

УДК 666.233

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В АЛМАЗНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ «КАРБОНАДО»

© 2013 г. **А. И. Лаптев, А. А. Ермолаев, А. В. Ножкина**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва  
ОАО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента»  
(ВНИИАлмаз), г. Москва

**А. И. Лаптев** – докт. техн. наук, вед. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории сверхтвердых материалов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 638-44-64, 638-44-67. E-mail: laptev@isis.ru.

**А. А. Ермолаев** – канд. техн. наук, доцент кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС». E-mail: aerm60@mail.ru.

**А. В. Ножкина** – докт. техн. наук, зав. лабораторией в ОАО «ВНИИАлмаз» (119110, г. Москва, ул. Гиляровского, 65). Тел.: (495) 681-65-34. E-mail: nojkina@inbox.ru.

Методом электронной сканирующей микроскопии проведено изучение структурного строения синтетических алмазов «карбонадо». Установлено, что поверхность «карбонадо» покрыта крупными алмазными кристаллитами, достигающими 200 мкм, имеющими явно выраженную текстуру роста. На поверхности этих кристаллов наблюдали капли металла-катализатора (никеля) субмикрометрового диапазона. Выявлено, что структура синтетического «карбонадо» представляет собой взаимопроникающие каркасы из алмазной и металлокерамической фаз.

**Ключевые слова:** карбонадо, алмазные поликристаллы, связка.

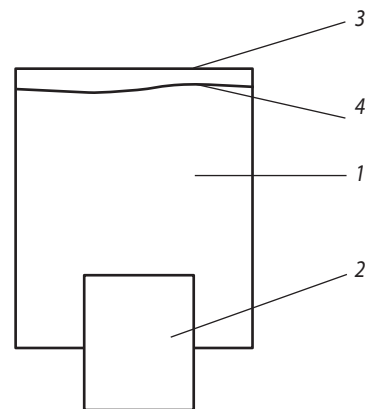
A study of the synthetic «carbonado» structure has been carried out by electron scanning microscopy. It is established that the «carbonado» surface layer contains large diamond crystallites reaching 200  $\mu\text{m}$  and having obviously expressed growing texture. Drops of metal-catalyst (nickel) of a sub-micrometric range are observed on the surface of these crystals. It is discovered that the synthetic «carbonado» structure represents interpenetrating frameworks consisted of diamond and ceramic-metal phases.

**Key words:** carbonado, diamond polycrystals, adhesive.

При изучении синтетических алмазов типа «карбонадо» было установлено, что они представляют собой композиционные материалы [1]. Свойства синтетических «карбонадо» зависят как от количества и свойств алмазной фазы, так и от состава и распределения металлической фазы, играющей роль связки [2]. Полнота превращения графита в алмаз определяется свойствами используемого графита и параметрами синтеза. Повышение давления синтеза приводит к увеличению скорости превращения графита в алмаз, измельчению алмазной фазы и снижению остаточного графита, присутствующего в «карбонадо». При этом алмазные кристаллиты составляют алмазный каркас [1], а металлическая фаза представлена внутрикристаллитными и межкристаллитными включениями, состав которых зависит от состава применяемых сплавов-катализаторов [3]. Межкристаллитные включения пронизывают синтетический «карбонадо» по всему его объему. Это подтверждается косвенными данными по измерению электрического сопротивления «карбонадо» и его зависимостью от количества связки, изменяемой методом химического травления [4].

Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию строения синтетических «карбонадо» с помощью электронного сканирующего микроскопа «Hitachi S-800» при изучении шлифов и сколов «карбонадо» и его несгораемого остатка.

На рис. 1 представлена схема синтетического «карбонадо» и поверхности нанесения шлифов и изломов. Поликристаллы «карбонадо» были синтезированы



