

УДК 621.921.620.22

ФОРМОВАНИЕ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ СЛОЕВ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ СИЛОВОМ АКТИВИРОВАНИИ

канд. техн. наук, доц. А.А. ЛЫСОВ, канд. техн. наук А.С. АРШИКОВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены основные технологические факторы, влияющие на процесс формирования и уплотнения алмазосодержащих порошковых слоев под действием центробежных сил и импульсного силового воздействия. Показано, что импульсная активация в виде периодического изменения скорости вращения формы-изложницы позволяет увеличить подвижность частиц, что обеспечивает равномерную плотность укладки каркаса алмазных частиц под последующую пропитку.

Задача исследования – выявление основных технологических факторов, влияющих на процесс формирования композиционного материала из алмазных порошков методом активированной центробежной пропитки, и разработка технологических приемов, обеспечивающих получение материала в режиме пропитки с высокими физико-механическими свойствами.

Преимуществом степени регулярности и упорядоченности, структуры покрытий из порошков наблюдается в ряду последовательных состояний порошкового слоя: порошок, сформованный слой, пропитанный слой. То есть кинетика уплотнения при пропитке зависит от первоначального распределения частиц порошка в сформованном слое и расстояния между частицами. При случайном расположении частиц с участками скопления зависимость скорости уплотнения от времени значительно отличается от параболической, общее время уплотнения увеличивается [1 – 4].

К условиям, способствующим совершенствованию структуры алмазосодержащего слоя и увеличению его плотности, относятся требования, касающиеся не только процесса пропитки, но и условий формирования исходного слоя.

При воздействии импульсной активации на дисперсную среду с ней происходит ряд превращений, характер которых зависит от интенсивности активирующего воздействия. Физический коэффициент внутреннего трения должен быть заменен на эффективный коэффициент внутреннего трения, стремящийся к нулю. При этом порошок приобретает свойства жидкости, подчиняющейся закону Паскаля [5], что позволяет формировать на внутренней поверхности цилиндрических изделий слои равномерной толщины под действием центробежных сил и импульсного воздействия.

Исследование процесса формирования покрытия под действием центробежных сил и угловых колебаний осуществлялось с использованием метода полнофакторного планирования эксперимента с планом типа 2^3 .

В качестве исследуемых параметров выбраны: частота крутильных колебаний формы-изложницы с порошковой засыпкой ν , Гц, интенсивность колебаний – λ , которая определялась по формуле:

$$\lambda = \frac{A\nu^2}{g}, \quad (1)$$

где A – амплитуда колебаний, м; ν – частота колебаний, с^{-1} ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Коэффициент гравитационного усиления Kq :

$$Kq = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения формы-изложницы, $1/\text{с}$; r – средний радиус порошкового слоя, м.

Параметром оптимизации явился коэффициент погрешности профиля свободной поверхности порошкового слоя $R_{\square n}$:

$$\tilde{R}n = \frac{Rn}{S_{cp}}, \quad (3)$$

где S_{cp} – средняя толщина порошкового слоя, м; Rn – среднее квадратичное отклонение профиля свободной поверхности порошкового слоя, м:

$$Rn = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l x^2(y) dy + \frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^m x_i - \sum_{i=m}^n x_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m y_i - \sum_{i=m}^n y_i \right)^2 \right]}, \quad (4)$$

где x и y – координаты точек профиля свободной поверхности (рис. 1); n – количество точек, в которых производилось измерение ($n = 12$); m – количество точек, для которых x и y принимали положительные значения.

$$F_y = Fq, \tag{5}$$

где F_y – центробежная сила, Н; Fq – сила тяжести, Н.

Центробежная сила может быть определена из соотношения:

$$F_y = \frac{mv^2}{r}, \tag{6}$$

где m – масса частицы, кг; v – окружная скорость частицы, м/с; r – внутренний радиус формы-изложницы.

