

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ

К.Р. Муратов, Е.А. Гашев

Статья посвящена описанию процесса плоской абразивной доводки. Рассмотрены признаки, характеризующие чистовую финишную операцию доводки плоских поверхностей. Описаны процессы, протекающие во время доводки, такие как механические (микрорезание, пластическое деформирование и т. д.) и химические явления (образование окисных пленок и адсорбционных слоев). Представлен обзор наиболее распространенных схем формообразования поверхностей в процессе абразивной обработки. Рассмотрены схемы импульсной, геометрической и энергетической моделей формообразования. На основе энергетической модели и гипотезы Престона установлен рациональный закон изменения усилия прижима во время обработки, позволяющий стабилизировать контактное давление и увеличить производительность обработки. Получена экспоненциальная зависимость изменения контурной площади контакта при доводке плоскостей различной исходной формы макрорельефа. Проведена экспериментальная проверка предположения и гипотезы Престона при абразивной доводке образцов из бронзы марки О5Ц5С5 плоскими кругами из кубического нитрида бора КМ 40/28 50 М2-01 на плоскодоводочном станке «Растр 220». Установлено, что при изменении усилия по экспоненциальному закону, т. е. аналогично закону изменения контурной площади контакта при абразивной доводке, производительность процесса возрастает в 2,5–3 раза. Показано, что изменение среднеквадратического отклонения σ параметра шероховатости R_a обработанной поверхности в процессе доводки при постоянном усилии прижима, в начале обработки (момент времени $t = 1$ мин) почти в два раза выше, чем среднеквадратическое отклонение шероховатости в тот же момент времени при переменном усилии прижима.

Ключевые слова: абразивная доводка, энергетическая модель, гипотеза Престона, усилие прижима, переходный процесс.

Введение. Один из окончательных методов обработки точных плоских поверхностей деталей – это абразивная доводка. Доводка является технологическим процессом окончательной финишной обработки высокоточных деталей после их чистовой (обычно абразивное шлифование) обработки [1]. Она служит для получения высокой точности размеров и геометрической формы обработанных поверхностей, имеющих малую величину шероховатости. Данная финишная операция позволяет получать поверхность с шероховатостью по параметру $R_a = 0,004 \dots 0,16$ мкм и отклонением от требуемой геометрической формы до $0,1 \dots 0,3$ мкм [2, 3].

Характерной особенностью любого процесса доводки следует признать малые скорости. Поэтому процесс доводки кругами или брусками может быть отнесен к микрошлифованию [4], получающему все более широкое развитие с освоением производства высококачественных микропорошков и связок.

При доводке пластических материалов, т. е. большинства металлов, съем осуществляется абразивными зёрнами, закрепленными на притире и царапающими обрабатываемую поверхность. При доводке хрупких материалов, наоборот, эффективно работают незакрепленные, свободные зёрна, перекатывающиеся по поверхности детали и выкальывающие частицы материала [4, 5].

К числу общих признаков, характеризующих процесс абразивной доводки, относятся:

- 1) одновременное воздействие на поверхность детали большого числа режущих зёрен, протекающее при относительно низких скоростях и давлениях;
- 2) применение мелкозернистых абразивов в виде микропорошков, а иногда шлифовальных порошков;
- 3) сложная кинематика (наличие нескольких движений притира и детали), которая создает более благоприятные условия для работы абразивных зёрен, способствует повышению точности обработки и уменьшению шероховатости поверхности [6];
- 4) незначительная роль тепловых явлений и отсутствие связанных с ними структурных изменений в поверхностном слое материала.

Процесс доводки включает ряд механических и химических явлений. К механическим относятся: сьем материала и формирование микрорельефа поверхности, которое осуществляется в результате резания-царапания обрабатываемой поверхности большим количеством мельчайших абразивных частиц. В начальный период доводки преобладает резание-царапание (вероятность резания $0,6 \dots 0,7$), затем наблюдается постепенный переход к трению с пластическим оттеснением материала (вероятность резания $0,1 \dots 0,3$). Изменяя соотношение между резанием-царапанием и трением, можно в какой-то мере управлять процессом доводки. Преобладание резания необходимо на предварительных операциях, где снимается предварительный припуск для исправления погрешности формы. На финишной стадии доводки, где основной задачей является получение малой шероховатости, рекомендуют вести доводку с преобладанием трения, когда абразивные зерна осуществляют своеобразное выглаживание поверхности [7].