**Рис. 1.** Схема синтетического «карбонадо»

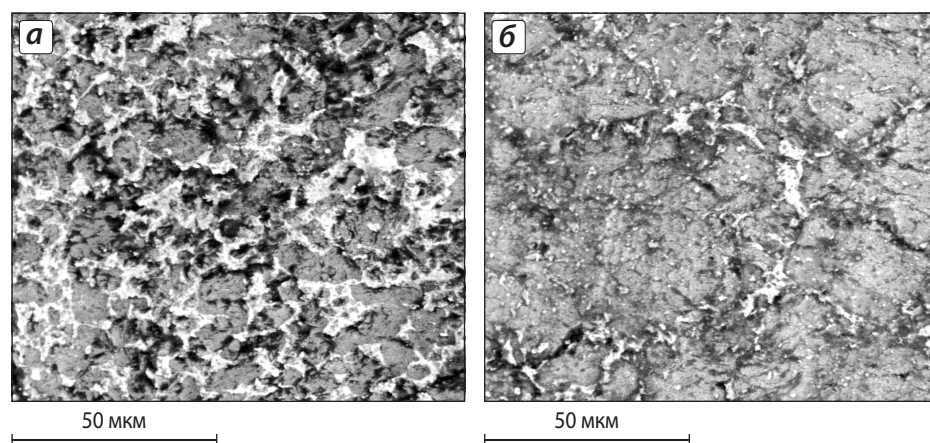
1 – алмазный композит, 2 – сплав-катализатор,  
3 – торцевая поверхность, 4 – приповерхностный скол

при давлении 9,0 ГПа и температуре 2000–2200 К с использованием никеля в качестве металла-катализатора.

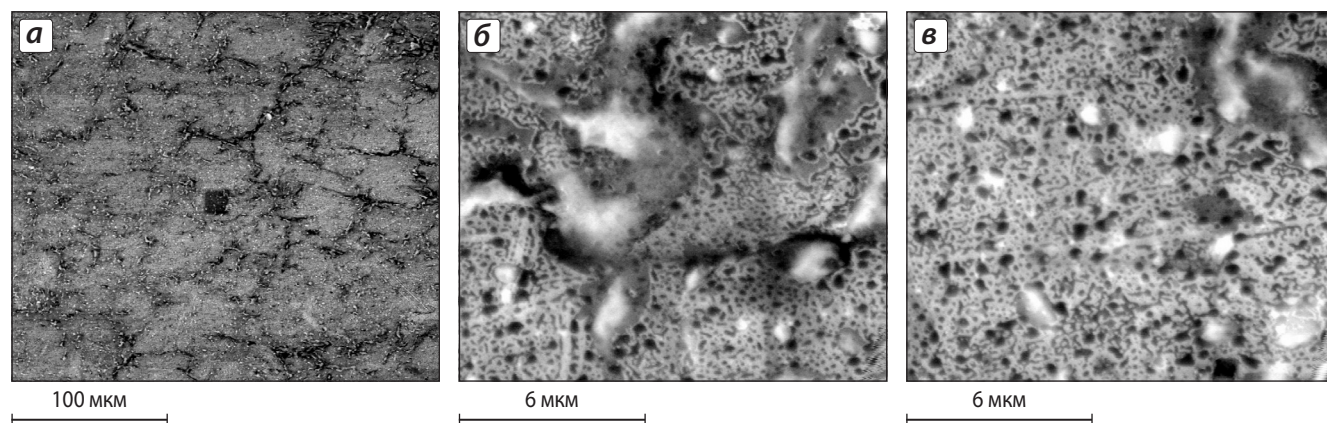
На фотографиях (рис. 2–4) показаны типичные области шлифов «карбонадо» при различных увеличениях. Видно, что шлифы представляют собой неоднородные структуры. Никель распределен между

алмазными кристаллитами, которые также имеют включения Ni (см. рис. 3, б), выпадающие в процессе шлифования и образующие на поверхности алмазного зерна раковины размером в доли микрометра.

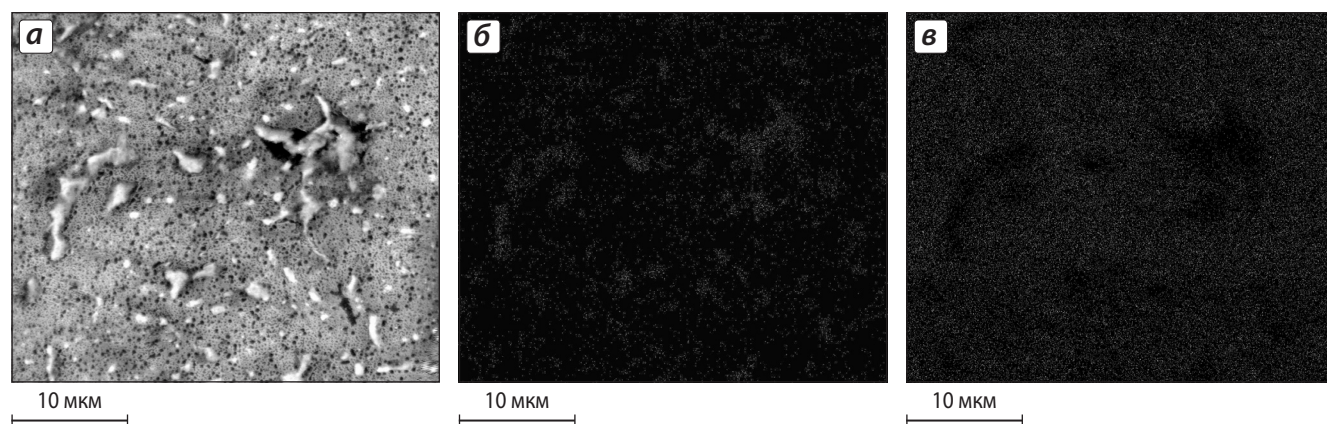
При изучении электропроводности «карбонадо» было установлено, что значительную ее часть составляет поверхностная электропроводность [4].



