

## МЕХАНИЗМ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ МЕДНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, А. Н. Рыхлик

Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь,  
e-mail: lerakor1974@mail.ru

Поступила 25.07.2019 г.

*Разработан механизм деформационного уплотнения медных кабельных отходов. Определены внутренние структурные характеристики фильтрующих волоконных материалов, полученных из медных кабельных отходов: координационное число  $Z$ , межконтактное расстояние  $l_p$ , количество контактов  $N$ .*

**Введение.** Ранее нами было установлено [1], что медные кабельные отходы (МКО) являются объектами волоконного строения и могут быть использованы для изготовления фильтрующих волоконных материалов (ФВМ). Отличительной особенностью МКО от медных волокон, является присутствие в них наряду с дискретными элементами волоконного строения с близкими значениями диаметров и различными длинами, волоконных элементов меньшего диаметра в виде крючков и свертывшей [1]. Такой дисперсный состав МКО может существенно повлиять на характер их уплотнения при изготовлении ФВМ.

Известно [2], что процесс уплотнения порошковых материалов принято разделять на три стадии. Данный процесс описывается следующим образом. Уплотнение начинается за счет деформации пористого каркаса, образованного при засыпке порошка в пресс-форму. Когда нагрузка создает напряжения, превышающие предел прочности каркаса, наблюдается перемещение частиц и их переупаковка. Эта первая стадия уплотнения характеризуется лишь структурной деформацией частиц в порошковой засыпке. На второй стадии происходит пластическая деформация в приконтактных зонах и не затрагивает изменение формы частиц порошка. Третья стадия характеризуется существенной деформацией частиц за счет истечения материала порошка в поры и значительным уменьшением пористости заготовки.

Однако указанные стадии в реальных процессах уплотнения для различных дисперсных

материалов не имеют четких границ, «перекрывают» друг друга или разделяются на подстадии. Так, авторами [3, 4] показано, что при прессовании в стальной закрытой пресс-форме механической смеси композиции «железный порошок – жидкость» процесс уплотнения протекает в 5 стадий: компактирование; упругопластическое уплотнение; пластическое деформирование; локальное кавитационное разрушение; «скелетное» схлопывание дефектов.

Механизм деформационного уплотнения при горячем прессовании чугунной стружки [5] включает в себя 6 стадий: свободное перемещение; вращение и скольжение структурных элементов относительно друг друга; заклинивание; упругопластическое сжатие; интенсивное хрупкое разрушение с образованием конгломерата; пластическая деформация в условиях всестороннего сжатия.

При получении порошковых фильтрующих материалов, как правило, процесс характеризуется протеканием лишь двух первых стадий уплотнения, при которых еще не происходит образования закрытых пор. При этом всегда стремятся к достижению равномерного и однородного уплотнения во всем объеме формуемой заготовки при ее максимальной пористости. В технологии прессования для достижения максимальной пористости необходимо ограничивать давление прессования минимальными значениями, определяемыми свойством формуемости порошка.

По сравнению с чисто контактным характером уплотнения порошков при облегченном пе-

ремещении частиц путем взаимного скольжения, при уплотнении металлических волокон происходит не только контактная, но и обратимая упругая и необратимая пластическая изгибная деформации [6]. При этом смещение и скольжение волокон значительно затруднено. Первоначально прямые волокна, сталкиваясь в местах контакта с другими волокнами, спирализуются. Основными структурными элементами волоконных материалов являются отрезки нитей длиной, равной среднестатистическому межконтактному расстоянию  $l_1$ , а не волокна в целом. Отношение указанного расстояния к диаметру волокна  $d$ , наряду с твердостью металла, характеризует сочетание гибкости и жесткости как структурных элементов, так и всего волоконного тела.

МКО в состоянии свободной насыпки представляет собой дискретную среду, в которой отдельные волокна, чаще всего различных размеров и формы, соединены между собой зацеплениями в местах контактов. Общая величина контактной поверхности весьма невелика. Вследствие нагрузки волокна начинают перемещаться относительно друг друга, стремясь занять более устойчивое положение. Контактная поверхность увеличивается за счет как появления новых контактов, так и роста уже установившихся контактных зон в результате пластической деформации материала волокон.

