0,8–1,0 мкм и отклонение от плоскостности не более 0,6 мкм.

Известно, что свойства применяемого при доводке абразивного микропорошка оказывают существенное влияние на результаты обработки. Особенно это должно проявляться при доводке такого высокопрочного материала, как минералокерамика [12–14]. Нами проведены сравнительные исследования работоспособности микропорошков электрокорунда белого ЭБМ40, карбида кремния зеленого КЗМ40 и алмаза синтетического АСМ40 при доводке минералокерамики на притирах, изготовленных из различных материалов. Доводка минералокерамики микропорошком ЭБМ40 на притире из перлитного чугуна марки СЧ-28 за 4 мин обработки показала наименьшую величину суммарного съема, немного больше при обработке микропорошком КЗМ40 и в 10 раз больше при доводке микропорошком синтетического

алмаза АСМ 40 (рис. 1). Объясняется это тем, что твердость обрабатываемого материала – минералокерамики – мало уступает твердости микропорошков электрокорунда ЭБМ40 и карбида кремния КЗМ40, однако значительно меньше твердости алмаза синтетического АСМ40.

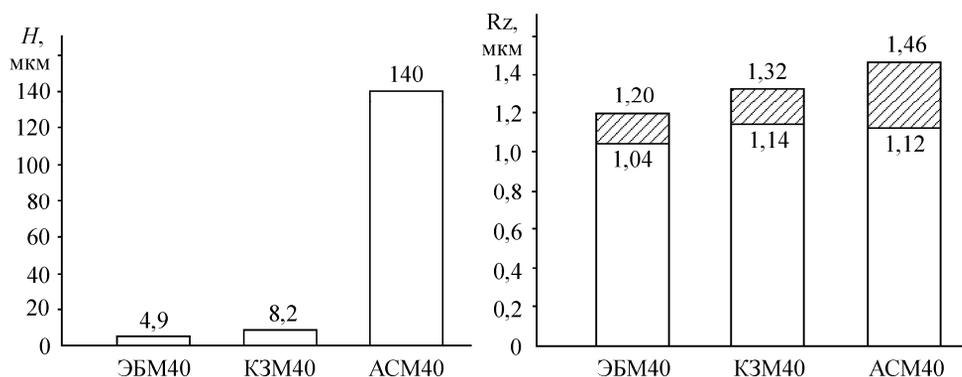


Рис. 1. Зависимость суммарного съема H (мкм) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от вида абразивного материала микропорошка. Материал притира – чугун СЧ-28

Шероховатость обработанной поверхности мало зависит от рода абразивного материала, что связано, очевидно, с особым характером съема в виде микровыкрашивания при доводке такого хрупкого материала, как минералокерамика. Однако лучшая шероховатость обработанной поверхности наблюдается при доводке электрокорундом ЭБМ40, наихудшая – при обработке алмазом синтетическим АСМ40. Это можно объяснить более активным измельчением абразивных зерен ЭБМ40 по сравнению с зернами алмаза.

Отклонение от плоскостности доведенной поверхности не зависит от применяемого абразивного материала и во всех случаях доводки минералокерамики на станке «Растр 220» составляет не более 0,6 мкм.

Также результаты по производительности и шероховатости обработанной поверхности получены при доводке на стальном и стеклянном притирах (рис. 2 и 3).

Проведенные эксперименты показали, что работоспособность микропорошка алмаза синтетического АСМ40 по величине суммарного съема в 8–30 раз больше по сравнению с работоспособностью микропорошков ЭБМ40 и КЗМ40, по плоскостности обработанной поверхности не отличается от работоспособности микропорошков

ЭБМ40 и КЗМ40, наибольшая шероховатость доведенной поверхности получена при доводке порошком из синтетического алмаза.

