

УДК 621.7.04

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

© 2023 В.А. Глушечков<sup>1,2</sup>, Р. де Алваренга<sup>2</sup>, И.А. Беляева<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Самара, Россия<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 17.05.2023

В работе рассмотрена гибридная технология уплотнения порошковой композиции (ПК) в металлической оболочке: волочение и магнитно-импульсный обжим. Разработана методика компьютерного моделирования такого статико-динамического процесса. На основе результатов моделирования разработана визуализационная картина процесса деформирования трубы и находящейся в ней ПК. Полученная визуализационная картина процесса позволила описать поэтапно механизм уплотнения и его зависимость от степени деформации трубы при волочении и от величины энергии магнитно-импульсного обжима. Определена достигаемая при этом плотность упаковки, характеризующая качество уплотнения. Результаты работы используются при проектировании новой технологии.

*Ключевые слова:* порошковая композиция, уплотнение, гибридная технология, волочение, магнитно-импульсный обжим, статико-динамическое деформирование, плотность упаковки.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-43-49

EDN: KDFRLB

### ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Одной из операций, используемой при изготовлении деталей из порошковой композиции, является операция ее уплотнения [1-4]. В настоящее время уплотнение ПК в большинстве случаев осуществляется в штампах с использованием статического нагружения (рис. 1). Имеются также публикации, отражающие результаты поисковых научных работ по уплотнению ПК, где использовались динамические нагрузки [5-8], в том числе в металлической оболочке (рис. 2).

Таким образом, существующие технологии уплотнения ПК осуществляются под действием только одной нагрузки: либо статической, либо динамической. Такие технологии уплотнения имеют некоторые недостатки и ограничения:

- недостаточная плотность упаковки, что снижает механические свойства материала, из которого изготавливаются детали;
- неравномерность упаковки ПК по объему получаемой заготовки или детали;
- ограничение размеров изготавливаемых

*Глушечков Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, заведующий лабораторией «Биоинженерия». E-mail: vgl@ssau.ru*

*Роберто де Алваренга, инженер кафедры обработки металлов давлением. E-mail: de\_alvarenga.r@ssau.ru*

*Беляева Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, ведущий научный сотрудник лаборатории «Биоинженерия». E-mail: belyaeva-otmr@yandex.ru*

деталей из уплотненного порошкового материала, например, длинномерных изделий.

Идет постоянный поиск новых методов уплотнения, направленных на устранение тех или иных недостатков. Так, для уплотнения ПК предложена технология волочения трубы, наполненной порошком [9], что решает, например, задачу получения длинномерных металлопорошковых изделий. Однако для реализации и этой технологии также используется только один вид нагружения – статический. Кроме того, при этом не обеспечивается требуемое качество уплотнения: плотность и однородность. Поиск новых технических решений продолжается.

Предлагаемое техническое решение. Предложено новое техническое решение – гибридная технология уплотнения ПК в металлической оболочке, в которой сочетаются два процесса: протяжка оболочки с ПК через матрицу (волоку) и ее магнитно-импульсный обжим (рис. 3). Реализуются [10-11] одновременно статическое и динамическое нагружения. В таком гибридном процессе на напряженно-деформированное состояние (н.д.с.) материала трубы и порошка, реализуемое при протяжке (волочении), накладывается н.д.с., возникающее при магнитно-импульсном обжиге. Без понимания процессов, происходящих в оболочке с ПК при таком сложном нагружении, невозможно управлять процессом. Понимание механизма уплотнения ПК при гибридном нагружении может дать компьютерное моделирование такого процесса.

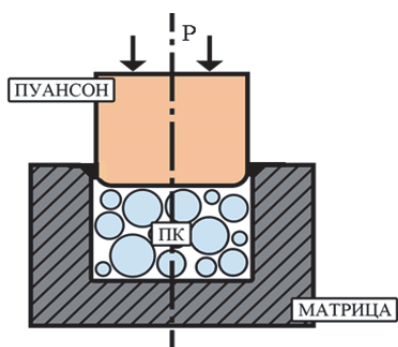


Рис. 1. Технологическая схема уплотнения ПК в инструментальном штампе с использованием статического нагружения P