В отличие от порошковых материалов Ю. Г. Дорофеев показал [7], что при уплотнении металлических волокон важное значение имеет то, что на первой его стадии давление прессования следует рассчитывать не по величине контактного сечения, а по напряжению, определяемому сопротивлением волокон изгибу и предложил следующее выражение для определения зависимости между давлением прессования  $P$  волоконного тела и его относительной плотностью  $\rho = 1 - \Pi$ :

$$P = K \sigma_{T0} (1 - \Pi)^m, \quad (1)$$

где  $K$ ,  $m$  – постоянные;  $\sigma_{T0}$  – предел текучести материала волокон;  $\Pi$  – пористость.

В свою очередь, М. Ю. Бальшин доказал [8], что уравнение (1) является контактным уравнением, т. е.

$$P = K \sigma_{T0} (1 - \Pi)^3 = P_k \alpha_k, \quad (2)$$

где  $P_k = K \sigma_{T0}$  – критическое контактное напряжение при прессовании;  $\alpha_k = (1 - \Pi)^3$  – критическое контактное сечение.

Механизм уплотнения МКО может быть основан на рассмотрении влияния давления прессования МКО различного фракционного состава на пористость  $\Pi$  ФВМ и связанную с ней величину критического контактного сечения  $\alpha_k$ , среднестатистическое межконтактное расстояние  $l_1$ , координационное число  $Z$ , характеризующее среднее количество контактов, приходящимся на одно волокно, общее количество контактов в единице объема  $N$  ФВМ.

*Целью работы* является разработка механизма деформационного уплотнения МКО.

**Результаты и их обсуждение.** Согласно уравнению Ю. Г. Дорофеева, в рассматриваемом нами случае критическое контактное сечение  $\alpha_k = (1 - \Pi)^m$ .

Ранее нами были определены коэффициенты  $K$  и  $m$ , входящие в уравнение Ю. Г. Дорофеева, для МКО различного фракционного состава (см. таблицу) и доказана применимость уравнения (1) при их уплотнении [9].

**Значения коэффициентов  $K$ ,  $m$ , входящих в уравнение прессования различных фракций МКО**

Фракции, мм	$K$	$m$
(–0,2...+0,1)	7,51	3,59
(–0,315...+0,2)	7,63	3,7
(–0,4...+0,315)	8,14	3,76
(–0,63...+0,4)	8,36	3,81

На основании экспериментальных данных [9], на рис. 1 представлены зависимости изменения критического контактного сечения  $\alpha_k$  от пористости  $\Pi$  и давления прессования  $P$  для МКО различных фракций.

Анализ представленных зависимостей изменения критического сечения  $\alpha_k$  от давления прессования  $P$  (рис. 1, а) показал, что характер изменения  $\alpha_k$  различен на различных участках кривой. Сопоставляя зависимости (рис. 1, а и рис. 1, б), были выделены следующие участки при уплотнении МКО. На первой стадии (стадия I) при пористости 0,8–0,5 происходит резкий рост критического контактного сечения. Далее кривая при пористости 0,5–0,4 замедляет свой рост (стадия II). При пористости 0,4–0,3 происходит дальнейшее замедление роста критического сечения (стадия III), а при пористости 0,3–0,15 – резкое нарастание контактного сечения по линейной зависимости (стадия IV).