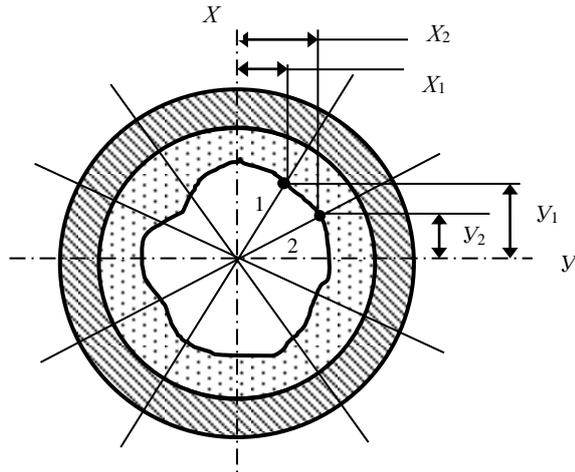


Рис. 1. К определению среднего квадратичного отклонения профиля свободной поверхности порошкового слоя

Сила тяжести определяется:

$$Fq = mq. \tag{7}$$

Тогда уравнение (1) можно записать:

$$\frac{mv^2}{r} = mq. \tag{8}$$

Зная

$$v = \frac{D\pi n}{60}, \tag{9}$$

где D – диаметр внутренней цилиндрической поверхности, м; n – число оборотов, мин⁻¹, получим значение критического числа оборотов в минуту, при котором частица будет удерживаться на внутренней поверхности формы-изложницы [6]:

$$n_k = \frac{42,32}{\sqrt{D}}, \text{ мин}^{-1} \tag{10}$$

Если скорость вращения меньше, чем критическая, частица в определенный момент будет отделяться от поверхности формы. Положение частицы в этот момент может быть определено из равновесного состояния под действием сил действующих на нее (см. рис. 2):

$$\cos \alpha = \frac{v^2}{rq}; \tag{11}$$

$$\alpha = \arccos \frac{v^2}{rq}. \tag{12}$$

Непосредственное наблюдение и фотографирование процесса формирования слоя из алмазных порошков производили с помощью скоростной кинокамеры СКС-1М со скоростью протяжки пленки 1 м/с, видеокамеры «Panasonic» и фотоаппарата «Olympus IS-30 DLX» с объективом «2Olympus lens AF», выдержка 1/2000 с.

Рассмотрим процесс формирования слоя из алмазного порошкового материала под действием центробежных сил.

Из равновесного состояния порошковой частицы можно определить критическую скорость вращения v_k , выше которой частица будет удерживаться на поверхности вращающейся детали (рис. 2)

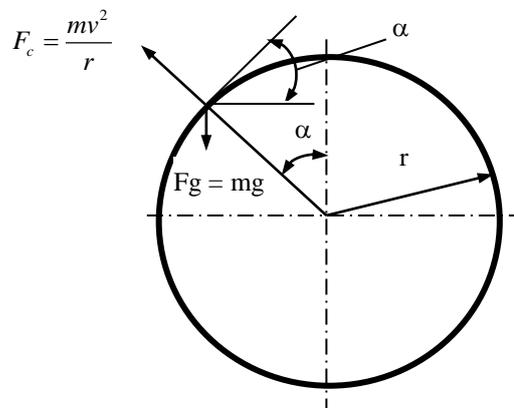


Рис. 2. Силы, воздействующие на порошковую частицу при вращении формы

Для $r = 0,04$ м и $q = 9,81$ м/с² угол, при котором частица будет отделяться от поверхности формы, зависит от скорости вращения детали.

Результаты расчета для различных скоростей сведены в таблицу.

Результаты расчета различных скоростей

Скорость вращения, м/с	$\cos \alpha$	α
$v_k = 0,628$	1	0
$v = 0,95; v_k = 0,595$	0,90	25°50'
$v = 0,85; v_k = 0,533$	0,72	44°00'
$v = 0,75; v_k = 0,471$	0,56	56°00'
$v = 0,55; v_k = 0,314$	0,25	75°30'

С момента отделения от поверхности частица будет двигаться в соответствии с законом свободного падения, и траектория ее движения может быть описана уравнениями:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - v_0 \cos \alpha \cdot t \\ y &= y_0 - v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{qt^2}{2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где x_0 и y_0 определяются в зависимости от угла; v_0 – начальная скорость, м/с; t – время.

