

УДК 621.7.04

ГИБРИДНАЯ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

© 2025 В.А. Глушcenков, Р. де Алваренга

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 03.04.2025

В работе рассмотрены три возможные схемы осуществления гибридной технологии уплотнения порошковой композиции в деформируемой металлической оболочке: последовательное выполнение операций «волочение – магнитно-импульсный обжим» или «магнитно-импульсный обжим – волочение». Третья схема предполагает одновременное выполнение этих операций, для реализации которых предложена конструкция керамической волоки со встроенным внутри нее токопроводом индуктора, соединенного с магнитно-импульсной установкой. Для всех трех технологических схем разработана методика компьютерного моделирования гибридной статико-динамической технологии уплотнения порошковой композиции внутри деформируемой трубчатой оболочки. Используя ее, получены визуализационные картины процессов, что дает качественное представление о механизме (особенностях) уплотнения, о влиянии деформационно-силовых параметров процесса на плотность упаковки порошковой композиции. Дан анализ каждой из предлагаемых схем, их преимущества и недостатки, что обеспечивает обоснованный их выбор, в зависимости от конкретного технического задания при получении композиционного материала и конструкций из него.

Ключевые слова: порошковая композиция, металлическая оболочка, гибридная технология, уплотнение, волочение, магнитно-импульсный обжим, плотность упаковки, компьютерное моделирование, визуализационные картины.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-147-155

EDN: RJSBHV

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

В машиностроении появилась потребность создания и использования нового композиционного материала – порошковая композиция в металлической оболочке (рис. 1).

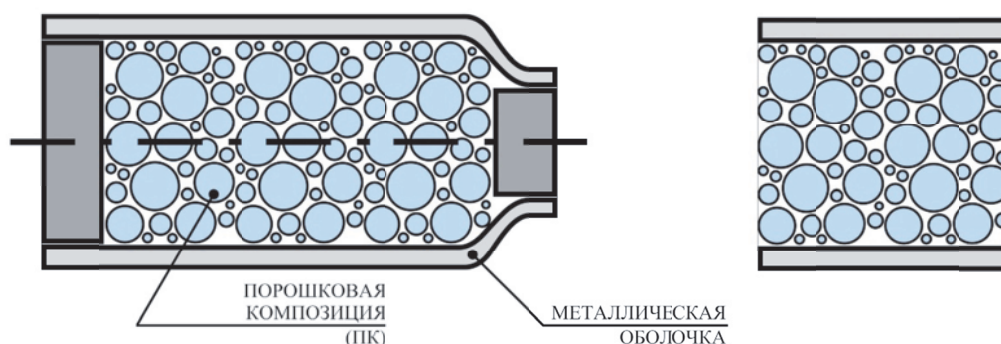


Рисунок 1. Композиционный материал
(порошковая композиция – металлическая оболочка)

Технология получения такого материала включает операцию уплотнения порошковой композиции, например, с помощью осевого прессования под действием статической нагрузки на гидравлическом прессе (рис. 2).

В качестве порошковой композиции (ПК) используются как однородные порошки (железо, алюминий, медь...), так и порошки сложного состава, например, алюминий-бор. Из такого композиционного материала изготавливают различного рода экраны, фильтры, режущий инструмент и другие конструкционные детали. Некоторые изделия из такого материала имеют большую (до нескольких метров) длину. Получить такие детали на вертикальных прессах не представляется возможным. Их

Глушcenков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: impr@ssau.ru

де Алваренга Роберто, инженер кафедры обработки металлов давлением. E-mail: de_alvarenga.r@ssau.ru