Химические явления в процессе доводки заключаются в очень быстром образовании окисных пленок и адсорбционных слоев на металлической поверхности, снижающих прочность поверхностного слоя и способность последнего противостоять разрушению. Эффективность химико-механического воздействия зависит от химической активности жидких компонентов абразивной пасты или суспензии, поэтому в состав суспензии вводят такие вещества, как олеиновая кислота, стеарин и др. [8].

1. Расчетная схема. При моделировании формирования рельефа в процессе абразивной доводки обычно задаются определенной формой режущих зерен, а также предположением о законе их распределения вглубь поверхности (детерминированном или статистическом). Затем изучается геометрическое воспроизведение принятой идеализированной режущей поверхности на обрабатываемой детали. Известны несколько подходов к моделированию взаимодействия абразивной и обрабатываемой поверхностей в процессе формирования последней. На рис. 1 представлены схемы формообразования поверхности в процессе абразивной доводки [9].

1. Импульсная модель (рис. 1, а). Явления, происходящие в местах контакта абразивных зерен с поверхностью детали, можно представить в виде импульсных воздействий. Общие сведения о составлении передаточных функций импульсных систем приводит Г.Ф. Зайцев [10]. Вершины активных зерен следует рассматривать как выбросы случайной функции абразивного профиля. Для определения числа, распределения и продолжительности выбросов – основных параметров и импульсной модели пользуются результатами теории выбросов, систематизированных В.И. Тихоновым [11].

Поскольку длительность выброса на уровне a внедрения зерен мала по сравнению со средним расстоянием между выбросами, и они являются независимыми и ординарными, то чередование режущих вершин во времени можно рассматривать как пуассоновский поток редких событий. Импульсная модель процесса формообразования хорошо отражает реальную картину абразивных воздействий, но ее разработка упирается в математические трудности, а также связана с отсутствием экспериментальных данных для числовых характеристик.

2. Геометрическая модель (рис. 1, б). Профиль обработанной поверхности рассматривается как результат копирования некоторого числа формообразующих профилей X_1, X_2, X_3, X_4 режущего инструмента. Эти профили можно считать некоррелированными, образующими уплотненный поток. Число формообразующих профилей для данного материала и абразива должно быть постоянным, поскольку шероховатость обработанной поверхности практически не зависит ни от давления, ни от скорости. Для теоретического нахождения числа этих профилей привлекают данные теорий восстановления и массового обслуживания. Однако математическое описание данной совокупности элементов потока недостаточно разработано. К тому же задача усложняется наличием упругих деформаций, т. е. различием профилей режущей поверхности при измерении и в процессе работы. На основе геометрической модели можно было бы найти не только высоту неровностей, но и другие, более тонкие характеристики обработанной поверхности – средний угол наклона линии профиля, распределение шагов и др. При таком подходе открывается возможность связать конечные результаты с кинематикой рабочего движения при доводке, так как можно рассматривать движение профиля под различными углами.

3. Энергетическая модель (рис. 1, в). В основу данной концепции заложена гипотеза Престона о пропорциональности толщины снятого слоя, затраченной на сьем энергии. Этот метод явля-

ется наиболее общим, применимым для любых абразивных и обрабатываемых материалов при всех способах доводки. Конечные результаты могут быть получены через небольшое число обобщенных параметров, характеризующих условия обработки.

