

**Ключевые слова:**

ЧПУ, оснастка, фрезерный станок, распыление расплава, электродуговая сфероидизация, металлический порошок, кинематическая схема, диспергирование

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО МАТЕРИАЛА НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

**Александр ЗВЕРОВЩИКОВ, Сергей МИТЯСОВ, Илья ДАДУШКИН,  
Сергей НЕСТЕРОВ**

Предложена кинематическая схема технологической оснастки для фрезерных станков с ЧПУ и способа диспергирования и сфероидизации металлических материалов на основе электродугового плавления. Рассмотрены возможности оценки размеров сфероидизированных частиц за счет анализа динамики способа. Рассмотрены геометрические характеристики факела распыления частиц при диспергировании.

Расширение технологических возможностей обработки за счет использования различных видов технологического оснащения позволяет производителям повысить эффективность его использования на производстве. Тенденции развития средств технологического оснащения в последнее время направлены на реализацию различных комбинированных методов обработки с использованием различных физических эффектов для достижения новых технологических реализаций.

Примером таких решений являются комбинированные станочные комплексы для одновременной реализации аддитивных технологий и обработки резанием, различных технологий напыления и обработки резанием [1, 2]. Дополнительное развитие получило направление модифицирующих видов оснастки, позволяющих расширить технологические возможности оборудования: например, пневматическая шпиндельная оснастка для увеличения частоты вращения шпинделя, оснастка для реали-

зации на фрезерных станках объемной центробежной обработки [3, 4].

Обеспечение многофункциональности станочного оборудования в направлении получения исходных материалов для аддитивных технологий позволяет значительно снизить стоимость технологического комплекса за счет использования широких возможностей фрезерных станков с ЧПУ.

Актуальность твердосплавных порошковых материалов обусловлена необходимостью получения сырьевых материалов для изготовления режущего инструмента. Отсутствие порошковых материалов, состоящих из сферических частиц определенного размерного диапазона, приводит при изготовлении заготовок к неравномерной агломерации, возникновению анизотропной структуры материала и, как следствие, наличию внутренних напряжений в деталях. Такие явления приводят к снижению качества изделий, полученных порошковой металлургией, PIM-технологиями, иными

аддитивными технологиями. Например, при изготовлении твердосплавного инструмента появление трещин в поверхностном слое и режущих кромках при эксплуатации или заточке в большей части обусловлено именно вышеописанными проблемами.

Наиболее перспективным способом диспергирования твердых сплавов и сфероидизации частиц является электродуговое распыление [6]. Известна технология распыления твердого сплава [5], при котором вращающийся распыляемый электрод взаимодействует с соосно расположенным электродом, однако проведенный анализ влияния кинематических характеристик на размеры зерна не позволяет оценить возможности способа.

В задачу данного исследования входила оценка возможностей создания технологической оснастки для станка с ЧПУ, пригодной для изготовления мелких партий сфероидизированных твердосплавных порошков. Согласно характеристикам ряда моделей фрезерных станков SMЕС, на шпинделе может обеспечиваться частота вращения 12000–20000 мин<sup>-1</sup>. При этом значение подачи обусловлено возможностями системы ЧПУ и может составлять 0,5–1 мкм/об. Проведем анализ кинематики процесса и расчет диаметров частиц порошка, полученных по технологии [6].

Для определения толщины расплавленного слоя материала  $h$ , м воспользуемся формулой [5]:

$$h = \frac{R \cdot v_{\Pi}}{2 \cdot v_{CP}}$$

где  $R$  – радиус заготовки,  $R = 0,005$  м;  $v_{\Pi}$  – скорость подачи заготовки, м/с;  $v_{CP}$  – средняя скорость течения материала, м/с.

Кинематика оборудования позволяет обеспечить среднюю скорость течения материала  $v_{CP}$  [6].

Скорость подачи заготовки обеспечивает параметр  $v_{\Pi}$  и зависит от частоты вращения. Величины скорости подачи заготовки при значениях подачи на оборот  $s = 0,5$  мкм,  $s = 1$  мкм и  $s = 1,5$  мкм приведены на рис. 1.

