

Features of Elastoplastic Deformation Powder Composites of the "Iron Cast" Type

A.T. Mamedov, M.Ch. Huseynov, B.B. Musurzaeva, A.A. Jafarova

Azerbaijan Technical University (H. Javid ave. 25, Baku, AZ 1073, Azerbaijan)

For correspondence:

Mamedov Arif / e-mail: ariff-1947@mail.ru

Abstract

The features of deformation of a powder system consisting of plastic (iron) and elastic (cast iron) particles are considered. To solve the problem of deformation of such a system, the model of continuum mechanics is taken as a basis, although after compaction of a powder medium, it consists of a matrix and pores, which is called a powder or porous medium. In this case, to apply the principle of continuum, the region of space is subdivided into small subregions corresponding to the size of the powder particles. The considered mathematical problem makes it possible to solve the technological problems of pressing the axis of symmetrical products with height transitions.

Keywords: elastoplastic medium, iron, cast iron, discrete character, mathematical model.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_03_71_79

Received 27.01.2023

Revised 18.09.2023

Accepted 20.09.2023

For citation:

Mamedov A.T., Huseynov M.Ch., Musurzaeva B.B., Jafarova A.A.

[Features of Elastoplastic Deformation Powder Composites of the "Iron Cast" Type]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 71-79 (in Russian)

“Dəmirçuqun” tip ovuntu kompozitlərinin elastikiplastiki deformasiyasının xüsusiyyətləri

A.T. Məmmədov, M.Ç. Hüseynov, B.B. Musurzayeva, A.A. Cəfərova

Azərbaycan Texniki Universiteti (H. Cavid pr. 25, Bakı, AZ 1073, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Məmmədov Arif / e-mail: ariff-1947@mail.ru

Xülasə

Məqalədə, plastiki (dəmir) və elastiki (çuqun) hissəciklərdən ibarət olan ovuntu sisteminin deformasiyasının xüsusiyyətlərinə baxılıb. Belə sistemin defromasiya məsələsinin həlli üçün əsas kimi kontinium mexanikasının modeli qəbul olunmuşdur. Baxmayaraq ki, ovuntu mühitinin sıxlaşdırılmasından sonra bu mühit matrisdən və məsamələrdən ibarət olub, ovuntu və ya məsaməli mühit adlanır. Bu halda kontinium prinsipinin tətbiqi üçün ovuntu hissəciklərinin ölçülərinə uyğun olaraq fəza sahəsi kiçik sahəaltılara bölünmüşdür. Baxılmış riyazi həll hündürlüyünə görə keçidlərə malik olan oxa simmetrik məmulların texnoloji problemlərini həll etməyə imkan verir.

Açar sözlər: elastiki-plastiki mühit, dəmir, çuqun, diskret xarakter, riyazi model.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_03_71_79

УДК 621.762.4

Особенности упругопластического деформирования порошковых композитов типа «железочугун»

A.T. Мамедов, М.Ч. Гусейнов, Б.Б. Мусурзаева, А.А. Джафарова

Азербайджанский технический университет (пр. Г. Джавида, 25, Баку, AZ 1073, Азербайджан)

Для переписки:

Мамедов Ариф /e-mail: ariff-1947@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются особенности деформирования порошковой системы, состоящей из пластичной (железо) и упругой (чугун) частиц. Для решения задачи деформирования такой системы за основу взята модель механики континуума, хотя после уплотнения порошковой среды она состоит из матрицы и пор, которая называется порошковой или пористой средой. При этом для применения принципа континуума область пространства подразделена на малые подобласти, соответствующие размерам частиц порошков. Рассмотренная математическая задача позволяет решить технологические проблемы прессования осесимметричных, имеющих по высоте переходы изделий.

Ключевые слова: упругопластичная среда, железо, чугун, дискретный характер, математическая модель.