**Рис. 2.** Шлифы «карбонадо», изготовленные с помощью алмазных кругов



**Рис. 3.** Шлифы «карбонадо», изготовленные с помощью чугуного диска, шаржированного алмазным порошком АСН 5/3



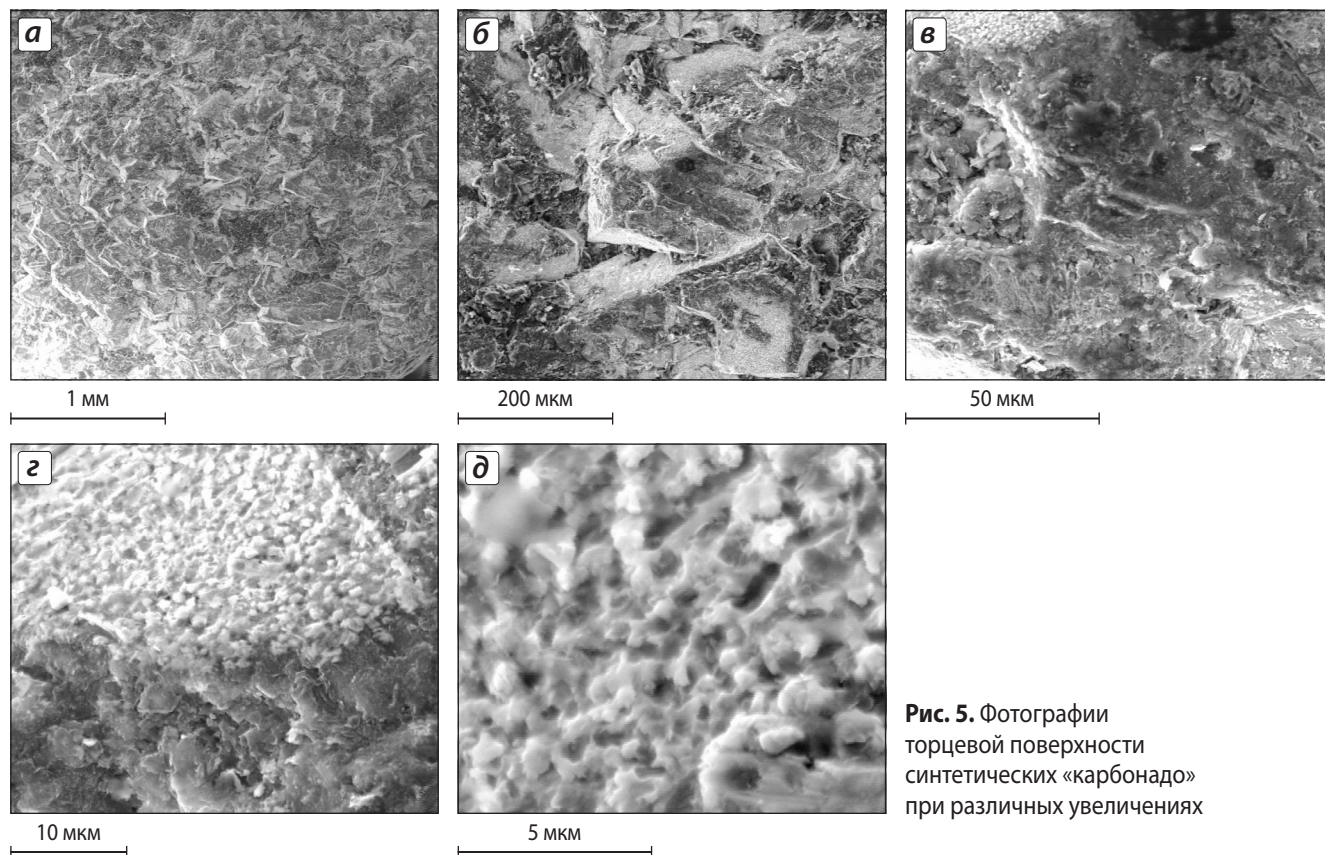
**Рис. 4.** Распределения никеля (б) и углерода (в) на поверхности шлифа (а) синтетического «карбонадо», изготовленного с помощью чугуного диска, шаржированного алмазным порошком АСН 5/3



