

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ СПОСОБОМ АЛМАЗНОГО МАТЕРИАЛА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

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

Исследованы особенности формирования и уплотнения зернистых порошковых материалов под действием центробежных сил на внутренней поверхности цилиндрической формы вращающейся вокруг своей оси. Показано, что импульсное воздействие на процесс формирования порошкового слоя зернистого материала в виде периодического изменения скорости вращения повышает текучесть и позволяет формировать на внутренней цилиндрической поверхности формы-изложницы алмазные порошковые слои равномерной толщины, в том числе из порошковых материалов мелких фракций и осколочной формы. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние технологических режимов и параметров силового импульсного воздействия на геометрию профиля свободной поверхности и плотности алмазного зернистого слоя, формируемого под действием центробежных сил.

Введение. Необходимость повышения надежности и долговечности машин и механизмов требует изыскания новых путей совершенствования уже известных, широко применяемых в промышленности методов изготовления алмазных инструментов. Анализ традиционных, а также разработанных в последние годы методов изготовления таких инструментов показывает, что дальнейшее их совершенствование должно идти по пути изыскания оптимальных условий формирования композиционных алмазосодержащих материалов.

Среди многих разработанных в последнее время методов получения композиционных алмазосодержащих материалов методы предварительного формирования алмазных порошков с последующей их пропиткой металлическими расплавами имеют перспективы широкого внедрения, за счет возможности получать максимально плотную упаковку зерен алмаза в матрице связующего материала.

Центробежное формование [1 – 2] при получении композиционных алмазосодержащих материалов недостаточно изучено. Сущность центробежного формования состоит в том, что центробежная сила, действуя непосредственно на каждую частицу порошка, преодолевает силы сцепления между частицами, снижающие эффективность статического, гидростатического и ряда других способов формования, вследствие чего частицы порошка получают большую свободу относительного перемещения, и соответственно, происходит уплотнение слоя. Задачей исследования явилось 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.

Оборудование и методика исследования процесса центробежного формования. При получении композиционных алмазосодержащих материалов центробежным методом на внутренней поверхности цилиндрической формы предварительное формование слоя осуществляется свободной засыпкой алмазного порошка, который при вращении детали распределяется по внутренней поверхности формы [3].

Монтажная схема экспериментального оборудования, предназначенного для исследования процесса «холодного» активированного центробежного формования алмазных порошков с горизонтальной осью вращения и угловыми крутильными колебаниями (рис. 1), состоит из электродвигателя постоянного тока 1 типа 2ПБ9 ОЛУ-ХЛ4 с электроприводом ЕПЕ2, на валу которого устанавливается форма 2, один её торец заглушен, а второй закрывается прозрачной крышкой 3, что позволяет вести с помощью скоростной камеры 4 непосредственное наблюдение и фотографирование процесса формирования порошкового слоя 5 на внутренней поверхности формы [4]. Угловые колебания формы с помещенной во внутреннюю полость засыпкой из алмазного порошка задавались в процессе ее вращения вокруг собственной оси с помощью схемы тиристорного фазоимпульсного управления электроприводом 6, которая обеспечивает угловые колебания с частотой до 200 Гц. Скорость вращения втулки регистрировали с помощью цифрового тахометра ТЦ-1.

На рисунке 2 изображен общий вид экспериментальной установки и вид формы с засыпанным в ее внутреннюю полость алмазным порошком. Блок-схема управления электроприводом состоит из генератора

импульсов, распределителя импульсов, элементов задержки на прямое и обратное включение, блоков прямого и обратного включения, электродвигателя. Блоки прямого и обратного включения могут быть выполнены по одинаковым схемам и представляют собой устройства, обеспечивающие необходимый режим работы двигателя постоянного тока. Функциональная схема одного из таких блоков состоит из сглаживающего реактора, управляемого тиристорного выпрямителя, распределителя импульсов, генератора пилообразного напряжения, усилителя постоянного тока, источника питания, задатчика скорости, стабилизатора. Схема работает следующим образом: с помощью ключа запускается генератор прямоугольных импульсов, вырабатывая импульсы, по фазе близкие к прямоугольным, частотой от 5 до 200 Гц и соотношением длительностей прямого и обратного импульсов от 1 до 0,1. Переключателем и переменными резисторами можно ступенчато и плавно регулировать частоту, а также соотношения длительностей в указанных пределах. С помощью распределителя импульсов положительные и отрицательные перепады напряжения распределяются через цепи задержки на соответствующие блоки включения электродвигателя. Для регистрации параметров вибрации на торце формы устанавливался датчик виброускорений, который через ртутный ток-костемник подключался к преобразователю вибросигнала типа ВИБ-5МА.