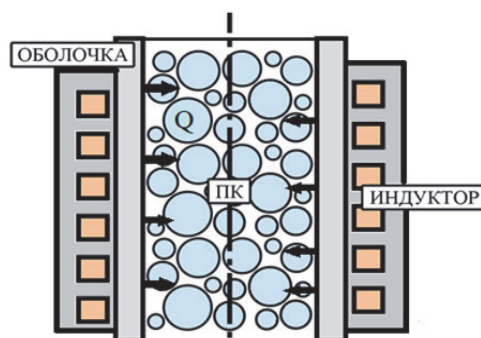


Рис. 2. Технологическая схема уплотнения ПК в металлической оболочке с использованием магнитно-импульсного нагружения Q

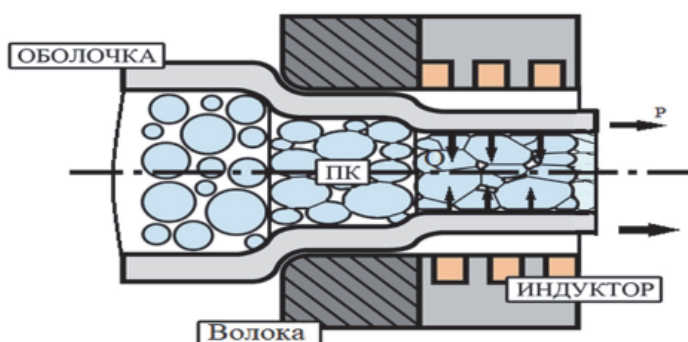


Рис. 3. Технологическая схема гибридной технологии уплотнения ПК в металлической оболочке с использованием с статической и динамической нагрузок

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ ПК

Для компьютерного моделирования гибридной технологии уплотнения ПК в металлической оболочке ее можно представить в последовательном выполнении следующих операций (рис. 4):

а) в металлическую оболочку диаметром D0 с установленной заранее нижней заглушкой

свободно засыпают ПК. Частицы порошка разных размеров распределяются в оболочке хаотично одна над другой с большим количеством пор между ними;

б) через вторую (верхнюю) заглушку на порошок действуют статической нагрузкой, осуществляя его предварительную подпрессовку. Частицы порошка, перемещаясь, деформируются в этом случае, в основном, упруго. Но за счет их перемещения количество пор между ними сокращается. При этом прикладываемое

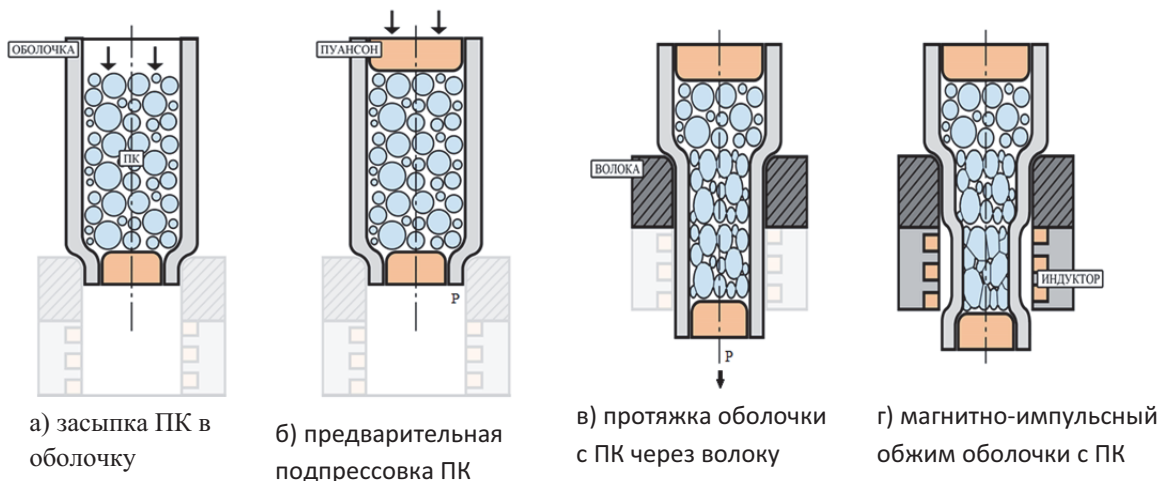


Рис. 4. Последовательность выполнения гибридного технологического процесса уплотнения ПК в металлической оболочке

давление подпрессовки ограничено возможной деформацией самой оболочки;

в) полученную сборку (оболочка с подпересованным порошком и закрепленными с обеих сторон заглушками) протягивают через матрицу (волоку) с диаметром  $D_m$  меньшим диаметра оболочки (трубы), что вызывает пластическую деформацию самой трубы и соответственно пластическую деформацию частиц порошка при их взаимодействии друг с другом. Пластическая деформация частиц осуществляется в направлении наименьшего сопротивления, т.е. в направлении пор, что и приводит к количественному их уменьшению;

г) на выходе из матрицы редуцированная оболочка без разгрузки подвергается радиальному динамическому нагружению – магнитно-импульсному обжигу [12]. Оболочка с ПК дополнительно пластически деформируется до диаметра  $D_k$ , повышая плотность упаковки.