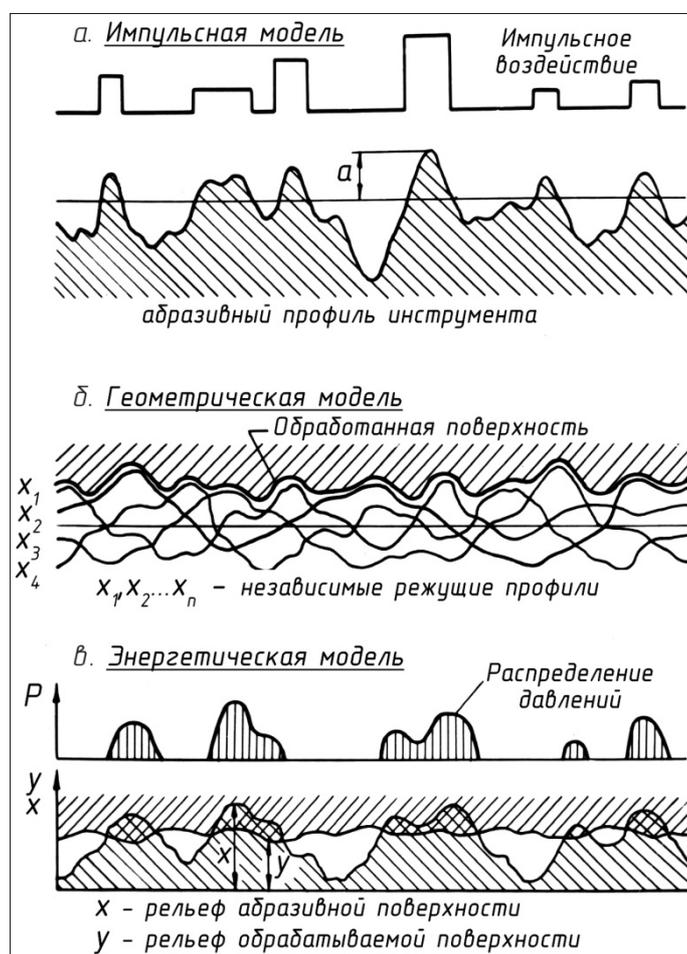


Рис. 1. Схемы моделей формообразования поверхности в процессе абразивной доводки: а – импульсная модель; б – геометрическая модель; в – энергетическая модель

Энергетическая модель является универсальной еще и потому, что может применяться не только для моделирования процесса доводки плоскостей, но и доводки цилиндрических поверхностей [12, 13]. Как правило, все существующие методики расчета формы взаимно притирающихся поверхностей инструмента и детали основаны на гипотезе Престона. По методике С.М. Кузнецова [14], форма обрабатываемой поверхности является функцией соотношения диаметра детали и ширины кольца инструмента, скоростей их вращения при постоянных давлениях и форме обрабатываемой поверхности. Данная методика приемлема для разработанного С.М. Кузнецовым и Л.И. Шевельковой «стабилизированного» процесса формообразования плоских поверхностей оптических деталей. Методика С.И. Винокура основана на постоянстве давления и учитывает неравномерность распределения скоростей, выход за край и динамику вращения верхнего звена системы деталь – инструмент. Форма получаемой поверхности детали определяется как функция времени обработки. Дальнейшее развитие методы расчета формы обрабатываемых поверхностей получили в кинематических программах М.Н. Семибратова [15], применяющихся в технологических процессах изготовления оптических деталей на операциях шлифования и полирования. Методика Л.С. Цеснека [16] отличается от изложенных тем, что наряду с учетом кинематики формообразования при определении износа поверхностей инструмента и обрабатываемой детали принимается во внимание и распределение давления. В силу того, что энергетическая модель оперирует с усредненными по всей поверхности показателями, выходные данные будут

представлены такими общими параметрами, как среднее квадратичное отклонение линии профиля. Более полные результаты, в отличие от предыдущих моделей, здесь недостижимы (например, получение спектра поверхности в различных направлениях и зависимости от кинетики рабочего движения). Поскольку в первую очередь необходимо знать величину σ_y или Ra обработанной поверхности, то энергетическая модель, позволяющая сравнительно просто рассчитывать эти характеристики, представляет на данном этапе для нас особый интерес.