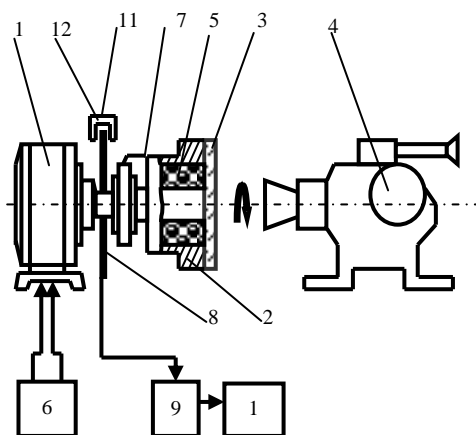


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса формирования алмазного порошка виброцентробежным методом

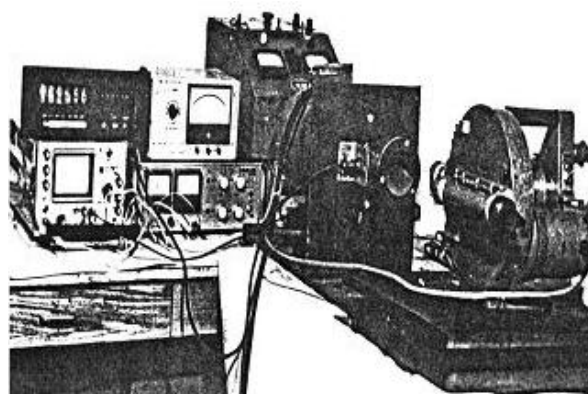


Рис. 2. Общий вид установки для исследования процесса формирования

Исследование процесса формирования покрытия под действием центробежных сил и угловых колебаний осуществлялось с использованием метода полнофакторного планирования эксперимента с планом типа 2^3 [5]. В качестве исследуемых параметров выбраны: частота крутильных колебаний втулки с порошковой засыпкой ν , Гц, интенсивность колебаний λ , ед. q . Параметром оптимизации явился коэффициент погрешности профиля свободной поверхности порошкового слоя $\bar{R}n$:

$$\bar{R}n = \frac{Rn}{S_{cp}}, \quad (1)$$

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

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

Здесь x , y – координаты точек профиля свободной поверхности (рис. 3); n – количество точек, в которых производилось измерение ($n = 12$); m – количество точек, для которых x и y принимали положительные значения.

Непосредственное наблюдение и фотографирование процесса формирования порошкового слоя производили с помощью видеокамеры «Panasonic NV M9000 TN» и фотоаппарата «Olympus IS-30 DLX» с объективом «Olympus lens AF», выдержка 1/2000 с [6].

Результаты и обсуждение. Профиль свободной поверхности порошкового слоя существенно зависит от величины ускорения, с которым происходит разгон втулки с порошковой засыпкой до значения скорости, превышающей критическую. Зависимость величины коэффициента погрешности профиля от ускорения разгона формы иллюстрирует рисунок 4. Для сферических порошков крупных фракций (см. рис. 4, кривые 1 и 2) увеличение коэффициента погрешности профиля наблюдается, начиная с некоторого поро-

гового значения ускорения разгона, т.е. при малых значениях ускорения разгона формируется слой достаточно правильной геометрической формы ($Rn \approx 0$).