Первые две операции а) и б) являются подготовительными и полученные при этом значения плотности упаковки принимаются за начальные. Две другие операции в) и г) являются окончательными. На этих этапах происходит уменьшение диаметра оболочки с  $D_0$  до  $D_m$  и далее до  $D_k$ . Именно на этих конечных этапах и происходит интенсивное изменение плотности порошка. Постоянная протяжка и высокая скважность разрядов магнитно импульсной установки [13] обеспечивают необходимую длину изделия.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ ПК В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Компьютерное моделирование исследуемого гибридного процесса уплотнения ПК в металлической оболочке проводилось методом конечных элементов с использованием программного продукта LS-DYNA [14] и возможностью соединения процессов IMPLICIT и EXPLICIT. При этом решались следующие задачи :

- создание геометрии взаимодействующих тел;
- взаимная увязка и выполнение расчетов во времени для различных этапов деформирования;
- оптимизация расчетов;
- проверка осуществимости предложенной методики моделирования, получение и анализ визуализационных картин процессов уплотнения ПК на всех его этапах;
- моделирование процесса уплотнения ПК при различных энерго - силовых параметрах нагружения, получение в первом приближении количественной оценки изменения плотности.

Для решения первой задачи, создания геометрии взаимодействующих тел написан

SCRIPT, позволивший автоматически создавать необходимую геометрию. При этом появилась возможность построения геометрии частиц порошка разных размеров. Каждая частица сконфигурирована так, чтобы реагировать на контакт с другими частицами и с поверхностями оболочки и заглушек. Выполнение этих настроек вручную заняло бы слишком много времени.

В процессе моделирования рассматривалась трехмерная задача деформирования оболочки. Взаимодействие частиц порошка при этом изучалось только в плоскости XZ (рис. 5).

Для имитации наличия частиц порошка по всему объему оболочки искусственно созданы вертикальные, радиально расположенные по окружности плоскости с эквивалентным «порошковой» плоскости сопротивлением при деформировании оболочки. Эти искусственные плоскости создают сопротивление почти такое же, как и порошковая плоскость. Таким образом, сочеталось 2Д и 3Д моделирование со стратегией компенсации. Для сокращения времени расчета в плоскости XZ размещали 60 частиц порошка (зерен) с увеличенными по сравнению с реальными их размерами: от 1,6 до 2,6 мм.

Все этапы рассматриваемой гибридной технологии уплотнения ПК реализуются за разные промежутки времени: от десятков секунд при

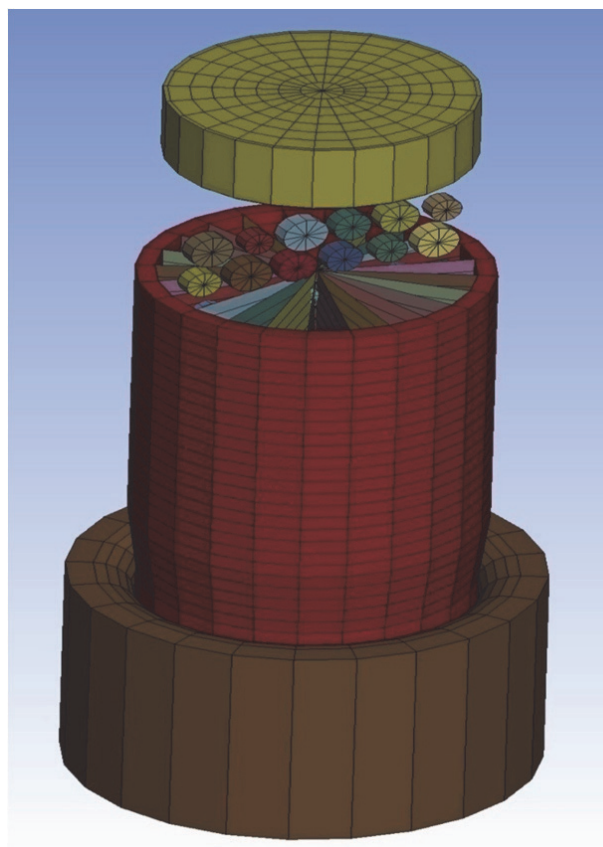


Рис. 5. Плоскость XZ-плоскость наличие частиц порошка, дополнительные плоскости сопротивления