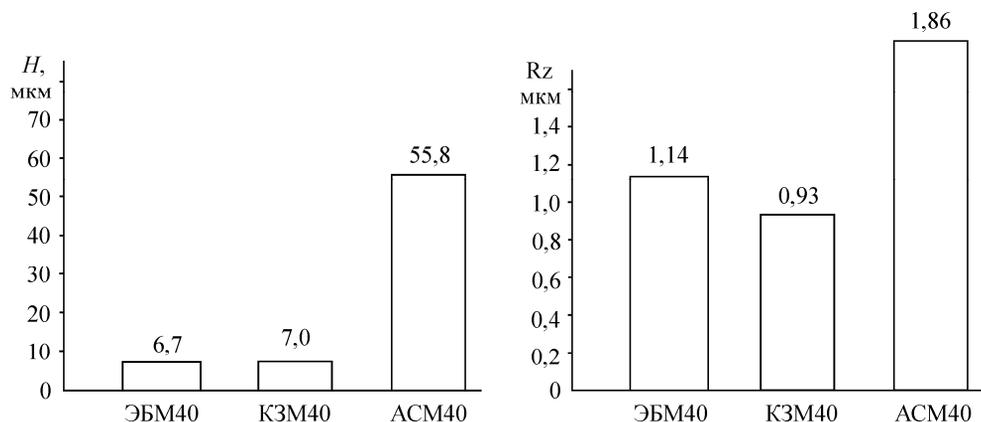


Рис. 2. Зависимость суммарного съема H (мкм) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от разновидности абразивного материала микропорошка. Материал притира – сталь

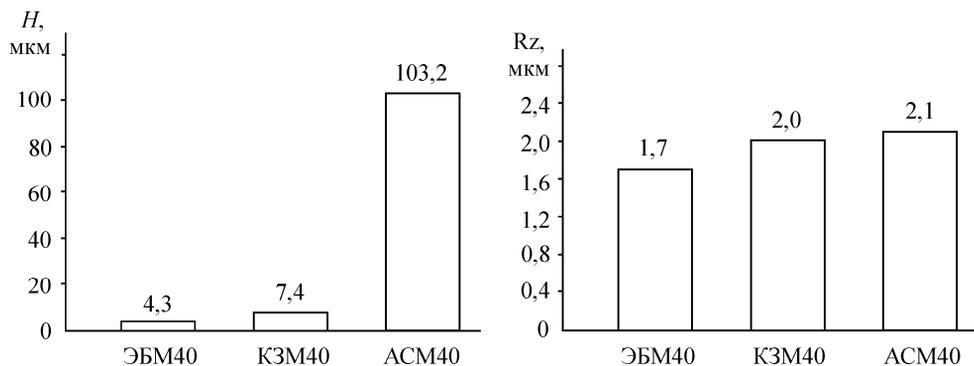


Рис. 3. Зависимость суммарного съема H (мкм) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от разновидности абразивного материала микропорошка. Материал притира – стекло оптическое (ЛК-5)

Из опыта доводочных и притирочных работ известно, что материал притира оказывает заметное влияние на качество обработанной поверхности и во многом определяет производительность доводки. Существенную роль при этом играет рациональное сочетание свойств материала притира и обрабатываемой детали [15, 16]. Однако в литературе отсутствуют данные об оптимальном сочетании материала детали – материала притира для случая доводки минералокерамики. Вместе

с тем известно, что для доводки деталей из твердых материалов предпочтительно использовать притиры из более мягких материалов. Но минералокерамика имеет очень высокую твердость, и по сравнению с ней притиры из чугуна, стали, стекла являются мягкими, поэтому были проведены сравнительные исследования притиров, изготовленных из чугуна перлитного, закаленной стали У7А и стекла оптического (рис. 4).

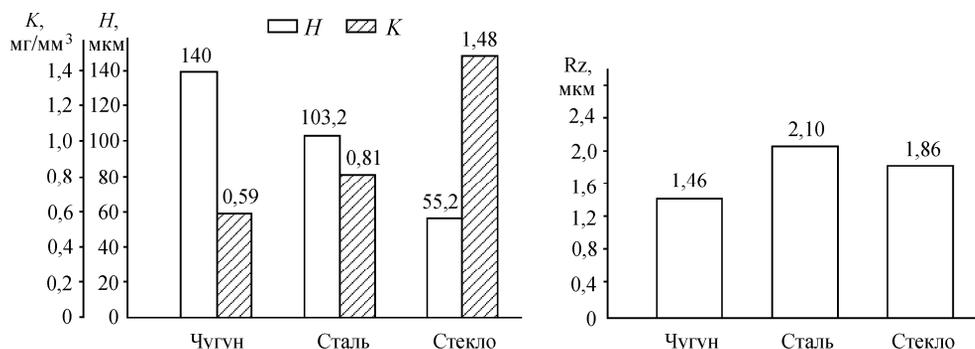


Рис. 4. Зависимость суммарного съема H (мкм), удельного расхода алмазов K (мг/мм³) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от материала притира. Микропорошок АСМ40, $p = 50$ кПа, $T = 4$ мин

Установлено, что наибольшая величина суммарного съема материала обеспечивается при доводке на чугунном притире, меньшая – на стальном притире и самая наименьшая – на стеклянном притире (см. рис. 4). Условный удельный расход алмазов за 4 мин доводки наименьший при обработке на чугунном притире, больший – на стальном притире, и самый большой – на притире из оптического стекла.

