

УДК 621.438-46

Исследование процесса съёма металла при абразивной галтовке¹

А. В. Ющенко

(Ростовский государственный университет путей сообщения),

М. Б. Флек

(Донской государственный технический университет)

Изучена роль обработки деталей свободными абразивами в современном машиностроении и продемонстрированы технологические возможности абразивной галтовки. Сформулирована задача получения теоретических зависимостей, описывающих связь производительности и качества галтовки с технологическими параметрами обработки и характеристиками рабочих сред. Рассмотрено единичное взаимодействие абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью при галтовке. Получены зависимости для определения максимальной глубины внедрения гранулы и съёма металла за один удар абразивной гранулы. Произведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса съёма металла, при этом учтено влияние режимов обработки, характеристик абразивной частицы и обрабатываемого материала. Получена зависимость для определения съёма металла при галтовке, прошедшая экспериментальную проверку. Сделан вывод о том, что полученные теоретические зависимости могут быть использованы при проектировании технологических процессов обработки деталей абразивной галтовкой.

Ключевые слова: галтовка, единичное взаимодействие, глубина внедрения, единичный съём металла, расчёт удаления металла, проверка адекватности теоретических зависимостей.

Введение. Развитие машиностроения на современном этапе невозможно без постоянного повышения производительности труда и улучшения качества выпускаемых изделий. В машиностроении всё более широкое применение находят методы обработки абразивным инструментом. Абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а также высокую надёжность и долговечность машин в процессе эксплуатации, поэтому роль абразивных операций в современном машиностроении непрерывно возрастает.

Стремление удешевить окончательную обработку привело к созданию новых методов обработки — свободными абразивами, в которых инструмент не имеет жёсткой кинематической связи со станком.

При обработке свободными абразивами зёрна более полно используют свои режущие способности, так как происходит равномерное распределение их режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также переориентация и перемещение в процессе обработки.

Методы обработки свободными абразивами позволяют осуществлять обработку деталей сложной конфигурации, в больших размерных диапазонах, из различных материалов, используя при этом сравнительно простое и надёжное в эксплуатации оборудование. Значительно снижается, по сравнению со шлифованием, и температурный режим процесса, так как скорость резания снижается, а зоны микрорезания обильно омываются технологической жидкостью (ТЖ). Все эти факторы позволяют получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений.

Сущность метода галтовки заключается в очистке и отделке (шлифовании, полировании) поверхности детали путём совместного пересыпания с абразивом в барабане. При вращении барабана (или колокола) обрабатываемые изделия вместе с абразивными частицами (гранулами) беспорядочно перемещаются и трутся друг об друга, в результате чего с поверхности снимается слой металла. Барабаны могут быть цилиндрическими, многогранными, бочкообразными с двумя

¹ Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

или тремя внутренними рёбрами и объёмом до 4 м³. При частоте вращения барабана 10–50 об/мин, объём абразивного материала в 3–8 раз должен превышать общий объём деталей, а объём всей массы загрузки (деталей и абразива) не должен превышать более 60 % объёма барабана. Существует сухая и мокрая (жидкостно-абразивная) галтовка.

До настоящего времени исследования по выявлению влияния технологических параметров на выходные показатели обработки галтовкой практически не проводились, что ограничивало применение этого высокопроизводительного метода. В литературе отсутствует теоретический анализ влияния режимов обработки и характеристик обрабатываемой среды на производительность и качество обработки. Существуют лишь отдельные рекомендации по выбору определённых технологических параметров, носящие в основном рекламный характер.

В связи с вышеперечисленными факторами, дальнейшее развитие технологии галтовки и её промышленное освоение невозможны без создания теоретической модели процесса, отражающей его физическую сущность и позволяющей прогнозировать результаты обработки на стадии проектирования.

Исследование единичного взаимодействия. При исследовании основных технологических параметров галтовки (производительности процесса и качества обработанной поверхности) необходимо решить задачу теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемой детали. Разработка теоретических зависимостей, описывающих форму и размеры следов обработки, позволит в дальнейшем перейти к теоретико-вероятностному описанию распределения следов на поверхности детали, что, в свою очередь, даёт возможность разработать модель формирования профиля шероховатости и удаления металла с поверхности детали.

Процесс единичного резания при абразивной обработке рассматривается во многих работах [1, 3, 4], так как он является основополагающим, раскрывает сущность абразивного воздействия и даёт возможность определить оптимальные технологические режимы обработки деталей машин.