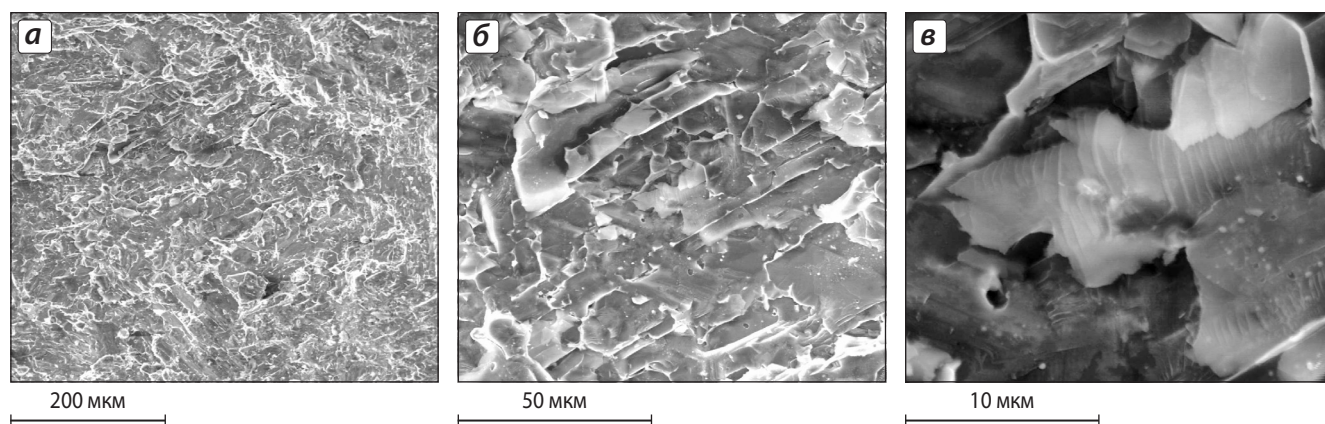
Поэтому было проведено исследование поверхности «карбонадо» (рис. 5), а также поверхности его изломов в приповерхностной зоне (рис. 6), обозначенной на рис. 1.

Анализ фотографий на рис. 5 и 6 показывает, что поверхность синтетических «карбонадо» покрыта крупными алмазными кристаллитами, размер которых достигает 200 мкм (см. рис. 5, а, б). Причем эти кристаллиты имеют ярко выражен-

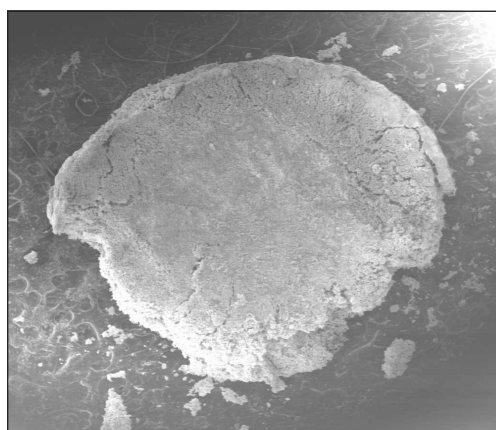
ную кристаллографическую направленность (см. рис. 5, а, б и 6, а, б). Ранее было установлено, что направление роста алмазных кристаллитов зависит от условий синтеза [5]. Поверхность «карбонадо» покрыта затвердевшими каплями никеля (см. рис. 5, з, д). При поверхностном химическом травливании этих никелевых образований происходит резкое увеличение электросопротивления синтетических «карбонадо» [4].