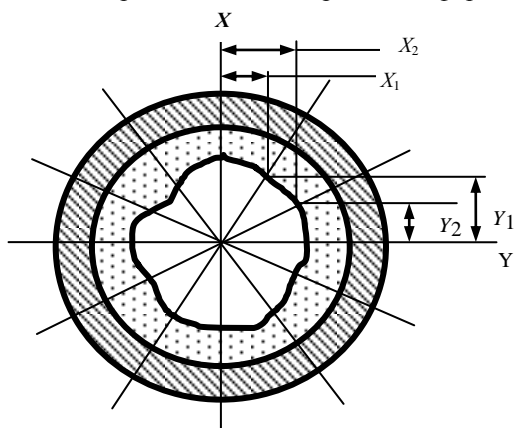


Рис. 3. К определению погрешности профиля свободной поверхности порошкового слоя

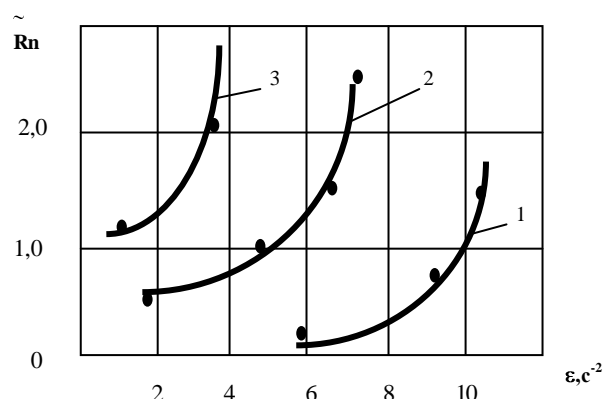


Рис. 4. Зависимость коэффициента погрешности профиля от ускорения разгона формы с порошковой засыпкой: 1 – АС 15 200/160; 2 – АС 15 200/160 (плакированный); 3 – АРК 1800/1250

Для алмазных порошков осколочной геометрической формы и мелких фракций (см. рис. 4, кривая 3) погрешность профиля свободной поверхности имеет место практически при любых значениях ускорения разгона. Причем величина коэффициента погрешности профиля слабо зависит от гравитационного усиления (рис. 5), т.е. при повышении скорости вращения профиль свободной поверхности слоя сохраняет свою форму за счет сил сцепления между частицами.

На рисунке 6 представлена зависимость погрешности профиля от относительного объема порошковой засыпки \bar{V} , который определялся по формуле:

$$\bar{V} = \frac{V_n}{V_\phi}, \tag{3}$$

где V_n – объем порошкового материала; V_ϕ – объем внутренней полости формы.

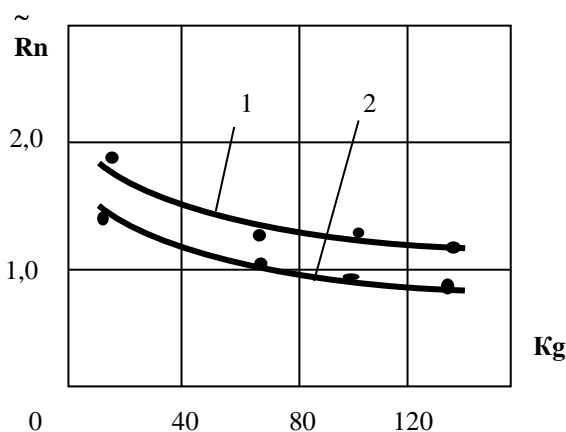


Рис. 5. Зависимость от коэффициента погрешности профиля от гравитационного усиления: 1 – АС 15 200/160; 2 – АС 15 200/160 (плакированный)

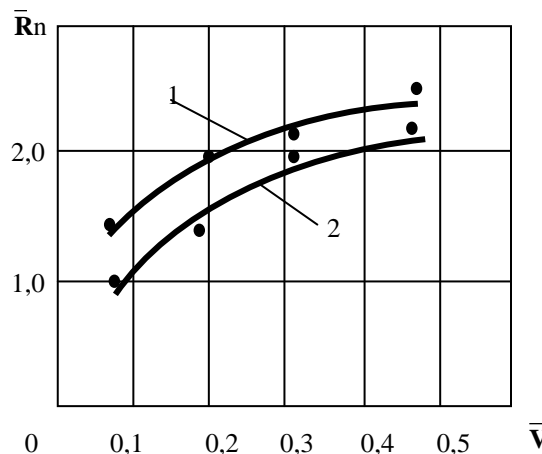


Рис. 6. Зависимость коэффициента погрешности профиля от относительного объема засыпки: 1 – АС 15 200/160; 2 – АС 15 200/160 (плакированный)

Как видно из рисунка 6, с увеличением толщины порошкового слоя увеличивается погрешность профиля свободной поверхности.

Исследование формования слоя из алмазных порошков центробежным способом с силовой активацией осуществлялось с использованием метода полнофакторного планирования эксперимента с планом 2^3 . В качестве исследуемых параметров выбраны интенсивность колебаний λ , ед. g, частота ν , Гц, коэффициент гравитационного усиления Kg . Параметром оптимизации (Y) являлся коэффициент погрешности профиля свободной поверхности порошкового слоя Rn .