Анализ работ [1–3] позволяет предположить, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали происходит следующим образом. При ударе частицы, движущейся под некоторым углом β к поверхности детали, на неё действует сила сопротивления P , которую можно разложить на нормальную P_n и касательную P_t . Известно [1], что при нормальном заглублении, единичный индентор будет охватываться деформируемым материалом равномерно со всех сторон. При приложении тангенциальной нагрузки напряжения со стороны действия тангенциальной силы возрастают и абразивная частица начинает двигаться, пластически оттесняя материал. При этом задняя полуповерхность, по направлению движения этой частицы, окажется полностью разгруженной, то есть она оторвётся от ранее деформируемого материала. Так как средние нормальные напряжения на поверхности контакта в статическом состоянии приблизительно равны средним нормальным напряжениям при движении, то очевидно, что в момент начала скольжения площадь на передней полуповерхности индентора должна возрасти, тем самым компенсируя отсутствие её на задней полуповерхности. Это приведёт к заглублению индентора до тех пор, пока площадь передней полуповерхности не достигнет определённого значения. Соответственно будет возрастать тангенциальная сила, которая при равенстве поверхностей достигает своего максимального значения (если пренебречь реологическим эффектом). В результате этого происходит дополнительное углубление индентора h .

При таком перемещении частицы на неё действует реакция со стороны материала детали, одна составляющая которой касательная — сила трения, тормозящая движение, а другая нормальная, стремящаяся вытолкнуть частицу из материала. При соударении твёрдых тел обе составляющие обычно уравниваются внешними усилиями, то есть динамическими силами, определяемыми ускорением и массой частицы. По мере увеличения силы взаимодействия P кон-

тактные напряжения, или деформации, возрастают и могут достигнуть разрушающих величин. В этом случае происходит переход к микрорезанию.

Согласно [2, 4] процесс снятия стружки становится возможным при напряжениях по линии скалывания, обычно превышающих сопротивление материала срезу. Установлено, что при углублении сферического индентора металл по краям выпучивается, и углубление происходит до тех пор, пока напряжение на контактной поверхности не станет равным σ_s , где σ_s — предел текучести материала детали, оценивающий несущую способность контактной поверхности. По данным [2, 4] значение этого коэффициента колеблется от 1 до 6, для металла в нормальном состоянии, и достигает 10 при наличии наклёпа. При определённом углублении, когда напряжение на контактной поверхности достигает вышеуказанных значений, наступает затормаживание металла перед частицей, обтекание прекращается и начинается нагребание металла, то есть идёт процесс микрорезания. Сдвиг металла происходит в направлении движения в плоскости касания.

На основании анализа работ [1, 3] предлагается следующая методика определения съёма металла с поверхности детали при единичном взаимодействии. Пусть абразивная частица, имеющая характерный размер R (радиус описанной окружности), движущаяся со скоростью V_d под углом β к поверхности детали, ударяется о неё с силой, достаточной для снятия стружки (здесь рассматриваются только те случаи взаимодействия, которые приводят к микрорезанию), тогда

$$dV = \frac{V_d}{L} \cdot dx, \quad (1)$$

где L — средний диаметр пятна касания при ударе; dV — объём металла, удалённого на пути скольжения dx ; V_d — деформированный объём при взаимодействии сферической частицы с деформируемым пространством.

Воспользуемся соотношением, известным из теории скольжения жёсткой сферы по пластически деформируемому полупространству [2]:

$$L = 2\sqrt{Rh}, \quad (2)$$

$$V = \pi Rh^2, \quad (3)$$

где π — число пи. Тогда

$$dV = \frac{\pi Rh^2}{2\sqrt{Rh}} dx,$$

$$dV = \frac{\pi}{2} \sqrt{R} \cdot h^{3/2} dx. \quad (4)$$

Проинтегрировав (4) по пути скольжения частицы, получим

$$V = \frac{\pi}{2} \sqrt{R} \cdot \int_0^{x_s} h^{3/2} dx. \quad (5)$$

Для нахождения предела интегрирования введём безразмерные координаты:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_{\max}} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{x}{h_{\max}}, \quad (6)$$

где h_{\max} — максимальная глубина внедрения частицы.

После преобразований получим:

$$V = \frac{\pi}{2} \sqrt{R} \cdot h_{\max}^{5/2} \int_0^{\varepsilon_s(\xi_s)} \varepsilon^{3/2} d\varepsilon. \quad (7)$$

Для дальнейшего анализа воспользуемся тем, что удар жёсткой сферической частицы о деформируемое полупространство, ограниченное плоскостью, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} k_m m \frac{d^2 h}{dt^2} = -P_N; \\ k_m m \frac{d^2 x}{dt^2} = -P_T; \end{cases} \quad (8)$$

где m — масса частицы; k_m — коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке; t — время.

