

УДК 621.048.6.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

О.А. РОЖНЕНКО, Э.Э. ТИЩЕНКО, Е.М. ТАМАРКИНА, Ю.В. КОРОЛЬКОВ

(Донской государственный технический университет)

Рассчитаны теоретико-вероятностные модели процесса единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали, съема металла и формирования качества поверхностного слоя при обработке фасонных поверхностей свободными абразивами. Установлены закономерности формирования полей скоростей и напряжений гранулированных абразивных сред при прямом компьютерном моделировании. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки фасонных деталей, позволяющая обеспечить минимальное время обработки за счет рационального выбора характеристик рабочей среды и режимов обработки.

Ключевые слова: моделирование процессов обработки, свободный абразив, сьем металла с поверхности детали, качество поверхностного слоя, методика проектирования технологических процессов, вибрационная обработка, центробежно-ротационная обработка.

Введение. Развитие машиностроения на современном этапе невозможно без постоянного повышения производительности труда и улучшения качества выпускаемых изделий. Для решения этих задач разрабатываются и внедряются новые методы обработки, к которым относятся и процессы обработки гибкой гранулированной абразивной средой [1]. В последнее время они находят все большее применение в различных отраслях промышленности на этапах финишной обработки благодаря широким технологическим возможностям, позволяющим обрабатывать детали с фасонными поверхностями и обеспечивать высокое качество продукции.

Высокопроизводительная обработка фасонных поверхностей является сложной технологической задачей [2]. Особые трудности вызывает обработка точных фасонных поверхностей, так как от конфигурации обрабатываемых деталей зависит доступ частиц рабочей среды к различным элементам поверхности и соответствующая интенсивность обработки. В глухих карманах, отверстиях, пазах и углублениях обработка происходит медленнее и требует более тщательного подбора размеров и форм частиц рабочей среды.

Обработка фасонных поверхностей отличается от обработки плоских и других простых поверхностей ярко выраженной нестационарностью, уровень которой оказывает существенное влияние на выбор режимов технологического процесса обработки и оборудования. Поэтому выбору технологии и оборудования должен предшествовать тщательный анализ закономерностей, свойственных процессу обработки фасонных поверхностей.

Цель исследований – установление закономерностей влияния формы и расположения фасонных поверхностей деталей на производительность и качество обработки свободным абразивом для повышения эффективности технологического процесса.

Теоретические исследования. Одной из сложностей, возникающих в процессе обработки деталей сложной формы, является обработка отверстий и внутренних поверхностей.

Обработка внутренних поверхностей деталей свободными абразивными частицами может осуществляться следующими способами.

1. Отверстие обрабатывается воздушно-абразивной или воздушно-жидкостно-абразивной струей. Для этого в обрабатываемое отверстие вводится струйный аппарат со щелевидным соплом, расположенным веером.

2. Возможно использование для зачистки отверстий таких известных процессов, как дробеструйный, гидropескоструйный, гидрокавитационный, гидрокавитационно-абразивный, пескоструйный, дробеметный, пневмодробеструйный, пневмошариковый, пневмопластмощариковый.

3. В полость детали подают абразивный материал и воздействуют на него направленными с противоположных сторон спиралевидными потоками энергоносителя. При этом интенсивность потоков энергоносителя изменяют синфазно.

4. В полость детали помещают гранулы между двумя уплотнителями, посредством которых рабочую среду сжимают. После этого ей сообщают возвратно-поступательные перемещения вдоль обрабатываемой детали. Среде, кроме того, могут сообщаться круговые колебания и ударные импульсы.

5. Через каналы в детали прокачивают под давлением 1,5-15 МПа суспензию.

6. В полость детали загружают абразивные частицы, которые подаются на обрабатываемые поверхности с помощью специального инструмента, закрепленного на конце вращающегося вала. Инструмент, помимо периферийных лопаток, параллельных оси вращения, содержит торцовые лопатки, наружные кромки которых образуют с периферийными тупой угол. При вращении периферийные лопатки собирают абразивные частицы, лежащие на дне обрабатываемой полости, и отбрасывают их к верхней части полости. Отразившиеся от нее частицы падают частично на торцовые лопатки, которые направляют их на боковые стенки.

7. При струйно-абразивной обработке внутренних поверхностей деталей для увеличения тангенциальной составляющей скорости движения струи (в целях повышения производительности процесса) разработана технологическая схема на основе вихревого закручивания потока суспензии.