Шероховатость обработанной поверхности также зависит от материала притира. Наименьшая высота микронеровностей наблюдается при доводке на чугунном притире, более высокая – на стеклянном притире, и самая высокая шероховатость на стальном притире. Это объясняется разным процессом шаржирования абразивных зерен в поверхность притира. Больше всего абразивные зерна шаржируются в поверхность притира, изготовленного из чугуна, и практически не шаржируются в притиры из закаленной стали и оптического стекла.

Таким образом, чугунный притир имеет наилучшую работоспособность как по величине суммарного съема, так и по удельному расходу алмазов и шероховатости обработанной поверхности. Следует

отметить что при доводке минералокерамики с контактным давлением 50 кПа наблюдается повышенный износ стеклянного притира.

С изменением зернистости алмазного микропорошка при прочих равных условиях изменяются размеры и количество алмазных зерен, участвующих в работе, поэтому изменение зернистости микропорошка сказывается на условиях микрорезания и влияет на производительность доводки, удельный расход алмазов и шероховатость обработанной поверхности.

Результаты исследования доводки минералокерамики микропорошками различной зернистости показали, что величина суммарного съема возрастает при увеличении зернистости микропорошка от АСМ5 до АСМ40 (рис. 5). Объясняется это тем, что по мере увеличения размеров алмазных зерен уменьшается их общее количество, увеличивается нагрузка на каждое зерно, оно глубже проникает в обрабатываемый материал и срезает микростружки больших размеров. С увеличением зернистости условный удельный расход алмазов снижается, причем особенно интенсивно – при изменении зернистости от АСМ5 до АСМ10. С увеличением зернистости алмазного микропорошка от АСМ5 до АСМ40 высота неровностей доведенной поверхности возрастает от $Rz = 0,27$ до $Rz = 1,12$.

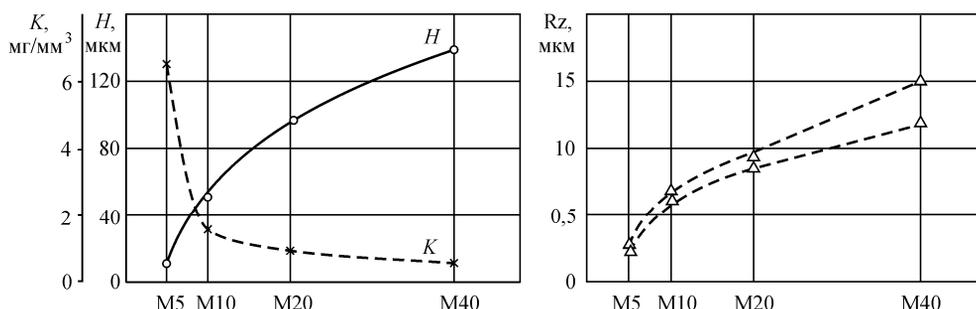


Рис. 5. Зависимость суммарного съема H (мкм), удельного расхода алмазов K (мг/мм³) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от зернистости микропорошка алмаза синтетического: $p = 50$ кПа, $T = 4$ мин, притир – чугун СЧ-28

Установлено, что при растровой доводке минералокерамики порошками АСМ5, АСМ10, АСМ20, АСМ40 обеспечивается минимальное отклонение от плоскостности до 0,3 мкм. Учитывая, что при доводке микропорошком АСМ20 обеспечивается достаточно высокая

производительность, невысокий удельный расход алмазов и требуемая шероховатость поверхности $Rz = 0,8 \dots 0,9$, большинство дальнейших исследований проводили с использованием этого микропорошка.

Количество алмазного микропорошка, наносимого на притир, оказывает влияние на результаты процесса и, в первую очередь, на удельный расход алмазов и производительность процесса.