Введение

Интенсивное проникновение идей и методов механики континуума характеризует современное состояние теории прессования порошковых композитов и дисперсных смесей. Идентичность многих вопросов прессования порошковых композитов и обработки металлов давлением позволяет обобщить многие новые проблемы и теоретические выкладки в этой области.

Между тем в связи с дискретным характером порошковых матриц и пористых тел и главным образом их способностью обратимо изменять свой объем континуальное описание этих вопросов обладает рядом особенностей.

Гипотезу сплошности используют при объяснении любой модели континуума. Исходя из этого, можно полагать, что частица среды - элементный носитель ее свойств находится в любом участке области пространства, заполненной данной средой.

В связи с тем, что в порошковой среде или каркасе пористого тела находятся как порошковые частицы, так и поры, возникает следующий вопрос: следует ли под понятием сплошности порошковой среды подразумевать сочетание порошкового тела и пор? Если применить к этим материалам известные понятия многофазных систем [1, 2], может быть сформулирован ответ на данный вопрос следующим образом: под частицей среды следует понимать область пространства, размеры которой меньше образца в целом и в то же время значительно превышают размеры отдельных частиц порошка, пор или расстояние между ними. Объединение таких областей назовем порошковой, или пористой средой. При применении принципа континуума об-

ласть пространства, в которой находится изучаемая среда, подразделяют на малые подобласти, величина которых совпадает с размерами частиц среды. Сами подобласти отождествляют с точками пространства, заполненного средой.

По упомянутым малым областям осуществляют с использованием операций осреднения (размазывания) предельный переход, связанный с определением кинематических, динамических и термических параметров, характеризующих состояние данной упругопластичной среды [3].

Методы холодного прессования со взаимным перемещением пресс-элементов получили широкое применение в порошковой металлургии при изготовлении композитных заготовок относительно сложной конфигурации. Схему прессования определяет установленный вид законов движения пресс-элементов. Теоретически недостаточно изучено влияние схемы прессования на распределение основных характеристик формируемого изделия в его объеме. Невозможно учитывать должным образом схему прессования при холодном формовании существующими методами исследования напряжений и плотностей.

В работе [4] предполагается описание в рамках представлений механики континуума поведения компактируемого металлического порошка или порошковой смеси. Принимаются общеизвестные следующие допущения:

- во все моменты времени материал изотропен;
- эффекты, приводящие к несимметрии тензора напряжений при деформировании, отсутствуют;
- между характеристиками и состоянием среды в локальной форме могут быть

описаны реологические свойства материала;

- впоследствии можно пренебречь инерционными эффектами.

На опыте использования в механике грунтов и сыпучих сред основаны первые три допущения [5]. Когда скорости приложения нагрузки небольшие, последнее допущение характерно для процесса компактирования.

Экспериментально обоснованное предположение представляет основу используемой модели сплошной среды. Это предположение говорит о том, что прессуемое в указанных условиях вещество является пластически упрочняющимся. Как добавка в шихту твердой частицы (порошок чугуна) упрочнение порошка железа, так и изменение пористости обуславливают упрочнение порошкового композита в целом.

Однозначно связаны между собой три вида упрочнения при монотонном нагружении. При этом исходные параметры порошка чугуна и значение пористости в текущий момент деформирования принимаются в качестве параметров упрочнения.

Целью данной статьи является построение на основе математической модели холодного прессования упругопластичной порошковой среды с учетом зависимости осевого и бокового давлений от пористости заготовки.

Модель упрочнения композита. Из общих закономерностей механики упрочняющейся пластическим деформированием модели композита, состоящего из порошковых частиц железа, чугуна и пор (рисунок) следует то, что в данном случае между пористостью и компонентами тензора

напряжений имеется соотношение, которое может быть названо в дальнейшем условием упрочнения [6]. На основании допущения об изотропии материала в этом условии содержатся инварианты тензора и дивiator напряжений, и оно имеет вид:

$$f(q_1, q_2, \theta) = 0, \quad (1)$$

где $q_1 = \sigma_{ij} \delta_{ij}, \quad (2)$

$$q_2^2 = \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} q_1 \delta_{ij} \right) \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} q_1 \delta_{ij} \right), \quad (3)$$

σ_{ij} – тензор напряжений, σ_{ij} – тензор деформаций, θ – пористость.