Траектории движения частиц, имеющих различные линейные скорости вращения при формировании слоя под действием центробежных сил, из свободно засыпных во внутреннюю полость цилиндрической формы алмазных порошков, изображены на рисунке 3.

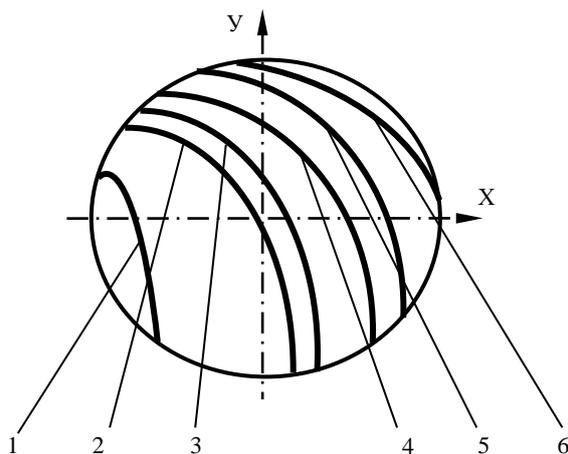


Рис. 3. Траектории движения частиц в процессе разгона:

- 1 – $v = 0,60 \% v_k$; 2 – $v = 0,70 \% v_k$; 3 – $v = 0,75 \% v_k$;
4 – $v = 0,80 \% v_k$; 5 – $v = 0,85 \% v_k$; 6 – $v = 0,95 \% v_k$

На рисунке 4 представлена зависимость величины коэффициента погрешности профиля от ускорения разгона формы. Для сферических порошков крупных фракций (кривые 1 и 2) увеличение коэффициента погрешности профиля наблюдается, начиная с некоторого порогового значения ускорения разгона, т.е. при малых значениях ускорения разгона формируется слой достаточно правильной геометрической формы ($R_{\square n} \approx 0$).

Для алмазных порошков неправильной геометрической формы и мелких фракций (кривая 3) погрешность профиля свободной поверхности имеет место практически при любых значениях ускорения разгона. Причем, величина коэффициента погрешности профиля слабо зависит от гравитационного усиления, т.е. при повышении скорости вращения профиль свободной поверхности слоя сохраняет свою форму.

Объем порошковой засыпки \bar{V} определяем по формуле:

$$\bar{v} = \frac{v_n}{v_{\phi}}, \quad (14)$$

где v_n – объем порошкового материала; v_{ϕ} – объем внутренней полости формы.

С увеличением толщины порошкового слоя увеличивается погрешность профиля свободной поверхности. Статистическая обработка экспериментальных данных с использованием ЭВМ позволила установить математическую модель в виде полинома первой степени:

$$Y = 1,89 - 9,53X_1 - 10,97X_2 + 1,88X_3 + 2,23X_1X_2 + 0,853X_1X_3 + 0,551X_2X_3 + 0,151X_1X_2X_3. \quad (15)$$

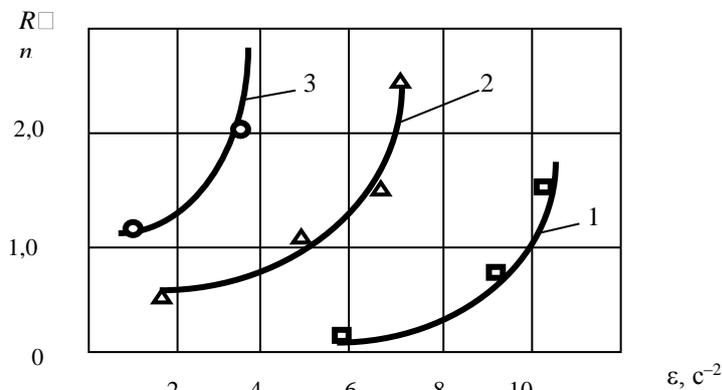


Рис. 4. Зависимость коэффициента погрешности профиля от ускорения разгона:

1 – АС 15 200/160; 2 – АС 15 200/160 (плакированный); 3 – АРК 1800/1250

инерции и упругого сопротивления вибрирующей системы, так и на преодоление сил трения и сцепления формируемого алмазного порошка.