8. Отверстие заполняют жидкостью, которая обладает свойством затвердевать в магнитном поле, воздействуют на нее этим полем, а после затвердевания отводят вместе со стружкой к сборнику стружки, где воздействие физического поля прекращается.

9. При магнитоабразивной обработке отверстий индуктор вводится в обрабатываемое отверстие с зазором, который заполняется ферроабразивным порошком и приводится во вращение вокруг своей оси и в планетарное движение. Кроме того, индуктору придается осевое колебательное движение.

10. Для обработки внутренних поверхностей деталей используется метод вибрационной обработки, при котором абразивные частицы совершают колебательное движение в вибрирующем резервуаре.

11. При центробежно-ротационной обработке отверстий абразивные частицы совершают спиралевидное движение, вовлеченные в тороидально-винтовой поток, создаваемый вращающимся вокруг вертикальной оси дном рабочей камеры.

Анализ исследований процессов вибрационной (ВиО) и центробежно-ротационной (ЦРО) обработки в среде абразива [1] показал, что многочисленные результаты, полученные исследователями этих процессов, недостаточно полно описывают процессы ВиО и ЦРО при обработке фасонных поверхностей деталей в среде свободного абразива. Большим препятствием при проектировании и внедрении техпроцессов для данных методов обработки является недостаточная изученность особенностей взаимодействия гибкой гранулированной абразивной среды с поверхностью деталей сложной конфигурации.

Проведены теоретические исследования обработки фасонных поверхностей свободным абразивом. При расчете съема металла в гранулированных рабочих средах очень важное значение имеет учет вероятности покрытия каждой точки поверхности детали пятном контакта с абразивной гранулой.

Получены аналитические зависимости для определения вероятности покрытия обрабатываемой поверхности пятнами контакта при обработке для наиболее распространенных поверхностей, таких, как плоская, цилиндрическая и коническая.

Оценка вероятности определяется зависимостью:

$$P_1 = \frac{\pi ab}{S_{\text{кв.уп}}}, \quad (1)$$

где a и b – большая и малая полуоси эллипсов контакта; $S_{\text{кв.уп}}$ – площадь квадрата упаковки.

Для плоской поверхности упаковку шаров принимаем по квадрату со стороной d , равной диаметру шара, тогда площадь единичной упаковки и вероятность P_1 определяются по формулам:

$$S_{\text{е.у.пл}} = d^2, \quad P_{\text{1пл}} = \frac{\pi ab}{d^2}. \quad (2)$$

Для цилиндрической поверхности диаметром D площадь единичной упаковки и вероятность P_1 вычисляются как

$$S_{\text{е.у.цил}} = dD \arcsin\left(\frac{d}{D+d}\right), \quad P_{\text{1цил}} = \frac{\pi ab}{dD \arcsin\left(\frac{d}{D+d}\right)}. \quad (3)$$

При определении вероятности P_1 и площади единичной упаковки для участка конической поверхности, ограниченного диаметрами минимальным D_{min} и максимальным D_{max} , принимается допущение:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{min}} + D_{\text{max}}}{2},$$

тогда

$$S_{\text{е.у.ср.кон}} = dD_{\text{ср}} \arcsin\left(\frac{d}{D_{\text{ср}} + d}\right), \quad P_{\text{1кон}} = \frac{\pi ab}{dD_{\text{ср}} \arcsin\left(\frac{d}{D_{\text{ср}} + d}\right)}. \quad (4)$$

Для сравнительной оценки влияния формы поверхности на процесс обработки воспользуемся коэффициентом формы, который определяется как отношение вероятности покрытия каждой точки плоской поверхности к вероятности покрытия каждой точки криволинейной поверхности пятном контакта:

$$k_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{1пл}}}{P_{\text{1кр}}}. \quad (5)$$

С учетом влияния формы обрабатываемых фасонных поверхностей и их расположения установлена зависимость для расчета съема металла с поверхности детали:

$$Q = k_{\text{ф}} k_{\text{расп}} P_1 P_2 \omega t q \frac{S_{\text{дет}}}{d^2} \quad \text{при } S_{\text{дет}} > d^2, \quad (6)$$

$$Q' = k_{\text{ф}} k_{\text{расп}} P_1' P_2 \omega t q \quad \text{при } S_{\text{дет}} < d^2,$$

где $k_{\text{расп}}$ – коэффициент, учитывающий влияние расположения фасонных поверхностей; P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию; ω – частота воздействия; t – время обработки; q – сьем металла при единичном взаимодействии.

