

Print. **18.** Kuznecov, D. S. *Special'nye funkicii*. Moscow: Vysshaja shkola, 1962. Print. **19.** Ljuk, Ju. *Special'nye matematicheskie funkicii i ih approksimacii*. Ed. K. I. Babenko. Moscow: Mir, 1980. Print. **20.** Markin, N. S. *Osnovy teorii obrabotki rezul'tatov izmerenij: uchebnoe posobie dlja srednih special'nyh zavedenij*. Moscow: Izd-vo standartov, 1991. Print. **21.** Min'ko, A. A. *Statisticheskij analiz v MS Excel*. Moscow: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2004. Print. **22.** Mitropol'skij, A. K. *Tehnika statisticheskikh vychislenij*. Moscow: Nauka, 1971. Print. **23.** Novickij, P. V., and I. A. Zograf. *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij*. 2nd. ed. Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1991. Print. **24.** Romanov, V. N. *Teorija izmerenij. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenij*. 2nd. ed. St. Petersburg: SZTU, 2006. Print. **25.** Smirnov, N. V., and I. V. Dunin-Barkovskij. *Kurs teorii verojatnostej i matematicheskoj statistiki dlja tehniceskikh prilozhenij*. Moscow: Nauka, 1969. Print. **26.** *Spravochnik po special'nym funkcijam s formulami, grafikami i tablicami*. Ed. M. Abramovica, and I. Stigan. Moscow: Nauka, 1979. Print. **27.** Tihonov, V. I. *Statisticheskaja radiotekhnika*. Moscow: Radio i svjaz', 1982. Print. **28.** Uilks, S. *Matematicheskaja statistika*. Ed. Ju. V. Linnik. Moscow: Nauka, 1967. Print. **29.** Uitteker, Je., and G. Robinson. *Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov nabljudenij*. Ed. N. M. Gjunter. Moscow-Leningrad: ONTI – Glavnaja redakcija obshhetehnicheskogo literatury, 1935. Print. **30.** Hal'd, A. *Matematicheskaja statistika s tehniceskimi prilozhenijami*. Ed. Ju. V. Linnik. Moscow: Izd-vo inostrannoju literatury, 1956. Print. **31.** Hodasevich, G. B. *Obrabotka jeksperimental'nyh dannyh na EVM. Chast' 1. Obrabotka odnomernyh dannyh. Uchebnoe posobie*. 2015. Web. 10 Jun 2015 <http://www.dvo.sut.ru/libr/opds/il30hodo_part/4.htm>. **32.** Hudson, D. *Statistika dlja fizikov. Lekcii po teorii verojatnostej i jelementarnoj statistike*. Ed. E. M. Lejkin. 2nd. ed. Moscow: Mir, 1970. Print. **33.** Chermenskij, O. N., and N. N. Fedotov. *Podshipniki kachenija: Spravochnik – catalog*. Moscow: Mashinostroenie, 2003. Print. **34.** Janke, E., F. Jemde and F. Ljosh. *Special'nye funkicii. (Formuly, grafiki, tablicy)*. Ed. L. I. Sedov. Moscow: Nauka, 1964. Print.

Надійшла (received) 05.06.2015

УДК 519.67:621.762.4.04+621.762.53+537.52

Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО, ст. науч. сотр., НТУ «ХПІ»

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕССОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВ МЕТОДОМ СПАРК-ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Рассматривается проблема физико-математического прогнозирования рационального давления в процессах спарк-плазменного спекания порошковых композиций. Определены физические аспекты этой проблемы и представлен подход к расчету давлений в цикле прессования на стадии подготовки и экспериментальной разработки производства. Расчет основан на использовании закона Пашена применительно к рассматриваемой модели спарк-плазменной консолидации порошков под давлением. Предложена расчетная реляционная база данных по давлению в нанометрическом диапазоне средних размеров зерен исходных порошков в технологиях производства спарк-плазменным спеканием. Результаты расчетов сопоставлены с практическим опытом энергосберегающего скоростного спарк-плазменного спекания плотного керамического композита из нанопорошков $Al_2O_3 - WC$ (50/50 мас. %). Предложены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: порошковая композиция, спарк-плазменное спекание, электрический разряд, закон Пашена, давление прессования, асимптотическая зависимость.