Если масса формируемого порошка невелика, то основную роль будет играть инерция и упругие свойства системы. В связи с этим для обеспечения наиболее выгодного режима формования следует выбирать вынужденную частоту активирования ближе к собственной частоте колебаний системы.

Снижение величины погрешности профиля с увеличением частоты активации свидетельствует о приближении к резонансным значениям между частотой вынужденных колебаний формы и собственных колебаний слоя алмазного порошка. Очевидно, что при превышении величины частоты активации выше оптимальной (30...60 Гц), погрешность профиля начинает возрастать. Это, вероятно, связано с тем, что при повышении частоты колебаний снижается амплитуда активирования, а при малых амплитудах перемещения энергия активации затухает в порошковом зернистом слое.

Эксперименты по определению влияния частоты и ускорения силового активирования на состояние порошкового зернистого слоя, сформованного на внутренней поверхности цилиндрической формы под действием центробежных сил, позволили выделить три характерных состояния (рис. 5).

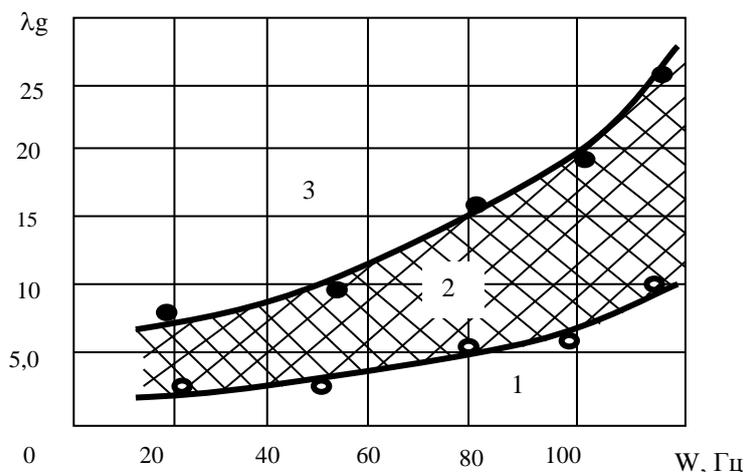


Рис. 5. Состояние порошкового слоя в зависимости от параметров импульсной активации
1 – неравномерный по толщине; 2 – равномерно распределенный; 3 – разрыхление слоя

В области I порошок зернистый слой характеризуется значительной неравномерностью по толщине. В области II формируется равномерный по толщине плотный слой правильной геометрической формы. В области III наблюдалось разрыхление порошкового зернистого слоя.

Как показали эксперименты, порошки, обладающие более высокими упругими свойствами, быстрее формируются в слой. В свою очередь время формирования слоя зависит от относительного объема порошковой засыпки. Время формирования покрытия существенно сокращается при наложении крутильных колебаний непосредственно в процессе разгона формы с порошковой зернистой засыпкой до скорости, превышающей критическую, т.е. скорости, при которой происходит формирование слоя алмазного порошка на внутренней поверхности втулки.

При оптимальных режимах силовой активации слой формируется за время, соответствующее периоду разгона до критической скорости v_k .

На рисунке 6 представлена кинетика формирования порошкового слоя из алмазного порошка (AC15, грануляция 200/160).