Решение первого уравнения системы (8) можно найти, используя известное соотношение теории пластического контакта гладкого сферического индентора с деформируемым полупространством [2]:

$$P_N = \pi R_{cp} h c \sigma_s. \quad (9)$$

Так как при галтовке фактическая площадь контакта образуется в процессе дискретного взаимодействия группы абразивных зёрен, расположенных на сферическом сегменте, с поверхностью детали, в выражении (9) заменим R_{cp} на эквивалентный ему радиус частицы:

$$R_s = k_R R_{cp},$$

где k_R — коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта.

Определение величины k_R будет представлено ниже.

Тогда

$$P_N = \pi k_R R h c \sigma_s. \quad (10)$$

После подстановки (10) в (8) получим:

$$k_m m \frac{d^2 h}{dt^2} = -\pi k_R R h c \sigma_s, \text{ или } \frac{d^2 h}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{k_R c \sigma_s h}{k_m \rho_q R^2},$$

где ρ_q — плотность материала частицы.

Учитывая, что при $t = 0$, $h = 0$ и $\frac{dh}{dt} = 0$, получим:

$$\frac{dh}{dt} = \pm \sqrt{V_q^2 \sin^2 \beta - \frac{3}{4} \cdot \frac{k_R c \sigma_s}{k_m \rho_q R^2} h^2},$$

а так как при $h = h_{\max}$, $\frac{dh}{dt} = 0$, то зависимость для определения максимальной глубины внедрения частицы будет выглядеть следующим образом:

$$h_{\max} = 2k_m^{0,5} V_z R \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_r}{3k_R c \sigma_s}}.$$

Для процесса галтовки примем допущение, что частица падает на деталь с высоты h_q , равной 2/3 диаметра барабана:

$$V_q = \sqrt{2gh_q} = 1,15\sqrt{gD_6},$$

где D_6 — диаметр барабана, g — ускорение свободного падения.

Тогда максимальная глубина внедрения частицы определится по зависимости:

$$h_{\max} = 1,33k_m^{0,5} R \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_q g D_6}{k_R c \sigma_s}}. \quad (11)$$

Перейдя к безразмерным координатам можно записать:

$$\frac{dh}{dt} = \pm V_v \sin \beta \sqrt{1 - \varepsilon^2};$$

$$dt = \pm \frac{h_{\max} d\varepsilon}{k_m^{0,5} V_v \sin \beta \sqrt{1 - \varepsilon^2}}.$$

Учитывая, что $P_T = f \cdot P_N$, где f — коэффициент пропорциональности, после преобразований получим:

$$d\varepsilon = \left(f \pm \frac{\operatorname{ctg} \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon. \quad (12)$$

Здесь знак плюс соответствует увеличению внедрения ($d\varepsilon > 0$), а знак минус — уменьшению ($d\varepsilon < 0$). Используя (12), можно проинтегрировать (7). Предел интегрирования ε_* находим из условия, что скольжение прекращается либо когда $\frac{dh}{dt} = 0$, либо когда $\varepsilon = 0$. В первом случае из (12) имеем

$$\varepsilon_* = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \operatorname{tg} \beta} - 1 \right)^2},$$

а во втором случае — $\varepsilon_* = 0$.

Вид интеграла

$$A' = \int_0^{\varepsilon_*} \varepsilon^2 d\varepsilon, \quad (13)$$

входящего в выражение (7), зависит от численного значения ε_* , то есть от величины произведения $f \cdot \operatorname{tg} \beta$. Учитывая, что по данным [2, 3], коэффициент трения абразивного зерна по металлу равен в среднем 0,25, а угол встречи с поверхностью детали для обработки свободным абразивом не превышает 45° , можно сделать вывод, что

$$f \cdot \operatorname{tg} \beta < \frac{1}{2}.$$

Тогда интеграл (13) преобразуется к виду

$$A' = 2(\operatorname{ctg} \beta - 1) \int_0^1 \frac{\varepsilon^2 d\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}. \quad (14)$$

Интеграл, представленный в выражении (14), не берётся в конечном виде, но его можно выразить через гамма-функцию:

$$A' = \sqrt{\pi} \frac{\Gamma\left(\frac{5}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{7}{4}\right)} (c \operatorname{tg} \beta - f). \quad (15)$$

Подставляя значения гамма-функции, получим

$$A' = 1,75 \cdot (c \operatorname{tg} \beta - f). \quad (16)$$

Подставляя (16) в выражение (7), после преобразований получим зависимость для определения объёма металла, удалённого за один удар абразивной частицы:

$$V = 1,46 \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \left(\sin \beta k_m^{0,5} \sqrt{\frac{\rho_v g D_6}{c \sigma_s}} \right)^2 (c \operatorname{tg} \beta - f). \quad (17)$$

Соответственно, съём металла за один удар абразивной частицы

$$q = 1,46 \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \left(\sin \beta k_m^{0,5} \sqrt{\frac{\rho_4 g D_6}{c \sigma_s}} \right)^2 (\operatorname{ctg} \beta - f) \rho_d, \quad (18)$$

где ρ_d — плотность материала детали.