Введение. Конкуренция технологий консолидации порошков различных материалов инструментального и конструкционного назначения определяется соперничеством прежде всего в формировании, и притом энергоэффективном, тонкодисперсных и высокоплотных структур, в единстве этих двух качеств и составляющих основу уровня их физико-механических свойств и эксплуатационных показателей в готовых изделиях [1], если решаемая задача

не связана с целенаправленным созданием пористого твердого тела, например фильтра. Особую остроту конкуренции технологий высокопрочных продуктов на современной порошковой основе, в особенности в нанометрическом диапазоне размеров зерен, придает повышенная востребованность в них эксплуатационно высокофункциональных, но трудно консолидируемых высокотвердых тугоплавких материалов.

Современные успехи в производстве высокоплотных порошковых консолидатов связываются с совмещением электронагрева и горячего прессования [2], что обеспечивает возможность одновременного независимого управления скоростью нагрева и механической активацией, и в результате позволяет добиваться энергичного протекания процесса уплотнения с опережением теплового роста зерен механической активацией их упаковки в консолидате.

Таким образом, прессование относится к основным воздействиям на объект порошковой консолидации, и выработка обобщенного подхода к обоснованному выбору его режима в цикле спекания является актуальной, заслуживающей специального рассмотрения, которому, применительно к методу спарк-плазменного спекания, или, в современной оригинальной терминологии японского фундатора (*M. Tokita*) и его последователей [3 – 5], *spark plasma sintering* (SPS), и посвящается представляемая здесь работа.

Анализ предшествующих исследований. Метод SPS является одним из признанных технологических лидеров последней четверти века среди методов консолидации субмикронных и наноразмерных порошков в Японии [3], США [4], Евросоюзе [5] и других высокоразвитых суверенных и надгосударственных образованиях, с повышенной эффективностью в получении высокоплотных (низкопористых) структур, одновременно с приложением внешнего давления использующих нагрев прямым действием электрического тока. Относительно короткий цикл спекания (обычно не более 5 мин) с повышенными скоростями нагрева обеспечивает в продуктах технологий SPS незначительный рост зерна по сравнению с исходным порошковым размером.

Несмотря на бесспорную значимость адекватного обоснования задания режима прессования в цикле SPS, большинство исследований этого метода не содержат соответствующего обоснования, а многие вообще не предоставляют сведений о прессующих нагрузках (давлениях) по ступеням цикла спекания или ограничиваются указанием на максимальное (финальное) давление в цикле. Отчасти это связано с современным трендом коммерциализации исследований и сокрытием «ноу-хау», но также и со сложившейся некоторой второстепенностью отношения к давлению горячего прессования в цикле SPS по сравнению с характеристиками нагрева.

Теоретические подходы к аналитическому заданию значений давления прессования на том или ином этапе цикла SPS в известных литературных и интернетовских источниках не рассматриваются.

В реальной практике страны-фундатора SPS (Япония), в том числе внедренческой, установленной в ходе общих дискуссий и частных общений с участием автора на проходившем в рамках международной школы-семинара [3] российско-японском семинаре по SPS, верхний предел давления прессования желателен как можно больший, но сдерживается прочностью, допускаемой материалом рабочей камеры электроконсолидации под давлением,

как правило, на графитной основе. С учетом запаса на многооперационную работоспособность камеры опытный верхний предел обычно не превышает 40 – 45 МПа.

Таким образом, разработка обобщенного подхода к априорной аналитической оптимизации цикла SPS по давлению является актуальной, осуществление которой призвано способствовать не только рациональной энергодостаточности поглощаемых рабочими процессами SPS энергетических ресурсов, но и повышению срока службы оборудования, а с этим дополнительной экономии материальных и финансовых ресурсов.

Постановка задачи. Основная задача данного исследования, выполняемого с позиций разработки обобщенного подхода к априорной аналитической оптимизации цикла SPS по давлению, состоит в предложении физико-математически обоснованной расчетной модели и соответствующей ей реляционной базы данных по давлению на первых участках циклограммы в технологиях SPS, реализуемых в нанометрическом диапазоне средних размеров зерен исходных порошков.

Другими задачами являются сопоставление полученных расчетных результатов с успешной практикой SPS, а также обозначение следующих горизонтов по пути уточнения и развития применимости полученных аналитически обобщенных и конкретных расчетных результатов.

