

УДК 621.762.864

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-67-71

## Воздействие ультразвуковых волн на процесс инфильтрации дисперсных частиц в поры порошкового материала

© 2016 г. **О.И. Разинская, С.Я. Алибеков, В.В. Фоминых**

Поволжский государственный технологический университет (ПГТУ), г. Йошкар-Ола

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола

Статья поступила в редакцию 23.12.14 г., доработана 20.09.15 г., подписана в печать 05.10.15 г.

Статья посвящена технологии изготовления изделий из пористых порошковых материалов путем заполнения металлической матрицы различными наполнителями при воздействии ультразвуковых волн. Рассмотрены механизмы диффузии твердых частиц наполнителя в поры порошкового материала при различных случаях движения частиц. Представлено математическое описание механизмов движения частиц в случае воздействия силы тяжести и при совместном действии силы тяжести и ультразвука, а также дано объяснение процесса заполнения пор твердыми частицами инфильтрующей суспензии.

**Ключевые слова:** пористый порошковый материал, инфильтрация присадок, ультразвуковая пропитка, диффузия, механизмы диффузии.

**Разинская О.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроения и материаловедения ПГТУ (424000, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Тел.: (8362) 68-68-01. E-mail: o.razinskaya@mail.ru.

**Алибеков С.Я.** – докт. техн. наук, проф., заведующий этой кафедрой. Тел.: (8362) 68-68-01. E-mail: mim@volgatech.net.

**Фоминых В.В.** – ст. препод. кафедры математического анализа и теории функций Марийского гос. ун-та (424000, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Машиностроителей, 15).

**Для цитирования:** Разинская О.И., Алибеков С.Я., Фоминых В.В. Воздействие ультразвуковых волн на процесс инфильтрации дисперсных частиц в поры порошкового материала // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 1. С. 67–71. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-67-71.

*Razinskaya O.I., Alibekov S.Ya., Fominykh V.V.*

### **Effect of ultrasonic waves on infiltration of dispersed particles into the pores of the powdered material**

The article is devoted to the fabrication technology of wares from porous powder materials by filling the metal matrix with various fillers under the effect of ultrasonic waves. Diffusion mechanisms of solid particles of the filler into the pores of the powder material in various cases of particle motion are considered. The mechanical description of particle-motion mechanism in the case of influence of gravity impact and under the joint influence of gravity and ultrasound is presented and filling the pores by solid particles of the infiltrating suspension is interpreted.

**Keywords:** porous powder material, infiltration of additives, ultrasonic impregnation, diffusion, diffusion mechanisms.

**Razinskaya O.I.** – PhD Sci. (Eng.), associate prof., Department of engineer and materials, Volga State University of Technology (424000, Russia, Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin sq., 3). Tel.: (8362) 68-68-01. E-mail: o.razinskaya@mail.ru.

**Alibekov S.Ya.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of Department of engineer and materials, Volga State University of Technology. Tel.: (8362) 68-68-01. E-mail: mim@volgatech.net.

**Fominykh V.V.** – senior teacher, Department of the mathematical analysis and theory of functions, Mari State University (424000, Russia, Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Mashinostroiteley str., 15).

**Citation:** Razinskaya O.I., Alibekov S.Ya., Fominykh V.V. Vozdeistvie ul'trazvukovykh voln na protsess infil'tratsii dispersnykh chastits v pory poroshkovogo materiala. Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya. 2016. No. 1. С. 67–71. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-67-71.

## Введение

В настоящее время широко развивается направление получения «спроектированных материалов». Такой термин впервые появился в публичном докладе Сколковского института науки и технологий в октябре 2014 г. Сюда можно отнести искусственные наноструктурированные материалы, полученные методом порошковой металлургии,

отвечающие набору определенных функциональных требований или с заданными физико-механическими свойствами.

Спроектированные материалы способствуют решению двух важных задач: стимулирование инноваций в производство собственных материалов для различных машин и оборудования и создание но-

вых методов производства деталей на основе этих материалов с уникальными свойствами, что также привлекательно для инновационных разработок [1].

Изготовление изделий из металлических порошков — распространенная в настоящее время технология, которая используется в производстве деталей для машиностроения, химической, энергетической отраслей промышленности, медицины и т.д. Помимо металлической основы в структуре порошкового материала создается разветвленная система пор, наличие которых в этих изделиях является как преимуществом (в фильтрах, очистителях, медицинских имплантатах и др.), так и, в некоторых случаях, недостатком, обуславливая плохую герметичность, низкую коррозионную стойкость по сравнению с литыми деталями и пр. [2, 3].