Для удобства записи и пользования зависимостью (18) введём новый коэффициент

$$k_3 = \frac{1}{k_R^{3/4}} \quad (19)$$

и назовём его коэффициентом, учитывающим влияние зернистости абразивной частицы на съём металла. Тогда зависимость для определения съёма металла при единичном взаимодействии запишется в виде:

$$q = 1,46 k_3 R^3 \left(\sin \beta k_m^{0,5} \sqrt{\frac{\rho_4 g D_6}{c \sigma_s}} \right)^2 (\operatorname{ctg} \beta - f) \rho_d. \quad (20)$$

Для учёта влияния зернистости абразивной гранулы на съём металла воспользуемся методикой работы [4]:

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{63,5 g D_6 \rho_4}{c \sigma_s} \left(\frac{k_p k_m^{0,5} \sin \beta \chi Y(\alpha) (1 - \varepsilon_3) \bar{x}}{\alpha^2 (\bar{x}^2 + 3\sigma^2)} \right)^2}, \quad (21)$$

где α — коэффициент формы зерна; $Y(\alpha)$ — функция, зависящая от α ; χ — доля, занимаемая зёрнами в грануле; ε_3 — коэффициент, учитывающий заделку зёрен в связке; \bar{x} — средний размер зерна; σ — среднее квадратичное отклонения размеров зёрен.

Исследование процесса удаления металла. Общее количество взаимодействий на площади квадрата упаковки (в случае упаковки абразивных частиц на поверхности детали по квадрату, со стороной, равной диаметру описанной окружности), приводящих к микрорезанию, можно определить следующим образом:

$$n_p = P_1 P_2 f_b t, \quad (22)$$

где P_1 — геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных частиц; P_2 — вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведёт к микрорезанию; f_b — частота циклов воздействия массы абразивных частиц на поверхность детали; t — время обработки.

Как показано в [3], большинство взаимодействий абразивных частиц с поверхностью детали происходит под острым углом, следовательно, пятно контакта при единичном взаимодействии можно представить в виде эллипса.

Задача заключается в определении вероятности того, что любая точка внутри квадрата упаковки может быть покрыта одним эллипсом. Однако ввиду того, что в реальном процессе обработки взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали имеет более сложный характер, дадим оценку вероятности. Применительно к процессу вибрационной обработки такая модель рассмотрена А. П. Бабичевым в работе [6], при этом оценка искомой вероятности снизу равна

$$P_1 = \frac{pab}{\pi a^2 + 4Da + D^2}, \quad (23)$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипсов контакта; D — диаметр абразивной частицы.

В обычном случае, когда площадь поверхности детали больше квадрата упаковки, общее число взаимодействий, приводящих к микрорезанию равно

$$N_p = n_p \frac{S_{дет}}{S_{кв.уп.}},$$

где $S_{дет}$ — площадь поверхности детали; $S_{кв.уп.}$ — площадь квадрата упаковки.

Приняв $S_{кв.уп.} = D^2 = 4R^2$, получим

$$N_p = P_1 P_2 f_b t \frac{S_{дет}}{4R^2}. \quad (24)$$

Следует учитывать, что в случае обработки очень малых деталей, либо их отдельных участков, когда площадь детали меньше площади квадрата упаковки, значение вероятности P_1 изменится и составит

$$P_1' = \frac{pab}{S_{дет}}. \quad (25)$$

При этом зависимость для определения общего числа взаимодействий, приводящих к микрорезанию, примет вид:

$$N_1' = P_1' P_2 f_b t. \quad (26)$$

Для проведения расчётов необходимо определить величину полуосей эллиптического пятна контакта a и b , воспользовавшись геометрической схемой внедрения абразивной частицы в поверхность детали.