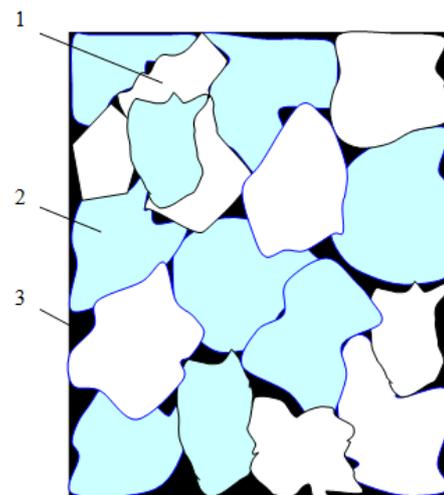


Рисунок – Модель структуры упругопластичного композита железочугун: 1 - железная матрица; 2 - чугун-наполнитель; 3 - пора

Figure – Model of the structure of an elastic-plastic composite iron-cast iron: 1- iron matrix; 2- cast iron filler; 3- time

Методы описания изменения механических свойств металлических порошков и смесей показывает, что функции f соответствует поверхность нагружения в изображающем пространстве тензора напряжений, которая является выпуклой, закрытой и имеет особенность, например ребра, либо может быть гладкой. В последнем случае

деформирование аналитически выражается выполнением двух следующих условий и происходит на ребре кусочно-гладкой поверхности.

$$\varphi(q_1, q_2, \theta) = 0, \quad (4)$$

$$\psi(q_1, q_2, \theta) = 0, \quad (5)$$

где φ и ψ - гладкие функции своих аргументов.

Нами рассмотрены схемы формирования осесимметричной задачи в цилиндрических координатах. В текущий момент деформирования рассматривается напряженно-деформированное состояние, и поэтому целесообразнее использование представления Эйлера.

В общем случае основная группа уравнений:

- уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{d\tau_{rz}}{dz} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0, \quad (7)$$

- уравнение неразрывности

$$\frac{d\varrho_z}{dz} + \frac{d\varrho_r}{dr} + \frac{\varrho_r}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (8)$$

Компоненты тензора напряжений, которые определяются геометрическими соотношениями:

$$e_r = \frac{d\varrho_r}{dr}, \quad (9)$$

$$e_z = \frac{d\varrho_z}{dz}, \quad (10)$$

$$e_\varphi = \frac{\varrho_r}{r}, \quad (11)$$

$$2e_{rz} = \frac{d\varrho_z}{dr} + \frac{d\varrho_r}{dz}, \quad (12)$$

По формуле [7] определяется связь между пористостью и плотностью:

$$\rho = \rho_k(1 - \theta), \quad (13)$$

где ρ_k - плотность материала порошка.

К записанной системе уравнений в случае гладкой поверхности добавляется уравнение (1), а система уравнений (2) добавляется в случае кусочно-гладкой поверхности.

Соотношения ассоциированного закона скорости деформаций связаны с напряжениями, для гладкой поверхности нагружения это имеет следующий вид:

$$e_{ij} = \mu \frac{df}{d\sigma_{ij}}, \quad (14)$$

(e_{ij} - тензор скоростей деформаций), а для кусочно-гладкой принимается в форме:

$$e_{ij} = \nu \frac{d\varphi}{d\sigma_{ij}} + x \frac{d\psi}{d\sigma_{ij}}, \quad (15)$$

где μ, ν, x - множители Лагранжа.