При проведении опытов количество алмазного микропорошка АСМ20, наносимого на поверхность чугунного притира, изменялось в пределах от 50 до 175 мг (от 14 до 50 см^3).

Нами установлено, что по мере увеличения количества алмазного микропорошка возрастает как величина суммарного съема материала, так и условный удельный расход алмазов. Данные представлены на рис. 6.

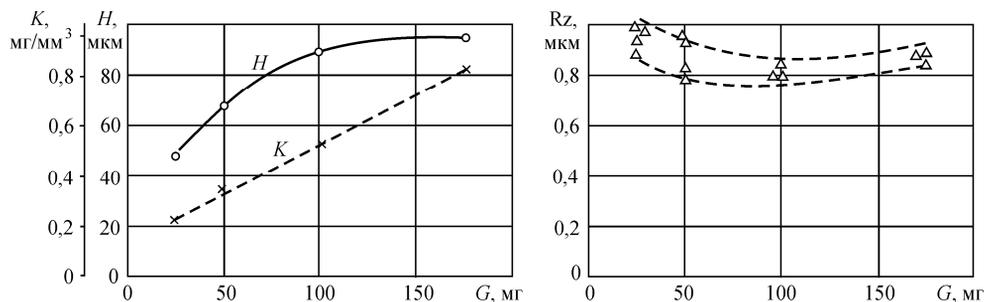


Рис. 6. Зависимость суммарного съема H (мкм), удельного расхода алмазов K ($\text{мг}/\text{мм}^3$) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от количества микропорошка алмаза синтетического АСМ20; $p = 50$ кПа, $T = 4$ мин, притир – чугун СЧ-28

Однако при увеличении количества микропорошка от 100 до 175 мг величина суммарного съема возрастает незначительно (с 93 до 97 мкм), а условный удельный расход алмазов увеличивается почти вдвое (с 0,52 до 0,85 $\text{мг}/\text{см}^3$). Шероховатость обработанной поверхности практически не зависит от количества микропорошка и находится в пределах 0,78–1,0 мкм. Также установлено, что изменение количества микропорошка в указанных пределах не оказывает существенного влияния на плоскостность обработанной поверхности.

Аналогичные результаты были получены при изменении количества алмазного микропорошка АСМ зернистостью 10 мкм (рис. 7).

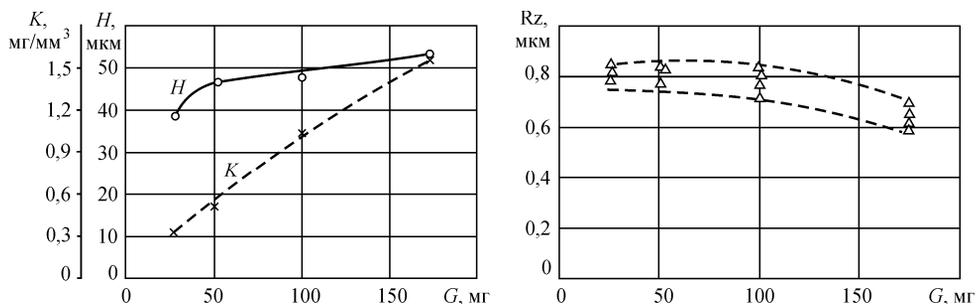


Рис. 7. Зависимость суммарного съема H (мкм), удельного расхода алмазов K (мг/мм^3) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от количества микропорошка алмаза синтетического АСМ10; $p = 50$ кПа, $T = 4$ мин, притир – чугун СЧ-28

Следует лишь отметить, что при увеличении количества микропорошка АСМ10 от 50 до 175 мг величина суммарного съема возрастает незначительно, тогда как удельный расход алмазов увеличивается втрое (с 0,51 до 1,57 мг/см^3).

Таким образом, при доводке на оборудовании с растровой траекторией движения инструмента деталей из минералокерамики на чугунном притире диаметром 220 мм оптимальное количество алмазного микропорошка для зернистости АСМ10 следует считать 20–45 мг, для зернистости АСМ20 – 40–80 мг.