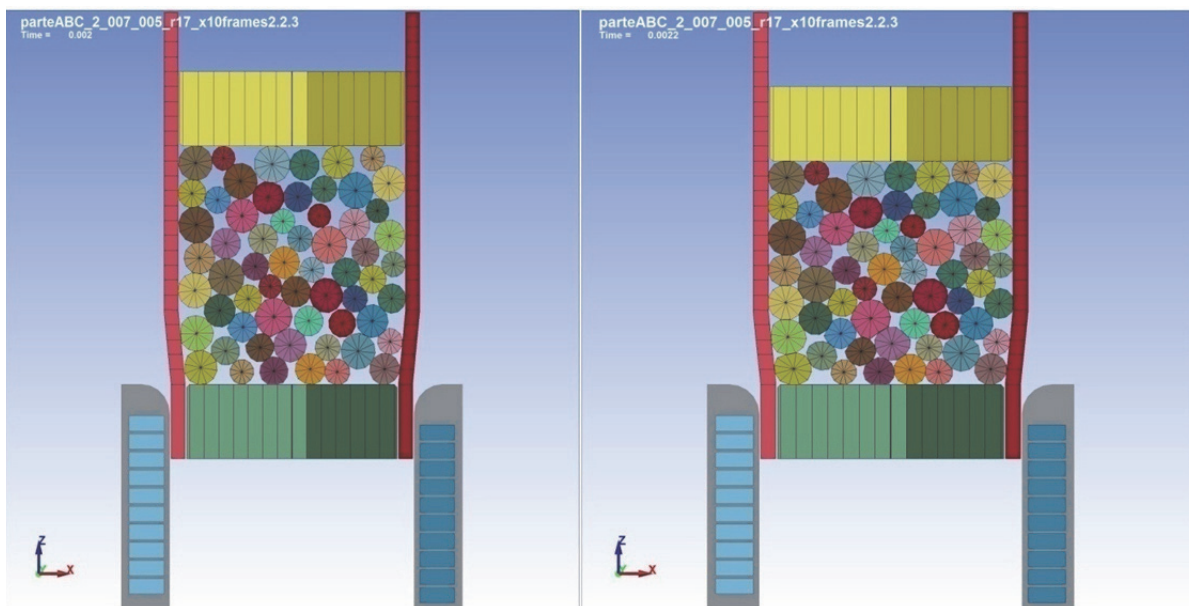
протяжке (волочении) до микросекунд при магнитно импульсном обжиге. Чтобы смоделировать разновременные этапы сквозного процесса деформирования использовалось моделирование, при котором на каждом этапе применялись свои параметры шкал времени, то есть все этапы были объединены для выполнения единого сквозного расчета, но на каждом этапе использовались свои параметры шкал времени.

Кроме того, моделирование процесса организовано не в одном основном К-файле, а

распределенным образом в нескольких дополнительных К-файлах, загружаемых из основного. Такое решение оптимизирует и облегчает управление и манипулирование расчетами.