Технология инфильтрации различных композиций в поры порошковых материалов открывает новые возможности для решения этой проблемы, а также для проектирования и изготовления изделий, обладающих комплексом свойств, недостижимых при их изготовлении традиционными способами.

Известно несколько методик заполнения пор порошковых материалов инфильтрующими суспензиями: самопроизвольная пропитка, под давлением, в вакууме. В наших исследованиях использовалась пропитка под действием ультразвуковых волн. Благодаря ультразвуковым колебаниям скорость движения жидкости по капиллярам и качество заполнения пор существенно интенсифицируются [4, 5].

## Методика исследования

Объектами исследования стали пропитывающие суспензии на основе технических масел с наполнителями в виде дисперсных частиц различных размеров [6]. Для инфильтрации были разработаны три композиции, состоящие из индустриального масла И-20А (ГОСТ 20799-88) и графита АГ-1500 (ТУ 48-20-4-87). Композиции отличались дисперсностью графита: содержание его частиц размерами до 1 мкм составляло, %: 10—15 (образец 1), 30—35 (обр. 2), 50—60 (обр. 3).

К наноккомпозитам, как известно, относятся материалы, у которых по крайней мере один из размеров армирующих элементов имеет порядок нанометров. В нашем случае этим компонентом был углерод, внедряемый в поры детали, изготовленной методом порошковой металлургии. Эти

композиционные материалы являются многообещающими не только по физико-механическим свойствам, но и по коррозионной стойкости и антифрикционности. В настоящее время для получения новых композиционных материалов в ООО «Наномет» и на кафедре машиностроения и материаловедения ПГТУ (г. Йошкар-Ола) ведутся работы, связанные с технологиями инжекционного формования порошковых композиций. Эти исследования начались в конце 1990-х годов.

При наличии взвешенных частиц в жидкостях во время распространения ультразвуковой волны скорость колебательного движения частиц зависит от их массы и размеров, частоты ультразвука и вязкости жидкости и в общем случае не равна скорости элементов объема жидкости. Появление разности скоростей движения взвешенных частиц и элементов объема жидкостей, в которых размещены частицы, приводит к дополнительным потерям ультразвуковой энергии. Дополнительные потери обусловлены также рассеянием энергии на частицах [7].

Рассмотрим два случая проникновения дисперсных частиц в поры порошкового материала: при самопроизвольной пропитке и при инфильтрации под действием ультразвука.

Для сравнительного анализа результатов в ходе экспериментов варьировали концентрацию дисперсных частиц графита в жидкой матрице (от 1 до 5 %), температуру (от 20 до 90 °С) и время инфильтрации (от 5 до 60 мин). Частоту ультразвука на данном этапе исследований не меняли, она составляла 40 кГц.

## Движение твердых частиц в жидком масле под действием силы тяжести

Для стационарного случая движения твердой частицы предположим следующее:

- 1) частица имеет форму тонкого диска;
- 2) число Рейнольдса по скорости течения мало:  $Va/v_{\text{кинем}} \ll 1$ , где  $V$  — скорость установившегося течения,  $a$  — радиус диска,  $v_{\text{кинем}}$  — кинематическая вязкость масла (рис. 1).

Если  $\mu = \rho v_{\text{кинем}}$  — динамическая вязкость,  $\rho$  — плотность масла, тогда  $F = 16\mu aV$  — сила сопротивления, действующая на диск [8].

Установившаяся скорость осаждения с учетом силы Архимеда составит

$$V = \frac{(\rho' - \rho)g\pi a^2 h}{16\mu a}, \quad (1)$$

где  $\rho'$  — плотность частицы, г/см<sup>3</sup>;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> —

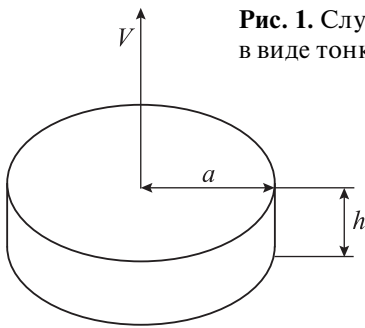


Рис. 1. Случай движения частиц в виде тонкого диска

ускорение свободного падения;  $h$  — толщина тонкого диска, мм.