**Рис. 5.** Фотографии торцевой поверхности синтетических «карбонадо» при различных увеличениях



**Рис. 6.** Поверхность скола торцевой части «карбонадо» при разных увеличениях



**Рис. 7.** Диск «карбонадо» после отжига при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  на воздухе

Методом шлифования были изготовлены алмазные диски из надкатализаторной зоны «карбонадо» диаметром 4 мм и высотой 2 мм. Алмазные диски отжигали на воздухе при температуре  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 5 ч с целью удаления алмазной фазы синтетического «карбонадо» и определения несгораемого остатка. После проведения отжига и

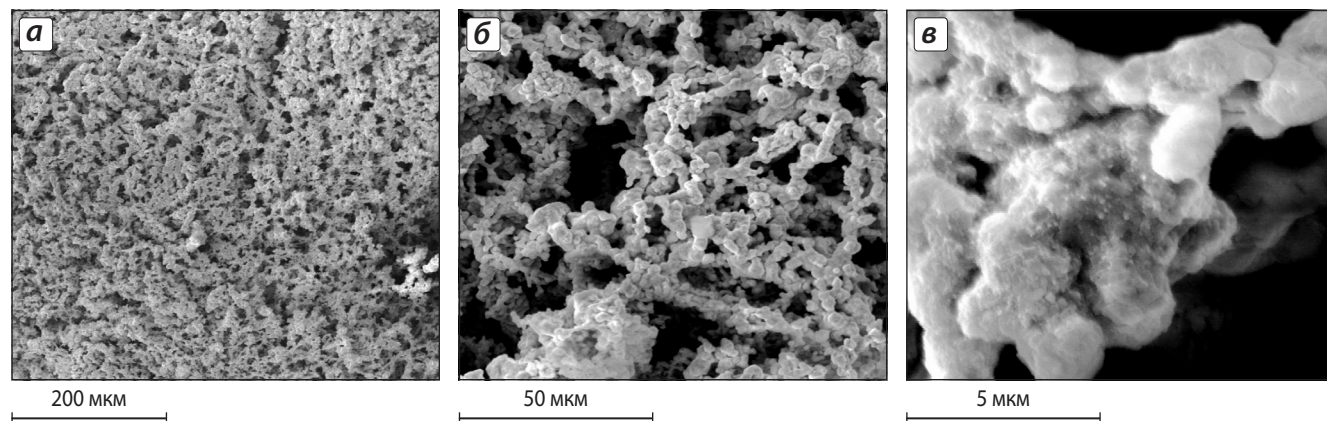
выгорания алмаза исходный диск не изменил свои форму и размеры (рис. 7).

В процессе металлографического анализа несгораемого остатка было установлено, что он представляет собой высокопористую ватообразную массу, которая легко разрушается при малейшем прикосновении (рис. 8).

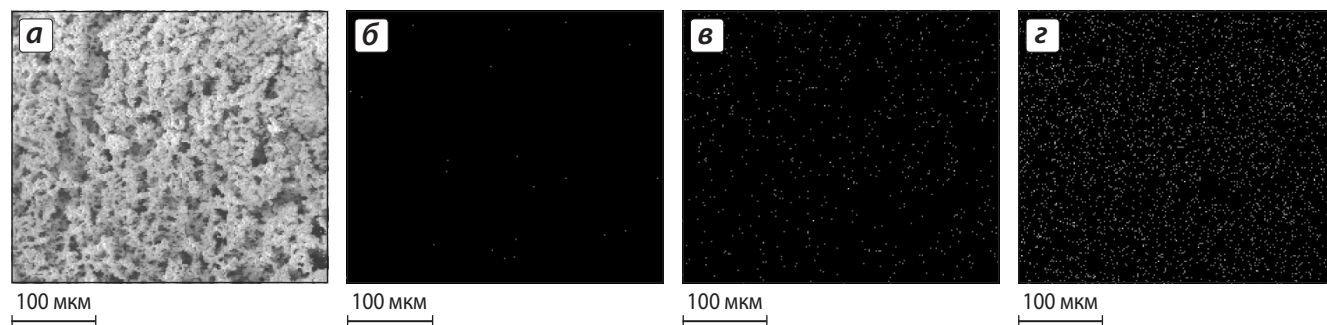
Распределение химических элементов по поверхности несгораемого остатка представлено на рис. 9. Из него следует, что несгораемый остаток состоит из оксидов никеля при незначительном содержании остаточного углерода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных металлографических исследований можно заключить, что структура синтетического «карбонадо» представляет собой взаимопроникающие каркасы из алмазной и металлокерамической фаз и определяет экстремально высокие значения его твердости и износостойкости. Размеры кристаллитов алмазной и металлокерамической фаз «карбонадо» зависят от термодинамических параметров синтеза.



