

УДК 621.937

М.Г. Киселев, д-р техн. наук, проф., Д.А. Степаненко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАПЫЛЕНИЯ АБРАЗИВНОЙ СУСПЕНЗИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОГРАНОЧНОГО ДИСКА

На основании математической модели исследованы оптимальные с точки зрения обеспечения равномерности распределения абразивных частиц режимы напыления алмазосодержащей суспензии на поверхность ограночного диска.

В данной статье рассматривается процесс напыления абразивной суспензии на поверхность ограночного диска. Напыление является подготовительной операцией процесса формирования алмазосодержащего слоя, выполняемой с целью предварительного закрепления зерен алмазных микропорошков, которые затем внедряются в поверхностный слой материала диска и закрепляются в нем путем механического шаржирования (укатки) [1]. При этом характер распределения алмазных частиц, определяемый технологическими параметрами процесса напыления, оказывает существенное влияние на формирование эксплуатационных показателей ограночного диска на операции его укатки.

Авторами в [2] была предложена математическая модель процесса напыления и на ее основе рассчитана функция плотности распределения абразивных частиц по поверхности диска. Было показано, что для стационарных значений технологических параметров процесса (скорость перемещения сопла распылительного устройства  $v_s$ , скорость истечения суспензии  $v$ , концентрация абразивных частиц в суспензии  $\mu$ , скорость вращения диска  $\omega_d$ ) распределение частиц вдоль радиуса диска имеет неравномерный характер. Вместе с тем представляется рациональным обеспечение равномерного распределения частиц, при котором достигается постоянство эксплуатационных показателей по рабочей поверхности диска. Предшествующие исследования авторов показали, что для некоторого диапазона технологических параметров напыления равномерность распределения частиц может быть обеспечена за счет реализации процесса напыления с нестационарным расходом суспензии, изменяющимся во времени по линейному закону. Была предложена оригинальная методика расчета функции распределения частиц, основанная на временной дискретизации модели процесса, и разработано программное обеспечение для ее реализации. Кроме того, была поставлена и решена задача об исследовании влияния режимов нестационарного напыления на равномерность распределения частиц по поверхности ограночного диска.

Пусть закон изменения расхода абразивной суспензии во времени описывается функцией

$$q(t) = q(0)(1 - k_q t), \quad (1)$$

где  $q(0)$  – расход суспензии в начальный момент напыления;  $k_q$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения расхода суспензии во времени.

Для реализации равномерного распределения частиц по поверхности диска необходимо, чтобы коэффициент изменения расхода суспензии  $k_q$  был связан определенной зависимостью с другими технологическими параметрами процесса напыления.

На рис. 1 приведен график зависимости коэффициента изменения расхода суспензии от радиуса зоны распыления. Скорость вращения диска и скорость перемещения сопла распылительного устройства при расчете были фиксированы и составляли 10 рад/с и 1 мм/с соответственно. Расчет производился с помощью специально разра-

ботанного программного обеспечения в системе компьютерной алгебры MathCAD. Значения коэффициента изменения расхода суспензии представлены в экспоненциальной форме. Например,  $8,1E - 03 = 8,1 \cdot 10^{-3}$ .

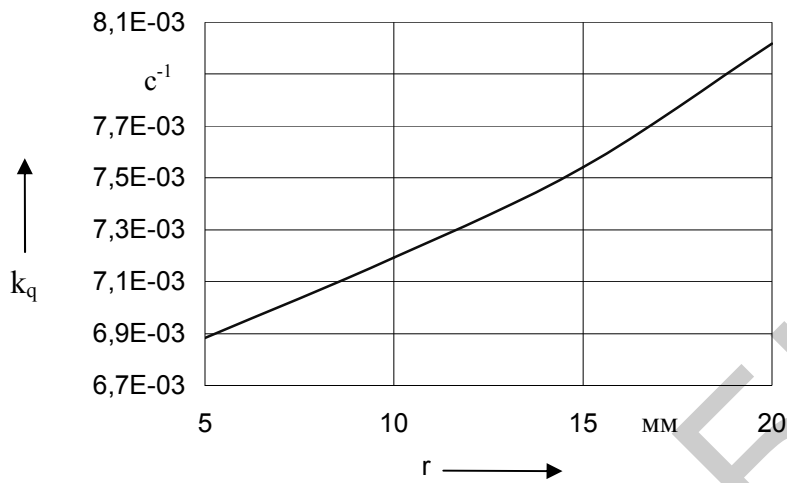


Рис. 1. График зависимости коэффициента изменения расхода суспензии  $k_q$  от радиуса зоны распыления  $r$

Из анализа приведенного графика следует, что с ростом радиуса зоны распыления происходит увеличение коэффициента изменения расхода суспензии.

