

Особенности разрушения материала поверхностей деталей при абразивной доводке в условиях изготовления или ремонта

В.А. СКРЯБИН*, д-р техн. наук, проф., С.А. ГУСЕВ, асп.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026,
Российская Федерация

*E-mail: vs_51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2026-0-3-10-15

Статья поступила в редакцию 23.11.2024

Принята после доработки 16.04.2025

Принята к публикации 23.12.2025

В статье рассмотрены особенности процесса абразивной доводки поверхностей, приведены математические модели силового воздействия абразивного зерна на обрабатываемую поверхность детали. Показано, что при заданных силовых и режимных параметрах процесса обработки детали поверхностями абразивных зерен притира в зоне малых глубин резания разрушение металла поверхностного слоя обрабатываемой детали носит более хрупкий характер. Это способствует интенсификации процесса стружкообразования и достижению заданного качества поверхности детали.

Ключевые слова: абразивная доводка, силовое взаимодействие, притир, абразивное зерно, интенсификация процесса.

Введение

Одним из элементов комплексного исследования работы абразивных зерен притира является определение силовых зависимостей. В соответствии с ранее проведенными исследованиями модели абразивного зерна [1–3], каждый его выступ можно рассматривать в миниатюре как вершину абразивного зерна с соответствующими размерами и формой правильной усеченной пирамиды с основанием в виде квадрата (рис. 1).

В связи с этим систему сил, возникающих при микрорезании, можно рассматривать на примере взаимодействия единичного выступа абразивной частицы с поверхностью обрабатываемой детали в соответствии с исследованиями, проведенными в работах [1–3].

Выступ абразивного зерна (рис. 1), перемещаясь со скоростью V по обрабатываемой поверхности, снимает слой материала толщиной a_z (толщина среза). Этот слой в результате деформации сдвига на пло-

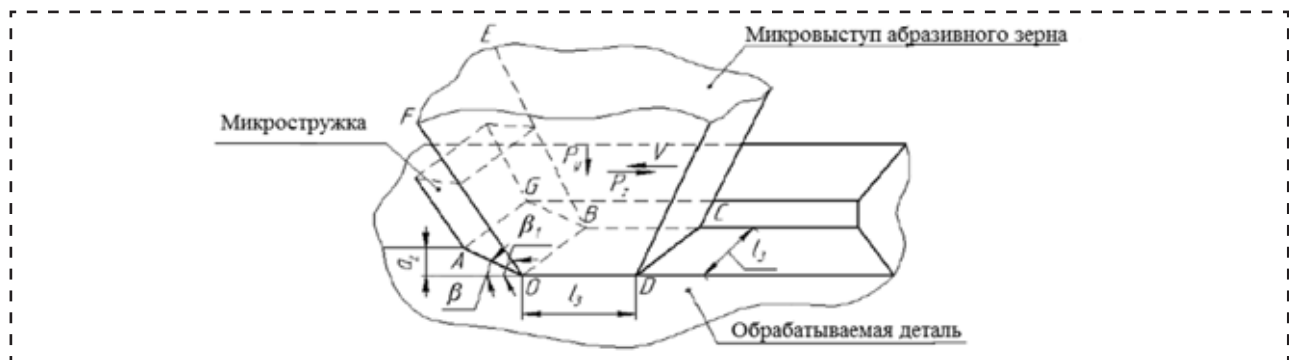


Рис. 1. Схема перемещения абразивного зерна относительно обрабатываемой поверхности детали

скости $OAGB$ переходит в микростружку. Микровыступ абразивного зерна при движении в направлении скорости V преодолевает тангенциальную составляющую силы резания P_z . Внедрение зерна своим микровыступом в обрабатываемую поверхность обеспечивается составляющей силы резания P_y , действие которой формирует направления сжатия в плоскости сдвига и под заданной площадкой $OAGB$.

Материалы и методы

Можно предположить, что напряженное состояние в области, примыкающей к срезу, при удалении материала в зоне малых глубин резания $a_z(h_d) \geq 0,002\text{--}0,03$ мм в первом приближении будет соответствовать тем же закономерностям, что и при микрорезании вершиной абразивной частицы при шлифовании. В этом случае при определении сил резания необходимо исходить из равновесия активных (внешних) и реактивных (внутренних) сил, действующих на микровыступ абразивного зерна. При абразивном воздействии рассматривают три вида этих сил: силу сдвига, силу нормального давления и силу трения. Указанные силы и их составляющие приведены на рис. 2.

