

УДК 621.922.34

М. Н. Шейко, А. П. Максименко (г. Киев)

Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Установившаяся фактическая подача на глубину при многократных проходах

Продолжено теоретическое изучение правки алмазными брусками. Исследовано явление накопления неснятого припуска срезаемого абразивного круга в процессе многократных проходов стола с бруском. Установлена механико-статистическая природа явления. Построена математическая модель, прогнозирующая рост и последующую стабилизацию параметров резания, в том числе главной величины — фактической подачи на глубину. Теоретические выводы подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: *врезная правка, алмазный брусок, абразивно-алмазная обработка, абразивный круг, накопление неснятого припуска, фактическая подача на глубину, механико-статистическая природа явления.*

Данная статья является непосредственным продолжением работ [1, 2], актуальность которых обусловлена решаемыми там задачами, сопряженными с использованием нового правящего инструмента — алмазных профильных брусков — в прогрессивной технологии обработки методом фасонного шлифования абразивными кругами.

В настоящей работе исследовано явление накопления неснятого припуска срезаемого круга в процессе многократных проходов стола с бруском (при подачах на глубину t_n на ход). Аналогично [3], ниже показано, что явление не связано с упругим отжатием в технологической системе, а имеет механико-статистическую природу.

Действительно, при алмазно-абразивной обработке съем припуска осуществляется посредством массовых актов резания-царапания отдельными зернами, нерегулярно размещенными на рабочей поверхности инструмента и имеющими неправильную геометрическую форму. Поперечное сечение поверхности резания при этом представляет собой реализацию случайного процесса с большой вариацией относительно среднего значения. Иными словами, это профилограмма с большим значением R_{max} . Наиболее глубокие впадины соответствуют максимальному внедрению инструмента, величина которого — не меньше R_{max} . Толщина же удаленной (за одно касание инструмента и заготовки) части припуска определяется расстоянием между средними линиями двух таких последовательно сформированных профилограмм, причем это расстояние может быть намного меньше R_{max} . Более того, поверхность резания при первых касаниях представляет собой лишь малочисленные, разрозненные, даже не слившиеся по ширине царапины. Лишь в ходе последующих касаний царапины сливаются в развитую поверхность резания. Понятно, что фактическая величина объема удаляемого материала при этом

отстает от номинальной величины, соответствующей задаваемой станком подаче на глубину; происходит накопление неудаленного припуска. Такого же мнения придерживается В. Ф. Казаков в [4]: "... во время выхаживания отдельные абразивные зерна продолжают снимать наиболее высоко расположенные гребешки независимо от того, имеется или нет перемещение круга за счет упругого воздействия звеньев станка. Поэтому нельзя согласиться с Г. Б. Лурье ... в том, что резание продолжается из-за упругого отжатия звеньев станка. В этом легко убедиться, сравнивая процесс шлифования узких (ширина 2—3 мм) и широких (ширина 20—50 мм) деталей. При шлифовании узкой детали возникающая радиальная составляющая силы резания недостаточна, чтобы вызвать упругое отжатие звеньев станка. Однако искрообразование при выхаживании, свидетельствующее о продолжающемся съеме металла, имеет место в равной степени при выхаживании как широких, так и узких деталей". Такова качественная картина специфического механизма алмазно-абразивного удаления припуска.

Переходя на количественный уровень решения вопроса, отметим, что в [1], руководствуясь принципом суперпозиций отдельных царапин при формировании полной поверхности резания, т. е. с механико-статистических позиций, найдено выражение для толщины суммарного съема за j врезных и m выхаживающих оборотов заправляемого круга:

$$T_{jm} = jt_0 - \int_0^{jt_0} e^{-(1-\delta_{1j})\mu_1 x^{k_1} - (\frac{1}{2}(1+\delta_{1j})+m)\mu_2 x^{k_2}} dx, \quad (1)$$