К двум группам соотношений приводят в координатной форме уравнения. Эти соотношения являются скоростями девиаторов напряжений и скоростей деформаций, которые для обоих указанных видов поверхностей нагружения являются одинаковыми

$$\frac{\sigma_z - \frac{1}{3}q_1}{e_z - \frac{1}{3}e} = \frac{\sigma_r - \frac{1}{3}q_1}{e_r - \frac{1}{3}e}, \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_r - \frac{1}{3}q_1}{e_r - \frac{1}{3}e} = \frac{\sigma_\varphi - \frac{1}{3}q_1}{e_\varphi - \frac{1}{3}e}, \quad (17)$$

$$\frac{\sigma_r - \frac{1}{3}q_1}{e_r - \frac{1}{3}e} = \frac{\tau_{rz}}{e_{rz}}, \quad (18)$$

В случае гладкой поверхности эти соотношения приводят к скалярному равенству:

$$\frac{1}{3}e \frac{df}{dq_2} = \gamma \frac{df}{dq_1}, \quad (19)$$

где

$$e_{ij} \delta_{ij} = e_i; \quad \gamma^2 = \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij} \right) \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij} \right) \quad (20)$$

В случае гладкой поверхности нагружения дальнейшая конкретизация механической модели связана с заданием конкретного вида функции f , а в случае кусочно-гладкой поверхности она связана с заданием явного вида функций ϕ и ψ . Однако в осуществлении экспериментальной программы по определению величин указанных функций имеются значительные трудности, связанные со спецификой прочностных свойств пористых порошковых композитов.

В работах [8-11] указан путь решения задачи, требующей только знания зависимостей осевого и бокового давлений как функций пористости.

Для установления вида граничных условий необходимы постановка и решение конкретных задач в рамках представленной модели. Характер взаимодействий внутренней поверхности рабочих элементов пресс-формы с поверхностью прессуемого тела, а также геометрические особенности прессуемой заготовки должны отражаться в этих условиях. Для втулки внутреннего радиуса a , наружного радиуса b и конечной высоты h установлен вид этих условий.

Взяв в качестве основных координат плоскость нижнего пуансона ($z = 0$) и полагая, что он не деформируемый, получаем:

$$v_z \Big|_{z=h} = 0, \quad (21)$$

Предполагаем также, что верхний пуансон ($z = h$) также не деформируемый.

$$\frac{dv_z}{dr} \Big|_{z=h} = 0. \quad (22)$$

Одновременно предполагается, что по сравнению с величиной осевой деформации этих элементов такая деформация весьма мала и является упругой.

$$u_r \Big|_{r=a} = u_r \Big|_{r=b} = 0. \quad (23)$$

Тогда наружные боковые поверхности матрицы ($p = b$) и внутреннего стержня ($p = a$) можно отнести к поверхностям трения. В соответствии с формулой Кулона (закон внешнего трения) можно записать:

$$|\tau_{rz}| \Big|_{r=a} = -\lambda \sigma_r \Big|_{r=a}; \quad (24)$$

$$|\tau_{rz}| \Big|_{r=b} = \lambda \sigma_r \Big|_{r=b}, \quad (25)$$

где λ - коэффициент внешнего трения порошка с боковыми стенками матрицы и стержня.

Схемы прессования, используемые на практике, характеризуются взаимным перемещением относительно друг друга пресс-формы наружной матрицы и внутреннего стержня.

Принятие во внимание закона взаимного смещения указанных выше элементов позволяет уточнить соотношения (24) и (25).

Перемещение пресс-элементов в направлении, совпадающем с верхним пуансоном и не превосходящем его перемещение по абсолютной величине, применяемые на практике законы движения пресс-элементов соответствуют вышеуказанным, поэтому такой выбор перемещения не ограничивает общность.

На поле смещений на границе «прессуемое тело – поверхность матрицы» смещение верхнего пуансона равно W_1 , а матрицы – W_2 .