2. Расчетные зависимости. Для математического описания процесса формирования поверхности используем гипотезу Престона (1) о пропорциональности толщины снятого слоя материала и затраченной на сьем энергии.

$$h = \int_0^t A \cdot V \cdot P \cdot dt, \quad (1)$$

где P – контактное давление; V – скорость относительного движения; A – коэффициент, определяющий технологические факторы процесса.

В работе В.П. Некрасова [4] приведены результаты исследования формообразования при постоянных входных параметрах: усилия прижима, скорости резания и технологических условиях обработки. Исходя из гипотезы Престона, получена экспоненциальная зависимость изменения контурной площади контакта при доводке плоскостей различной исходной формы макрорельефа (2).

$$S = S_n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_\Phi}} \right), \quad (2)$$

где S_n – номинальная площадь контакта при тира и обрабатываемой поверхности, t – время обработки, T_Φ – время, за которое отклонение геометрической формы стало бы равным нулю, если бы оно изменялось с постоянной скоростью, равной скорости в начальный момент.

Проанализировав выражения (1, 2), можно предположить, что с изменением усилия прижима во время обработки по закону (рис. 2), аналогичному изменению контурной площади контакта, время переходного процесса достижения минимального отклонения формы и установившейся шероховатости поверхности существенно сократится.

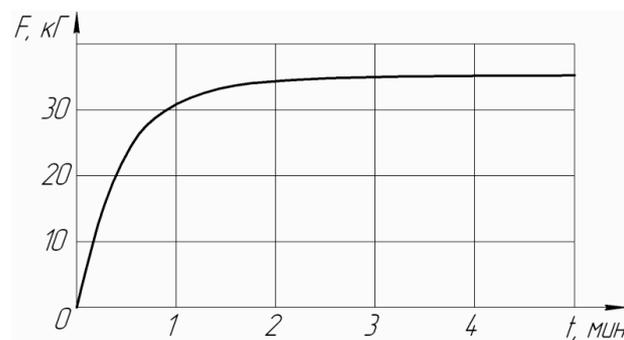


Рис. 2. График изменения усилия прижима

3. Экспериментальные исследования

Экспериментальная проверка предположения и гипотезы Престона проводилась при абразивной доводке образцов из бронзы марки О5Ц5С5 ГОСТ 613-79 плоскими кругами формы 6А2Т из кубического нитрида бора КМ 40/28 50 М2-01 ГОСТ 17007-80 на плоскодоводочном станке «Растр 220» [17, 18]. Сравнительные опыты проводились при постоянном (6,4 кг) и переменном усилии прижима обрабатываемой поверхности к инструменту. Средняя скорость резания во всех экспериментах поддерживалась постоянной.

Основными выходными параметрами процесса доводки являются макро- и микрорельеф обработанной поверхности, а также производительность обработки. Для оценки макрорельефа в радиальном направлении измерялось отклонение от прямолинейности обработанной поверхности на приборе ММQ 400 фирмы Маhr. Динамика изменения отклонения формы в процессе доводки поверхности представлена на рис. 3, 4.

По результатам измерений (см. рис. 3, 4) видно, что конечное отклонение от прямолинейности обработанных поверхностей после доводки с постоянным и переменным усилием прижима отличаются незначительно. Однако как показано на рис. 5, время достижения наименьшего отклонения от прямолинейности при переменном усилии прижима в три раза меньше, чем при постоянном усилии прижима.