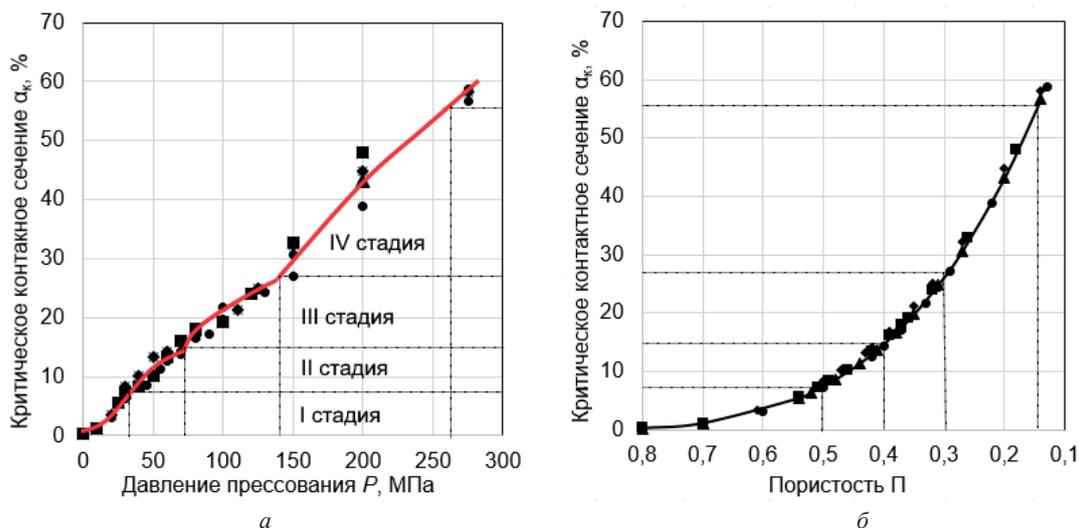


Рис. 1. Зависимости критического контактного сечения  $\alpha_k$  от пористости  $\Pi$  (а) и давления прессования  $P$  (б) для МКО различных фракций:  $-(-0,2...+0,1)$  мм;  $-(-0,315...+0,2)$  мм;  $-(-0,4...+0,315)$  мм;  $-(-0,63...+0,4)$  мм

Проведенный анализ позволил предложить следующий механизм деформационного уплотнения МКО (рис. 2):

первая стадия (рис. 2, б) – свободное перемещение волокон в направлении, совпадающем с направлением действия усилия (стадия I, рис. 1, а)

вторая стадия (рис. 2, в) – упруго-пластический изгиб и кручение волокон (стадия II, рис. 1, а);

третья стадия (рис. 2, г) – объемное упруго-пластическое сжатие, со значительным преобладанием пластического деформирования, и формирование пористого каркаса (стадия III, рис. 1, а);

четвертая стадия (рис. 2, д) – объемное пластическое сжатие с течением материала волокон в образовавшиеся поры пористого каркаса с резким нарастанием контактного сечения (стадия IV, рис. 1, а).

Процесс уплотнения волоковых материалов наряду с уменьшением пористости характеризуется изменением внутренних структурных характеристик ФВМ: координационного числа  $Z$ , межконтактного расстояния  $l_1$ , количества контактов  $N$ . В работах [10, 11] предложены следующие выражения для расчета этих параметров:

$$Z = \frac{4l[1 - \Pi(1 - \ln \Pi)]}{d(1 - \Pi)}; \tag{3}$$

$$l_1 = \frac{d}{4(1 - \Pi)}; \tag{4}$$

$$N = \frac{8(1 - \Pi)^2}{\pi d^3}, \tag{5}$$

где  $d$  – диаметр волокна;  $l$  – длина волокна.

На рис. 3 представлены результаты расчетов  $Z$ ,  $l_1$  и  $N$  по приведенным выше формулам (3)–(5)