Компонента смещения на этой границе

$$|W_2| \leq |W_1|. \quad (26)$$

$u_z|_{r=h}$, являющаяся функцией Z не нулевой, будет непрерывно изменяться от нуля на нижнем пуансоне до W_1 на верхнем. В связи с отсутствием разрывов сплошности, а также больших градиентов рассмотренной величины $u_z|_{r=b}$ по Z , свойственных прессованию при значительных скоростях приложения нагрузки, можно предположить, что эта функция монотонна. Эта монотонная непрерывная функция изменяется в пределах

$$0 \leq |u_z|_{r=b} \leq |W_1|. \quad (27)$$

В соответствии с промежуточным значением находится значение z_6 , принадлежащее промежутку $[0, h]$, когда

$$u_z|_{r=b}(z_6) = W_2.$$

Образующаяся координатой z_6 матрица разбивается на две составляющие: $0 \leq Z < Z_b$ и $Z_b < Z \leq h$.

На первом участке в соответствии с (26) будет иметь место неравенство:

$$|u_z|_{r=b} \leq |W_2|, \quad \text{при } 0 \leq Z < Z_b,$$

а на втором 1

$$|u_z|_{r=b} \geq |W_2|, \quad \text{при } Z_b < Z \leq h.$$

Эти два неравенства означают следующее:

- при $0 \leq Z < Z_b$, т.е. на первом участке, порошок движется медленнее наружной матрицы;

- при $Z_b < Z \leq h$ он движется быстрее.

Это суждение справедливо также для внутреннего стержня. Соответствующую точку на его поверхности обозначим как z_a .

Указанная трактовка специфических свойств кинематического поля на поверхностях трения имеет видимые следствия.

Рассмотрим часть поверхности порошка, движущуюся быстрее наружной поверхности матрицы.

Касательное трение порошка в этом случае о стенки матрицы препятствуют его движению в направлении движения верхнего пуансона. Для части поверхности порошка, движущегося медленнее боковых стенок матрицы, внешнее трение будет способствовать передвижению порошка, касательное усилие же будет противоположно по знаку относительно случая, рассмотренного выше [12].

С учетом этого пограничные условия (24) и (25) могут быть конкретизированы следующим образом:

$$\tau_{rz}|_{r=b} = \begin{cases} \lambda \sigma_r|_{r=b} & \text{при } Z_b < Z \leq h; \\ 0 & \text{при } Z = Z_b; \\ -\lambda \sigma_r|_{r=b} & \text{при } 0 \leq Z \leq Z_b; \end{cases} \quad (28)$$

$$\tau_{rz}|_{r=a} = \begin{cases} -\lambda \sigma_r|_{r=a} & \text{при } Z_a < Z \leq h; \\ 0 & \text{при } Z = Z_a; \\ \lambda \sigma_r|_{r=a} & \text{при } 0 \leq Z \leq Z_a; \end{cases} \quad (29)$$

Граничные условия (21) и (22) задаются способами, включающими два независимых параметра z_a и z_6 . Оба эти пара-

метра, как объяснялось выше, характеризуют законы движения боковых пресс-элементов. Законы движения, в свою очередь, определяют схему прессования. Иначе говоря, предложенный способ задания граничных условий учитывает схему прессования.

Кроме граничных условий, необходимо учитывать факторы, воздействующие на процесс уплотнения порошка. При учете давления этим фактором служит равенство среднего напряжения на верхнем пуансоне. Это условие записывается следующим образом:

$$\frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b \sigma_z|_{z=h} z dz = \rho. \quad (30)$$

При прессовании до упора величину перемещения верхнего пуансона следует приравнять величине смещения верхнего слоя порошка:

$$u_z|_{z=h} = W_1. \quad (31)$$

Задание условий (30) и (31) требует наличие величин P и W_1 . На практике эти величины неизвестны, поэтому они определяются из решения поставленной задачи. В этом качестве задаваемой величиной служит конечная средняя пористость. Она характеризует конечный результат процесса прессования и выражается следующим образом:

$$\theta_{cp} = \frac{2}{h(b^2 - a^2)} \int_0^h \int_a^b \theta_r dr dz, \quad (32)$$

где θ_{cp} – среднее значение пористости после прессования.