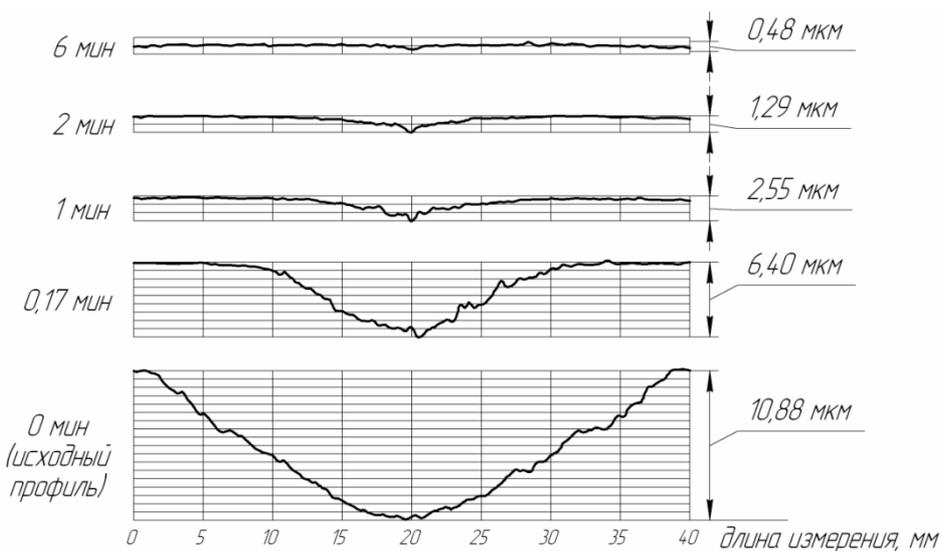


Рис. 3. Динамика изменения отклонения формы обрабатываемой поверхности при доводке с постоянным усилием прижима

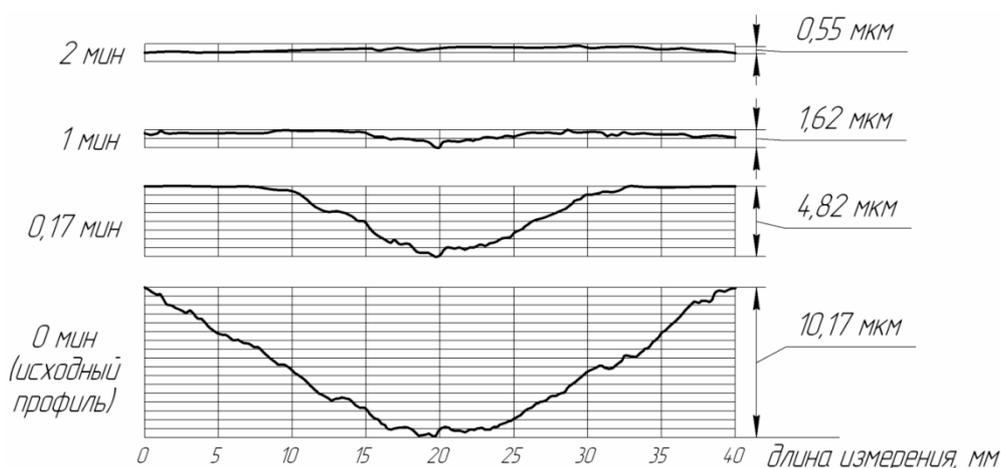


Рис. 4. Динамика изменения отклонения формы обрабатываемой поверхности при доводке с переменным усилием прижима

Кроме того, на приборе MMQ 400 фирмы Mahr измерялся профиль притира до и после доводки. Максимальное отклонение до обработки составляло 0,00186 мм, а после 0,00173 мм. Измерения формы поверхности притира показывают высокую износостойкость притира, что позволяет говорить о стационарности процесса доводки.

Для оценки микрорельефа обработанных поверхностей шероховатость измерялась на профилометре S2 фирмы Mahr. По результатам измерений вычислялось среднее квадратическое отклонение σ параметра шероховатости R_a , результаты экспериментов представлены на рис. 6.

Как видно на рис. 6, разброс шероховатости поверхности при постоянном усилии прижима в момент времени $t = 1$ мин почти в два раза выше, чем среднее квадратическое отклонение шероховатости в тот же момент времени при переменном усилии прижима. Это говорит о том, что достижение установившейся шероховатости при переменном усилии прижима происходит значительно быстрее. Результаты экспериментальной проверки находятся в хорошем согласии с теоретическими выводами. При изменении усилия по экспоненциальному закону, т. е. аналогично закону изменения контурной площади контакта при абразивной доводке, производительность процесса возрастает в 2,5–3 раза. Данная методика позволит получать более высокие параметры качества при обработке хрупких материалов и деталей с малой жесткостью.