где для $h_{nc} = 0$

$$k_1 = \beta + \frac{3}{2}; \quad k_2 = k_1 - 1;$$

$$\mu_1 = \frac{2}{2\beta + 3} \sum_{r=0}^{\infty} C_{\beta}^r (-1)^r \frac{2}{2r+1} \cdot \left| 1 - \frac{1}{q} \right| n_c \alpha \sqrt{d_e} \frac{1}{t_0};$$

$$\mu_2 = k_1 t_0 \mu_1,$$

а для $h_{nc} \neq 0$

$$k_1 = \beta + \frac{5}{2}; \quad k_2 = k_1 - 1;$$

$$\mu_1 = \frac{1}{\beta + 1} \frac{2}{2\beta + 5} \sum_{r=0}^{\infty} C_{\beta+1}^r (-1)^r \frac{2}{2r+1} \cdot \left| 1 - \frac{1}{q} \right| n_c \alpha \sqrt{d_e} \frac{1}{h_{nc} t_0};$$

$$\mu_2 = k_1 t_0 \mu_1.$$

Искомая фактическая подача t_{ϕ} для врезания и выхаживания определяется соответственно из уравнений

$$T_{jm} - T_{j-1m} = \int_0^{t_{\phi}} e^{-\mu_2 x^{k_2}} dx; \quad T_{jm} - T_{j m-1} = \int_0^{t_{\phi}} e^{-\mu_2 x^{k_2}} dx. \quad (2)$$

Сохраняя обозначения, принятые в [1, 2], напомним, что в вышеприведенных выражениях h_{nc} — разновысотность поверхностного слоя; n_c — удельное число зерен на рабочей поверхности правящего бруска; α и β — коэффициенты, характеризующие форму поперечного сечения зерна; d_e — эквивалентный диаметр шлифования равный в нашей схеме диаметру заправляемого

го круга; $t_0 = t_n/j_{\max}$ — подача на глубину на оборот заправляемого круга, где t_n — номинальная подача на глубину правки, а j_{\max} и m_{\max} обуславливаются длиной заборной и калибровочной частей бруска и соотношением скоростей детали (заправляемого круга) и инструмента (стола с бруском) — $q = v_d/v_n$, где v_d и v_n — скорость детали и круга соответственно.

Обозначив через T^k суммарную толщину удаленного припуска за k проходов, условие стабилизации величины съема за проход записываем в виде

$$\frac{dT^k}{dk} = t_n. \quad (3)$$

Из последнего находим номер прохода k' , начиная с которого толщина слоя, фактически снимаемая с абразивного круга за ход, достигает величины, равной подаче t_n , задаваемой станком. При этом если брусок не имеет заборной части ($j_{\max} = 1$), то его врезание в абразивный круг происходит с фактической подачей на глубину t_n^Φ (на ход), превышающей номинальную подачу t_n . Значение t_n^Φ равно максимальной глубине внедрения при входе в контакт находим из уравнения

$$T_{j_{\max}, m_{\max}} \Big|_{t_n \rightarrow t_n^\Phi} = t_n. \quad (4)$$

Если брусок имеет заборную часть ($j_{\max} > 1$), его врезание в круг происходит плавно, а увеличение фактической подачи t_n^Φ эквивалентно увеличению расчетного параметра j_{\max}^Φ ($j_{\max}^\Phi > j_{\max}$), который находим из уравнения

$$T_{j_{\max}^\Phi, m_{\max}} = t_n. \quad (5)$$

Решение системы (3), (4) или (3), (5) осуществляется на ПЭВМ численно. Практическая схема решения следующая. Для первой системы (где $j_{\max} = 1$), предварительно переопределив значение параметра $n_c = n_c(1 + m_{\max})$, табулируем функцию

$\frac{dT_{jm}}{dj} \Big|_{\substack{j=k \\ m=0}}$ по целочисленному аргументу k . Параллельно (в соответствии с (2)) вычисляем t_Φ . По достижении (с наперед заданной точностью) функцией

$\frac{dT_{jm}}{dj} \Big|_{\substack{j=k \\ m=0}}$ значения t_n при $k = k'$, табуляцию прекращаем, причем искомой t_n^Φ присваиваем последнее значение t_Φ . Аналогично находим решение второй системы (когда $j_{\max}^\Phi > 1$). Но здесь, не изменяя начального значения n_c , табулируем функцию $T_{j_{\max}, m_{\max}}$ по j_{\max} и по достижении функцией значения t_n при $j_{\max} = j_{\max}'$ искомой величине j_{\max}^Φ присваиваем значение j_{\max}' .