Статистическая обработка экспериментальных данных (таблица) с использованием ЭВМ позволила установить математическую модель в виде полинома первой степени [7]:

$$Y = 1,89 - 9,53X_1 - 0,79X_2 + 1,88X_3 + 2,23X_1X_2 + 0,853X_1X_3 + 0,551X_2X_3 + 0,151X_1X_2X_3. \quad (4)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что наибольшее влияние на формируемость порошкового зернистого слоя оказывает интенсивность колебаний X_1 и частота X_2 импульсной силовой активации. Величина коэффициента гравитационного усиления X_3 влияет на параметр оптимизации значительно меньше. Это обстоятельство подтверждает предположение о том, что форма профиля свободной поверхности порошкового слоя зависит не столько от прикладываемого центробежного давления, сколько от параметров активирования. Импульсная энергия активации расходуется как на преодоление инерции и упругого сопротивления вибрирующей системы, так и на преодоление сил трения и сцепления формируемого алмазного порошка. Если его масса невелика, то основную роль будет играть инерция и упругие свойства системы. В связи с этим для обеспечения наиболее выгодного режима формирования следует выбирать вынужденную частоту активирования, близкую к собственной частоте колебаний системы.

Определение коэффициента погрешности профиля свободной поверхности в зависимости от режимов активированного центробежного формования

| Наименование | | Свободный член | Интенсивность колебаний, ед. q | Частота, Гц | Коэффициент гравитационного усиления | Коэффициент погрешности профиля | |
|-----------------------|---|----------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------|------|
| | | | | | | Y | Y |
| Верхний уровень (+) | | – | 12 | 120 | 12 | – | – |
| Основной уровень | | – | 6,5 | 65 | 7 | – | – |
| Нижний уровень (–) | | – | 1 | 10 | 2 | – | – |
| Интервал варьирования | | – | 9 | 120 | 10 | – | – |
| Кодовое обозначение | | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | | |
| Номер опыта | 1 | + | – | – | + | 3,81 4,11 3,83 | 3,92 |
| | 2 | + | + | – | – | 1,44 1,49 1,42 | 1,45 |
| | 3 | + | – | + | – | 2,20 2,02 2,08 | 2,11 |
| | 4 | + | + | + | + | 0,07 0,09 0,02 | 0,06 |
| | 5 | + | – | – | – | 4,72 4,54 4,61 | 4,61 |
| | 6 | + | + | – | + | 0,57 0,53 0,58 | 0,56 |
| | 7 | + | – | + | + | 2,22 2,38 2,42 | 2,34 |
| | 8 | + | + | + | – | 0,09 0,13 0,11 | 0,11 |

На рисунке 7 приведена зависимость погрешности формы свободной поверхности слоя от частоты активации. 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. Из графика (см. рис. 7) видно, что при превышении величины частоты активации выше оптимальной (30...60 Гц) погрешность профиля начинает возрастать. Это, очевидно, 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. 8): область I – порошковый зернистый слой характеризуется значительной неравномерностью по толщине; область II – формируется равномерный по толщине плотный слой правильной геометрической формы; область III – наблюдается разрыхление порошкового зернистого слоя.

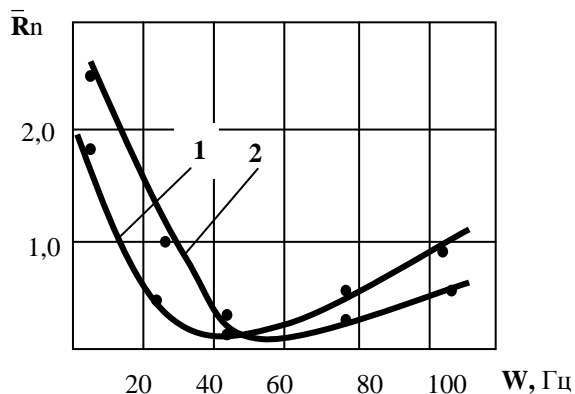


Рис. 7. Зависимость коэффициента погрешности профиля от частоты колебаний:
1 – АС 15 200/160; 2 – АС 15 200/160 (плакированный)