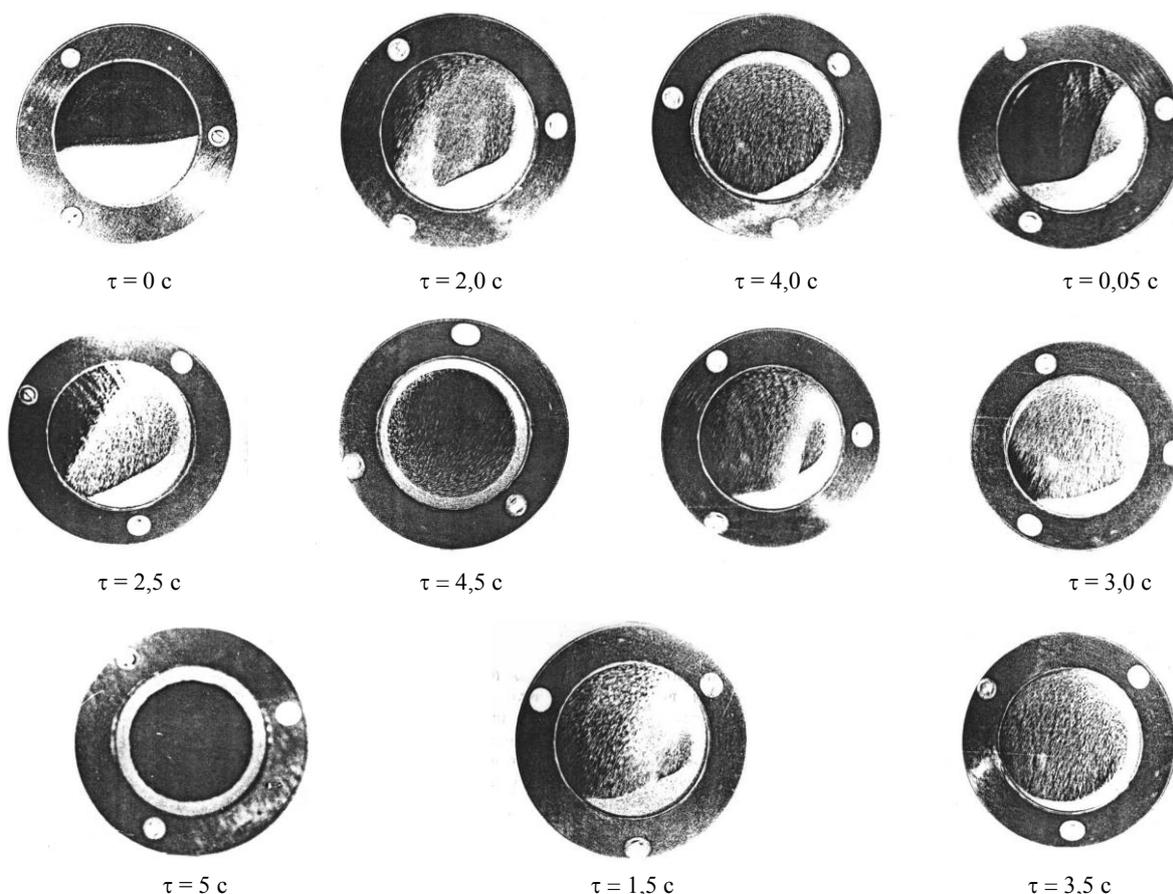


Рис. 6. Кинетика формирования слоя алмазного порошка AC 15
($W = 35$ Гц; $\lambda = 5,6$ q; $\varepsilon = 2,5$ c⁻²)

Порошковые зернистые слои, сформованные под действием центробежных сил, характеризуются наличием градиента пористости по толщине слоя. Максимальная плотность достигается вблизи основы, поскольку там действует максимальное давление центробежных сил, и по мере удаления от поверхности основы плотность убывает. Неравномерное распределение пористости по объему слоя алмазного порошка объясняется также склонностью порошковых зернистых материалов к агрегатированию, образованию «арок» и «куполов».

Применение импульсного силового активирования при уплотнении порошковых зернистых материалов позволяет увеличить подвижность частиц, что обеспечивает более равномерную их укладку. Это приводит к образованию регулярных устойчивых пространственных структур. Если уплотнение под действием статической нагрузки осуществляется путем вдавливания одних частиц между другими и заклиниванием их в новом положении, то импульсное уплотнение осуществляется путем размыкания контактов без разрушения самих контактных участков. Периодическая импульсная активация как бы раздвигает

частицы, помогая им «самостоятельно» находить наиболее выгодные с энергетической точки зрения положения для плотной упаковки в каждом микрообъеме, выравнивая тем самым неоднородность распределения алмазных частиц. При этом разрушаются «арки» и «мостики», уменьшаются воздушные прослойки между частицами, повышается плотность порошкового зернистого слоя.