Также получены зависимости для определения времени обработки:

– на удаление дефектного слоя

$$t_{\Delta L} = \frac{16R^4 \Delta L}{\pi a b P_2 \omega V k_{\phi} k_{\text{расп}}}, \quad (7)$$

где R – характерный размер абразивной гранулы; ΔL – толщина дефектного слоя; V – объем металла, удаленный при единичном взаимодействии;

– достижение установившейся шероховатости

$$t_{R_{\text{уст}}} = \frac{4k_{\text{пр}} R_{\text{исх}} R^2}{P_1 P_2 \omega V k_{\phi} k_{\text{расп}}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий вид профиля шероховатости до обработки; $R_{\text{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности;

– изменение шероховатости поверхности от исходной до заданного значения

$$t = -\frac{1}{k_{\text{и}} k_{\phi} k_{\text{расп}}} \ln \left(\frac{Ra_3 - Ra_{\text{уст}}}{Ra_{\text{и}} - Ra_{\text{уст}}} \right), \quad (9)$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент интенсивности изменения шероховатости; $Ra_{\text{и}}$, Ra_3 , $Ra_{\text{уст}}$ – параметр исходной, заданной и установившейся шероховатости поверхности соответственно.

Прямое компьютерное моделирование процесса. Для более тщательного изучения сущности процессов, происходящих при обработке фасонных деталей в гранулированных рабочих средах, с использованием современных методов прямого компьютерного моделирования проведены комплексные исследования динамики сложного пространственного движения абразивных гранул, детали и контейнера. Для этого применено инструментальное программное средство GranMos, использующее метод «мягких частиц» [3]. Цель компьютерного моделирования – исследование динамики объемов гранул сферической формы, ограниченных поверхностями; визуальное наблюдение потоков среды, дающее представление о протекающем процессе. Данные компьютерного моделирования позволили подтвердить адекватность применяемых теоретических моделей. Определен параметр, характеризующий интенсивность воздействия абразивных гранул на обрабатываемую деталь, – модуль сопротивления абразивному изнашиванию, который определяется по формуле:

$$\Omega = E / \Pi, \quad (10)$$

где E – плотность потока энергии движущейся абразивной среды; Π – объемный удельный съем металла.

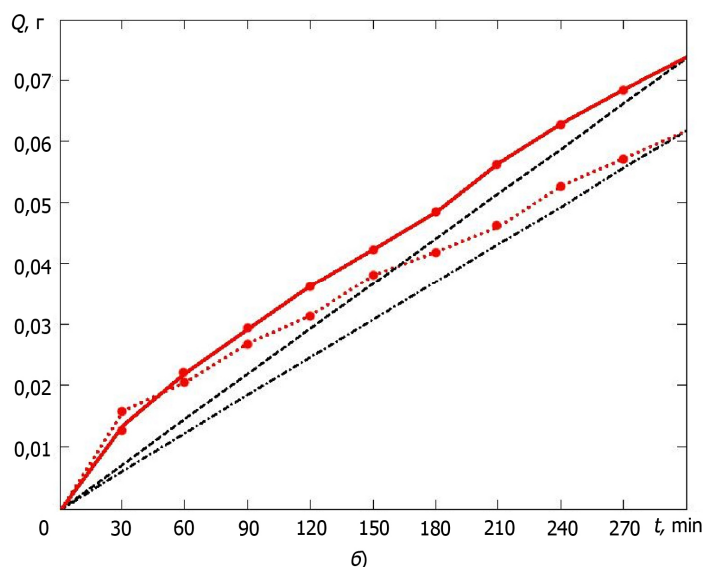
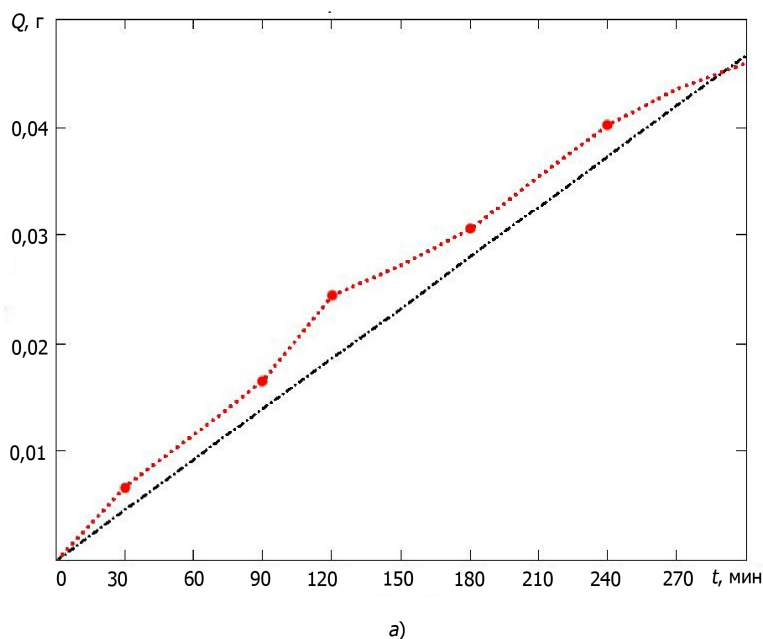
Полученные значения модуля сопротивления абразивному изнашиванию позволяют судить о целесообразности обработки внутренних фасонных поверхностей при различных сочетаниях технологических факторов.