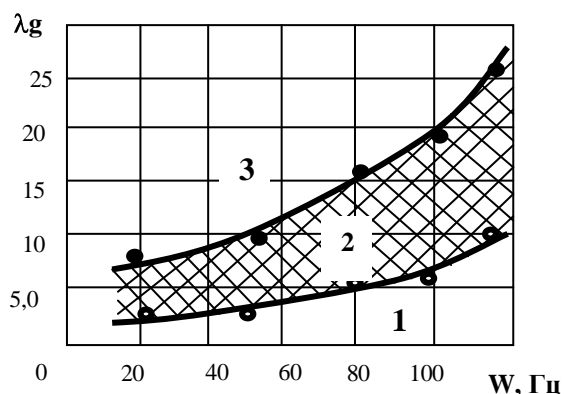


Рис. 8. Состояние порошкового слоя в зависимости от параметров импульсного воздействия:
1 – неравномерный по толщине;
2 – равномерно распределенный; 3 – разуплотнение слоя

Как показали эксперименты, порошки, обладающие более высокими упругими свойствами, быстрее формируются в слой (рис. 9). В свою очередь время формирования слоя зависит от относительного объема порошковой засыпки.

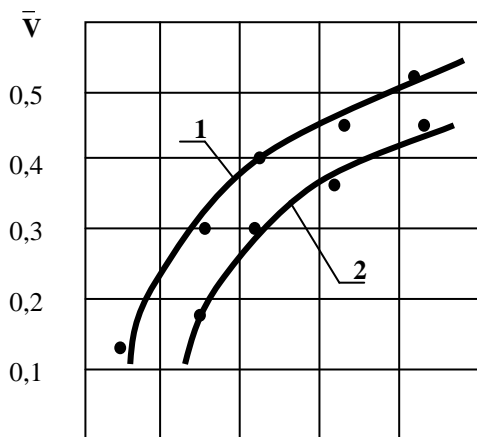


Рис. 9. Зависимость времени формирования равномерного слоя от объема засыпки алмазного порошка ($W = 30$ Гц, $\lambda = 5$):
1 – АС15 200/160; 2 – АС15 200/160 (плакированный)

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 импульсной активации, слой, практически, формируется за время, соответствующее периоду разгона до критической скорости V_k . На рисунке 10 представлена кинетика процесса формирования порошкового слоя из АС15 грануляцией 200/160 при наложении крутильных колебаний в процессе разгона формы. Порошковые зернистые слои, сформированные 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.

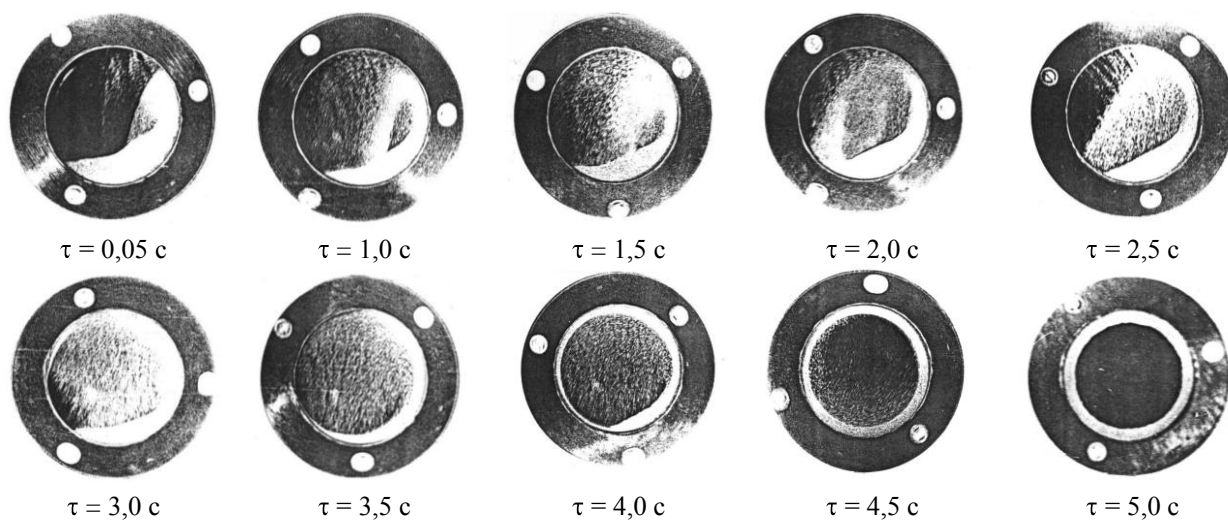


Рис. 10. Кинетика процесса формирования слоя алмазного порошка АС 15 ($W = 35$ Гц; $\lambda = 5,6$ q; $\epsilon = 2,5$ c⁻²)

Неравномерное распределение пористости по объему слоя алмазного порошка объясняется также склонностью порошковых зернистых материалов к агрегатированию, образованию «арок» и «куполов» [8]. На рисунке 11 представлен вид характерных «куполов» и «арок» в покрытии из АС 15.