Физико-математическая модель. Объемно-геометрически идеальным результатом SPS порошковых композиций является полное подавление пористости и формирование сплошного твердого тела. Поэтому геометрическим основанием модели является размер поры, и притом текущей наибольшей, как первоочередной текущей цели подавления в процессе SPS. Определиться с этой оценкой в начальной стадии SPS представляется целесообразным унифицированно с размерной характеристикой зернового состава исходного порошка, например в привязке, к среднему диаметру зерна в его модельной интерпретации сферой.

Методом структурных исследований по аннигиляции позитронов – продлению времени их жизни захватом вакансиями, вакансионными скоплениями (порами) по сравнению с пребыванием в бездефектных структурах, впервые использованному в исследовательской практике [6], [7] выделены три типа свободных объемов как дефектов внутренней структуры неплотно компактированных нанокристаллических материалов, рис. 1: отдельные вакансии; вакансионные агломераты или нанопоры, образующиеся в тройных стыках кристаллитов; большие поры на месте отсутствующих кристаллитов. Это позволяет рассматривать неплотные консолидаты (в том числе с участием исходных порошков различной зернистости в микро-, субмикро- и нанодиапазоне) с позиций единого представления о типичных дефектах, моделировать их и априорно выстраивать пути развития наноматериалов и нанотехнологий из соответствующих имитационных подходов.

В поддержку подобных рассмотрений свидетельствуют, например, данные [8], также полученные методом аннигиляции позитронов в компактированных средах и подтверждающие сходство микроструктуры нано- и субмикроструктурных материалов, в частности, наличие в них свободных объемов одинакового типа.

При этом очевидно, что обнаруживаемые в тройных стыках поры (зоны

τ_2 по рис. 1) являются наследием исходной несплошности спекаемой насыпки, трансформирующейся в поры неплотного конечного продукта.

В контексте физических исследований [7] и основанной на их результатах модели геометрической структуры порошкового консолидата, размер наибольших пористых включений (рис. 1, зона τ_3), являющихся потенциальными объектами предпочтительного подавления при электромеханической консолидации нанопорошков, соизмерим с размерами отдельных кристаллитов (зерен).

Поскольку интенсификация подавления наибольших пор является предпочтительной, то далее воспользуемся описанием их величины в консолидате размером зерна, то есть на первых участках циклограммы в технологиях SPS – по характеристике зернистости исходной порошковой композиции.

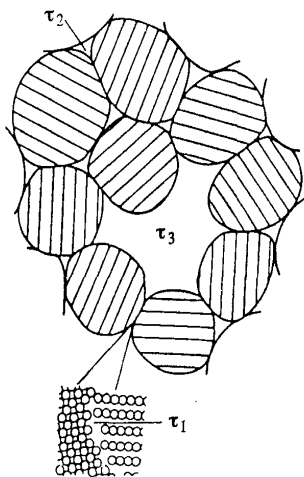


Рис. 1 – Двумерная модель нано-кристаллического материала [7]: вакансии в границе раздела (время жизни позитрона τ_1); вакансионный агломерат в тройном стыке кристаллитов (τ_2) и большая пора (τ_3) на месте отсутствующего кристаллита.

мпозитах горячего прессования с SPS электроконсолидацией.

С позиции энергоэффективного преодоления (уменьшения) пористости наибольший интерес представляет минимизация потенциала зажигания электрических разрядов в газовых средах пор спекаемого под давлением консолидата. При данном рабочем электрическом напряжении токоподвода это повысит пробойные возможности и уменьшит число пор, обойденных прямым электроразрядным действием.

В теоретических представлениях электроконсолидационных процессов [9] с увеличением концентрации электрополярных линий в зонах обтекания электрическим током пор с большим поперечным размером формируются и большие градиенты температур (рис. 2, а). Это не только «подталкивает» структурные вакансии к диффундированию из окружения больших пор в сторону меньших, выравнивая плотность электрического поля вместе с увеличением за счет размерного стеснения больших пор числа и (или) размера меньших пор, как отмечается в [9], но и облегчает тем самым условия их электроразрядного преодоления в ходе электроконсолидации (рис. 2, б).