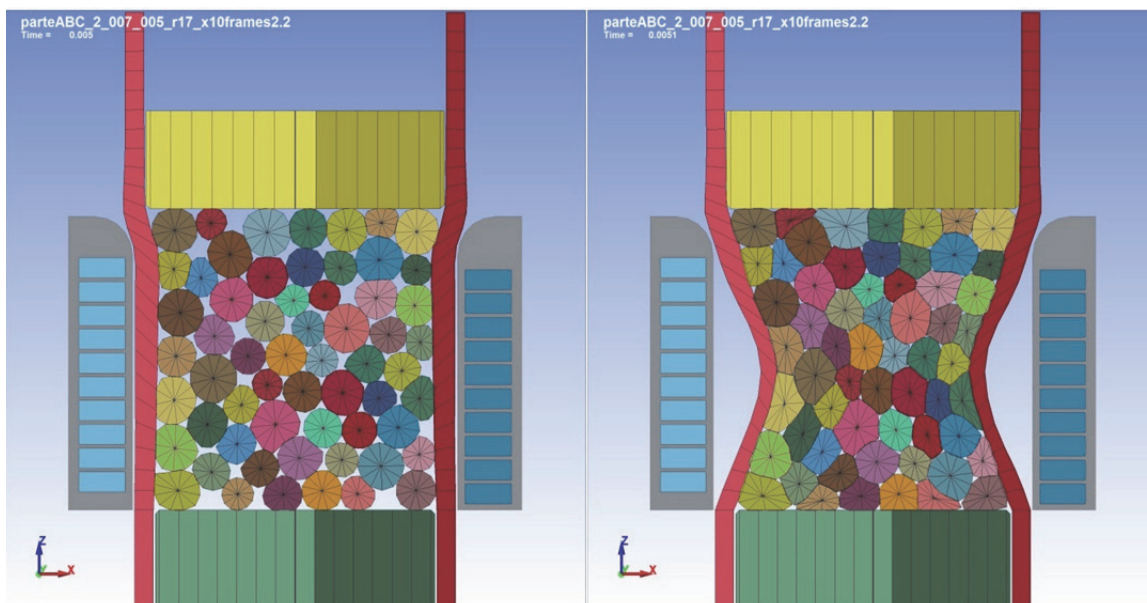
При моделировании четвертого этапа уплотнения ПК - магнитно импульсный обжим - в качестве параметра магнитно импульсного нагружения использовался ток  $I$  в разрядной цепи.

Применялся, кроме того, целый ряд внутренних особенностей методики моделирования таких, например, как применение сеточных



а) Засыпка ПК в оболочку

б) Статическая подпрессовка



в) Волочение оболочки с ПК

г) Магнитно-импульсный обжим

**Рис. 6.** Визуализационные картины уплотнения ПК на разных этапах гибридной технологии уплотнения

элементов SOLID и SHELL к различным элементам оснастки, или частицам порошка, что обеспечивает лучший анализ деформаций и сокращает время расчета, и другие.

**РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ПОЭТАПНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПК В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ**

Разработанная методика компьютерного моделирования позволила получить картины процессов, происходящих с оболочкой и порошком на всех этапах деформирования, описать взаимосвязанное взаимодействие оболочки и частиц порошка, наблюдать процессы деформирования частиц порошка по всему объему. На рисунке 6 представлены такие характерные выборочные картины: от свободной засыпки до магнитно-импульсного обжима. Как видно, при свободной засыпке количество пор максимально.

После предварительной подпрессовки количество пор уменьшается за счет перемещения частиц порошка относительно друг друга, а не их пластической деформации. С трудом можно найти частицу, изменившую свою форму. При протяжке трубы с порошком через матрицу уже видна пластическая деформация трубы и большинства частиц порошка. Соответственно происходит значительное уменьшение количества пор. Кроме того, можно видеть неравномерность уплотнения порошка по объему: наибольшая плотность упаковки наблюдается по периферии (вдоль участка трубы, деформируемой в результате ее взаимодействия с матрицей). В центральной части вдоль оси заготовки частицы порошка деформируются незначительно, поры остаются.

При магнитно импульсном обжиме трубы с порошком после протяжки видна интенсивная деформация практически всех частиц порошка, на всю глубину. С трудом можно найти

несколько единичных пор. Причиной глубокой проработки (деформирования) частиц порошка может быть возрастающее силовое энергетическое воздействия по мере распространения волн напряжения к центру.

Анализ полученных картин помогает лучше понять процессы, сопровождающие уплотнение порошка при статико-динамическом нагружении. Причем такие картинки можно представить в виде видео ряда, т.е. наблюдать процесс уплотнения непрерывно во времени на всех временных участках как единое целое.

Конечной целью компьютерного моделирования является оценка в первом приближении плотности упаковки ПК в зависимости от энерго-силовых параметров гибридного процесса уплотнения. За плотность упаковки принята площадь пор, то есть разница площадей плоскости сечения XZ и площади, занимаемой шестьюдесятью частицами порошка. Плотность упаковки на этапе свободной засыпки принята за 100% и ее изменение фиксировалось на дальнейших этапах. На рис 7 показано изменение плотности упаковки на всех этапах технологического процесса при использовании матрицы Дм 17 мм.

На рис. 8 можно видеть одну из полученных картин уплотнения ПК при различной степени редуцирования оболочки ( $D_m/D_o=17/18; 16/18$  и  $15/18$ ).