Как показано в работе [4], величину полуосей эллипса контакта при обработке свободными абразивами, в том числе и при галтовке, можно найти по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2},$$

$$a = \frac{\pi}{2} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha - f) \cdot h_{\max} + b. \quad (27)$$

Ранее отмечалось, что разрушение поверхностного слоя при галтовке происходит преимущественно путём микрорезания. Следовательно, при расчёте съёма металла достаточно учитывать только число взаимодействий N_p , приводящих к микрорезанию:

$$Q = N_p q,$$

где Q — съём металла с поверхности детали.

Подставив значение N_p из рассмотренных выше зависимостей, получим:

$$Q = P_1 P_2 f_b t q \frac{S_{дет}}{4R^2} \text{ при } S_{дет} > 4R^2, \quad (28)$$

$$Q' = P_1' P_2 f_b t q \text{ при } S_{дет} < 4R^2. \quad (29)$$

Для проверки полученной зависимости, произведена серия экспериментальных исследований процесса абразивной галтовки. Определялось влияние зернистости абразивных гранул и механических свойств обрабатываемых материалов на съём металла с образцов площадью $S_{дет} = 10 \text{ см}^2$.

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Влияние зернистости абразива на съём металла при галтовке

Зернистость	Q теоретический (кг)	Q экспериментальный (кг)
4	$7,48 \cdot 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$
8	$1 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
16	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
25	$1,64 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
40	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2

Влияние предела текучести материала детали на съём металла при галтовке

σ_s (МПа)	Q теоретический (кг)	Q экспериментальный (кг)
200	$8,83 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$
300	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$
400	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$
600	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$

Заключение. Анализируя результаты теоретических и экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что полученные зависимости могут быть использованы при технологических расчётах параметров абразивной галтовки.

Библиографический список

1. Непомнящий, Е. Ф. Трение и износ под воздействием струи твёрдых сферических частиц / Е. Ф. Непомнящий // Контактное взаимодействие твёрдых тел и расчёт сил трения и износа. Москва : Наука, 1971. С. 190–200.
2. Михин, Н. М. Внешнее трение твёрдых тел / Н. М. Михин. — Москва : Наука, 2002. — 222 с.
3. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 1998. — 624 с.
4. Тamarкин, М. А. Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива / М. А. Тamarкин, Э. Э. Тищенко, В. В. Друппов // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2007. — № 10. — С. 19–24.

Материал поступил в редакцию 30.01.13.

References

1. Nepomnyashchiy, E. F. Trenie i iznos pod vozdeystviem strui tverdy`x sfericheskix chasticz. [Friction and wear caused by solid spherical particle-laden jets.] Kontaktnoe vzaimodejstvie tverdy`x tel i raschet sil treniya i iznosa. [Contact interaction of solids, and friction and wear forces analysis.] Moscow : Nauka, 1971, pp. 190–200 (in Russian).
2. Mikhin, N. M. Vneshnee trenie tverdy`x tel. [External friction of solids.] Moscow : Nauka, 2002, 222 p. (in Russian).
3. Babichev, A. P., Babichev, I. A. Osnovy` vibracionnoj tehnologii. [Vibration technology basics.] Rostov-on-Don : DSTU Publ. Centre, 1998, 624 p. (in Russian).
4. Tamarkin, M. A., Tishchenko, E. E., Drupov, V. V. Formirovanie parametrov kachestva povexnosti pri centrobezhno-rotacionnoj obrabotke v srede abraziva. [Generation of quality parameters under centrifugal rotary machining in abrasive environment.] Uprochnyayushhie tehnologii i pokry`tiya, 2007, no. 10, pp. 19–24 (in Russian).

STUDY ON METAL REMOVAL PROCESS UNDER ABRASIVE RUMBLING¹

A. V. Yushchenko

(Rostov State Transport University),

M. B. Flek

(Don State Technical University)

The loose-abrasive part cutting role in the modern mechanical engineering is studied, and the manufacturing capability of the abrasive rumbling is presented. The problem of obtaining theoretical dependences describing the connection of rumbling productivity and quality with the process parameters and types of working environments is formulated. Single interaction of an abrasive particle with the working face under rumbling is considered. Dependences for determining maximum depth of the granule penetration and the metal removal at one impact of an abrasive granule are obtained. The theoretical and experimental study on the metal removal process is carried out. At that, the effect of the operation modes, properties of an abrasive particle and the processed material is considered. The experimentally tested dependence for determining metal removal under rumbling is obtained. It is concluded that the obtained theoretical dependences can be used under designing part cutting processes through abrasive rumbling.

Keywords: *rumbling, single interaction, introduction depth, single metal removal, metal removal analysis, validation of theoretical dependences for adequacy.*

¹ The research is done within the frame of the independent R&D.