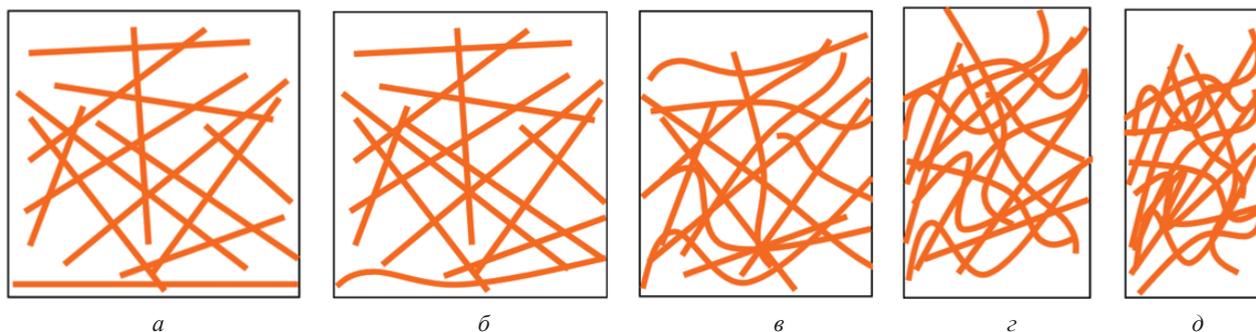


Рис. 2. Механизм деформационного уплотнения МКО: а – исходное состояние после войлокования; б – свободное перемещение; в – упруго-пластический изгиб и кручение; г – объемное упруго-пластическое сжатие; д – объемное упруго-пластическое сжатие с резким нарастанием контактного сечения

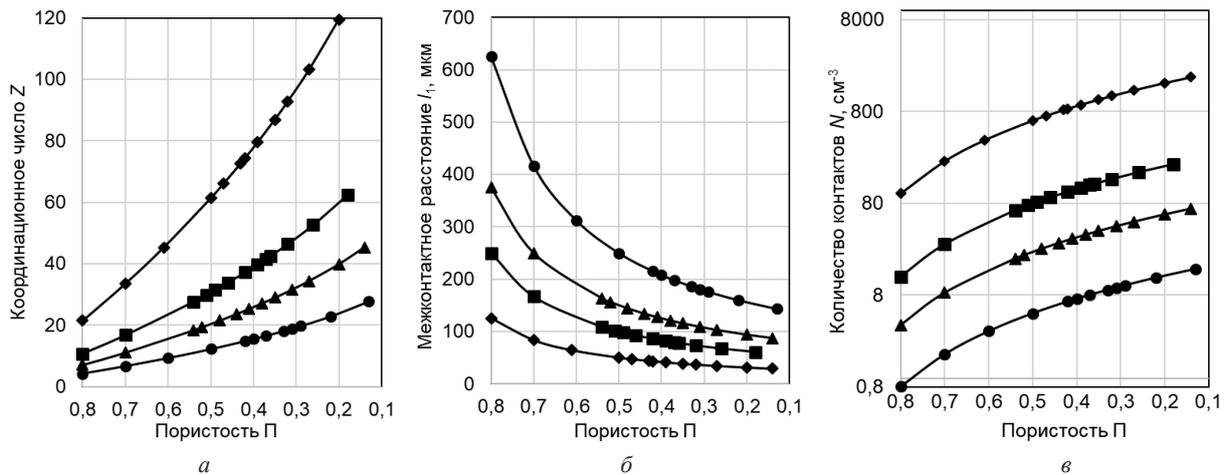


Рис. 3. Зависимости изменения координационного числа  $Z$  (а), межконтактного расстояния  $l_1$  (б) и количества контактов  $N$  (в) от пористости  $P$  для различных фракций МКО:  $-(-0,2...+0,1)$  мм;  $-(-0,315...+0,2)$  мм;  $-(-0,4...+0,315)$  мм;  $-(-0,63...+0,4)$  мм

для рассматриваемых фракций МКО  $(-0,2...+0,1)$  мм,  $(-0,315...+0,2)$  мм,  $(-0,4...+0,315)$  мм;  $(-0,63...+0,4)$  мм, характеризуемых, соответственно, диаметрами  $d$ , равными 100, 200, 300, 400 мкм и длиной  $l = 5$  мм.