Проведен значительный комплекс экспериментальных исследований процесса обработки фасонных поверхностей в среде свободного абразива. Для образцов использовались материалы, применяемые в общем машиностроении и авиастроении, такие, как сталь 45 и алюминиевый сплав Д16Т.

Эксперименты проводили на станках: для вибрационной обработки – УВГ4×10; для центробежно-ротационной обработки – ЦРС-10. Обработку в среде свободного абразива проводили с незакрепленными приспособлениями типа «стакан», на которых были закреплены образцы на внутренних и внешних сторонах приспособления с разной глубиной расположения от верхней кромки.

Образцы обрабатывались в абразивных средах различной зернистости 10-25 (фарфоровые шары, призмы трехгранные абразивные ПТ 15×15, конусы абразивные на полимерной и керамической связках).

Для комплексной проверки адекватности теоретических моделей удаления металла и формирования шероховатости обрабатываемой поверхности произведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований (см. рисунок). Теоретическая зависимость определения съема металла от формы обрабатываемой поверхности построена с помощью программы MathCAD. Установлено, что расхождение между результатами не превышает 20%.



Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей для определения съема металла:
 а – с плоской поверхности при ВиО ($A=2,5$ мм); б – с плоской и цилиндрической поверхности при ВиО ($A=4$ мм);
 – экспериментальные значения (плоская поверхность); - · - – теоретическая зависимость (плоская поверхность);
 — – экспериментальные значения (цилиндрическая поверхность); - - - – теоретическая зависимость (цилиндрическая поверхность)

Была проведена серия экспериментальных исследований по определению основных закономерностей интенсивности процесса обработки различно расположенных поверхностей фасонных деталей методом прямого компьютерного моделирования с использованием программного комплекса GranMos, основанного на представлении гранулированной среды дискретными частицами сферической формы различных размеров и контактных свойств. Поверхность, ограничивающая резервуар со средой, моделируется совокупностью линейных сплайнов, движущихся в соответствии с заданной кинематикой.

В GranMos проведено моделирование динамики рабочей среды в контейнере. Результатом моделирования стала возможность определять на любом интервале времени значения нормальных и касательных напряжений, возникающих при воздействии рабочей среды на стенки обрабатываемой детали, полей скоростей, траекторий движения отдельно выбранной абразивной гранулы и т.д. Контур проектируемой детали соответствовал образцу, применяемому при обработке. Закон движения контейнера с деталью отвечал режимам работы реального технологического оборудования: амплитуда вертикальных колебаний 4 мм, частота 27,85 Гц. Установлен характер движения абразивных гранул во внутренних полостях различной формы.

Применение компьютерного моделирования при технологическом проектировании позволяет решить вопрос о целесообразности использования методов обработки свободными абразивами для конкретной конфигурации фасонной детали. Результаты моделирования позволяют установить диапазон значений коэффициентов, учитывающих расположение фасонных поверхностей для конкретных деталей.

Результаты экспериментов подтвердили адекватность теоретических моделей съема металла с поверхности обрабатываемых деталей и формирования профиля шероховатости поверхности с учетом комплексного влияния формы обрабатываемой поверхности и ее расположения на детали.

По результатам исследований разработаны технологические рекомендации по выбору рациональных режимов обработки с использованием прямого компьютерного моделирования процесса. Созданы банки данных коэффициентов формы и расположения при обработке фасонных поверхностей детали. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки фасонных деталей.

Разработку технологического процесса обработки деталей сложной формы можно представить в следующем виде.

1. Выбор зернистости абразивных гранул осуществляют в зависимости от решаемой технологической задачи и от материала детали.