Скорость подачи растет прямо пропорционально числу оборотов, так же как и средняя скорость истечения материала. Таким образом, кинематика станка с ЧПУ позволяет обеспечить практически

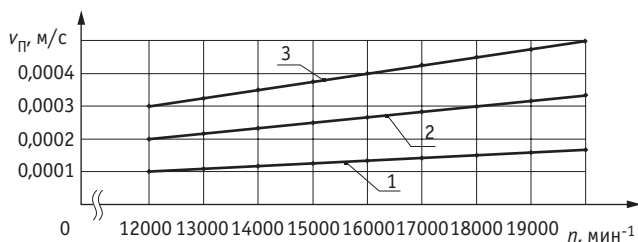


Рис. 1. Зависимость скорости подачи от частоты вращения заготовки: 1 –  $s = 0,5$  мкм; 2 –  $s = 1$  мкм; 3 –  $s = 1,5$  мкм

во всем диапазоне оборотов шпинделя достаточно постоянную толщину расплавленного слоя:

$$h = \frac{0,005 \cdot 0,0002}{2 \cdot 3,14} = 0,000000159 \text{ м} = 0,159 \text{ мкм.}$$

Приблизительный размер диаметра капли  $d$  вычисляется исходя из баланса сил натяжения – центробежного и поверхностного [5]:

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho \cdot \omega^2 \cdot R = \pi \cdot \sigma \cdot d_M,$$

где:

$\rho$  – плотность распыляемого материала, кг/м<sup>3</sup>, для карбида вольфрама  $\rho = 15770$  кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  – угловая скорость заготовки, с<sup>-1</sup>, принимаем [6]  $\omega = 1256,64$  с<sup>-1</sup>;

$R$  – радиус заготовки, м, принимаем ;  $R = 0,005$  м;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, для расплава карбида вольфрама принято  $\sigma = 1,4$  Н/м;

$d_M$  – диаметр сечения в момент отрыва капли (медианный диаметр), м.

При определении медианного диаметра можно принять гипотезу, что этот диаметр коррелирует с толщиной слоя расплавленного материала. В таком случае, принимаем  $d_M = 0,00000016$  м.

Этот баланс сил подразумевает хрупкое разрушение при отрыве капли, возможное только за меньшее время, чем при релаксации атомов сплава, кроме того, не учитывается влияние вязкости сплава. Погрешность при расчете диаметра сформированной сферической капли может достигать до 40% в сравнении с диаметром гранулы, полученной экспериментальным путем.

Приблизительный размер диаметра капли можно определить формулой:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \sigma \cdot d_M}{\rho \cdot \omega^2 \cdot R}}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,4 \cdot 0,00000016}{15770 \cdot 1256,64^2 \cdot 0,005}} = 0,0000221 \text{ м.}$$

Таким образом, диаметр частиц согласно формуле  $d = 22,1$  мкм.

Поэтому для перехода к меньшим размерам частиц необходимо использовать преимущества предлагаемой схемы взаимодействия распыляемого и инертного электродов.

Суммарные линейные скорости в различных точках кромки расходимого электрода меняются из-за взаимодействия с инертным электродом. Подставим в формулу значение для максимальной и минимальной составляющей центростремительного ускорения ( $a = \omega^2 \cdot R$ ) из работы [6]. Это позволит определить максимальный и минимальный диаметр частиц.

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,4 \cdot 0,00000016}{15770 \cdot 15792}} = 0,0000175 \text{ м;}$$

$$d_{max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,4 \cdot 0,00000016}{15770 \cdot 987}} = 0,0000442 \text{ м.}$$

Используя данные, полученные в результате расчета центростремительного ускорения, возникающего на кромке заготовки, можно построить график зависимости диаметра частиц от суммарного ускорения, возникающего в зоне контакта (рисунок 2).