Анализ полученных данных (рис. 3) показал, что на первой стадии уплотнения (пористость 0,8–0,5) значения координационного числа  $Z$  возрастают в 2,7–2,9 раза для всех фракций, межконтактное расстояние  $l_1$  уменьшается в 2,4–2,6 раза, а количество контактов  $N$  увеличивается в 6,3–6,5 раза. На второй (пористость 0,5–0,4) и третьей (пористость 0,4–0,3) стадии рост координационного числа  $Z$  замедляется до 1,2–1,3 раза, а на четвертой (пористость 0,3–0,15) незначительно возрастает до 1,3–1,4 раза. Характер изменения межконтактного расстояния  $l_1$  на второй, третьей и четвертой стадии характеризуется уменьшением в 1,1–1,3 на каждой стадии уплотнения. Количество контактов  $N$  на второй ста-

дии увеличивается в 1,4–1,5 раза, на третьей – увеличивается в 1,2–1,4 раза, а на четвертой – 1,4–1,6 раза.

Проведенные исследования показали, что каждая стадия уплотнения характеризуется различной интенсивностью изменения внутренних структурных характеристик  $Z$ ,  $l_1$  и  $N$ . Это позволяет показать различие в поведении МКО на каждой стадии уплотнения и обосновать предложенный механизм деформационного уплотнения.

**Заключение.** Предложен механизм деформационного уплотнения медных кабельных отходов, включающий свободное перемещение волокон при пористости 0,8–0,5, упруго-пластический изгиб и кручение при пористости 0,5–0,4, объемное упруго-пластическое сжатие при пористости 0,4–0,3 и объемное упруго-пластическое сжатие с резким нарастанием контактного сечения при пористости 0,3–0,15.

## Литература

1. **Ильющенко, А. Ф.** Проницаемые материалы из медных кабельных отходов. Сообщение 1. Свойства медных волоконных отходов / А. Ф. Ильющенко, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева // Порошковая металлургия: респ. Межвед. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2013. – Вып. 36. – С. 243–249.
2. **Новые** фильтрующие материалы и перспективы их применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2008. – 232 с.
3. **Теория** и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В. Н. Кокорин [и др.]. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 236 с.
4. **Способ** прессования увлажненных механических смесей на основе железа с наложением УЗ-воздействия / В. Н. Кокорин [и др.]. // Вестн. УлГТУ. – 2012. – № 3 – С. 24–27.
5. **Дьяконов, О. М.** Теоретические и технологические основы получения композиционных шихтовых материалов из отходов черных металлов горячим прессованием : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06 / О. М. Дьяконов ; ГНПО ПМ. – Минск, 2012. – 41 с.
6. **Косторнов, А. Г.** Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов / А. Г. Косторнов. – Киев : Наук. думка, 2002. – Т. 1. – 576 с.

7. **Дорофеев, Ю. Г.** Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев. – М. : Наука, 1968. – 120 с.
8. **Бальшин, М. Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. Ю. Бальшин. – М. : Металлургия, 1972. – 336 с.
9. **Ильющенко, А. Ф.** Проницаемые материалы из медных кабельных отходов. Сообщение 2. Закономерности уплотнения медных волоконных отходов / А. Ф. Ильющенко, В. К. Корнеева, В. М. Капцевич // Порошковая металлургия: респ. Межвед. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 36. – С. 250–256.
10. **Klimenko, V. N.** Research of structural (frame) characteristics of porous materials from discrete fibres / V. N. Klimenko, A. G. Kostornov // Proceedings of V Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigeratorjs», Minsk, Sept. 8–11, 2003. – Minsk, 2003. – P. 409–412.
11. **Klimenko, V. N.** Coordination number and bulk porosity of porous fibrous materials / V. N. Klimenko, A. G. Kostornov, Yu. N. Kryuchkov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1999. – Vol. 38, № 3–4. – P. 202–204.

#### MECHANISM OF DEFORMATION SEAL OF COPPER CABLE WASTE

**V. Kaptsevich, V. Korneeveva, A. Rykhlik**

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: lerakor1974@mail.ru*

*A mechanism for the deformation compaction of copper cable waste has been developed. The internal structural characteristics of filtering fiber materials obtained from copper cable waste are determined: coordination number  $Z$ , contact distance  $l_1$ , number of contacts  $N$ .*