Из теории Эйнштейна для коэффициента диффузии ( $D$ ) взвешенных частиц следует, что  $V = bf$ , где  $b = (16\mu a)^{-1}$  — подвижность частиц,  $D = bT$ . Здесь  $T$  — абсолютная температура,  $f$  — коэффициент трения частицы при ее движении в масле [2].

Для индустриального масла возможна следующая зависимость динамической вязкости от температуры:  $\mu = \mu_0 e^{-A(T - T_0)}$  ( $A > 0$ ), что справедливо при сравнительно небольшом перепаде температур, т.е.  $\mu = K_0 e^{-AT}$ , где  $K_0$  и  $A$  определяются из экспериментальных данных [9].

Таким образом,  $D = (16K_0 a)^{-1} e^{AT} T$ , т.е. с ростом температуры коэффициент диффузии  $D$  существенно растет.

### Движение твердых частиц в масле при совместном действии силы тяжести и ультразвука

Длина волны ультразвукового поля равна

$$\lambda = V_{\text{звука}} / \gamma_{\text{волны}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{звука}}$  — скорость звука в жидкости.

По порядку величины  $V_{\text{звука}} = 1,2 \cdot 10^3$  м/с,  $\gamma_{\text{волны}} = 40 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>, отсюда  $\lambda = 0,03$  м.

Размер частиц составляет 10–15 мкм, т.е.  $\lambda \gg 2a$ .

Определим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Va}{\nu_{\text{кинем}}} = \frac{(\rho' - \rho)g\pi a^2 h}{16\rho\nu_{\text{кинем}}} = \frac{(\rho'/\rho - 1)g\pi a^2 h}{16\nu_{\text{кинем}}^2} \ll 1 \quad (3)$$

при  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $\rho'/\rho \approx 2,5 \div 3,0$ ;  $a = 10 \cdot 10^{-6}$  м;  $h = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м;  $\nu_{\text{кинем}} = (1 \div 300) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

В случае низкого ультразвука (не более 40 кГц) и его сравнительно невысокой интенсивности течение, обусловленное наличием ультразвуковых волн, по порядку величины будет эффектом второго порядка. Скорость и глубина проникновения масла в поры порошковой гранулы возрастают при

наличии ультразвука за счет большого капиллярного эффекта; масло проникает внутрь по капиллярным каналам, заполняя воздушные промежутки, тем самым увеличивая проникновение частиц наполнителя в поры. В крупнопористых мембранах ускоряется перенос диффундирующего вещества за счет генерации конвективных микропотоков в их порах [10–12].

## Результаты и их обсуждение

Практические работы по пропитке пористых порошковых материалов проводились с использованием ультразвуковой ванны «Кристалл 5».

В ходе исследований анализировали масловпитываемость и коэффициент заполнения пор порошковых образцов созданными композициями. При этом применяли металлические порошковые детали с различной плотностью и пористостью (табл. 1). Также изучали показатели масловпитываемости при использовании композиций с наполнителями различной дисперсности (табл. 2).

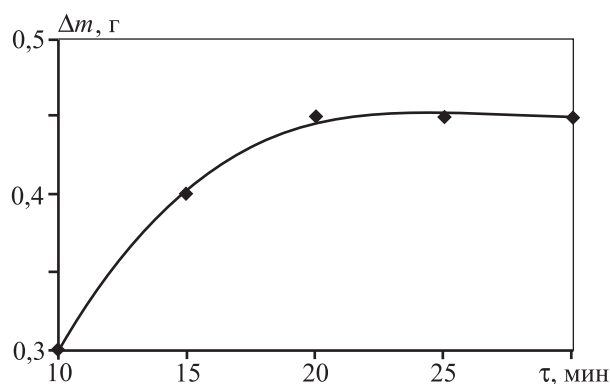
Из табл. 1 и 2 следует, что уменьшение плотности (увеличение пористости) детали дает более высокие показатели масловпитываемости, чем варьирование дисперсности наполнителей. Полученные данные позволяют сделать вывод, что на коэффициент диффузии частиц в масле ультразвук не окажет значительного влияния, повышая лишь степень проникновения частиц в поры.