При заданных условиях (21), (23), (28), (29) и (32), решая уравнения (28), (29) и (32) и определив распределение всех не-

известных величин (в том числе σ и u_z), находим значения P и W_1 .

В связи с вышеизложенным можно утверждать, что при решении поставленной математической задачи одновременно решается и технологическая проблема для прессуемого по указанной схеме изделия по конечным средней пористости и размерам. Можно определить требуемое усилие прессования, ход пуансона и распределение остаточной пористости.

Однако указанный выше метод исследования применим для осесимметричных, имеющих переходы по высоте изделий. Для этого на частях поверхностях, параллельных основанию, задаются граничные условия в соответствии с (23), а на поверхности основания - условия в соответствии с (15) и (22). Боковые поверхности характеризуются условиями (28) и (29).

Заключение

В рамках предложенной модели механики континуума может быть решена следующая задача: по необходимым конечным размерам втулки, ее конечной средней по объему пористости и данной схеме прессования можно вычислить распределение остаточной пористости и напряжений в объеме изделия из порошкового композита

Решение краевой задачи процесса холодного прессования не зависит от вида поверхности нагружения. Оно определяется зависимостями осевого и бокового давления от пористости.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

REFERENCES

1. **Nigmatulin R.I.** Osnovy mekhaniki geterofaznyh sred. M.: *Nauka*, 1998. 336 s. (in Russian)
2. **Lomakin V.A.** Sticheskie zadachi mekhaniki tverdogo deformiruemogo tela. M.: *Nauka*, 1990. 106s. (in Russian)
3. **Bahvalov N.S.** Osrednenie nelinejnyh uravnenij s chastnymi proizvodnymi s bystro oscilliruyushchimi koefficientami. - Dokl. AN SSSR, 1985, 221, №3. S.80-84. (in Russian)
4. **Shtern M.B. i dr.** Vliyanie skhemy pressovaniya na napryazhenno - deformirovanie so-stoyanie izdelij tipa vtulok // *Poroshkovaya metallurgiya*, 1998, № 3. S.1-7. (in Russian)
5. **Ivlev D.D., Bykovcev G.I.** Teoriya plastichnosti uprochnyayushchegosya tela. M.: *Nauka*, 1991. 231s. (in Russian)
6. **Boginskij L.S., Zhdanovich G.M., Yakubovskij Ch.A.** Pressovanie metallicheskih po-roshkov metodom podvizhnoj igly // *Poroshkovaya metallurgiya*. 1996. №6. S.14-20. (in Russian)
7. **Skorohod V.V.** Reologicheskie osnovy teorii spekaniya. Kiev: «*Naukova dumka*», 1992. 152s. (in Ukrainian)
8. **Shtern M.B. i dr.** Metody rascheta raspredelenij napryazhenij i poristosti // *Po-roshkovaya metallurgiya*. 1988. №3. S.25-30. (in Russian)
9. **Rodomyselskij I.D., Serdyuk G.G., Kovalev Yu.I.** Issledovanie velichiny koefficienta bokovogo davleniya pri pressovanii zheleznyh sporoshkov // *Poroshkovaya metallurgiya*. 1986. №9. S.6-10. (in Russian)
10. **Məmmədov A.T., Rüstəmovə S.M.** Dəmir əsaslı məsaməli cisimlərin plastiklik hipotezasının eksperimental yoxlanması: *Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuələri*, 2016, cild 18, №4, s.72-79. (in Azerbaijani)
11. **Mamedov A.T., Mamedov V.A.** Phenomenological approach to the plastic deformation of metallic powders in confined cavity: *AMEA-nın Xəbərləri*, 2012, №1(9), c.67-72. (in Azerbaijani)
12. **İbrahimov N.Y., Məmmədəliyev R.M., Bayramov X.B.** Lazer qurğusunda sığyrtmə sığpərgnən səthəgnə metal ovuntu örtüyünün çəkglmə texnologgyasi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının xəbərləri*, cild 12, №1, Bakı, 2020. s.38-42. (in Azerbaijani)