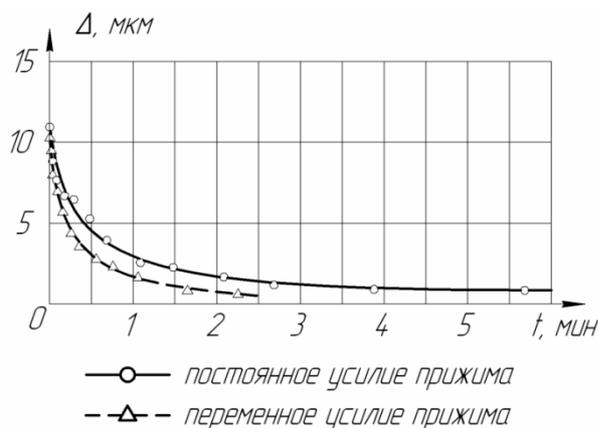


Рис. 5. Динамика изменение отклонения от прямолинейности обрабатываемой поверхности в процессе доводки

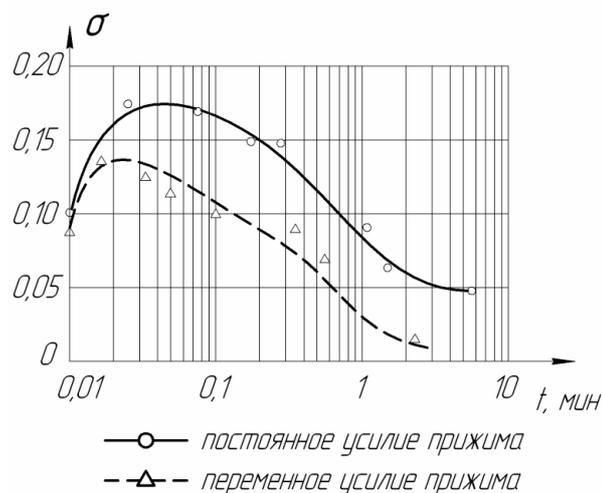


Рис. 6. Изменение среднеквадратического отклонения параметра σ шероховатости обработанной поверхности в процессе доводки

4. Выводы

1. Абразивная доводка – сложный процесс, при котором имеют место как механические явления (микрорезание, пластическое деформирование и т. д.), так и химические явления (образование окисных пленок и адсорбционных слоев).

2. Исходя из гипотезы Престона, получена экспоненциальная зависимость изменения контактной площади контакта при доводке плоскостей различной исходной формы макрорельефа.

3. Проведена экспериментальная проверка предположения и гипотезы Престона при постоянном (6,4 кг) и переменном усилии прижима показавшая, что время достижения наименьшего отклонения от прямолинейности при переменном усилии прижима в три раза меньше чем при постоянном усилии прижима.

4. Изменение среднеквадратического отклонения σ параметра шероховатости Ra обработанной поверхности в процессе доводки при постоянном усилии прижима в момент времени $t = 1$ мин почти в два раза выше, чем среднеквадратическое отклонение шероховатости в тот же момент времени при переменном усилии прижима.

5. Обсуждение и применение. Полученные теоретические и практические результаты исследования процесса плоской доводки при постоянном и переменном усилии прижима обрабатываемой поверхности к поверхности инструмента лягут в основу модернизации плоскодоводочного станка «Растр 220». Модернизация плоскодоводочного станка «Растр 220» позволит бесступенчато регулировать частоту колебаний инструмента в диапазоне 50–360 1/мин, программировать время разгона, торможения и устанавливать закон изменения частоты колебаний инструмента, а также задавать необходимое давление и закон перемещения обрабатываемых деталей по притиру. Также полученные результаты будут использованы при модернизации хонинговальных станков с «растровой» кинематикой инструмента [19], для прецизионной обработки внутренних цилиндрических поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке ПНИПУ, грант в номинации «Поддержка молодых докторантов».