**Рис. 8.** Фотографии несгораемого остатка после отжига «карбонадо»



**Рис. 9.** Распределение углерода (б), кислорода (в) и никеля (з) по поверхности несгораемого остатка (а) после отжига синтетического «карбонадо»



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ножкина А. В., Лаптев А. И., Ермолаев А. А. // Сверхтв. материалы. 2002. № 5. С. 36.
2. Ножкина А. В., Ермолаев А. А., Лаптев А. И. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления: Сб. науч. тр. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006. Вып. 9. С. 175.
3. Ермолаев А. А., Лаптев А. И., Поляков В. П. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2000. № 2. С. 62.
4. Понизовский Л. З., Боброва Е. М., Лихтер А. И. // Алмазы и сверхтв. материалы. 1974. Вып. 8. С. 1.
5. Ножкина А. В., Лаптев А. И., Салимон А. И. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Тез. докл. V Междунар. конф. (Крым, п. Морское, 21–27 сент. 2002 г.). Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2002. С. 25.

УДК 621.762

## ВАРИАНТ КONTИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Сообщение 2. Экспериментальная проверка

© 2013 г. **А. Ф. Федотов**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

**А. Ф. Федотов** – докт. техн. наук, профессор кафедры механики СамГТУ  
(443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). Тел.: (846) 332-42-33. E-mail: a.fedotov50@mail.ru.

Выполнена экспериментальная проверка континуальной модели горячего деформирования пористых порошковых материалов, учитывающей неоднородный характер вязкого течения твердой фазы. Описана методика идентификации феноменологических параметров ползучести для твердой фазы порошковых материалов. Показано, что в зависимости от температурно-силового режима деформирования реализуется тот или иной механизм вязкого течения частиц твердой фазы. В отличие от литых материалов процесс ползучести порошковых материалов, наряду с объемной и граничной диффузией, может контролироваться и поверхностной диффузией. При одинаковом механизме ползучести предлагаемая континуальная модель позволяет для порошковых материалов напрямую использовать феноменологические константы литых материалов.

**Ключевые слова:** пористый материал, горячее деформирование, феноменологические константы, кривые уплотнения.

Considering the non-uniform character of viscous flow of hard phase, the continual model of hot deformation of porous powder materials has been checked. The procedure of the phenomenological creep parameter identification for the hard phase of powder materials is described. A particular mechanism of viscous flow of hard phase particles is shown to be realized depending on temperature-force strain conditions. Unlike the cast materials the powder material creep process, alongside with volume and boundary diffusion, can be controlled by superficial diffusion as well. In case of the same creep mechanism, the offered continual model allows us to use for powder materials directly the phenomenological constants of cast materials.

**Key words:** porous material, hot deformation, phenomenological constants, sealing curves.

В работе [1] предложен вариант континуальной модели пористых материалов, учитывающей неоднородный характер вязкого деформирования твердой фазы. Определяющие соотношения имеют следующий вид:

$$\sigma_{ij} = \frac{2\sigma_{i0}}{3\dot{\epsilon}_{i0}} \left[ \left( \psi - \frac{1}{3}\phi \right) e \delta_{ij} + \phi e_{ij} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $e_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $e$  – скорость объемной деформации;  $\delta_{ij}$  – единичный тензор Кронекера;  $\sigma_{i0}$ ,  $\dot{\epsilon}_{i0}$  – соответственно эквивалентные напряжения и скорость деформации в твердой фазе;  $\phi$ ,  $\psi$  – функции пористости (или относительной плотности  $\rho$ ). Микроскопическая эквивалентная скорость деформации в твердой фазе  $\dot{\epsilon}_{i0}$  связа-

на с макроскопическими параметрами деформированного состояния пористого тела следующей зависимостью:

$$\dot{\epsilon}_{i0} = \frac{1}{\sqrt{3}\alpha} \sqrt{2\psi e^2 + \phi H^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – доля эффективного объема осреднения микроскопических напряжений и деформаций;  $H$  – интенсивность макроскопических скоростей деформации сдвига. В случае степенного закона вязкого течения используется одночленная степенная аппроксимация:

$$\dot{\epsilon}_{i0} = A \sigma_{i0}^n. \quad (3)$$

При законе течения (3) и соотношении (2) для определяющих соотношений (1) получим