При минимальной степени редуцирования частицы порошка начинают деформироваться по границе их взаимодействия с деформируемой оболочкой. В центральной области частицы порошка только вступают во взаимодействие, видно наличие достаточно большого количества пор. При увеличении степени редуцирования оболочки количество деформированных частиц возрастает как по периферии, так и к центру. Количество пор наглядно уменьшается, но остается еще их значительное количество. При редуцировании оболочки через матрицу диаметром 15 мм практически все частицы порошка деформи-

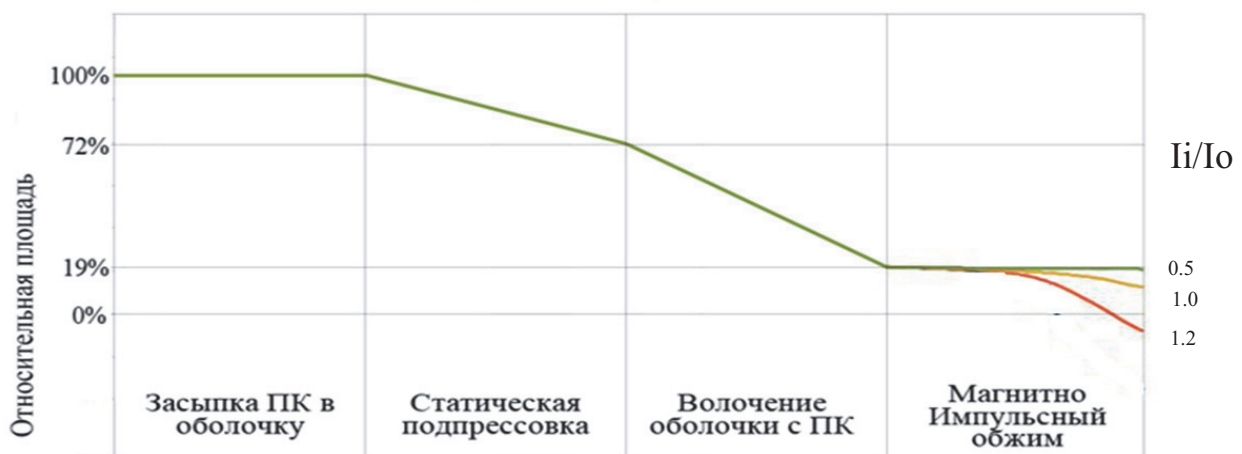
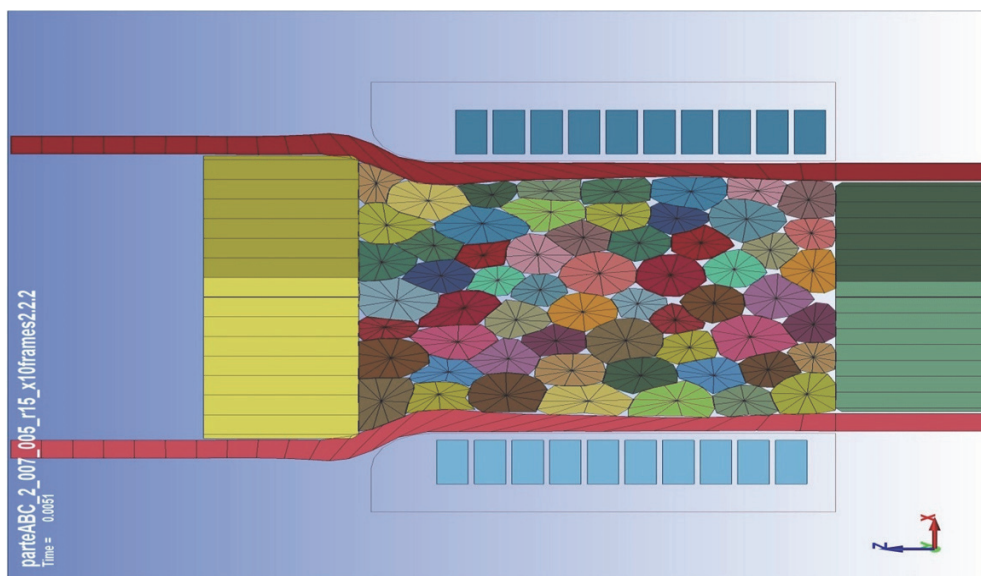


Рис. 7. Изменение площади пор на разных этапах процесса уплотнения



**Рис. 8.** Визуализационная картина деформирования оболочки с ПК при протягивании ее через матрицу Дм 17мм

рованы, изменили свою форму, снизилось и количество пор между ними. В рассматриваемом диапазоне степеней редуцирования оболочки относительная плотность упаковки изменилась с 19,26% при Дм=17 мм до 14,64% при Дм=15 мм).