Литература

1. Чистосердов, П.С. Отделочно-абразивные методы обработки / П.С. Чистосердов. – Минск: Выш. шк., 1983. – 287 с.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: справ. / под ред. А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. Шальнов, В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов / В.А. Шальнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
4. Честнов, А.Л. Вопросы отделочной обработки металлов / А.Л. Честнов. – М.: Акад. наук СССР, 1961. – 111 с.

5. Космачев, И.Г. Отделочные операции в машиностроении / И.Г. Космачев, В.Н. Дугин, Б.А. Немцев. – Л.: Лениздат, 1985. – 248 с.
6. Sanchez, L.E.A. Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors / L.E.A. Sanchez, N.Z.X. Jun, A.A. Fiocchi // Precision Engineering. – 2011. – Vol. 35, № 2. – pp. 355–363.
7. Tam, H.Y. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components / H.Y. Tam, H.B. Cheng, Y.W. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 192–193. pp. 276–280.
8. Кремень, З.И. Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
9. Некрасов, В.П. Исследование процесса растровой доводки и закономерностей формирования плоских поверхностей: дис. ... канд. техн. наук / В.П. Некрасов. – Пермь, 1971. – 178 с.
10. Зайцев, Г.Ф. Анализ линейных импульсных систем автоматического регулирования и управления / Г. Ф. Зайцев. – Киев: Техника, 1967. – 163 с.
11. Тихонов, В.И. Выбросы траекторий случайных процессов / В.И. Тихонов, В.И. Хименко. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
12. Дьяченко, А.Н. К вопросу создания математической модели процесса доводки отверстий свободным абразивом / А.Н. Дьяченко, И.Д. Аксельруд, В.П. Мельник // Труды ЦНИТА. – 1980. – № 16. – С. 58–64.
13. Орлов, П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П.Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
14. Кузнецов, С.М. Стабилизированный процесс формообразования плоской поверхности / С.М. Кузнецов, Л.И. Шевелькова // Формообразование оптических поверхностей: сб. ст. / под ред. К.Г. Куманина. – М.: Оборонгиз, 1962. – С. 195–214.
15. Зубаков, В.Г. Технология оптических деталей / В.Г. Зубаков, М.Н. Семибратов, С.К. Штандель. – М.: Машиностроение, 1978. – 415 с.
16. Цеснек, Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей / Л.С. Цеснек. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
17. Растровый метод обработки прецизионных поверхностей / В.Н. Анциферов, А.М. Ханов, К.Р. Муратов и др. // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 512–519.
18. Nanoroughness produced by systems with raster kinematics on surfaces of constant curvature / A.M. Khanov, R.A. Muratov, K.R. Muratov, E.A. Gashev // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 5. – P. 528–529.
19. 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.

Муратов Карим Равилевич. Кандидат технических наук, доцент, кафедры «Технологии, материалы и конструирование машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, karimur_80@mail.ru.

Гашев Евгений Анатольевич. Аспирант кафедры «Технологии, материалы и конструирование машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, unpl_mtf@pstu.ru.

Поступила в редакцию 24 октября 2014 г.

THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE SHAPE OF THE SURFACE DURING ABRASIVE FINISHING OF THE PRECISION PLANES

*K.R. Muratov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,
karimur_80@mail.ru,*

*E.A. Gashev, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,
unpl_mtf@pstu.ru*