Существенное влияние на плотность укладки алмазных частиц оказывает амплитуда колебаний. С ее ростом плотность укладки частиц возрастает. Это объясняется, по-видимому, тем, что величина амплитуды колебаний определяет величину перемещения частицы, т.е. определяет степень ее подвижности, а значит, и способность занимать наиболее энергетически выгодное положение. Вместе с тем эксперимент показывает, что колебания с амплитудой больше оптимальной также нежелательно, как и колебания с меньшей амплитудой. Увеличение амплитуды может привести не к уплотнению, а, напротив, к разрыхлению материала, слой как бы «разбухает». Интенсивность уплотнения порошкового зернистого слоя зависит от размера частиц. С уменьшением размера частиц необходимо выбирать более высокую частоту активирования, увеличивать амплитуду и коэффициент гравитационного усиления.

Каждому значению амплитуды соответствует наиболее выгодная частота колебаний, при которой достигается максимальное уплотнение, взаимосвязь между ними в свою очередь зависит от величины гравитационного усиления. Эффект уплотнения слоя алмазного порошка в основном определяется величиной колебаний, так как каждому значению плотности слоя соответствуют практически постоянные значения осредненных ускорений колебаний.

Результаты исследований по влиянию продолжительности импульсного силового активирования на степень уплотнения показывают, что процесс уплотнения протекает неравномерно, с убывающей скоростью – наиболее интенсивно в начальный момент активации, затем скорость уменьшается и при активации в течение 10...20 с по существу процесс прекращается. Такая неравномерность обусловливается тем, что по мере уплотнения материала площадь поверхностей контакта между отдельными алмазными частицами увеличивается и при этом снижается эффективность воздействия импульсной силовой активации [7 – 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Fortes M.A. The Kinetics of Powder Densification due to Capillary Forces // Powder Met. Int. – 1982. – V. 14, № 2. – P. 96 – 100.
2. Аршиков А.С., Лысов А.А., Куксинский И.Н. Центробежное нанесение антифрикционных металлостеклянных покрытий // Технологическое обеспечение работоспособности деталей машин, механизмов, инструмента: Материалы междунар. конф., Киев, 18 – 20 марта 1997 г. – Киев, 1997. – С. 46.
3. Аршиков А.С., Лысов А.А., Куксинский И.Н. Получение композиционных металлостеклянных покрытий центробежным методом // Композиционные материалы в высокоэффективных технологиях механосборочного производства: Материалы науч. конф., Алушта, 27 – 29 мая 1997 г. – Алушта, 1997. – С. 37.
4. Лысов А.А., Аршиков А.С. Получение режущих элементов алмазного инструмента с высокой концентрацией алмазов методом активированной виброцентробежной пропитки // ОСНАСТКА-94: Тез. докл. междунар. науч. конф., Киев, 22 – 24 марта 1994 г. – Киев, 1994. – С. 87.
5. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
6. Sandrica I. Determination of the Optimal Rotational Speed for Powder Mixing // The Int. Journal of Powd. Met. And Powd. Techn. – 1981. – V. 17, № 4. – P. 292 – 295.
7. Лысов А.А., Аршиков А.С. Особенности формирования порошковых слоев в поле действия центробежно-вибрационных сил // Современные технологические процессы упрочнения и восстановления деталей: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф., Новополоцк, 1993. – Новополоцк, 1993. – С. 33.
8. Аршиков А.С. Исследование процесса формования алмазосодержащих порошковых слоев в поле центробежных сил при вибровоздействии // Материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., Ялта, 27 – 28 мая 2003 г. – Ялта-Киев, 2003. – С. 85 – 87.
9. Лысов А.А., Аршиков А.С. Особенности виброцентробежного формирования порошковых слоев // Вибротехнология-96: Материалы ежегод. науч. школы стран СНГ, Одесса, 10 – 12 сентября 1996 г. – Одесса, 1996. – С. 86 – 87.