При микрорезании абразивными зернами толщина среза при абразивной доводке достаточно мала [$a_z(h_d) \leq 0,002\text{--}0,03$ мм], в связи с чем силы в условиях плоского

деформированного состояния можно считать приложенными в точке O , то есть в начале режущей кромки абразивной частицы. По этим же причинам силы могут быть приведены к одной равнодействующей, так как моменты их будут незначительны. На приведенной схеме распределение действующих сил и напряжений выполнено с помощью кругов Мора [1, 4, 5]. Круг Мора — это круговая диаграмма, дающая наглядное представление о напряжениях в различных сечениях, проходящих через данную точку.

В соответствии с рис. 2: P_y — радиальная составляющая силы микрорезания R ; P_z — тангенциальная составляющая R ; P_{ys} — составляющая силы P_y от нормальных напряжений σ ; $P_{zтр}$ — составляющая от напряжений, действующих по линии OB и вызывающих трение площадки выступа о материал; P_{zs} — составляющая силы P_z от напряжений пластического сдвига τ_s , которая увеличивает трение стружки о переднюю грань абразивного выступа; $P_{zтр}$ — тангенциальная сила трения материала о заднюю грань выступа; γ — передний угол режущей кромки абразивного выступа; L'_m и l' — основания трапеции сечения микростружки; $l'_m = l_m$ — параметры площадки затупления выступа вершины абразивного зерна; β_1 — угол плоскости сдвига; β — угол между линией среза и направлением равнодействующей среза R_s ; h_d — ди-

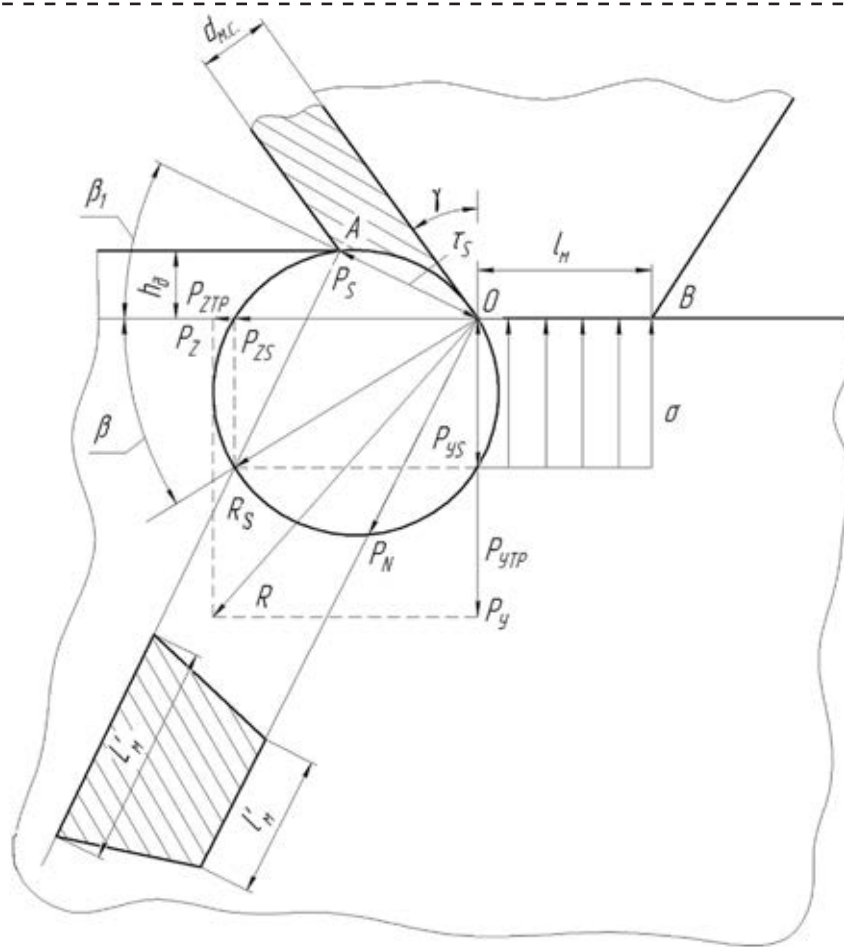


Рис. 2. Схема составляющих сил микрорезания поверхности материала детали выступом абразивного зерна

намическая глубина внедрения абразивной частицы в материал детали в процессе микрорезания.