This article describes the process of a flat abrasive lapping. Considered signs characterizing finishing operation lapping flat surfaces. The processes occurring during lapping, such as mechanical phenomena (microcutting, plastic deformation) and chemical phenomena (formation of oxide films and adsorbed layers). Provides an overview of the most common schemes surfaces forming in the process of lapping. The schemes are considered impulse model, geometric model and energy model of surfaces forming. Based on the energy model and hypotheses Preston found rational law changes downforce during processing, which allows to stabilize the contact pressure and increase productivity. An exponential dependence of the contour area for lapping various planes of the original form macrorelief. An experimental verification of the assumptions and hypotheses Preston at abrasive lapping of samples bronze brand O5C5S5 on flat circles CBN 40/28 50 M2-01 on machine "Raster 220". It is found that when the efforts change exponentially (similar to the law change the contour of the contact area with the abrasive lapping), process productivity increases of 2.5–3 times. Demonstrated that the change of the standard deviation σ of the roughness parameter Ra of the treated surface during lapping at a constant pressing force, at the beginning of processing (at time $t = 1$ min), almost two times higher than the standard deviation of the roughness at the same time at a variable force pressing.

Keywords: abrasive lapping, energy model, the hypothesis of Preston, force pressing, the transition process.

References

1. Chistoserdov P.S. *Otdelochno-abrazivnye metody obrabotki* [Abrasive Finishing and Processing Methods]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1983. 128 p.
2. Reznikov A.N. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov* [Abrasive and Diamond Material Processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 391 p.
3. Shal'nov V.A. *Shlifovanie i polirovanie vysokoprochnykh materialov* [Grinding and Polishing of High-Strength Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 272 p.
4. Chestnov A.L. *Voprosy otdelochnoy obrabotki metallov* [Questions of Finishing Processing of Metals]. Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1961. 111 p.
5. Kosmachev I.G., Dugin V.N., Nemtsev B.A. *Otdelochnye operatsii v mashinostroenii* [Finishing Operations in Mechanical Engineering]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1985. 248 p.
6. Sanchez L.E.A., Jun N.Z.X., Fiochi A.A. Surface Finishing of Flat Pieces When Submitted to Lapping Kinematics on Abrasive Disc Dressed under Several Overlap Factors. *Precision Engineering*, 2011, vol. 35, no. 2, pp. 355–363.
7. 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.
8. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* [Grinding Technology in Mechanical Engineering]. Sankt-Peterburg, Politehnika Publ., 2007. 424 p.
9. Nekrasov V.P. *Issledovanie protsessa rastrovoy dovodki i zakonomernostey formirovaniya ploskikh poverkhnostey. Dis. kand. tekhn. nauk* [Research the Process of Scanning and Finishing Laws Governing the Formation of Flat Surfaces. Cand. Sci. Diss.]. Perm', 1971. 178 p.

10. Zaytsev G.F. *Analiz lineynykh impul'snykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [The Analysis of Linear Impulsive Systems of Automatic Regulation and Control]. Kiev, Tekhnika Publ., 1967. 163 p.
11. Tikhonov V.I., Khimenko V.I. *Vybrosy traektoriy sluchaynykh protsessov* [The Emissions Trajectories of Random Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 304 p.
12. D'yachenko A.N., Aksel'rud I.D., Mel'nik V.P. [On the Development of a Mathematical Model of the Process of Finishing Holes Loose Abrasive]. *Trudy TsNITA* [Proceedings of the CNIT], 1980, no.16, pp. 58–64. (in Russ.).
13. Orlov P.N. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley metodami dovodki* [Technological Security of Quality Parts by Polishing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 384 p.
14. Kuznetsov S.M., Shevel'kova L.I. [Stabilized the Process of Forming a Flat Surface]. *Formoobrazovanie opticheskikh poverkhnostey*. Moscow, Oborongiz Publ., 1962, pp. 195–214. (in Russ.)
15. Zubakov V.G., Semibratov M.N., Shtandel' S.K. *Tekhnologiya opticheskikh detaley* [The Technology of Optical Components]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 415 p.
16. Tsesnek L.S. *Mekhanika i mikrofizika istiraniya poverkhnostey* [Mechanics and Microphysics Wear Surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 264 p.
17. Antsiferov V.N., Khanov A.M., Muratov K.R., Muratov R.A., Pepelyshev A.V. [Raster Processing Method Precision Surfaces]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011, vol. 13. no. 1, pp. 512–519. (in Russ.)
18. 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.
19. 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.

Received 24 October 2014 г.