В качестве характеристики равномерности напыления введем коэффициент отклонения от равномерности:

$$k_{\text{откл}} = \frac{1}{\bar{p}} \sqrt{\frac{1}{R-4r} \int_{2r}^{R-2r} (p(\rho) - \bar{p})^2 d\rho},$$

где  $R$  – радиус ограниченного диска;  $r$  – радиус зоны распыления;  $p(\rho)$  – функция плотности распределения частиц;  $\bar{p} = \frac{1}{R-4r} \int_{2r}^{R-2r} p(\rho) d\rho$  – среднее значение плотности распределения частиц на интервале  $[2r; R-2r]$ , для которого можно пренебречь влиянием краевого эффекта, возникающего в начале движения сопла распылительного устройства и при его остановке.

На рис. 2 приведены графики, изображающие зависимость между коэффициентом отклонения от равномерности напыления и радиусом зоны распыления для различных значений скорости перемещения сопла распылительного устройства. Скорость вращения диска при расчете была фиксирована и составляла 10 рад/с.

Из анализа приведенных графиков следует, что зависимость коэффициента неравномерности напыления от радиуса зоны распыления имеет экстремальный характер. Это объясняется тем, что при малых значениях радиуса зоны распыления возникают колебания плотности распределения частиц (рис. 3, а), а при больших значениях радиуса применение линейного закона управления расходом суспензии, описываемого уравнением (1), приводит к некоторому снижению плотности распределения частиц на внутреннем крае кольцевой зоны диска, свободной от краевого эффекта (рис. 3, б).

Отклонения первого типа связаны с особенностями процесса напыления и сложно поддаются корректировке. Можно показать, что характер кривой распределения частиц

определяется значением безразмерного критерия  $K = \frac{\pi v_s}{\omega_d r}$ . При значениях  $K$ , близких к

единице, на кривой наблюдаются колебания плотности распределения частиц, а в случае  $K \geq 1$  функция плотности распределения обращается в нуль на некоторых интервалах радиуса диска.

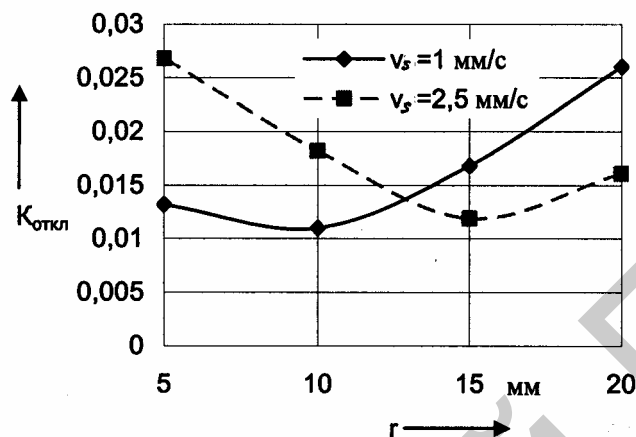


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента неравномерности напыления от радиуса зоны распыления

Отклонения второго типа связаны с неточностью синтеза закона расхода суспензии (методика синтеза основана на некоторых математически нестрогих соображениях) и могут быть скорректированы, но для этого требуется разработка специальных математических методов и программного обеспечения для их реализации.

При любых значениях параметров процесса напыления возникают погрешности обоих типов, однако в зависимости от соотношения этих параметров превалирует тот или иной вид погрешности.