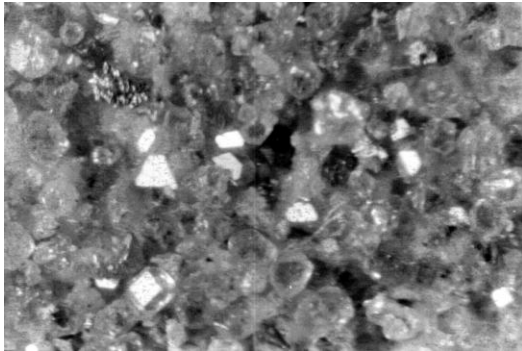


Рис. 11. Вид характерных куполов и арок в сформованном брикете из алмазного порошка АС 15 200/160

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 (рис. 12), по мере её увеличения плотность укладки частиц возрастает. Это объясняется, по-видимому,

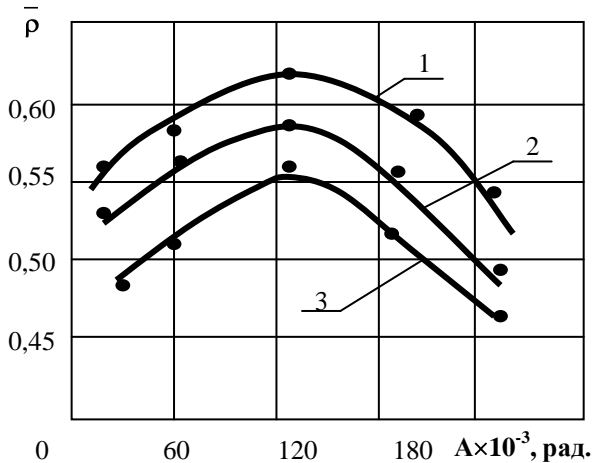


Рис. 12. Зависимость плотности порошкового слоя из АС 15 от амплитуды вибровоздействия ($W = 35$ Гц; $K_q = 12$):
1 – $(-63 + 50)$; 2 – $(-250 + 200)$; 3 – $(-530 + 500)$

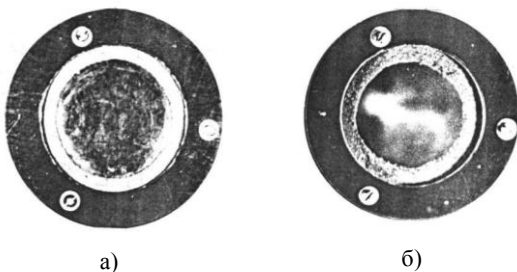


Рис. 13. Характерный вид разуплотнения слоя, формируемого в поле центробежных сил при завышении значения амплитуды импульсного воздействия $\omega = 3,5$ Гц:
а – $A = 9 \cdot 10^{-2}$ рад; (АС 15 100/80);
б – $A = 20 \cdot 10^{-2}$ рад; (АС 15 200/160)

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» найти 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 (рис. 12), по мере её увеличения 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, большей, чем оптимальная, так же нежелательно, как и колебания с меньшей амплитудой. Увеличение амплитуды может привести не к уплотнению, а, напротив, к разрыхлению материала, слой как бы «разбухает» (рис. 13). 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 наивыгоднейшая частота колебаний, при которой достигается максимальное уплотнение (рис. 14), взаимосвязь между ними в свою очередь зависит от величины гравитационного усиления.

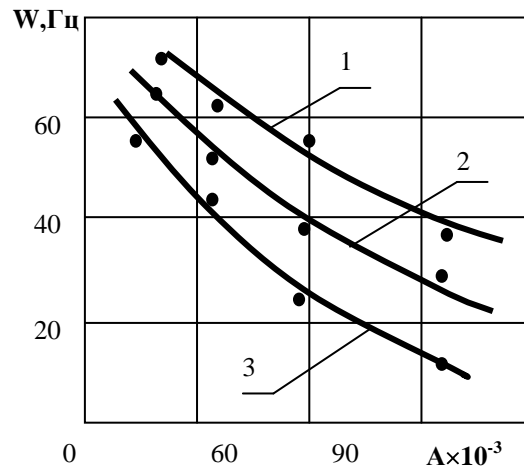


Рис. 14. Зависимость параметров импульсной активации от гравитационного усиления АС 15 200/160:
1 – $K = 46$; 2 – $K = 28$; 3 – $K = 12$

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 импульсном воздействии в течение 10...20 с процесс формирования слоя, по существу, завершается. Неравномерность слоя обуславливается тем, что по мере уплотнения материала площадь поверхностей контакта между отдельными алмазными частицами увеличивается, при этом снижается эффективность воздействия импульсной силовой активации.