Рольевые функции искровых разрядов в этом процессе связываются со скольжением по межзеренным границам [5] и действием непосредственно в промежутках пористости. Работу электрических разрядов в газовых порах вдоль границ зерен, спекаемых по методу SPS порошков, подтверждает обязанная своим генезисом, прежде всего электроразрядным эффектам, как показано в [10], экспансия семиркарбида вольфрама в вольфрамокерамических инструментальных ко-

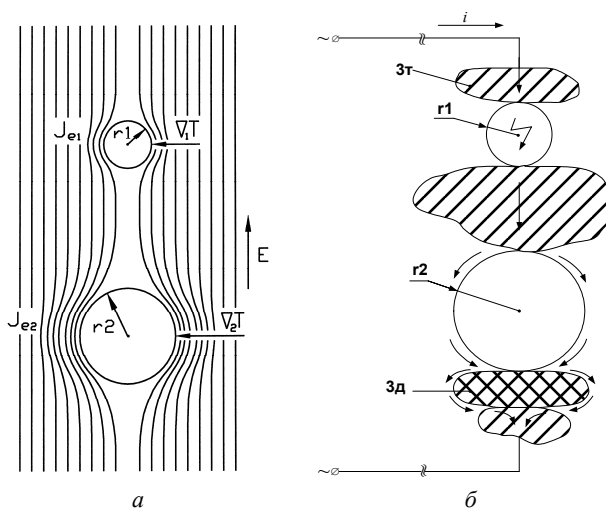


Рис. 2 – Изменение плотности тока ($J_{e2} > J_{e1}$) и градиента температуры ($\nabla_2 T > \nabla_1 T$) при наличии разноразмерных пор ($r_1 < r_2$): a – в электрическом поле некоторой напряженности E [9]; $б$ – схематическая маршрутизация электрического тока (i) в порошковой композиции с токопроводными (3т) и диэлектрическими (3д) зернами.

В экспериментальной физике испытывающих управляемое давление однокомпонентных газовых сред известны минимумы $U_{np\min}$ потенциала U_{np} зажигания в них электрических разрядов, следующие из экстремальных кривых Пашена [11]. В соответствии с отображаемым этими кривыми законом Пашена $U_{np\min} = \text{const}$ для данной газовой среды соответствует некоторому однозначно определенному постоянству произведения $P \cdot h = (P \cdot h)_{opt}$ величин исходного давления P и разрядного промежутка h , рис. 3, a .

По закону Пашена оптимальное значение P_{opt} исходного давления P (Па), при котором для известной величины разрядного промежутка h (м) потенциал зажигания разряда (напряжение электроразрядного пробоя данного промежутка) в идеально однокомпонентной газовой среде примет минимально возможное значение $U_{np} = U_{np\min}$, наиболее выгодное (оптимальное) с точки зрения энергопотребления, определится из выражения:

$$P_{opt} = (P \cdot h)_{opt} / h. \quad (1)$$

Известен также эффект Пеннинга [14], состоящий в дополнительном понижении минимумов Пашена в компаундных газовых структурах с присутствием примесей, потенциал энергии возбуждения метастабильного уровня которых ниже, чем в чистом основном газе (рис. 3, $б$), в том числе во влажных средах с однокомпонентной газовой основой.

Тогда, исходя из определяющей роли электроразрядного фактора и экспериментальных закономерностей Пашена-Пеннинга, можно предположить,

что оптимальное давление прессования P_{opt} при нанопорошковой электроконсолидации, во всяком случае, в первом приближении, подчиняется более общей по сравнению с (1) зависимости вида:

$$P_{opt} = k \cdot (P \cdot h)_{opt} / h, \quad (2)$$

где h – размерная характеристика нанопорошка, эквивалентная ожиданию наибольшего разрядного промежутка (диаметр зерна в сферической модели); k – поправочный коэффициент, учитывающий геометрию промежутка в порах, состав и теплофизический фон газовой среды в них; в общем случае $k > 0$ и, в частности, с повышенным ожиданием $0 < k < 1$ в нормально влажных исходных средах реального компактирования.

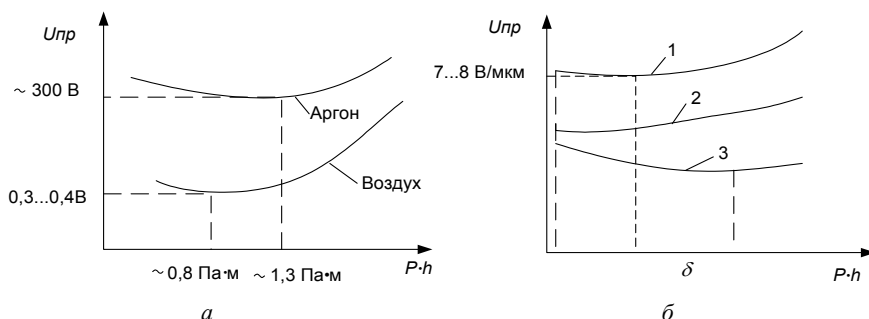


Рис. 3 – Кривые: а – экспериментальные кривые Пашена для аргона [12] и воздуха [13]; б – эффект Пеннинга – снижение потенциала зажигания разряда в газе (кривая 3), обусловленное присутствием в нем примеси другого газа, для инициирования разряда в котором достаточен потенциал ниже (кривая 2) энергии возбуждения метастабильного уровня чистого основного газа (кривая 1) [12].

Результаты расчета реляционной базы данных. В табл. 1 приведены рассчитанные по (2) значения P_{opt} в системе условий, идентичных установлению кривой Пашена для возбуждения электрического разряда в воздушной среде (рис. 3, а), в нанометрическом диапазоне средних размеров зерен h исходных порошков в технологиях SPS.

Таблица 1 – Расчетное давление при SPS с подавлением воздушных пор ($k = 1$)

h , нм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
P_{opt} , МПа	80	40	27	20	16	13	11	10	9	8

Представленные в табл. 1 расчетные данные численно отображают гиперболический характер зависимости $P_{opt} = P_{opt}(h)$, следующий из равенства $(P \cdot h)_{opt} = const$, с асимптотическим приближением кривой $P_{opt} = P_{opt}(h)$ к осям абсцисс (h) и ординат (P_{opt}) соответственно с ростом и уменьшением h .

Сопоставление расчетов по модели с практическим опытом. Апри-

орно можно утверждать, что необходимой доказательной основой справедливости гипотезы об определенном подчинении оптимального давления спарк-плазменной электроконсолидации закону Пашена является относительная близость (в пределах одного порядка) величин расчетного давления при $k = 1$ (с использованием кривой Пашена для доминирующего газа среды спекания) и из реальной опытно-экспериментальной оптимизационной практики SPS. Доказательной основой справедливости гипотезы о пропорциональном подчинении – относительная близость величин k для соотношений

$$k = P_{opt} \cdot h / (P \cdot h)_{opt},$$

полученных с использованием $(P \cdot h)_{opt}$ Пашена и данных о P_{opt} или диапазоне изменения P_{opt} в практике работы с порошком данной зернистости или смесью порошков разных зернистостей в одной и той же среде спекания.

В поддержанном давлением электроконсолидационном опыте [15] получения высокоплотных тонкодисперсных $Al_2O_3 - WC$ композитов исходные порошки имели зернистость 40 – 70 нм (WC) и 60 – 80 нм (Al_2O_3), а диапазон давлений первых ступеней цикла подавления пористости – 7,5 ... 25 МПа.

Из разрешения закона Пашена для газовой среды (в приближенной оценке $U_{nmin} = 0,35$ В при $(P \cdot h)_{opt} = 0,8$ Па·м, рис. 3, а) относительно определяющей по [7] максимальную пористость консолидата реальной практики [15] исходных зернистостей спекаемых тугоплавких порошков в диапазоне от 40 до 80 нм следует диапазон P_{opt} от 10 до 20 МПа (табл. 1), с последовательной ориентацией на преимущественное подавление от более крупных исходных пор, максимальных для зернистости 80 нм (расчетное значение $P_{opt} = 10$ МПа), к максимальным для зернистости 40 нм (расчетное значение $P_{opt} = 20$ МПа).

Из сопоставления установленных опытно-экспериментальным путем и из $(P \cdot h)_{opt}$ по Пашену значений давлений на границах диапазона исходной максимальной пористости, соответствующего по [7] диапазону исходной зернистости спекаемых порошков, следует, что теоретический диапазон является внутренним по отношению к опытному с отклонениями каждой границы опытного диапазона на 25 %. При этом коэффициент k соответственно изменяется от $k = 0,75$ (нижняя граница) до $k = 1,25$ (верхняя граница). Таким образом, обеспечивается повышенная надежность формирования оптимальных условий электроразрядного подавления пористости в условиях реальной форморазмерной статистики максимальных пор, в контексте [7] приближенно описываемых сферической моделью зерна. При этом условия выдержки $P_{opt} = 25$ МПа по циклограмме SPS [15], по-видимому, уже соответствуют запуску как преобладающего механизма деформационной реструктуризации спекаемого компаунда с уплотнительным скольжением границ смежных зерен друг относительно друга.

Таким образом, следует признать весьма высокой, и притом симметричной, сходимость расчетного (по предложенной модели) и экспериментального (по [15]) диапазонов P_{opt} .

Направления дальнейших исследований. Во-первых, следует провести расширенную экспериментальную проверку достоверности предложенной расчетной схемы определения рационального (оптимального по потенциалу зажигания электрических разрядов) давления при SPS с подавлением пористости на начальной стадии объединенного цикла электроспекания и горячего прессования. При этом необходимо учитывать, что реальная экспериментальная практика электрического разряда при SPS, с криволинейностью геометрии промежутка в порах, весьма далека от условий получения кривых Пашена (с плоскими электродами и однородным электрическим полем). Необходимо также принимать во внимание известную из фундаментального источника [12] приближенность закона Пашена и тем большую его точность, чем меньше P и h , и, в то же время (по некоторым экспериментальным данным), значительные искажения начального участка кривой Пашена при пробое малых разрядных промежутков (при одновременно малых $P \cdot h$ и h), объясняемые [16] поддержанным туннелированием *эффектом Шоттки*.

Во-вторых, предложенная расчетная схема нуждается в специальной адаптации к промежуточным и, особенно, заключительным стадиям горячего прессования в цикле SPS, когда размер текущих наиболее крупных пор, требующих предпочтительной атаки электрическим разрядом, становится все более неочевидным.

В-третьих, следует принципиально определиться с технической и экономической целесообразностью использования в технологиях SPS порошков со средним размером зерна менее 20 нм, в рамках предложенной расчетной схемы эффективного подавления пористости требующих приложения начальных давлений прессования свыше 40 МПа, то есть на уровне, близком к максимальной практике эксплуатации традиционно графитовых камер прессования и спекания. В этом рассмотрении не следует исключать разработки новых конструкторско-технологических схем механической активации твердотельной консолидации порошков по методу SPS, в том числе на усовершенствованных принципах создания условий консолидату для внутреннего пластического деформирования и интенсификации такого деформирования.

Выводы. Таким образом, предложенный приближенный расчетный подход к определению исходных давлений прессования на начальных этапах реализации полного технологического цикла нанопорошковой электроконсолидации по методу SPS согласуется с рассмотренной практикой и предложенная расчетная реляционная база расчетных данных по давлению в нанометрическом диапазоне средних размеров зерен исходных порошков рекомендуется к применению в опытно-экспериментальных разработках промышленных технологий SPS.

Дальнейшие исследования в данном направлении перспективны и заслуживают организационно-технической и финансовой поддержки.

Работа выполнена по комплексному проекту ХНУ, НТУ «ХПИ», УГАЖТ (г. Харьков) и СГУ (г. Сумы) «Многокомпонентные композиционные материалы и покрытия на основе наносоединений тугоплавких металлов», номер государственной регистрации 0113U001340.

Список литературы: 1. Янагида Х. Тонкая техническая керамика / Пер. с яп. – М.: Металлургия, 1986. – 279 с. 2. Groza J. R. Nanocrystalline Powder Consolidation Methods // Nanostructured Materials: Processing, Properties and Potential Applications / Ed. by C.C. Koch. – Norwich, N.Y.,

U.S.A.: Noyes Publications, William Andrew Publishing, 2002. – PP. 115 – 178. **3.** Tokita M. Recent Advanced Spark Plasma Sintering (SPS): Technology, Systems and Applications in Japan [электронный ресурс]: доклад [тезисы] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», ЛЭМПИМ, 20 – 23 мая 2013 г. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – Электрон. дан. (65 с.: 9987534 байт). – Режим доступа: <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf>. Дата обращения: 01.06.2015. **4.** Olevsky E. A. Fundamental Aspects of Spark Plasma Sintering: I. Experimental Analysis of Scalability / E.A. Olevsky, W.L. Bradbury, C.D. Haines, D.G. Martin, and D. Kapoor // J. of the American Ceramic Society. – Vol. 95, Iss. 8, Aug. 2012. – PP. 2406 – 2413. **5.** Berhard F. Dense nanostructured materials obtained by Spark Plasma Sintering and Field Activated Pressure Assisted Synthesis starting from mechanically activated powder mixtures / F. Berhard, S. Le Gallet, N. Spinassou, S. Paris, E. Gaffet, J. N. Woolman and Z.A. Munir // Science of Sintering. – Vol. 36 (2004). – PP. 155 – 164. **6.** Лаповок В.Н., Новиков В.И., Свирида С.В., Семенухин А.Н., Трусов Л.И. Образование неравновесных вакансий при рекристаллизации ультрадисперсного порошка никеля // ФТТ. – Т. 25 (1983). – Вып. 6. – С. 1846 – 1848. **7.** Schaefer H.-E. Interfaces and Physical Properties of Nanostructured Solids // Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. of Materials Having Ultrafine Microstructure: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. Porto Novo, Portugal. June 28 – July 10, 1992. / Ed. by M. Nastasi, Don M. Parkin, and H. Gleiter. – NATO ASI Series. Series E: Applied Sciences. – Vol. 233. – PP. 81 – 106. **8.** Wurschum R. Interfacial free volumes in ultra-fine grained metals of amorphous alloys / R. Wurschum, W. Greiner, R.Z. Valiev, M. Rapp, W. Sigle, O. Schneeweiss, and H.-E. Schaefer // Scripta Met. et Mater. – Vol. 25 (1991). – PP. 2451 – 2456. **9.** Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с. **10.** Геворкян Э.С., Гуцаленко Ю.Г. Генезис экспансии семикрибид вольфрама в вольфрамокерамических инструментальных композитах горячего прессования с электроконсолидацией нанопорошков на монокрибидной основе // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2010. – № 53. – С. 19 – 30. **11.** Paschen F. Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure beiverschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz // Annalen der Physik und Chemie. 1889. Nr. 5 (273). SS. 69-96. **12.** Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с. **13.** Dakin T.W. Phenomenes disruptifs dans les gaz en chanep uniforme. Courdes de Pashen pour l'azote, l'air et l'hexafluorure de soufre / T.W. Dakin, G. Luxa, G. Opperman, J. Vigreux, G. Wind, H. Winkelkemper // Electra. – 1974. – N. 32. – PP. 61 – 82. **14.** Penning, F. M. Electrical Discharges in Gases. New York: Macmillan, 1957. – 118 p. **15.** Геворкян Э.С., Гуцаленко Ю.Г. Подбор оптимальных режимов горячего прессования нанопорошковых смесей Al_2O_3 –WC для инструментальных применений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №5/1(47). – С. 13 – 18. **16.** Зотов В. М., Зотов Н.М. Основные причины возникновения разряда в малых газовых промежутках // Журн. техн. физики. – Т. 50 (1980). – Вып. 4. – С. 716 – 719.

Bibliography (transliterated): **1.** Yanagida, H. *Tonkaja tehnikeskaja keramika. Per. s jap.* Moscow: Metallurgija, 1986. Print. **2.** Groza, J. R. "Nanocrystalline Powder Consolidation Methods." *Nanostructured Materials: Processing, Properties and Potential Applications*. Ed. C. C. Koch. Norwich, N.Y., U.S.A.: Noyes Publications, William Andrew Publishing, 2002. 115–178. Print. **3.** Tokita, M. "Recent Advanced Spark Plasma sintering is (SPS): Technology, Systems and Applications in Japan." *Laboratory of Electromagnetic Field-Assisted Methods for Processing of Novel Materials*. National Research Nuclear University "MIPhI", 3 June 2013. Web. 1 June 2015. <<http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf>>. **4.** Olevsky, E. A., et al. "Fundamental Aspects of Spark Plasma Sintering: I. Experimental Analysis of Scalability." *J. of the American Ceramic Society*. Vol. 95, Iss. 8. 2406–2413. Print. **5.** Berhard, F., et al. "Dense nanostructured materials obtained by Spark Plasma sintering is and Field Activated Pressure Assisted Synthesis starting from mechanically activated powder mixtures." *Science of Sintering*. Vol. 36. 2004. 155–164. Print. **6.** Lapovok, V. N., et al. "Образование неравновесных вакансий при рекристаллизации ультрадисперсного порошка никеля." *Физика твердого тела*. Vol. 25. No. 6. 1983. 1846–1848. Print. **7.** Schaefer, H.-E. "Interfaces and Physical Properties of Nanostructured Solids." *Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. of Materials Having Ultrafine Microstructure*. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. Porto Novo, Portugal. 1992. Ed. M. Nastasi, Don M. Parkin, and H. Gleiter. NATO ASI Series. Series E: Applied Sciences. Vol. 233. 81–106. Print. **8.** Wurschum, R., et al. "Interfacial free volumes in ultra-fine grained metals of amorphous alloys." *Scripta Met. et Mater.*

Vol. 25. 1991. 2451–2456 Print. **9.** Rajchenko, A. I. *Osnovy processa spekanija poroshkov propuskaniem elektricheskogo toka*. Moscow: Metallurgija, 1987. Print. **10.** Gevorkjan, E. S., and Yu. G. Gucalenko. "Genezis ekspansii semikarbida vol'frama v vol'framokeramicheskikh instrumental'nykh kompozitakh gorjachego pressovanija s elektrokonsolidaciej nanoporoshkov na monokarbidnoj osnove." *Visnyk NTU "KhPI". Temat. vyp.: Tehnologii' v mashynobuduvanni*. No. 53. 2010. 19–30. Print. **11.** Paschen, F. "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz." *Annalen der Physik und Chemie*. No. 5 (273). 1889. 69–96. Print. **12.** *Fi-zicheskyj enciklopedicheskyj slovar*. Ed. A. M. Prohorov. Moscow: Soveckaja enciklopedija, 1983. Print. **13.** Dakin, T. W., et al. "Phenomenes disruptifs dans les gaz en chanep uniforme. Courdes de Pashen pour l'azote, l'air et l'hexafluorure de soufre." *Electra*. No. 32. 1974. 61–82. Print. **14.** Penning, F. M. *Electrical Discharges in Gases*. New York: Macmillan, 1957. Print. **15.** Gevorkjan, E. S., and Yu. G. Gucalenko. "Podbor optimal'nyh rezhimovgorjachego pressovanija nanoporoshkovykh smesej Al_2O_3-WC dlja instrumental'nykh primenenij." *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij*. No. 5/1 (47). 2010. 13–18. Print. **16.** Zotov, V. M., and N. M. Zotov. "Osnovnye prichiny voznikovenija razriada v malych gazovykh promezhutkah". *Zhurnal tehneskoj fiziki*. Vol. 50. No. 4. 1980. 716–719. Print.

Поступила (received) 15.06.2015

УДК 621.43.068.4

А.Н. КОНДРАТЕНКО, канд. техн. наук, ст. преп., НУГЗУ, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ. ЧАСТЬ 4: ВРЕМЕННОЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Описана математическая модель гидравлического сопротивления (ГС) фильтра твердых частиц (ФТЧ) дизеля в реальных условиях эксплуатации. Модель построена на основе расходной характеристики одного модуля ФТЧ, экспериментально полученной при постоянной температуре текучей среды, и данных стендовых испытаний автотракторного дизеля 2410,5/12, оснащенного полноразмерным ФТЧ. Модель позволяет учесть ряд факторов, характеризующих условия эксплуатации ФТЧ в составе выпускной системы этого дизеля путем введения соответствующих коэффициентов. В данной части работы описан физический смысл и оценены значения временного коэффициента модели, позволяющего учесть зависимость ГС ФТЧ от времени работы дизеля на стационарном режиме, то есть динамику засорения ФТЧ.

Ключевые слова: дизель, фильтр твердых частиц, гидравлическое сопротивление, математическая модель.

Введение. Научно-исследовательские работы (НИР), направленные на создание принципиально новых и совершенствование известных конструкций *фильтров твердых частиц* (ФТЧ), как показано в исследовании [1], являются актуальными и экономически обоснованными.

Анализ литературных источников. В отделе *поршневых энергоустановок* (ПЭУ) *Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины* (ИПМаш НАНУ) разработан *фильтрующий элемент* (ФЭ) для ФТЧ новой конструкции, описанный в предыдущих частях исследования [1 – 3]. В первой части исследования описаны результаты физического моделирования процесса движения *текучей среды* (ТС) в *прозрачном макете модуля* (ПММ) такого ФЭ на *безмоторной исследовательской установке* (БИУ) [1].