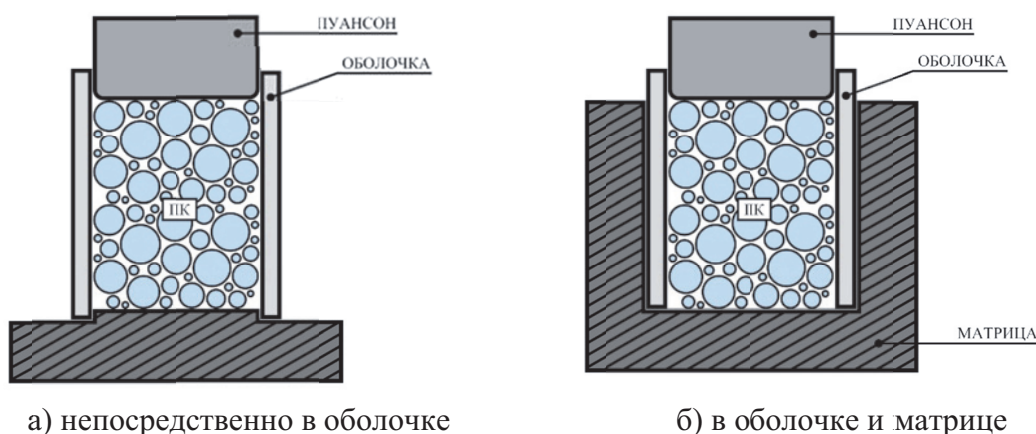


Рисунок 2. Схема осевого статического уплотнения ПК

можно изготовить с использованием технологии волочения [1] или последовательного радиального магнитно - импульсного обжатия [2] (рис. 3).

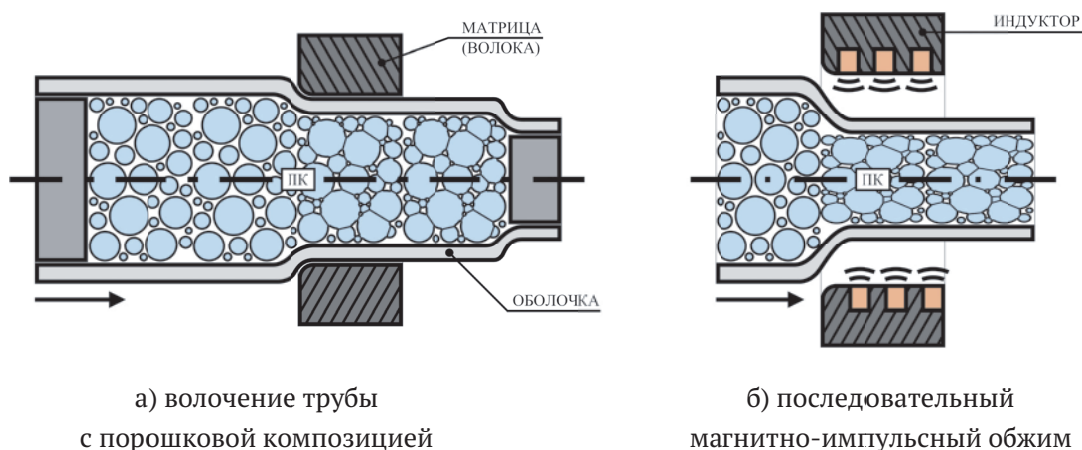


Рисунок 3. Схемы радиального уплотнения ПК с использованием статического и динамического нагружений

В процессе волочения или обжима трубы размещенный внутри нее порошок уплотняется, однако степень уплотнения по сечению или длине неравномерна и остается недостаточно высокой, особенно в центре. Для повышения качества уплотнения предлагается совместить статическое и динамическое нагружения в одном производственном цикле. Такая технология носит название гибридной или комбинированной, вариант реализации которой описан в работе [3].

Возможны три технологические схемы такой гибридно-комбинированной статико-динамической технологии (рис. 4).