Правильность построения кривых плотности распределения частиц подтверждалась путем проверки условия нормировки:

$$\int_0^R p(\rho) \rho d\rho = \frac{1}{2\pi}. \quad (2)$$

Расчет интеграла, стоящего в левой части выражения (2), по квадратурной формуле трапеций для кривых, приведенных на рис. 3, показал, что отклонение расчетного значения интеграла от теоретического не превышает 0,9 %.

Следует отметить, что увеличение радиуса зоны распыления приводит к снижению эффективности использования площади рабочей поверхности диска, так как возрастает ширина зоны краевого эффекта. Если ограничить максимальную ширину зоны краевого эффекта величиной, составляющей 25 % от радиуса диска, то при радиусе диска, равном 150 мм, радиус зоны распыления не должен превышать 18,75 мм.

При заданной скорости перемещения сопла распылительного устройства оптимальное значение радиуса зоны распыления, для которого обеспечивается минимальное отклонение от равномерности напыления, может быть определено из графика, приведенного на рис. 4. Скорость вращения диска при расчете была принята равной 10 рад/с.

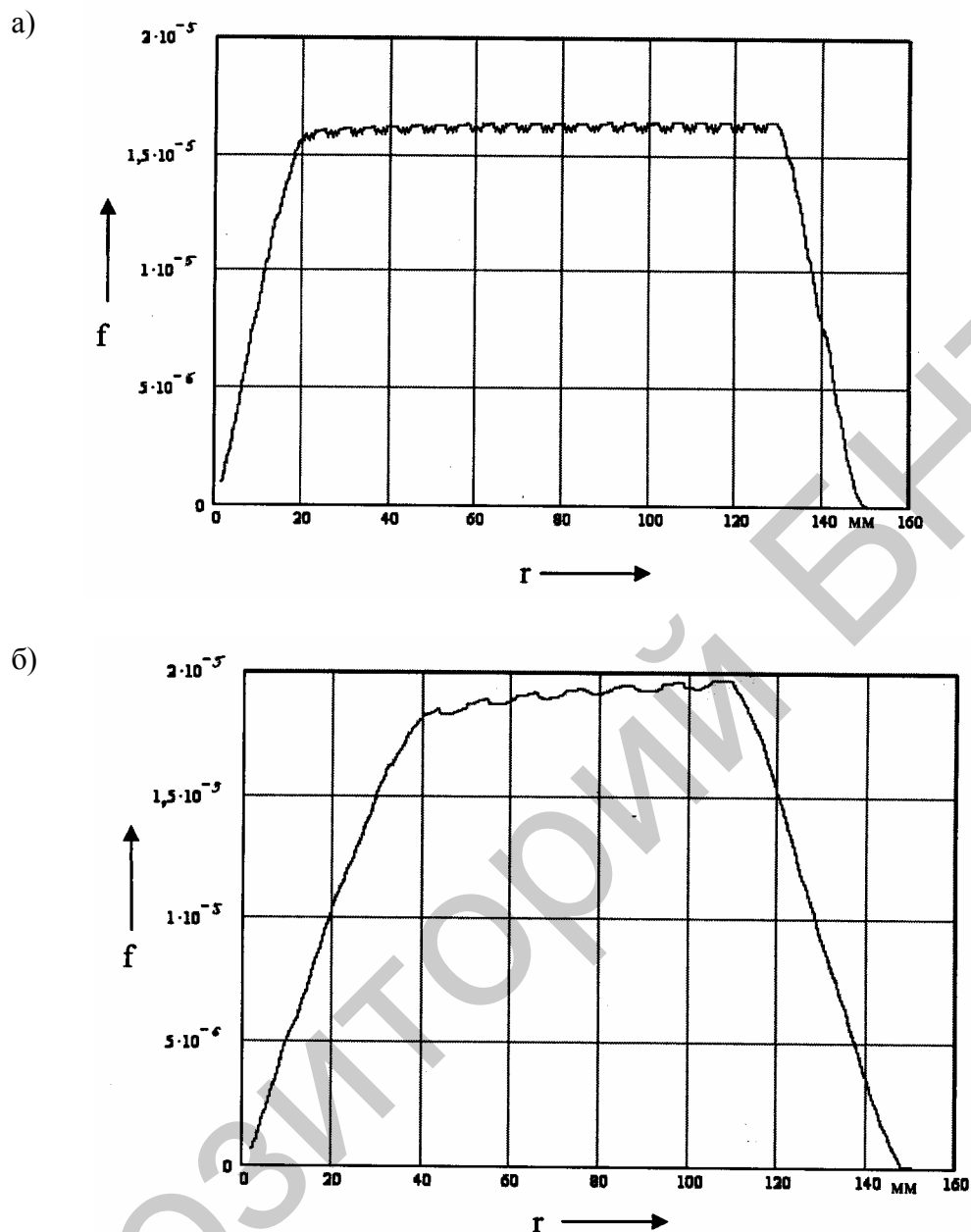


Рис. 3. Виды отклонений от равномерности напыления: а - колебания плотности распределения частиц ( $v_s = 1,75$  мм/с,  $r = 10$  мм,  $\omega_d = 10$  рад/с); б - погрешность управления ( $v_s = 1,75$  мм/с,  $r = 20$  мм,  $\omega_d = 10$  рад/с)

Сложный характер изображенной на рис. 4 зависимости требует дополнительного объяснения. В частности, в ходе предварительных исследований было обнаружено большое морфологическое разнообразие форм колебаний плотности распределения частиц, эволюционирующих сложным образом при изменении параметров процесса напыления. Эволюция формы колебаний может вызывать изменение коэффициента отклонения от равномерности напыления по сложному закону. Поэтому это явление требует дальнейшего исследования.