Удельное давление деталей на притир передается через алмазные зерна, находящиеся между ними. Очевидно, что давление определяет величину нагрузки на каждое работающее зерно и влияет на условия микрорезания. Влияние удельного давления при доводке минералокерамики алмазным микропорошком АСМ20 на чугунном притире исследовано в диапазоне от 25 до 150 кПа. Экспериментально установлено, что величина суммарного съема заметно возрастает при увеличении удельного давления с 25 до 50 кПа и мало изменяется при дальнейшем его увеличении до 150 кПа эта зависимость представлена на рис. 8. Последнее обстоятельство можно объяснить интенсивным измельчением алмазных зерен микропорошка под воздействием большой нагрузки. Удельный расход алмазов уменьшается по мере увеличения давления, наибольшее уменьшение расхода алмазов наблюдается при изменении давления с 25 до 50 кПа.

Шероховатость обработанной поверхности уменьшается с 1,28 до 0,75 мкм при увеличении удельного давления с 25 до 50 кПа и практи-

чески не изменяется при дальнейшем его увеличении до 150 кПа. Последнее обстоятельство подтверждает предположение об интенсивном разрушении – измельчении алмазных зерен при увеличении давления.

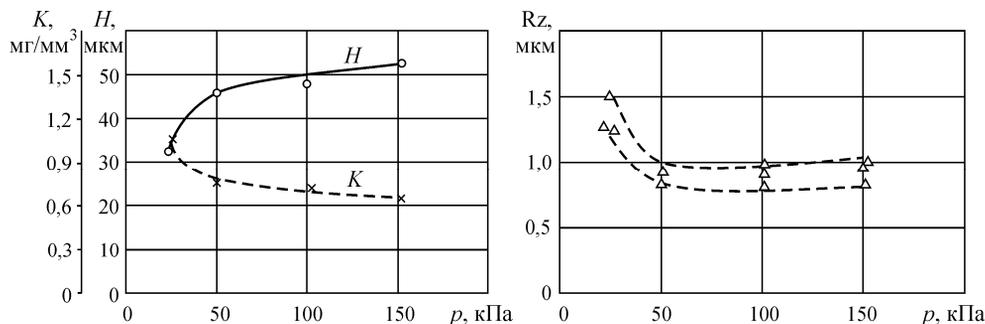


Рис. 8. Зависимость суммарного съема H (мкм), удельного расхода алмазов K (мг/мм³) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от удельного давления. Притир – чугун СЧ-28

Следует отметить, что при доводке с удельным давлением, равным 150 кПа, на поверхности чугунного притира появляются надирь и риски. Отклонение от плоскостности доведенной поверхности было в пределах 0,6 мкм. Оптимальное давление при доводке минералокерамики на чугунном притире – 50–100 кПа.

С увеличением времени доводки с 2 до 8 мин (без замены алмазного микропорошка) суммарный съем материала детали в начальный период работы возрастает пропорционально, а затем с отставанием от времени (рис. 9).

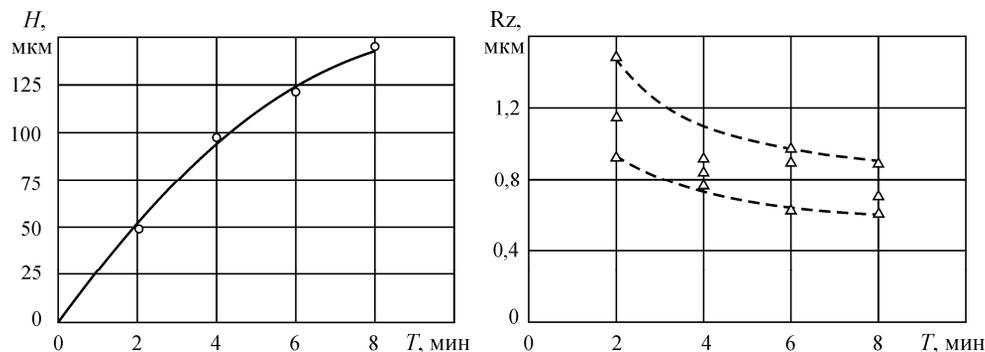


Рис. 9. Зависимость суммарного съема H (мкм) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от времени доводки. АСМ20, $p = 50$ кПа

Такое отставание съема от времени можно объяснить разрушением и измельчением алмазных зерен, появлением шлама на притире и частичным испарением жидкой среды (СОЖ). По мере увеличения времени доводки шероховатость обработанной поверхности уменьшается с 0,92 до 0,63 мкм, что также связано с постепенным измельчением абразивных зерен.