Подставляя найденные значения t_n^Φ или j_{\max}^Φ в (1) и в выражения остальных выходных механических характеристик процесса, выведенные в [5—7] и заложенные в программу для ПЭВМ [8], устанавливаем полную картину рос-

та и стабилизации нагрузок на правящий инструмент при многократных проходах.

В экспериментах с бруском длиной $l_6 = 10$ мм и алмазным слоем АС 160Т 630/500 ($n_c = 2,2 \text{ мм}^{-2}$) правили круги ПП 300×50×127 25А25СТ2 на следующих режимах: скорость стола $v_n = 380 \text{ мм/с} = 22,8 \text{ м/мин}$, скорость детали (заправляемого круга) $v_d = 30 \text{ м/с}$, номинальная подача на глубину $t_n = 0,001$ мм на ход стола. Расчеты показали, что при таком соотношении скоростей ($|q| = 78$) и малой длине бруска, когда $j_{\max} = 1$, $m_{\max} = 0$, в соответствии с решением системы (3), (4), величина фактической подачи на глубину t_n^ϕ превышает номинальную t_n в 5—11 раз, в зависимости от разновысотности зерен в алмазном слое правящего инструмента [9] в диапазоне от 0 до 0,02 мм соответственно. В нашем случае, когда разновысотность практически отсутствует, $t_n^\phi = 5,12 \cdot 10^{-3}$ мм (см. таблицу). Из таблицы также следует, что установившийся режим резания наступает к 14-му проходу.

Для экспериментального подтверждения расчетных данных осуществляли правку, при которой на столе плоскошлифовального станка 3Е721ВС последовательно с бруском закрепляли стальной клин с углом подъема γ (рисунок), верхняя точка которого лежала на одном уровне с вершинами наиболее выступающих зерен алмазного слоя бруска. В процессе правки осуществлялось также и шлифование клина с образованием лыски. По длине лыски l_ϕ , измеряемой на микроскопе МБС-9, пересчитывали фактическую подачу:

$$t_n^\phi = \frac{l_\phi \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma} \approx l_\phi \operatorname{tg} \gamma. \quad (6)$$

Рост и последующая стабилизация фактических параметров резания

Число проходов k	Съем за проход $\frac{dT^k}{dk}$, мм	Фактическая подача t_ϕ на глубину, мм	Сила правки на единицу ширины контакта (круг СМ1) $\frac{1}{b} P_z$, Н/мм
1	$4,28 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	0,039
2	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	0,117
3	$3,20 \cdot 10^{-4}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	0,232
4	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$3,54 \cdot 10^{-3}$	0,344
...
13	$9,99 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	0,136
14	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	0,137
15	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	0,137
...

Замеры дали величину $l_\phi = 6—8$ мм. Аналогичные замеры были произведены также при правке мягких кругов 25СМ1, силы резания при правке которых в два раза ниже [10]. При этом, если бы накопление неудаленного припуска было обусловлено упругим отжатием в технологической системе, следовало ожидать уменьшения значения фактической подачи на глубину. Но

замеры дали практически тот же результат — $l_{\phi} = 6-8$ мм, что при $\gamma = 2' 45''$ соответствует $t_{\text{н}}^{\phi} = 4,8-6,4 \cdot 10^{-3}$ (сравни с расчетным $t_{\text{н}}^{\phi} = 5,12 \cdot 10^{-3}$ мм). Это подтверждает механико-статистическую природу явления.