Таким образом, на основе разработанной математической модели установлено, что для заданных значений скорости вращения диска и скорости перемещения сопла

распылительного устройства существует оптимальное значение радиуса зоны распыления, для которого отклонение от равномерности напыления минимально по величине. Получены расчетные зависимости, связывающие оптимальные значения параметров процесса напыления.

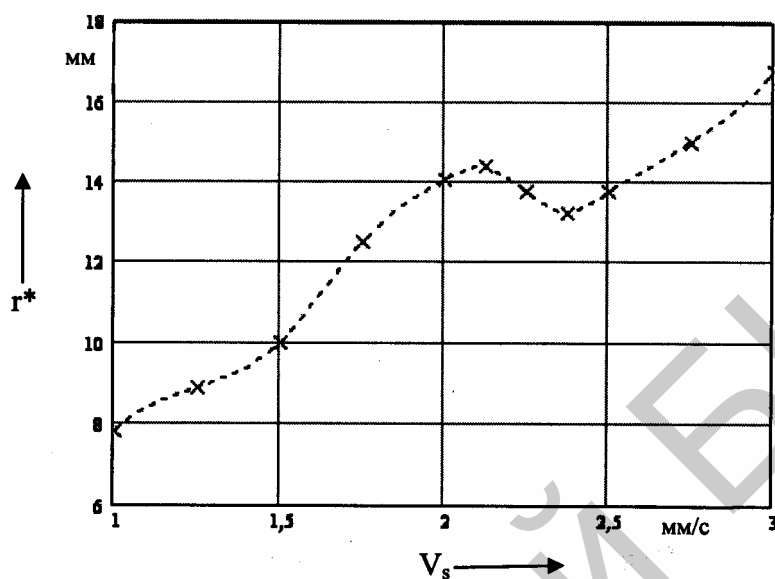


Рис. 4. График зависимости оптимального радиуса зоны распыления  $r^*$  от скорости перемещения сопла распылительного устройства  $V_s$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епифанов, В. И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – М. : Машиностроение, 1982. – 335 с.
2. Киселев, М. Г. Теоретическая оценка закономерностей распределения алмазных частиц по поверхности ограниченного диска при их нанесении методом распыления / М. Г. Киселев, Д. А. Степаненко // Теория и практика машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 34-38.

Белорусский национальный технический университет  
Материал поступил 25.11.2005

**M.G. Kiselev, D.A. Stepanenko**  
**Investigation of optimal modes of abrasive slurry sputtering on the surface of scaife**  
Belarusian National Technical University

On the basis of mathematical model optimal modes of abrasive slurry sputtering on the surface of scaife are investigated from the standpoint of providing uniformity of abrasive particles distribution.