Для различного уровня энергии магнитно импульсного обжима оболочки ( $I_i/I_0$  0,5;1,0;1,2) после протяжки ее через матрицу получены визуализационные картины, отражающие возможность получения беспористой структуры ПК (рис. 6; 7) по всему объему. Компьютерное моделирование даже показывает виртуальную отрицательную плотность упаковки, когда частицы порошка внедряются друг в друга.

Проведенное компьютерное моделирование показало широкие возможности гибридной технологии уплотнения. Стало возможным, варьируя геометрическими размерами оболочки, матрицы, параметрами нагружения, их сочетанием, проследить за изменением плотности упаковки, оценить вклад каждого этапа в процесс уплотнения и сформулировать рекомендации по ее проектированию.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена новая гибридная технология уплотнения порошковой композиции в металлической оболочке, включающая действие двух видов нагружения: статического и динамического. Дана схема и описание такого процесса – волочение и магнитно импульсный обжим.

2. Разработана методика компьютерного моделирования статико-динамического процесса уплотнения, проведено его моделирование, раскрывающее качественную картину процесса, включая деформацию самой оболочки и частиц порошка, находящихся в ней.

3. Получены визуализационные картины всех этапов гибридного процесса, позволившие понять механизм, последовательность и качество уплотнения.

4. Проведена оценка влияния некоторых геометрических и энерго силовых параметров на плотность упаковки порошковой композиции. Показана возможность достижения плотности порошковой композиции практически без пор (плотность упаковки 0,90 – 0,95).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гиршов, В.А.* Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие / В. А. Гиршов, С. А. Котов, В. Н. Цеменко. – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 385 с.
2. *Анциферов, В.Н.* Перспективные материалы и технологии порошковой металлургии: учеб. Пособие / В. Н. Анциферов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та, 2014. – 109 с.
3. *Цеменко, В.Н.* Деформирование порошковых сред: монография / В.Н. Цеменко. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001 – 102 с.
4. *Волкогон, Г.М.* Прогрессивные детали из порошков и оборудование: монография Е.М. Волкон, А.М Дмитриев, Е.П. Добряков, под общ. ред. А.М. Дмитриева, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1991. – 320с.
5. *Polyakov, A.P.* Dinamic power compaction processer. [www.orcid/000-0003-0109-6916](http://www.orcid.org/000-0003-0109-6916)
6. *Горбцов В.Г.* Разработка и внедрение процессов импульсного нагружения для получения порошковых и композиционных материалов: автореферат дис. на поиск. учён. степ. д.т.н. / В.Г. Горбцов – Минск, 1986.
7. *Нестеренко, В.Ф.* Импульсное нагружение гетерогенных материалов: монография / В.Ф. Нестеренко. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние РАН, 1992. – 200 с.
8. *Григорьев Е.Г., Калич Б.А.* Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков: Учебное пособие / Е.Г. Григорьев, Б.А. Калич. – М.: МИФИ, 2008. – 152 с.
9. *Миронов, В.А.* Магнитно-импульсное прессование порошков / В.А. Миронов. – Рига: Зинатне, 1980. – 192 с.
10. *Прокофьев, А.Б.* Магнитно-импульсная обработка



- материалов (МИОМ): монография / А.Б. Прокофьев [и др.] – Самара: АНО “Издательство СНЦ”, 2019. – 140 с.
11. Патент РФ № 2651094 от 24.07.18.
  12. Глушченков, В.А. Технология магнитно – импульсной обработки материалов: монография / В.А. Глушченков, В.Ф. Карпухин. – Самара: Издательский дом “Федоров”, 2014. – 208 с.
  13. Юсупов, Р.Ю. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глушченков. – Самара: Издательский дом “Федоров”, 2013. – 128 с.
  14. Беляева, И.А. Гибридные и комбинированные технологии, сочетающие статическое и магнитно-импульсное нагружения, в машиностроении и в металлургии: монография / И.А. Беляева, В.А. Глушченков. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2021. – 146 с.