В отличие от микрорезания зернами при шлифовании, где площадки затупления на их вершинах значительны, при абразивной доводке распределение нормальных напряжений по длине площадки затупления будет равномерным вследствие ее малости, и можно принять нормальное напряжение σ равным его значению на участке под точкой O . В этом случае имеем [1–3]:

$$\sigma \approx \sigma_0 = 1,5\tau_s. \quad (1)$$

Из геометрических соотношений получаем:

$$\begin{aligned} P_s &= \tau_s \cdot f_{cp} = \tau_s \cdot OA \cdot \left(\frac{l'_m + L'_m}{2} \right) = \\ &= \frac{\tau_s \cdot h_d \cdot (l'_m \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma)}{\sin^2 \beta_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

В соответствии с исследованиями [1–5, 7] параметры площадки износа абразивных зерен при абразивной доводке изменяются в диапазоне $l_m = l'_m = 3\text{--}20$ мкм в зависимости от условий обработки.

Нормальная сила P_N (рис. 2) определяется следующим образом:

$$P_N = \sigma \cdot f_{cp} = \frac{\sigma \cdot h_d \cdot (l'_m \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma)}{\sin^2 \beta_1}. \quad (3)$$

Так как из зависимости (1) $\sigma \approx \sigma_0 = 1,5\tau_s$, то получим:

$$P_N = \sigma \cdot f_{\text{ср}} = \frac{1,5 \tau_s \cdot h_d \cdot (l'_M \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma)}{\sin^2 \beta_1}. \quad (4)$$

Равнодействующая сила R_s получается по следующей зависимости:

$$R_s = \sqrt{P_s^2 + P_N^2} = \frac{2,55 \cdot \tau_s \cdot h_d \cdot (l'_M \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma)}{\sin^2 \beta_1}. \quad (5)$$

По R_s и углу β между линией среза и направлением равнодействующей среза R_s находим составляющие силы резания:

$$P_{ys} = R_s \cdot \sin \beta = \frac{2,55 \cdot \tau_s \cdot h_d \cdot (l'_M \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot \sin \beta}{\sin^2 \beta_1}; \quad (6)$$

$$P_{zs} = R_s \cdot \cos \beta = \frac{2,55 \cdot \tau_s \cdot h_d \cdot (l'_M \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot \cos \beta}{\sin^2 \beta_1}. \quad (7)$$

Составляющие силы трения по площадке трения с учетом действующих нормальных напряжений и размера площадки трения $f_{\text{тр}}$ определяются как:

$$P_{\text{утр}} = \sigma \cdot f_{\text{тр}} = 1,5 \cdot \tau_s \cdot l_M \cdot l'_M;$$

$$P_{\text{зтр}} = \mu \cdot P_{\text{утр}} = 1,5 \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot l_M \cdot l'_M,$$

где μ — коэффициент внешнего трения абразива по металлу.

С учетом значений выражений составляющих сил получим тангенциальную и радиальную составляющие силы результирующей силы резания R :

$$P_y = P_{ys} + P_{\text{утр}} = \frac{2,55 \cdot \tau_s \cdot h_d \cdot (l'_M \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot \sin \beta}{\sin^2 \beta_1} + 1,5 \cdot \tau_s \cdot l_M \cdot l'_M; \quad (8)$$

$$P_z = P_{zs} + P_{\text{зтр}} = \frac{2,55 \cdot \tau_s \cdot h_d \cdot (l'_M \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot \cos \beta}{\sin^2 \beta_1} + 1,5 \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot l_M \cdot l'_M. \quad (9)$$

Угол скалывания β_1 при резании вершинами абразивных зерен в соответствии с работами [5, 6] определяется следующим образом:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma + 0,05 \cdot \eta_{\text{мс}}}{0,9 \cdot \eta_{\text{мс}} - \sin \gamma}, \quad (10)$$

где γ — передний угол режущей кромки зерна; $\eta_{\text{мс}}$ — коэффициент усадки микростружки, представляющий собой отношение толщины стружки $a_{\text{мс}}$ к толщине среза h_d .

Передний угол при микрорезании вершинами абразивных зерен принимают равным $\gamma = (-45^\circ) \dots (-55^\circ)$ в соответствии с работами [4, 6]. Примерно в этих же пределах находятся передние углы режущих кромок выступов микрорельефа, полученные по данным электронно-микроскопических исследований [1, 2].

Усадку стружки находят экспериментальным путем, измеряя большое количество стружек, полученных при микрорезании единичными абразивными зернами. По данным ряда исследователей [4, 6], значение коэффициента усадки стружки изменяется в диапазоне 1,1—1,8.

Исследования, проведенные в работах [1–5], показали, что при микрорезании в зоне малых глубин ($h_d \leq 0,002–0,03$ мм) усадка микростружки меньше и колеблется в небольшом интервале $\eta_{mc} = 1,1–1,8$. Малая усадка стружки соответствует полученным в ранее проведенных исследованиях коэффициентам стружкообразования K_c [1, 2], близким к единице, и подтверждает, что разрушение металла поверхностного слоя обрабатываемой детали носит более хрупкий характер при абразивной доводке по сравнению с микрорезанием поверхности детали вершиной абразивного зерна при шлифовании.