2. Выбор размера абразивных гранул. Для обработки конических и плоских участков рекомендуемый диаметр гранул не более 25-30 мм, что позволяет увеличить интенсивность обработки. Для обработки глухих карманов, отверстий, пазов и углублений рекомендуется уменьшать размер гранул в соответствии с размерами обрабатываемых поверхностей.

3. Расчет среднего арифметического отклонения шероховатости поверхности и съема металла в местах, где условия обработки наихудшие, производится по разработанным теоретическим зависимостям. При расчетах варьируют зернистость абразивных гранул, в зависимости от формы обрабатываемой детали – коэффициент формы и коэффициент расположения. По результатам расчетов корректируют выбранные режимы обработки. Параллельно рассчитывают съем металла и скругление острых кромок с поверхностей, интенсивность обработки которых максимальна. При этом наибольшая величина режимов обработки ограничивается допустимым изменением размеров и формы этих поверхностей. Затем вновь рассчитываются параметры качества обработанной поверхности и так до тех пор, пока все заданные характеристики не будут располагаться в требуемых пределах.

4. Из нескольких возможных вариантов технологического процесса выбирают тот, который обеспечивает наименьшее время обработки.

Разработанные на основании результатов исследований технологические рекомендации по проектированию технологического процесса обработки внедрены в ОАО НПП КП «Квант» (Ростов-на-Дону).

Выводы. 1. Разработаны уточненные теоретические модели съема металла и формирования качества поверхностного слоя при обработке фасонных поверхностей свободными абразивами, позволяющие учесть влияние расположения обрабатываемой поверхности и ее форму.

2. Получены теоретико-вероятностные модели процесса единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали, позволяющие учесть влияние формы обрабатываемой поверхности на вероятность покрытия каждой точки поверхности пятном контакта.

3. В результате проведения комплексных экспериментальных исследований подтверждена адекватность предложенных моделей съема металла при обработке свободным абразивом. Разность между экспериментальными и теоретическими данными не превышает 20%.

4. Установлены закономерности формирования полей скоростей и напряжений гранулированных абразивных сред при прямом компьютерном моделировании обработки наружных и внутренних фасонных поверхностей с учетом размеров деталей, частиц среды и технологических параметров обработки, что позволило судить о целесообразности обработки и прогнозировать ее интенсивность.

5. С использованием прямого компьютерного моделирования процесса обработки выработаны рекомендации по выбору рациональных режимов обработки при решении различных технологических задач.

6. Создан банк коэффициентов, позволяющих учесть влияние формы и размеров элементов фасонных поверхностей на производительность и качество обработки при технологическом проектировании.

7. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки фасонных деталей, позволяющая обеспечить минимальное время обработки за счет рационального выбора характеристик рабочей среды и режимов обработки.

Библиографический список

1. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 1995.
2. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: ВИМВД, 1999.
3. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных машинах / С.Н. Шевцов. – Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2001.

Материал поступил в редакцию 22.03.2011.

References

1. Tamarkin M.A. Teoreticheskie osnovy` optimizacii processov obrabotki detalej svobodny`mi abrazivami: dis. ... d-ra texn. nauk. – Rostov n/D, 1995. – In Russian.
2. Kopy`lov Yu.R. Vibroudarnoe uprochnenie / Yu.R. Kopy`lov. – Voronezh: VIMVD, 1999. – In Russian.
3. Shevczov S.N. Komp`yuternoe modelirovanie dinamiki granulirovanny`x sred v vibracionny`x mashinax / S.N. Shevczov. – Rostov n/D: SKNCZ VSH, 2001. – In Russian.

MODELING OF LOOSE-ABRASIVE MACHINING TECHNIQUE FOR PROFILED SURFACES

O.A. ROZHNEKO, E.E. TISHCHENKO, E.M. TAMARKINA, Y.V. KOROLKOV

(Don State Technical University)

Probability-theoretical models of the unit contacting process of abrasive granules and the workpiece surface, of the removal of metal and forming the quality of the surface coating while processing profiled surfaces by loose abrasives are calculated. Regularities of forming velocity and stress fields of the granulated abrasive media under the direct computerized modeling are specified. A design technique for processing profiled parts is worked out. The technique permits to provide minimum time of processing due to the rational choice of operating environment characteristics and operating modes.

Keywords: *treatment processes modeling, loose abrasive, removal of metal from workpiece surface, quality of surface coating, design technique of processing, vibration treatment, centrifugal rotary treatment.*