Заключение. Исследованы особенности формирования и уплотнения зернистых порошковых алмазных материалов на внутренней поверхности цилиндрической формы в поле действия центробежных сил. Показано, что силовое импульсное воздействие на слой зернистого порошкового материала в виде периодического изменения скорости вращения повышает их текучесть и позволяет формировать на внутренней поверхности цилиндрической формы порошковые слои равномерной толщины, в том числе из порошковых материалов мелких фракций и осколочной формы (менее 100 мкм). Разработанная методика и экспериментальное оборудование для исследования кинетики формирования алмазосодержащих порошковых слоев в поле действия центробежных сил позволили теоретически и экспериментально установить рациональные режимы формирования порошковых слоев равномерной толщины и плотности. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние технологических режимов и параметров силового импульсного воздействия на погрешность профиля свободной поверхности алмазного порошкового слоя, формируемого под действием центробежных сил. Анализ уравнений показывает, что наибольшее влияние на формируемость порошкового зернистого слоя оказывают частота угловых колебаний и интенсивность изменения скорости вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов, В.А. Использование центробежных сил в порошковой металлургии / В.А. Миронов. – Рига, 1983. – 46 с.
2. Fortes, M.A. The Kinetics of Powder Densification due to Capillary Forces / M.A. Fortes // Powder Met. Int. – 1982. – V. 14, № 2. – P. 96 – 100.
3. Либенсон, Г.А. Перспективы применения центробежно-вибрационного формования порошков: сб. науч. тр. Моск. ин-та стали и сплавов / Г.А. Либенсон, А.И. Терехов. – М., 1977. – № 99. – 102 с.
4. Лысов, А.А. Особенности формирования порошковых слоев в поле действия центробежно-вибрационных сил / А.А. Лысов, А.С. Аршиков // Современные технологические процессы упрочнения и восстановления деталей: тез. докл. респ. науч.-техн. конф. – Новополюцк, 1993. – С. 33.
5. Тихонов, Г.Ф. Выбор оптимальных условий процессов спекания с применением методов математического планирования эксперимента / Г.Ф. Тихонов, В.А. Васильев, В.К. Калистов // Науч. тр. Горьк. политехн. ин-та. – Горький, 1973. – Т. 29. – № 22. – С. 33 – 36.
6. Аршиков, А.С. Исследование процесса формования алмазосодержащих порошковых слоев в поле центробежных сил при вибровоздействии / А.С. Аршиков // Материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., Ялта – Киев, 27 – 28 мая 2003 г. – Киев, 2003. – С. 85 – 87.
7. Верещагин, В.А. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия / В.А. Верещагин, В.В. Журавлев. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 208 с.
8. Данилова, Э.А. Методы борьбы со сводообразованием / Э.А. Данилова. – М.: Изд-во НИИ Автопром, 1966. – 138 с. – Серия. Сельхозмашиностроение.

Поступила 12.01.2010

INFLUENCE OF PARAMETERS OF POWER PULSE INFLUENCE ON FORMATION BY CENTRIFUGAL WAY OF THE DIAMOND MATERIAL ON THE INTERNAL SURFACE OF THE CYLINDRICAL FORM

A. LYSOV, A. ARSHIKOV

We investigated the features of forming and compressing of granulose powdered materials under the influence of centrifugal forces on the inner surface of a cylindrical form which revolves about its axis. We demonstrated that impulse function on the process of forming the powdery layer of granulose material by way of periodical drift of the rotation speed improves the flowage and allows the formation of diamond powdered layers of equal thickness on the inner cylindrical surface, including small fraction fragmentation form materials. We worked out regression equations which describe the influence of technical regimes and parameters of force impulse impact on the geometry of free surface's mold and toughness of diamond granulose layer being formed under the influence of centrifugal forces.