Расчет по зависимости (10) при среднем значении коэффициента усадки стружки $\eta_{mc} = 1,14$ и угле $\gamma = -50^\circ$ дает величину $\beta_1 = 23^\circ$. При предельных значениях коэффициента усадки стружки и углов γ угол сдвига изменяется в диапазоне $\beta_1 = 19–26^\circ$ согласно проведенным исследованиям.

Угол β определяется из условия:

$$\frac{P_N}{P_s} = \operatorname{tg}(\beta_1 + \beta) = 1,5.$$

Получаем $\beta_1 + \beta = 56^\circ 18'$, а поскольку $\beta_1 = 23^\circ$, то $\beta = 33^\circ 18'$.

Значения τ_s и μ можно ориентировочно определить по аналитическим зависимостям, задаваясь размерами площадки затупления, по полученным значениям P_y и P_z , определенным экспериментальным путем. В этом случае система уравнений (8) и (9) должна решаться совместно путем деления P_z на P_y , поскольку они содержат общий параметр τ_s , а коэффициент трения μ влияет только на тангенциальную составляющую силы резания.

Величина (остаточных напряжений) τ_s при шлифовании зависит от условий обработки и свойств обрабатываемого материала. Эти напряжения возникают из-за пластического деформирования металла в процессе шлифования, которое сопровождается внутризеренным сдвиговым неравномерным перемещением одних частей кристаллита относительно других.

Из решения уравнений (8) и (9) получаем:

$$\tau_s = \frac{P_y \cdot \sin^2 \beta_1}{2,55 \cdot h_d (l'_m \cdot \sin \beta_1 + h_d \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot \sin \beta + 1,5 \cdot l_m \cdot l'_m \cdot \sin^2 \beta_1}; \quad (11)$$

При вводе силовых и геометрических параметров в уравнение (11) в зависимости от условий обработки величина напряжения пластического сдвига при абразивной доводке изменяется в диапазоне $\tau_s = 3550–4550$ МПа ($355–455$ кгс/мм²), $\mu = 0,26–0,29$ по сравнению со шлифованием, где $\tau_s = 2000–3000$ МПа. Значение напряжения сдвига, полученное расчетно-экспериментальным путем, в несколько раз выше, чем при микрорезании вершинами абразивных зерен при шлифовании. Более высокие напряжения сдвига при абразивной доводке свидетельствуют о повышенном сопротивлении материала сдвигу, что может быть объяснено более хрупким характером разрушения материала [7–9].

Обсуждение результатов

Исследование характера разрушения материала при абразивной доводке показало, что процесс отделения материала происходит при более высоких значениях напряжения пластического сдвига. Это может быть объяснено более хрупким характером разрушения материала при его диспергировании.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. **Скрябин В.А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом: монография. Пенза: Изд-во ПВАИУ. 1992. 120 с.
2. **Мартынов А.Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами: монография. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1981. 212 с.
3. **Скрябин В.А., Пшеничный О.Ф.** Субмикрорезание при обработке поверхностей деталей незакрепленным абразивом, уплотненным инерционными силами // Машиностроение: Республ. межведомств. сборник статей. Минск: Вышэйшая школа. 1988. № 14. С. 60—64.
4. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами: монография. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии». 2015. 240 с.
5. **Корчак С.Н.** Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение. 1977. 523 с.
6. **Маслов Е.Н.** Механизм работы абразивного зерна при шлифовании. В сб.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. М.: Машгиз. 1960. С. 5—29.
7. **Филимонов Л.Н.** Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение. 1979. 245 с.
8. **Скрябин В.А.** Совершенствование технологии финишной обработки уплотненными мелкодисперсными абразивными средами плоских поверхностей деталей // Технология металлов. 2016. № 6. С. 26—36.
9. **Backer W.R., Marsschall E.R., Show M.C.** Micro-cutting with abrasive particles. Trans. ASME. 1952. V. 74. No 1. P. 61—72.

Требования к статьям для журналов, включенных в Перечень ВАК

Обязательное указание в каждой статье:

- УДК
- Название статьи
- Аннотация
- Ключевые слова
- Информация об авторах: ученая степень, наименование организации
- E-mail
- Наличие пристатейных библиографических списков у всех статей в формате, установленном журналом из числа предусмотренных действующим ГОСТом

Аннотации статей, ключевые слова, полная информация об авторах должны быть указаны на русском и английском языках.