## VISUALIZATION OF THE STATIC-DYNAMIC PROCESS OF COMPACTION OF A POWDER COMPOSITION IN A METAL SHELL

© 2023 V.A. Glouschenkov<sup>1,2</sup>, R. de Alvarenga<sup>2</sup>, I.A. Belyaeva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov

The paper considers a hybrid technology of compaction of a powder composition (PC) in a metal shell: drawing and pulse-magnetic crimping. A technique of computer simulation of such static-dynamic process has been developed. Based on the simulation results, a visualization picture of the process of deformation of the pipe and the powder composition contained in it has been developed. The resulting visualization picture of the process made it possible to describe step-by-step the compaction mechanism and its dependence on the degree of deformation of the pipe during drawing and on the value of the energy of pulse-magnetic crimping. The achieved packing density, which characterizes the quality of compaction, has been determined. The results of the work are used in design of a new technology.

*Key words:* powder composition, hybrid technology, drawing, pulse-magnetic crimping, static-dynamic deformation, packing density.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-43-49

EDN: KDFRLB

### REFERENCES

1. Girshov, V.A. Sovremennyye tekhnologii v poroshkovej metallurgii: ucheb. posobie / V. A. Girshov, S. A. Kotov, V. N. Cemenko. – SPb: Izd-vo politekhn. un-ta, 2010. – 385 s.
2. Anciferov, V.N. Perspektivnyye materialy i tekhnologii poroshkovej metallurgii: ucheb. Posobie / V. N. Anciferov. – Perm’: Izd-vo Perm. nac. isled. politekhn. un-ta, 2014. – 109 s.
3. Cemenko, V.N. Deformirovanie poroshkovykh sred: monografiya / V.N. Cemenko. – SPb: Izd-vo SPbGTU, 2001 – 102 s.
4. Volkogon, G.M. Progressivnyye detali iz poroshkov i oborudovanie: monografiya E.M. Volkon, A.M. Dmitriev, E.P. Dobryakov, pod obshch. red. A.M. Dmitrieva, A.G. Ovchinnikova. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 320 s.
5. Polyakov, A.R. Dinamic power compaction processer. [www.orcid/000-0003-0109-6916/](http://www.orcid/000-0003-0109-6916/)
6. Gorobcov V.G. Razrabotka i vnedrenie processov impul’snogo nagruzheniya dlya polucheniya poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov: avtoreferat dis. na poisk. uchyon. step. d.t.n. / V.G. Gorobcov – Minsk, 1986.
7. Nesterenko, V.F. Impul’snoe nagruzhenie geterogennykh materialov: monografiya / V.F. Nesterenko. – Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie RAN, 1992. – 200 s.
8. Grigor’ev E.G., Kalich B.A. Elektroimul’snaya tekhnologiya formirovaniya materialov iz poroshkov: Uchebnoe posobie / E.G. Grigor’ev, B.A. Kalich. – M.: MIFI, 2008. – 152 s.
9. Mironov, V.A. Magnitno-impul’snoe pressovanie poroshkov / V.A. Mironov. – Riga: Zinatne, 1980. – 192 s.
10. Prokof’ev, A.B. Magnitno-impul’snaya obrabotka materialov (MIOM): monografiya / A.B. Prokof’ev [i dr.] – Samara: ANO “Izdatel’stvo SNC”, 2019. – 140 s.
11. Patent RF № 2651094 от 24.07.18.
12. Glushchenkov, V.A. Tekhnologiya magnitno – impul’snoj obrabotki materialov: monografiya / V.A. Glushchenkov, V.F. Karpuhin. – Samara: Izdatel’skij dom “Fedorov”, 2014. – 208s.
13. Yusupov, R.Yu. Energeticheskie ustanovki dlya magnitno-impul’snoj obrabotki materialov: monografiya / R.YU. Yusupov, V.A. Glushchenkov. – Samara: Izdatel’skij dom “Fedorov”, 2013. – 128 s.
14. Belyaeva, I.A. Gibriddnye i kombinirovannyye tekhnologii, sochetayushchie staticheskoe i magnitno-impul’snoe nagruzheniya, v mashinostroenii i v metallurgii: monografiya / I.A. Belyaeva, V.A. Glushchenkov. – Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2021. – 146 s.

*Glushchenkov Vladimir Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Forming, Head of the Bioengineering Laboratory. E-mail: vgl@ssau.ru*  
*Roberto de Alvarenga, Engineer, Department of Metal Forming. E-mail: de\_alvarenga.r@ssau.ru*

*Belyaeva Irina Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Forming, Leading Researcher of the Bioengineering Laboratory. E-mail: belyaeva-ommr@yandex.ru*