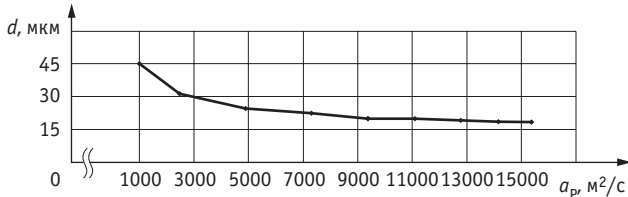


Рис. 2. Зависимость диаметра частиц от суммарного ускорения

Таким образом, при имеющихся кинематических характеристиках и предложенной схеме электродугового распыления минимальный диаметр сфероидизированных частиц изменяется в диапазоне 15–17 мкм.

Проектирование ловушки-сборника мелкодисперсных частиц является сложной самостоятельной технической задачей. Для первоначальной оценки требуемых размеров ловушки необходимо знать геометрические характеристики факела распыления электрода. Примем гипотезу, что траектория полета частиц после отрыва от зоны диспергирования прямолинейна и соответствует суммарному вектору скорости в момент потери контакта частицы с поверхностью электрода. Для этого по зависимостям, полученным в работе [6] построено векторное распределение скоростей  $v_p$  и ускорений  $a_p$  для зоны отрыва частиц (рис. 3, 4).

В результате анализа векторной конфигурации распределения скоростей можно сделать вывод, что, поскольку угловая скорость распыляемого электрода находится вблизи максимума, угол раствора разброса факела частиц в большей степени зависит от угловой скорости инертного электрода.

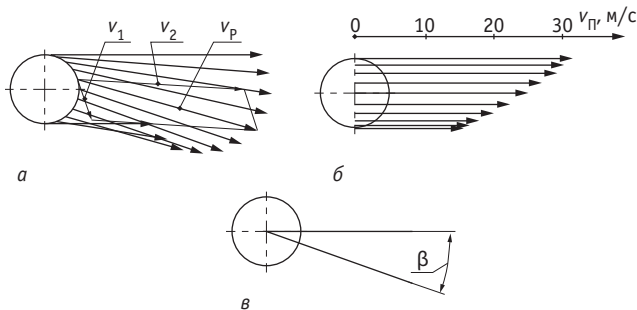


Рис. 3. Распределение скоростей зоны контакта: а – с учетом направления, б – по модулю, в – угол раствора разброса факела частиц

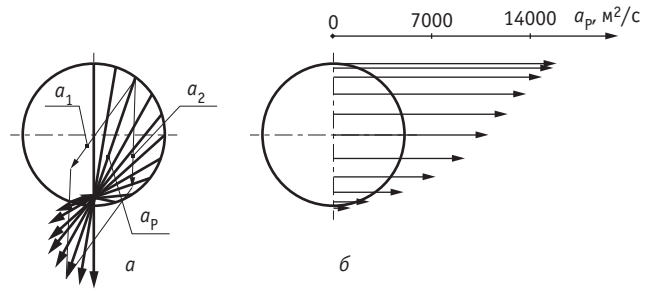


Рис. 4. Распределение ускорений точек зоны контакта: а – с учетом направления, б – по модулю

Наихудшим с точки зрения сбора частиц является вариант значительного превышения линейной скорости отрыва распыляемого электрода над скоростью инертного электрода. Соотношение скоростей, приемлемое для образования частиц требуемого диаметра, формирует факел с углом  $\beta$  в плане.

Таким образом, размеры ловушки частиц, могут быть рассчитаны из двух условий. Первое условие – приближенность к зоне диспергирования, что определяется конструктивными особенностями устройства. Второе – параметры факела распределения частиц, определяемые по вышеприведенной методике.

Одним из путей получения частиц меньшего диаметра является увеличение скорости в зоне контакта. Так как повышение скорости за счет увеличения количества оборотов расплавляемой заготовки ограничено возможностями станка, наиболее реальной в реализации представляется возможность увеличения количества оборотов неплавящегося электрода. Рассчитаем размеры частиц  $d'$  по рассмотренной методике, принимая частоту вращения неплавящегося электрода  $n_2 = 10000 \text{ мин}^{-1}$ :

$$d' = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \sigma \cdot \bar{d}_M}{\rho \cdot a_p'}}$$