Таблица 1. Показатели масловпитываемости образцов с различной плотностью

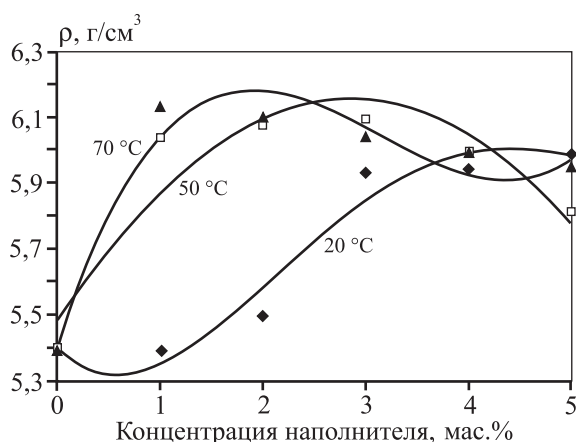
№ детали	$\rho_{\text{детали}}, \text{ г/см}^3$	Масловпитываемость		Коэффициент заполнения пор
		мас. %	об. %	
1	5,7	2,20	2,45	96
2	5,4	2,21	2,46	94
3	5,1	2,31	2,57	68

Таблица 2. Зависимость масловпитываемости от гранулометрического состава наполнителей композиций ИТ-20 + АГ

№ композиции	Доля частиц графита < 1 мкм, %	Масловпитываемость		Коэффициент заполнения пор
		мас. %	об. %	
1	10–15	2,31	2,57	68
2	30–35	2,20	2,45	64
3	50–60	1,79	1,98	51



**Рис. 2.** Зависимость изменения массы пропитанных образцов от времени выдержки



**Рис. 3.** Изменение плотности порошковых образцов в зависимости от параметров инфильтрации

Также была изучена зависимость процесса инфильтрации от времени пропитки. Экспериментально установлено оптимальное время выдержки образцов — 20 мин (рис. 2) [13].

Комплексное исследование времени выдержки, температуры инфильтрующей суспензии и концентрации дисперсного наполнителя дает возможность проанализировать и подобрать оптимальные условия инфильтрации суспензии в поры порошкового материала (рис. 3).

Определено, что оптимальные параметры инфильтрации следующие:  $t = 50 \div 70$  °C, концентрация наполнителя  $1 \div 3$  мас.% [14, 15].

## Заключение

Таким образом, инфильтрация композиций на основе индустриального масла с наполнителем-графитом с применением ультразвука увеличивается. Установлено, что в крупнопористых мембранах ускоряется перенос диффундирующего

вещества за счет генерации конвективных микропотоков в их порах. Выявлено, что ультразвук не оказывает значительного влияния на коэффициент диффузии масла, а повышает степень проникновения частиц графита в поры.

## Литература

1. Порошковая металлургия новых сплавов // Публ. аналит. доклад по развитию новых производственных технологий (Сколковский институт науки и техники, окт. 2014 г.). Заседание президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России. URL: <http://isicad.ru/ru/pdf/ReportSkolkovo2014.pdf> (дата обращения 20.03.2015).
2. Герман Рендалл М. Порошковая металлургия от А до Я: Учеб.-справ. рук-во. М.: ИД Интеллект, 2009.
3. Рыжонков Д.И. Наноматериалы: Учеб. пос. М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2014.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пос. М.: Наука, 1986.
5. Федоров С.А. Основы технологии сварки: Учеб. пос. М.: Машиностроение, 2013.
6. Разинская О.И., Алибеков С.Я. Влияние присадки графита на физико-механические свойства пористых порошковых материалов // Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение (ТПП-ПМ 2011): Сб. тр. науч.-практ. сем. (г. Йошкар-Ола, 28—30 июня 2011 г.). Йошкар-Ола: Центр-Принт, 2011. С. 144—147.
7. Осипов Л.В. Ультразвуковые диагностические приборы: Режимы, методы и технологии: Практ. рук-во для пользователей. М.: Изомед, 2011.
8. Хэппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976.
9. Раджендран В. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006.
10. Зарембо Л.К., Тимошенко В.И. Нелинейная акустика. М.: Изд-во МГУ, 1984.
11. Барвинок В.А., Богданович Б.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. М.: Машиностроение, 1999.
12. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 2010.
13. Разинская О.И., Алибеков С.Я. Влияние режимов пропитки на микроструктуру пористых порошковых

материалов // Вестн. КГТУ им. А. Н. Туполева (Казань). 2011. No. 4. С. 67—71.

14. *Разинская О.И., Алибеков С.Я.* Изготовление металлофторопластовых подшипников с заданными эксплуатационными свойствами // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2012. No. 1. С. 68—71.
15. *Разинская О.И.* Повышение эксплуатационных свойств пористых порошковых материалов для изделий машиностроения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Набережные Челны: КГИЭА, 2012.