Амплитуда и частота колебаний инструмента (притира) являются важными технологическими параметрами, определяющими скорость резания при доводке на оборудовании с растровой траекторией движения инструмента. При увеличении амплитуд складываемых колебаний притира возрастает величина относительных перемещений обрабатываемой детали и притира, т.е. возрастает скорость резания.

Увеличение скорости резания способствует большей интенсивности резания-царапания и влияет на производительность доводки. В проведенных экспериментах амплитуды колебаний притира в обоих направлениях были приняты одинаковыми, расстройка частот была постоянной – 10 %. Установлено, что величина суммарного съема материала детали возрастает пропорционально увеличению амплитуд колебаний притира, эта зависимость представлена на рис. 10.

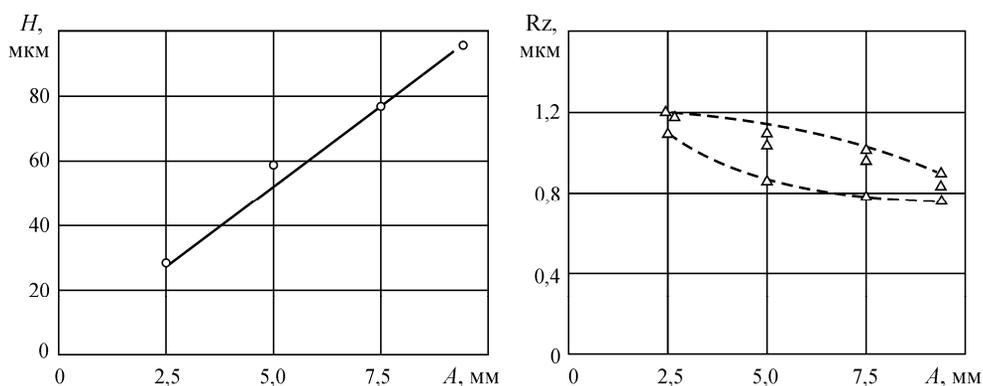


Рис. 10. Зависимость суммарного съема H (мкм) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от амплитуды колебаний притира. АСМ20, $T = 4$ мин, $p = 50$ кПа

Шероховатость обработанной поверхности уменьшается с 1,0 до 0,70 мкм при увеличении амплитуд с 2,5 до 9 мкм. Объясняется это, видимо, некоторым измельчением алмазных зерен вследствие возрастания

тания динамики процесса и относительных перемещений обрабатываемой детали, алмазных зерен и притира.

Увеличение частоты колебаний притира сопровождается возрастанием суммарного съема материала (рис. 11). Наибольшее увеличение съема наблюдается при увеличении частоты колебаний с 180 до 270 дв.ход/мин; дальнейшее увеличение частоты колебаний до 540 дв.ход/мин мало влияет на увеличение съема. Объясняется последнее обстоятельство ухудшением удержания жидкой абразивной смеси на притире при большой частоте колебаний.

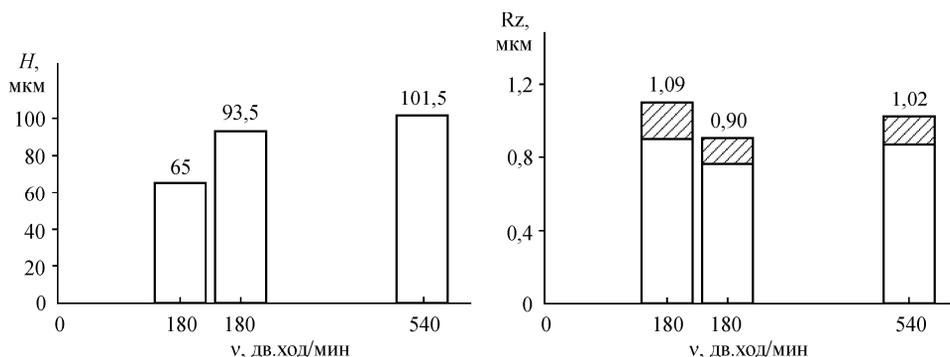


Рис. 11. Зависимость суммарного съема H (мкм) и шероховатости обработанной поверхности Rz (мкм) от частоты колебаний притира. АСМ20, $T = 4$ мин, $p = 50$ кПа

Шероховатость обработанной поверхности изменяется в пределах класса и практически не зависит от изменения частоты колебаний притира от 180 до 540 дв.ход/мин. Отклонение от плоскостности обработанной поверхности было в пределах 0,6 мкм.