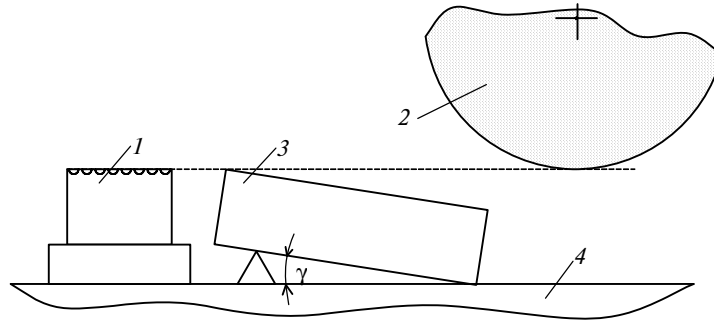


Схема правки алмазным бруском (1) абразивного круга (2) с одновременным шлифованием последним стального клина (3) при возвратно-поступательном движении стола (4) со скоростью v_n с подачей на глубину t_n на каждый ход.

Таким образом, результаты экспериментов и расчетов показывают, что накопление не удаленного припуска приводит к увеличению фактической подачи на глубину, а следовательно, нагрузок в контакте и текущей шероховатости. Степень этих изменений зависит от режима правки и характеристик бруска и тем значительнее, чем меньше отношение $|q|$, а также длина бруска, концентрация алмазов в рабочем слое и чем выше разновысотность зерен. Так, фактическая подача $t_{\text{н}}^{\phi}$ даже не в предельных условиях правки может превышать номинальную $t_{\text{н}}$ более чем в 5 раз. Таким образом, как и для правки роликами, при правке алмазными брусками установлена механико-статистическая природа явления роста и последующей стабилизации фактических параметров резания, неучет чего занижил бы расчетные значения силовых характеристик правки (а как следствие, исказил бы прогнозируемые показатели качества).

Работа выполнена по Государственной научно-технической программе Министерства образования и науки Украины 5.5 “Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии в машиностроении”.

1. Шейко М. Н., Химач О. В. Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Сообщение 1. Редукция к схеме обработки с непрерывной подачей на глубину // Сверхтв. материалы. — 2004. — № 1. — С. 36—45.
2. Шейко М. Н., Химач О. В. То же. Сообщение 2. Некоторые теоретические вопросы работы инструмента с неоднородной рабочей поверхностью // Там же. — 2004. — № 2. — С. 47—52.
3. Шейко М. Н. Динамика съема припуска при шлифовании периферией круга на стадии врезания и выхаживания: фактор инструмента и режима обработки // Там же. — 1994. — № 4. — С. 52—57.
4. Казаков В. Ф. Шлифование при высоких скоростях резания. — Київ: Техніка, 1971. — 171 с.
5. Шейко М. Н. К вопросу о распределении параметров срезов при шлифовании периферией круга: фактор инструмента и режима обработки: Сообщение 1 // Сверхтв. материалы. — 1993. — № 3. — С. 55—64, 70.
6. Шейко М. Н. То же: Сообщение 2 // Там же. — 1993. — № 5. — С. 51—61.

7. Шейко М. Н. Сила шлифования в свете теоретико-вероятностных представлений о процессе // Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ НАН Украины, 1998. — С. 172—175.
8. Шейко М. Н., Химач О. В., Молодид А. К. Компьютерная модель шлифования как стохастического процесса // Международ. конф. “Новая компьютерная технология в промышленности, энергетике, образовании”, Алушта, 21—23 сентября 1999 г.: Сб. докл. — Киев, 1999. — С. 47—48.
9. Шейко М. Н. Микроскопические характеристики поверхностного слоя правящего ролика и способы их измерений / Редкол. журн. “Сверхтвердые материалы”. — Киев, 1991. — 12 с. — Деп. в ВИНТИ 18.07.91, № 3074—В91.
10. Полупан Б. И., Байкалов А. К. Силы резания при правке абразивных кругов алмазным зерном // Синт. алмазы. — 1978. — Вып. 3. — С. 58—61.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 22.02.08