## References

1. Poroshkovaya metallurgiya novikh splavov [Powder metallurgy of new alloy]. In: *Publichnii analiticheskii doklad po razvitiyu novikh proizvodstvennikh tekhnologii* (Skolkovskii Institut Nauki i Tekhniki, okt. 2014). Zasedanie prezidiuma Soveta pri Prezidente Rossiyskoi Federatsii po modernizatsii ekonomiki i innovatsionnomu razvitiyu Rossii. URL: <http://isicad.ru/ru/pdf/ReportSkolkovo2014.pdf> (accessed: 20.03.2015).
2. *German Rendall M.* Poroshkovaya metallurgiya ot A do Ya: Uchebno-spravocnoe rukovodstvo [Powder metallurgy from A to Z: Educational reference guide]. Moscow: ID Intellect, 2009.
3. *Ryzhonkov D.I.* Nanomaterialy [Nanomaterials]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2014.
4. *Landau L.D., Lifshits E.M.* Teoreticheskaya fizika [Theoretical physics]: Uchebnoe posobie. Moscow: Nauka, 1986.
5. *Fedorov S.A.* Osnovy tekhnologii svarki [Bases of technology of welding]: Uchebnoe posobie. Moscow: Mashinostroenie, 2013.
6. *Razinskaya O.I., Alibekov C.Ya.* Vliyanie prisadki grafita na fiziko-mekhanicheskie svoystva poristyykh poroshkovykh materialov [Graphite additive influence on physico-mechanical properties of porous powder materials]. In: *Novie materialy i izdeliya iz metallicheskiykh poroshkov. Tekhnologiya. Proizvodstvo. Primenenie* (TPP-PM 2011): Sb. tr. nauchno-prakticheskogo seminar (Joshkar-Ola, 28—30 iyunya 2011) [In: *New materials and products from metal powders. Technology. Production. Application* (TPP-PM 2011): Collection of materials scientific and practical seminar (28—30 June 2011)]. Joshkar-Ola: Tsentr Print, 2011. P. 144—147.
7. *Osipov L.V.* Ul'trazvukovye diagnosticheskie pribory: Rezhimy, metody i tekhnologii: prakticheskoe rukovodstvo dlya polzovatelei [Ultrasonic diagnostic units: Modes, methods and technologies: Practical guidance for users]. Moscow: Izomed, 2011.
8. *Happel J., Brenner G.* Gidrodinamika pri malykh chislakh Reynol'dsa [Hydrodynamics engineer at small numbers Reynolds]. Moscow: Mir, 1976.
9. *Radzhendbrand V.* Primenenie ul'trazvuka [Application of ultrasound]. Moscow: Tehnosfera, 2006.
10. *Zaremba L.K., Timoshenko V.I.* Nelineinaya akustika [Nonlinear acoustics]. Moscow: Izd-vo MGU, 1984.
11. *Barvinok V.A., Bogdanovich B.I.* Fizicheskie osnovy i matematicheskoe modelirovanie protsessov vakuumnogo ionno-plazmennogo napyleniya [Physical bases and mathematical modeling of processes of a vacuum ion-plasma dusting]. Moscow: Mashinostroenie, 1999.
12. *Khmelev V.N., Slivin A.N., Barsukov R.V.* Primenenie ul'trazvuka vysokoi intensivnosti v promyshlennosti [Application of ultrasound of high intensity in the industry]. Biysk: Izd-vo Altaiskogo gos. tehn. universiteta, 2010.
13. *Razinskaya O.I., Alibekov S.Ya.* Vliyanie rezhimov propitki na mikrostrukturu poristyykh poroshkovykh materialov [Influence of the modes of impregnation on a microstructure of porous powder materials]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* (Kazan). 2011. No. 4. P. 67—71.
14. *Razinskaya O.I., Alibekov S.Ya.* Izgotovlenie metalloftoroplastovykh podshipnikov s zadannymi ekspluatatsionnymi svoystvami [Production the metalloftoroplastovykh of bearings with the set operational properties]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2012. No. 1. P. 68—71.
15. *Razinskaya O.I.* Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv poristyykh poroshkovykh materialov dlya izdelii mashinostroeniya [Increase of operational properties of porous powder materials for mechanical engineering products]: Abstract of the dissertation of PhD. Naberezhnye Chelny: KGIEA, 2012.