Проведенное исследование процесса плоской доводки на станке с растровой кинематикой рабочего движения инструмента деталей из минералокерамики марки ЦМ-332 позволило установить влияние параметров характеристик абразивного материала, режима резания и других условий обработки на показатели процесса доводки и установить основные закономерности процесса доводки.

На основании результатов исследования представляется возможным сделать следующие выводы:

1. При доводке на станке с растровой кинематикой деталей, изготовленных из минералокерамики марки ЦМ-332, установлено, что работоспособность микропорошка алмаза в 8–30 раз больше по сравне-

нию с работоспособностью микропорошков электрокорунда ЭБМ40 и карбида кремния зеленого КЗМ40. Отклонение от плоскостности практически не зависит от вида абразива, шероховатость поверхности при обработке алмазным микропорошком незначительно выше. Учитывая чрезвычайно высокую работоспособность микропорошка алмаза синтетического по величине съема, предпочтительно его использовать при доводке таких высокотвердых материалов, как минералокерамика.

2. Материал притира оказывает существенное влияние на результаты доводки. При обработке минералокерамики предпочтительней использовать чугунный притир марки СЧ-28, который показал лучшую работоспособность как по величине суммарного съема, так и по удельному расходу алмазов и шероховатости доведенной поверхности по сравнению с притирами, изготовленными из стали У7А и стекла оптического ЛК-5.

3. Зернистость микропорошков синтетического алмаза оказывает существенное влияние на производительность обработки и шероховатость обработанной поверхности. С увеличением зернистости возрастает величина суммарного съема и шероховатость обработанной поверхности. Для получения шероховатости по параметру $R_z = 0,8$ мкм рекомендуется использовать микропорошок АСМ10.

4. С увеличением количества алмазного микропорошка на поверхности притира возрастает производительность доводки и удельный расход алмазов. Шероховатость обработанной поверхности практически не зависит от изменения количества микропорошка на притире в пределах с 25 до 170 мг. Оптимальное количество микропорошка на поверхности притира диаметром 220–250 мм для зернистости АСМ10 следует считать 20–40 мг. Для зернистости АСМ20 – 40–80 мг.

5. Удельное давление детали на притир оказывает влияние на результаты доводки. С увеличением удельного давления с 25 до 50 кПа заметно возрастает величина суммарного съема, существенно уменьшается удельный расход алмазов и снижается шероховатость обработанной поверхности. Дальнейшее увеличение удельного давления до 150 кПа оказывает менее заметное влияние на параметры.

6. Оптимальное время доводки минералокерамики без замены алмазного микропорошка 6–8 мин.

7. Амплитуда и частота колебаний притира являются основными параметрами режима работы станка. С увеличением амплитуд колеба-

ний пропорционально возрастает величина суммарного съема и несколько снижается шероховатость (в пределах класса) обработанной поверхности. Увеличение частоты колебаний притира с 180 до 270 дв.ход/мин сопровождается заметным увеличением суммарного съема. Шероховатость обработанной поверхности практически не зависит от изменения частоты колебаний с 180 до 540 дв.ход/мин. Доводку минералокерамики предпочтительнее проводить при частоте колебаний притира 270 дв.ход/мин и амплитудах до 10 мм.

8. Плоскостность доведенных поверхностей напрямую зависит от геометрической точности рабочих поверхности притира. Для обеспечения высокой плоскостности поверхности притиров необходимо периодически осуществлять их правку методом трех плит.

Список литературы

1. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика: учеб. пособие / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2004. – 75 с.
2. Кремень З.И. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики. – Л.: Машиностроение, 1984. – 131 с.
3. Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семенов. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 384 с.
4. Kang J., Hadfield M. Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements // Original Research Article. – 2005. – Vol. 258. – P. 2–12.
5. Kim J.-D., Choi M.-S. A study on the optimization of the cylindrical lapping process for engineering fine-ceramics (Al_2O_3) by the statistical design method // Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – Vol. 52. – P. 368–385.
6. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
7. Некрасов В.П. Исследование процесса растровой доводки и закономерностей формирования плоских поверхностей: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1971. – 178 с.
8. Nanoroughness produced by systems with raster kinematics on surfaces of constant curvature / А.М. Khanov, R.A. Muratov, K.R. Muratov, E.A. Gashev // Russian Engineering Research. – 2010. – Т. 30, № 5. – P. 528–529.