где результирующее центростремительное ускорение  $a_p', \text{ м}^2/\text{с}^2$  будет составлять в точках максимума и минимума соответственно  $95626 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и  $68868 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Тогда:

$$d'_{min} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,4 \cdot 0,00000016}{15770 \cdot 95626}} = 0,0000096 \text{ м;}$$

$$d'_{max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,4 \cdot 0,00000016}{15770 \cdot 68868}} = 0,0000107 \text{ м.}$$

Размер частиц, при увеличении частоты вращения  $n_2$  неплавящегося электрода до  $10000 \text{ мин}^{-1}$  будет изменяться в диапазоне 9,6–10,7 мкм. Отличительной особенностью такого пути достижения уменьшения диаметра капли является также значительное уменьшение разброса диаметра частиц.

Результаты исследований позволяют получить исходные данные для проектирования оснастки,

позволяющей расширить технологические возможности фрезерного оборудования с ЧПУ для диспергирования и сфероидизации твердосплавных материалов на основе карбида вольфрама.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Малышев В.И., Левашкин Д.Г., Селиванов А.С.** Автоматизация гибридных и комбинированных технологий на основе модернизации станочного оборудования и выбора кинематических связей // Вектор науки ТГУ. 2010. № 3. С. 70–74.
2. **Макеев Д.Н., Захаров О.В., Виноградов А.Н.** Восстановление ресурса деталей машин путем наплавки поверхностных слоев // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Новосибирский государственный аграрный университет, сборник трудов всероссийск. Научн.техн. конф. 2014. С. 36–40.
3. Пат. № на изобретение гус 2218262 18.03.20, Мпк b24b 31/108(2007.07). Способ камерной абразивной обработки и устройство для его осуществления/ Зверовщиков А.В., Мартынов А.Н., Зверовщиков В.З., Долотин А.И. № 2006101416/02, заявл. 18.01.2006, опубл. 20.07.2007 бюл. № 20. 12 с.
4. **Зверовщиков А.Е., Артемов И.И., Зверовщиков В.З., Шешкин А.В.** Особенности конструирования оборудования для технологии объемной центробежно-планетарной обработки мелкоразмерных деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2015. № 6 (48). С. 18–23.
5. **Литвиненко А.И., Жудра А.П., Белый А.И.** Анализ и кинетика процесса термоцентрического распыления слитков из плавящихся карбидов вольфрама // Современная электрометаллургия. 2013. № 2. С. 29–35.
6. **Зверовщиков А.Е., Дадушкин И.Е., Беспятов В.Н.** Оценка кинематики технологического способа электродуговой сфероидизации металлических порошков // Техника и технология современных производств. — Пенза: Приволжский Дом знаний, 2019. 124 с.

**ЗВЕРОВЩИКОВ Александр Евгеньевич** –

доктор технических наук, Пензенский государственный университет

**МИТЯСОВ Сергей Геннадьевич** –

заместитель генерального директора по производству ООО «СтанкоМашСтрой»

**ДАДУШКИН Илья Евгеньевич** –

магистрант, Пензенский государственный университет

**НЕСТЕРОВ Сергей Александрович** –

кандидат технических наук, Пензенский государственный университет

### НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



## ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

Кузнецов А.П.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 488 с.  
ISBN 978-5-94836-477-3

Цена 1090 руб.

В книге рассматриваются методы оценки теплового режима металлорежущих станков и их наиболее теплонапряженных деталей и узлов. Приведен механизм формирования и теплофизического анализа теплового режима деталей и узлов металлорежущих станков, дана их теплофизическая классификация и описываются типовые тепловые модели. Приводятся аналитические зависимости для оценки стационарного и нестационарного тепловых режимов деталей и узлов станков.

Приведена классификация методов воздействия на тепловой режим станков, описаны способы снижения, коррекции, компенсации и управления тепловым режимом металлорежущих станков.

Предлагаемая монография может быть полезна студентам, аспирантам, а также инженерам и специалистам, занимающимся вопросами повышения точности при проектировании, производстве и эксплуатации металлорежущих станков.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎125319, Москва, а/я91; ☎+7 495 234-0110; ☎+7 495 956-3346; ✉knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru