

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACS numbers: 46.35.+z, 61.43.Gt, 81.20.Ev, 81.40.Ef, 83.10.Gr, 83.50.Uv, 83.60.Bc

Модель процесса уплотнения пористого порошкового упруго-вязкого материала при электроспекании

А. И. Райченко

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
ул. Кржижановского, 3,
03680, ГСП, Киев, Украина*

Изучается процесс электроспекания компакта в терминах теоретической макрореологии. Компактом является упруго-вязкое тело Кельвина–Фогта. Основа исследования — второй закон Ньютона (связь импульса с изменением количества движения). Выведено уравнение уплотнения при электроспекании упруго-вязкого компакта. Его исследование показало, что увеличение плотности тока интенсифицирует уплотнение вследствие более сильного понижения вязкости, чем упругости, при электротермии.

Ключевые слова: электроспекание, упруго-вязкий материал, понижение вязкости и упругости, электротермия.

Досліджується процес електроспекання компакту в термінах теоретичної макрореології. Компактом є пружньо-в'язке тіло Кельвіна–Фогта. Основа дослідження — другий Ньютонів закон (зв'язок імпульсу зі зміною кількості руху). Виведено рівняння ущільнення при електроспеканні пружньо-в'язкого компакту. Його дослідження показало, що збільшення густини струму інтенсифікує ущільнення внаслідок більш сильного зниження в'язкості, ніж пружності, при електротермії.

Ключові слова: електроспекання, пружньо-в'язкий матеріал, зниження в'язкості та пружності, електротермія.

Corresponding author: Oleksandr Ivanovych Raichenko
E-mail: raich@ipms.kiev.ua

*I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3 Krzhizhanovsky Ave., 03680 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: O. I. Raichenko, Model of Compaction Process of a Porous Powder Elastic-Viscous Material at Electric Sintering, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 5: 635–645 (2016) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.38.05.0635.

An electric sintering process is studied in the theoretical macrorheology terms. A compact is the Kelvin–Voigt elastic-viscous body. The basis of the study is Second Newton’s law (momentum equation). The constitutive equation of densification of an elastic-viscous compact at electric sintering is deduced. Investigation shows that the increase in current density at electrothermics intensifies the compaction due to stronger reduction of viscosity than elasticity.

Key words: constitutive equation, electric sintering, elastic-viscous material, decrease of viscosity and elasticity, electrothermics.

(Получено 7 октября 2015 г.; окончат. вариант — 20 апреля 2016 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс спекания (в том числе электроспекания) в макроскопическом представлении целесообразно описывать математически в терминах теории сплошных сред.

Если размеры порошковых частиц и пор гораздо меньше, чем элементарный объём, которым пользуются в континуальной теории (в гидродинамике, в теориях упругости, пластичности, реологии), то достаточно записать уравнение или ряд уравнений для величин и процессов, которыми характеризуются объекты и технология порошковой металлургии, керамики и других областей материаловедения. Известны работы, в которых для теоретического описания процесса электроспекания используются понятия реологии. В работах такого плана объекты обработки — это пористые материалы, обладающие по реологической классификации вязкостью (часто пластической). Таким образом, эти теоретические исследования касаются твёрдых тел, где фигурируют категории пластической деформации (например, типа ползучести) и не привлекается понятие предела текучести. Некоторые исследования касаются объектов с очень высоким значением вязкости, т.е. они являются, строго говоря, жидкостями (очень вязкими), и теоретико-механический подход к анализу их при воздействиях, либо постоянных, либо с малыми скоростями изменения, должен быть соответственный [1].

Возникает вопрос: как быть с теорией спекания (электрического и любого другого) или электроспекания под давлением порошков металлов и керамик, которые обладают упругими свойствами, а таких материалов, как известно, большинство. Например, в работе Вайсслера «Электрическое сопротивление металлических порошковых компактов» [2] убедительно показано, что между смежными частицами даже такого «мягкого» металла, как медь, при прессовании (включая эксперименты с прохождением тока) происходит упругое (иногда частично обратимое) сближение. При обсуждении экспериментов автор [2] использует результаты известной теории

Герца, где сближение сфер — «упругий» процесс [1]. При продолжающемся сжатии упругий процесс деформации дополняется пластичным. И при повышении температуры упругость есть, но она понижается, однако не исчезает (об этом речь будет ниже).

А это означает, что такой порошковый компакт нельзя считать просто вязким или пластично-вязким телом, оказывается, с реологической точки зрения это более сложный объект: это упруго-вязкое тело. В теоретическом исследовании таких объектов нельзя игнорировать их реологическую природу, тем более следует учитывать эти обстоятельства при расчётах предполагаемого поведения их в усложнённых условиях будущего технологического передела или эксплуатации.

Цель представленной работы — дать алгоритм математического вывода основополагающего уравнения — ОУ (constitutive equation—CE), могущего послужить исходной точкой для теоретического анализа уплотнения при электро-термобарической обработке пористых твёрдотельных объектов, где явным образом принимаются во внимание свойства как вязкости, так и упругости (в ряде работ для основополагающего уравнения используются определения «управляющее» либо «определяющее»).

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА

Рассмотрим основополагающую математическую модель поведения упруго-вязкого пористого тела при анализе процесса электроспекания порошкового компакта. Анализ проводится в терминах континуальной макрореологии. Принимается, что компакт подвергается «извне» механической обработке одноосным нормальным сжимающим напряжением и «изнутри» так называемым лапласовским воздействием из-за поверхностного натяжения на границах вещества и поры («напряжение спекания»). Весьма близкий процесс исследовался в работе [3]. Механическую часть обработки следует описывать тензором

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\sigma_{11} = -P_0 - \alpha/(3r_0)$, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = -\alpha/(3r_0)$, P_0 — напряжение сжатия в направлении 1, α — поверхностное натяжение на границе вещество/пора (сферическая усреднённого радиуса r_0).

Электрообработка: через компакт пропускается ток с плотностью j .

По макрореологической классификации такой компакт — упруго-вязкое тело Кельвина–Фогта (КФ) с формулой Н|N (Н — «пружина», элемент Гука, N — «амортизатор», элемент Ньютона). В ка-

честве исходной основы исследования будет второй закон Ньютона (связь импульса с изменением количества движения), который для нашей задачи выражен операторным уравнением [4]

$$P'\sigma(t) = 3Q'\varepsilon(t), \quad (2)$$

где P' — оператор объёмного напряжения, Q' — оператор объёмной деформации, $\sigma(t)$ — тензор средних нормальных напряжений, $\varepsilon(t)$ — тензор средних нормальных деформаций, t — время.

В случае объёмных эффектов (напряжения и деформации сжимаемого материала типа тела КФ) (рис. 1) следует взять операторы [5]

$$P' = 1, \quad Q' = K + (\zeta + 2\eta/3) \frac{\partial}{\partial t}, \quad (3)$$

где K — модуль объёмной упругости, ζ — объёмный коэффициент вязкости, η — сдвиговый коэффициент вязкости.

Используя выражения для параметров пористых материалов [6, 7]

$$K = \frac{4}{3} G_0 \frac{\beta}{1-\beta}, \quad \zeta = \frac{4}{3} \eta_0 \frac{\beta}{1-\beta}, \quad \eta = \eta_0 \beta^2, \quad (4)$$

где G_0 — модуль сдвига сплошного материала во время термического спекания при температуре $T = T_c$, η_0 — сдвиговый коэффициент вязкости сплошного материала, $\beta = 1 - \nu$ — парциальная объёмная

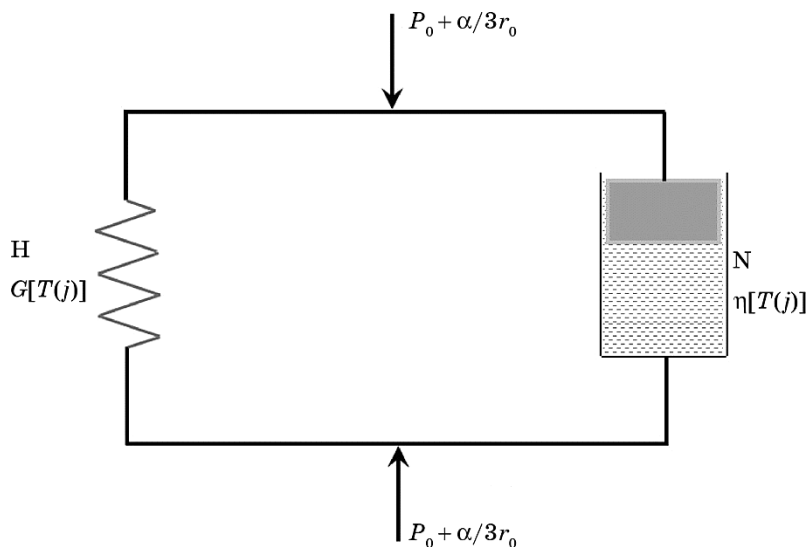


Рис. 1. Реологическая модель тела Кельвина–Фогта, H|N.

Fig. 1. Rheological model of Kelvin–Voigt body.

плотность, иногда применяется термин «относительная плотность» (доля объёма пористого материала, приходящаяся на вещество), ν — пористость, и формулы операторов (3), уравнение (2) можно преобразовать в следующее дифференциальное уравнение, которое является ОУ:

$$\dot{\beta} = -\frac{2G_0}{\eta_0(3-\beta)} - \left(\frac{P_0}{3} + \frac{\alpha}{r_0}\right) \frac{3(1-\beta)}{2\eta_0\beta^2(3-\beta)}. \quad (5)$$

Уравнение (5) можно представить в безразмерных величинах

$$\frac{d\beta}{d\tau} = \frac{-4\beta^3 + 12\beta^2}{4\beta^2 - 3P_G\beta + 3P_G}, \quad (6)$$

где $\tau = tG_0/\eta_0$ (безразмерное время), $P_G = (P_0/3 + \alpha/r_0)/G_0$ (безразмерное механическое напряжение).

В результате интегрирования уравнения (6) получаем ОУ в приведённых величинах в алгебраическом представлении:

$$\tau = -\frac{3(4-P_G)}{4}(\beta - \beta_i) + \frac{\beta^2 - \beta_i^2}{2} - \frac{9(4-P_G)P_G}{32} f(\beta, P_G), \quad (7)$$

где

$$f(\beta, P_G) = \ln \frac{4\beta^2 - 3P_G\beta + 3P_G}{4\beta_i^2 - 3P_G\beta_i + 3P_G} - \frac{4\sqrt{3}(20 - 20P_G + 9P_G^2)}{\sqrt{P_G}(16 - 3P_G)^{3/2}} \times \\ \times \left(\operatorname{arctg} \frac{8\beta - 3P_G}{\sqrt{3(16 - 3P_G)P_G}} - \operatorname{arctg} \frac{8\beta_i - 3P_G}{\sqrt{3(16 - 3P_G)P_G}} \right),$$

β_i — парциальная объёмная плотность в начале электроспекания.

Переход к реальному времени даёт для ОУ

$$t = \frac{\tau\eta_0}{G_0} = \frac{\eta_0}{G_0} \left[-\frac{3(4-P_G)}{4}(\beta - \beta_i) + \frac{\beta^2 - \beta_i^2}{2} - \frac{9(4-P_G)P_G}{32} f(\beta, P_G) \right], \quad (8)$$

Если в момент t_{ei} через компакт, находящийся при температуре $T = T_c$, начинает проходить ток с плотностью j , то компакт будет находиться при повышающейся температуре

$$T = T_c + T_e = T_c + \frac{j^2(t - t_{ei})}{\lambda_0 C \rho_0 \beta^2}, \quad (9)$$

где T_e — «часть» температуры, за которую ответственна электротермия ($\propto j^2$), λ_0 — удельная проводимость сплошного материала в момент $t = t_{ei}$, C — удельная теплоёмкость, ρ_0 — плотность сплошно-

го материала в момент в $t = t_{ei}$.

Самые различные твёрдофазные и жидкие материалы, чаще всего, на повышение температуры реагируют качественно сходным образом: их вязкость и упругость, как правило, понижаются [8–10].

Если учесть понижение сдвиговых вязкости и упругости из-за повышения температуры посредством приближённых линеаризованных зависимостей

$$\eta_e[T(j)] \cong \eta_0[1 - k_{\eta T}T_e(j)], G_e[T(j)] \cong G_0[1 - k_{GT}T_e(j)], \quad (10)$$

где η_0, G_0 — значения этих параметров в момент $t = t_{ei}$, то можно исследовать влияние плотности тока j через $T_e(j)$ на длительность (и тем самым на интенсивность) процесса электроспекания.

Сокращение длительности спекания при неизменности достигаемого значения парциальной плотности β или зависящей от неё функции свидетельствует об интенсификации спекания.

Запишем ОУ (8) для времени $t > t_{ei}$, когда происходит электроспекание при соответствующем повышении температуры, согласно уравнению (9):

$$t_e = t - t_{ei} = \frac{\eta_e[T(j)]}{G_e[T(j)]} f_e(\beta, P_G), \quad (11)$$

где $\eta_e[T(j)] / G_e[T(j)]$ — отношение параметров вязкости (числитель) и упругости (знаменатель) для сплошного материала при $t_e > 0$.

Нас интересует, каким образом влияет плотность тока j на длительность процедуры электроспекания τ_e (т.е. и t_e).

Введём формулы (10) в ОУ (11) и запишем получившееся уравнение в приведённых величинах

$$\tau_e = \frac{1 - k_{\eta T}T_e(j)}{1 - k_{GT}T_e(j)} f_e(\beta, P_G), \quad (12)$$

где $\tau_e = t_e G_0 / \eta_0$.

Главное влияние на τ_e в формуле (12) способна оказывать тенденция, задаваемая дробью $[1 - k_{\eta T}T_e(j)] / [1 - k_{GT}T_e(j)]$. Функция $f_e(\beta, P_G)$ меняется с величиной β в зависимости от времени весьма плавно: обычный интервал для парциальной плотности $0,6 < \beta < 1$. Для исследования влияния величины j на длительность τ_e продифференцируем обе стороны уравнения (12) по j :

$$\frac{\partial \tau_e}{\partial j} = \frac{\partial}{\partial T_e} \left(\frac{1 - k_{\eta T}T_e}{1 - k_{GT}T_e} \right) \frac{\partial}{\partial j} \left(\frac{j^2 t_e}{\lambda_0 C \rho_0 \beta^2} \right) f_e(\beta, P_G) = 2 \frac{(-k_{\eta T} + k_{GT}) j \tau_e \eta_0 f_e(\beta, P_G)}{(1 - k_{GT}T_e)^2 \lambda_0 C \rho_0 \beta^2 G_0}. \quad (13)$$

При неравенстве $k_{\eta T} > k_{GT}$, характерном для различных темпера-

турных интервалов для ряда разнообразных материалов [8–10], при электроспекании вследствие отрицательного значения производной слева в уравнении (13) следует ожидать сокращения времени обработки (τ_e в левой части уравнения (12)), т.е. интенсификации процесса. За это отвечает более резкое понижение вязкости, чем модуля упругости, с ростом j (и тем самым с ростом T_e) в условиях спекания.

Преобразуя уравнение (13), получим формулу, выражающую влияние изменения плотности тока на длительность электроспекания:

$$\frac{\partial \ln \tau_e}{\partial j} \cong 2 \frac{(-k_{\eta T} + k_{GT}) j f_e(\beta, P_G)}{(1 - k_{GT} T_e)^2 \lambda_0 C \rho_0 \beta^2}. \quad (14)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из опубликованных экспериментальных данных по материалам на основе Fe [8, 9] можно найти информацию, позволяющую оценить коэффициенты в формулах (10): $k_{\eta T} \cong 0,00175$, $k_{GT} \cong 0,00072$, откуда

получается влияние множителя $\left. \frac{-k_{\eta T} + k_{GT}}{(1 - k_{GT} \Delta T_e)^2} \right|_{\Delta T_e = 1\text{К}} \cong -0,00103 \text{ К}^{-1}$.

Это число даёт приближённую оценку того влияния, которое окажет повышение температуры на 1 К через электроспекание на сокращение длительности (через величину безразмерного времени) всего процесса.

Благодаря подходу, который предусматривает объективный учёт комплексной природы объектов материаловедения, можно рассчитывать на расширение круга таких объектов теоретического исследования.

Моделирование с привлечением структурных параметров и данных процессов обработки на мезо- и микроуровне (включающих такие понятия, как диффузия, геометрия и физика зёрновой структуры, нетепловые эффекты электромагнитного воздействия) позволяет понять довольно широкий перечень явлений, характерных для электроспекания. Многие из перечисленных факторов лежат в основе тех эффектов, которые учитываются при использованных закономерностях в процессе макрореологического анализа.

В дальнейшем важно предпринять исследования, направленные на учёт температурной зависимости поверхностного натяжения, наличие в объектах сферических пор с разными радиусами и пор несферической формы. Имеет смысл также выяснить, как можно эффективно использовать уже установленные зависимости и факты, связанные с мезо- и микроструктурой объектов электроспекания, причём имеется в виду необходимость объективного учёта физико-механической природы изучаемых материалов.

Привлечение данных исследований процессов, происходящих в спекаемых пористых материалах на мезо- и микроуровнях, имеющих, например, в [11–18], и теоретический подход, конкретно учитывающий комплексную реологическую природу материалов при электроспекании, могут привести к прогрессу, как в понимании, так и в прикладных сферах порошкового материаловедения.

Использованная в данной работе модель тела Кельвина–Фогта может отражать процессы в пористых компактах весьма приближённо. Компакты в реальной практике, оказывается, обладают весьма различными реологическими параметрами, причём даже исходные порошки одного металла (или сплава), но полученные разными способами, в компактах при электроспекании поведут себя отнюдь не одинаково, им присущи разные варианты математического формализма.

Для учёта конкретных особенностей физической природы обрабатываемых объектов целесообразно прибегать при теоретическом анализе к более сложным реологическим моделям. Например, чтобы более адекватно отразить объёмные эффекты (т.е. консолидацию) при обработке компакта можно прибегнуть к модели (рис. 2)

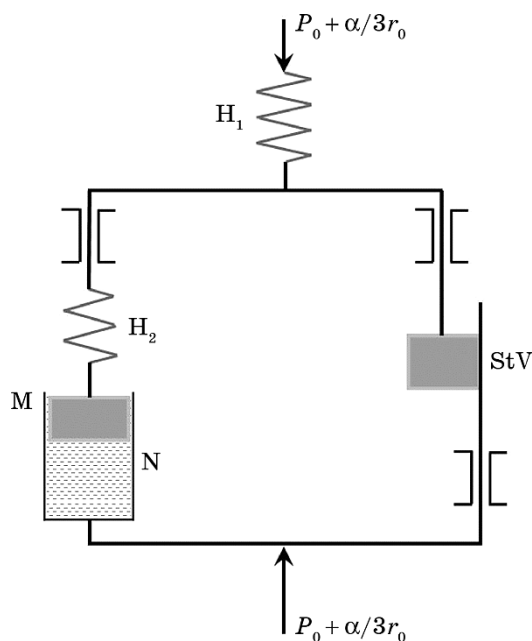


Рис. 2. Реологическая модель тела Шведова. $Shv = H_1 - (M|StV) = H_1 - (H_2 - N|StV)$, M — тело Максвелла.

Fig. 2. Rheological model of Shvedov's body. $Shv = H_1 - (M|StV) = H_1 - (H_2 - N|StV)$, M —Maxwell body.

тела Шведова (Shv). В этом случае для описания его консолидации придётся рассмотреть, по крайней мере, его поведение при двух условиях. При механической нагрузке, меньшей предела текучести, объект поведёт себя, как упругое тело, причём после устранения внешнего давления компакт должен вернуться к начальному объёму («пружина» H_1 распрямится до исходного размера). После превышения механической нагрузкой предела текучести (т.е. при деформации «узла трения» — элемент Сен-Венана (StV)) деформация всего компакта будет определяться как элементом упругости H_1 , так и другим элементом упругости H_2 и «амортизатором» N . После снятия механической нагрузки компакт останется в частично деформированном состоянии (т.е. частично консолидированным).

Проведённый в данной статье реологический анализ следует считать начальным шагом в деле формулирования уравнений, описывающих ход электроспекания пористых металлических и керамических объектов. Модель Шведова, например, может быть несколько упрощена: если убрать из неё элемент Гука H_2 , то получится модель Бингама, на базе которой, как может оказаться, удастся развить приемлемый вариант теории электроспекания каких-либо упруго-вязких материалов.

4. ВЫВОДЫ

1. В работе предложена схема макрореологического вывода основополагающего уравнения электроспекания пористого упруго-вязкого материала, где явно показана роль его вязкости и модуля упругости.
2. Показана роль изменений температурных и электротермических процессов для интенсивности (длительности) хода спекания. Согласно теоретическому анализу, длительность процесса спекания сокращается при возрастании плотности тока преимущественно из-за более резкого понижения вязкости материала компакта, чем понижения модуля упругости, вследствие повышения температуры.

Благодарю О. В. Кушнира за помощь в оформлении.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости* (Москва: Наука: 1965).
2. G. A. Weisler, *Powder Metallurgy International*, **10**, No. 1: 34 (1978).
3. Л. О. Андрущик, Ю. В. Корнюшин, С. П. Ошкадёров, М. Ляшук, Э. Дудрова, М. Кабат, М. Кабатова, М. Шлесар, *Металлофизика*, **13**, № 10: 110 (1991).

4. Т. Алфрей, Е. Ф. Гарни, *Реология* (Ред. Ф. Эйрих) (Москва: Иностранная литература: 1962), с. 459.
5. M. Reyner, *Handbuch der Physik* (Ed. S. Flügge) (Berlin: Springer: 1958), vol. 6, p. 434.
6. J. K. Mackenzie, *Proc. Phys. Soc. B*, **63**, No. 1: 2 (1950).
7. В. В. Скороход, *Реологические основы теории спекания* (Киев: Наукова думка: 1972).
8. П. А. Ребиндер, *Физический энциклопедический словарь* (Москва: Советская Энциклопедия: 1960), т. 1, с. 355.
9. Г. П. Слепцова, *Физический энциклопедический словарь* (Москва: Советская Энциклопедия: 1963), т. 3, с. 273.
10. *Справочник химика* (Ленинград–Москва: Госхимиздат: 1962), т. 1.
11. Ю. В. Корнюшин, *Явления переноса в реальных кристаллах во внешних полях* (Киев: Наукова думка: 1981).
12. К. Е. Белявин, В. В. Мазюк, Д. В. Минько, В. К. Шелег, *Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов* (Минск: Ремико: 1997).
13. M. Omori, *Mater. Sci. Eng. A*, **287**, Iss. 2: 183 (2000).
14. V. Y. Kodash, J. R. Groza, K. C. Cho, B. R. Klotz, and R. J. Dowding, *Mater. Sci. Eng. A*, **385**, Iss. 1–2: 367 (2004).
15. Е. Г. Григорьев, Б. А. Калинин, *Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков* (Москва: МИФИ: 2008).
16. E. Olevsky, S. Kandukuri, and L. Froyen, *J. Appl. Phys.*, **102**: 114913 (2007).
17. Л. О. Андрущик, С. П. Ошкадёров, А. П. Шпак, В. И. Курпас. *Физические основы получения высокопрочных порошковых материалов с помощью скоростной электротермической обработки* (Киев: Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины: 2007).
18. О. Б. Згалаг-Лозинский, *Порошковая металлургия*, № 1/2: 26 (2014).

REFERENCES

1. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Teoreticheskaya Fizika. Vol. 7. Teoriya Uprugosti* (Moscow: Nauka: 1965) (in Russian).
2. G. A. Weissler, *Powder Metallurgy International*, **10**, No. 1: 34 (1978).
3. L. O. Andrushchik, Yu. V. Korniyushin, S. P. Oshkaderov, M. Lyashuk, E. Dudrova, M. Kabat, M. Kabatova, and M. Shlesar, *Metallofizika*, **13**, No. 10: 110 (1991) (in Russian).
4. T. Alfrey and E. F. Garni, *Reologiya* [Rheology] (Ed. F. Eyrikh) (Moscow: Inostrannaya Literatura: 1962), p. 459 (in Russian).
5. M. Reyner, *Handbuch der Physik* (Ed. S. Flügge) (Berlin: Springer: 1958), vol. 6, p. 434.
6. J. K. Mackenzie, *Proc. Phys. Soc. B*, **63**, No. 1: 2 (1950).
7. V. V. Skorokhod, *Reologicheskie Osnovy Teorii Spekaniya* (Kiev: Naukova Dumka: 1972) (in Russian).
8. P. A. Rebinder, *Fizicheskiy Entsiklopedicheskiy Slovar'* (Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya: 1960), vol. 1, p. 355 (in Russian).
9. G. P. Sleptsova, *Fizicheskiy Entsiklopedicheskiy Slovar'* (Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya: 1963), vol. 3, p. 273 (in Russian).

10. *Spravochnik Khimika* (Leningrad–Moscow: Goskhimizdat: 1962), vol. 1 (in Russian).
11. Yu. V. Korniyushin, *Yavleniya Perenosa v Real'nykh Kristallakh vo Vneshnikh Polyakh* (Kiev: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
12. K. E. Belyavin, V. V. Mazyuk, D. V. Min'ko, and V. K. Sheleg, *Teoriya i Praktika Elektroimpul'snogo Spekaniya Poristykh Poroshkovykh Materialov* (Minsk: Remiko: 1997) (in Russian).
13. M. Omori, *Mater. Sci. Eng. A*, **287**, Iss. 2: 183 (2000).
14. V. Y. Kodash, J. R. Groza, K. C. Cho, B. R. Klotz, and R. J. Dowding, *Mater. Sci. Eng. A*, **385**, Iss. 1–2: 367 (2004).
15. E. G. Grigor'ev and B. A. Kalin, *Elektroimpul'snaya Tekhnologiya Formirovaniya Materialov iz Poroshkov* (Moscow: MIFI: 2008) (in Russian).
16. E. Olevsky, S. Kandukuri, and L. Froyen, *J. Appl. Phys.*, **102**: 114913 (2007).
17. L. O. Andrushchik, S. P. Oshkaderov, A. P. Shpak, and V. I. Kurpas, *Fizicheskie Osnovy Polucheniya Vysokoprochnykh Poroshkovykh Materialov s Pomoshch'yu Skorostnoy Elektrotermicheskoy Obrabotki* (Kiev: Physicotechnological Institute of Metals and Alloys, N.A.S. of Ukraine: 2007) (in Russian).
18. O. B. Zgalat-Lozinskiy, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 1/2: 26 (2014) (in Russian).