9. Kinematic potential of honing machines / A.M. Khanov, K.R. Muratov, E.A. Gashev, R.A. Muratov // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, № 6. – P. 607–609.

10. Чистосердов П.С. Отделочно-абразивные методы обработки. – Минск: Выш. шк., 1983. – 287 с.

11. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

12. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

13. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.

14. Tam H.Y., Cheng H.B., Wang Y.W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 192–193. – P. 276–280.

15. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

16. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.

References

1. Matrenin S.V., Slosman A.I. *Tekhnicheskaja keramika* [Technical ceramics: manual]. Tomskii politekhnicheskii universitet, 2004. 75 p.

2. Kremen' Z.I. *Skorostnaia almaznaia obrabotka detalei iz tekhnicheskoi keramiki* [High-speed diamond processing of details from technical ceramics]. Leningrad: Mashinostroenie, 1984. 131 p.

3. Garshin A.P., Gropianov V.M., Zaitsev G.P., Semenov S.S. *Keramika dlia mashinostroeniia* [Ceramics for mechanical engineering]. Moscow: Nauchtekhlitizdat, 2003. 384 p.

4. Kang J., Hadfield M. Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements. *Original Research Article*, 2005, vol. 258, pp. 2-12.

5. Kim J.-D., Choi M.-S. A study on the optimization of the cylindrical lapping process for engineering fine-ceramics (Al_2O_3) by the statistical design method. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 52, pp. 368-385.

6. Balkevich V.L. *Tekhnicheskaja keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Stroiizdat, 1984. 256 p.

7. Nekrasov V.P. *Issledovanie protsessa rastrovoi dovodki i zakonomernosti formirovaniia ploskikh poverkhnostei* [Research of process of raster operational development and regularities of formation of flat surfaces]. Ph. D. thesis. Perm', 1971. 178 p.

8. Khanov A.M., Muratov R.A., Muratov K.R., Gashev E.A. Nanoroughness produced by systems with raster kinematics on surfaces of constant curvature. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 5, pp. 528-529.

9. Khanov A.M., Muratov K.R., Gashev E.A., Muratov R.A. Kinematic potential of honing machines. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 6, pp. 607-609.

10. Chistoserdov P.S. *Otdelochno-abrazivnye metody obrabotki* [Finishing and abrasive methods of processing]. Minsk: Vyshaya shkola, 1983. 287 p.

11. *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov* [Abrasive and diamond processing of materials]. Ed. by A.N. Reznikov. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 391 p.

12. Shal'nov V.A. *Shlifovanie i polirovanie vysokoprochnykh materialov* [Grinding and polishing of high-strength materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 272 p.

13. Kremen' Z.I., Iur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniia v mashinostroenii* [Technology of grinding in mechanical engineering]. Saint Petersburg: Politehnika, 2007. 424 p.

14. Tam H.Y., Cheng H.B., Wang Y.W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 192-193, pp. 276-280.

15. Orlov P.N. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detalei metodami dovodki* [Technological support of quality of details by operational development methods]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 384 p.

16. Tsесnek L.S. *Mekhanika i mikrofizika istiraniia poverkhnostei* [Mechanics and microphysics of attrition of surfaces]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 264 p.

Получено 20.01.2016

Об авторах

Муратов Карим Равилевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: karimur_80@mail.ru.

Гашев Евгений Анатольевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: unpl_mtf@pstu.ru.

Лагунов Дмитрий Михайлович (Пермь, Россия) – лаборант-исследователь кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: unpl_mtf@pstu.ru.

Матыгулина Елена Вячеславовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: unpl_mtf@pstu.ru.

About the authors

Karim R. Muratov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: karimur_80@mail.ru.

Evgenii A. Gashev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: unpl_mtf@pstu.ru.

Dmitrii M. Lagunov (Perm, Russian Federation) – Laboratory Researcher, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: unpl_mtf@pstu.ru.

Elena V. Matygullina (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: unpl_mtf@pstu.ru.