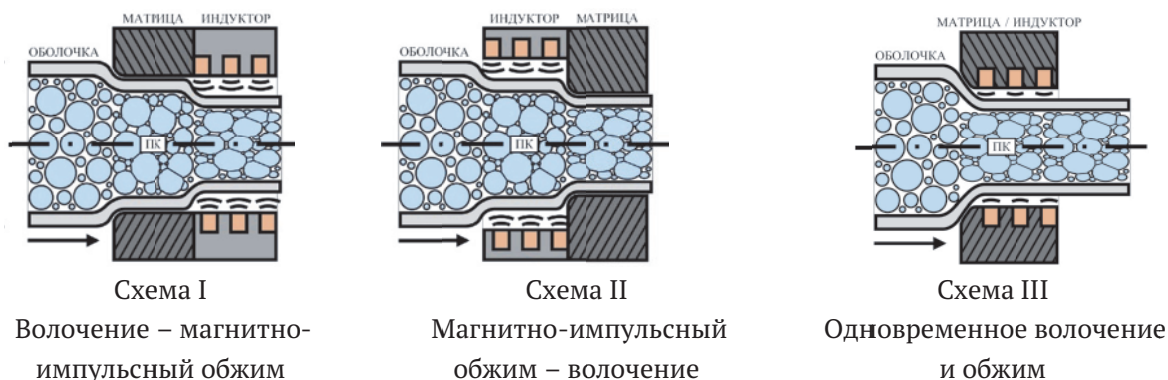


Рисунок 4. Технологические схемы гибридной технологии уплотнения ПК в металлической оболочке

Первые две схемы реализуют разную последовательность выполнения операций: волочение-обжим или обжим-волочение, третья - одновременное их исполнение. Третья схема потребовала создания новой конструкции волоки [4], отличие которой состоит в размещении внутри нее токопровода индуктора [5], соединенного с магнитно-импульсной установкой [6]. Заменен и материал волоки - вместо металла используется керамика [7]. При этом увязывается временной интервал между импульсами (скважность разрядов) и скоростью волочения. Перед выполнением операции уплотнения по всем трем схемам осуществляют две предварительные операции: засыпку порошковой композиции в трубчатую оболочку и предварительную ее подпрессовку (рис 5) Последовательность процессов уплотнения по трем схемам приведена на рисунке 6.

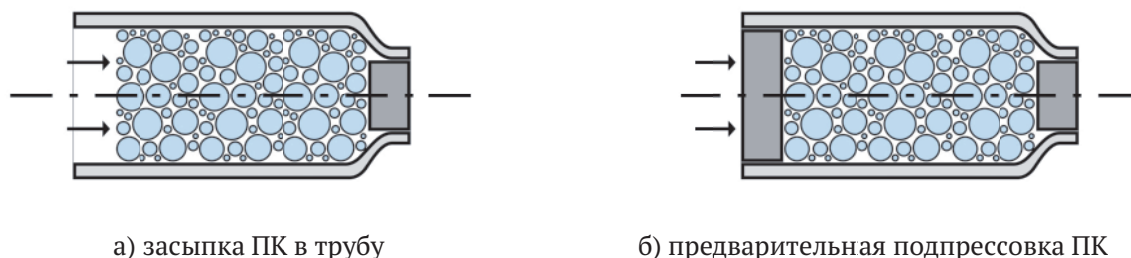


Рисунок 5. Операции, предшествующие уплотнению ПК

Схема I

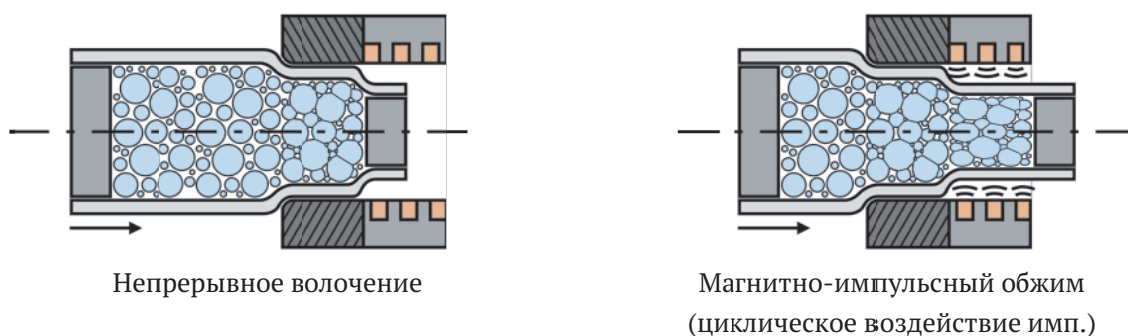


Схема II

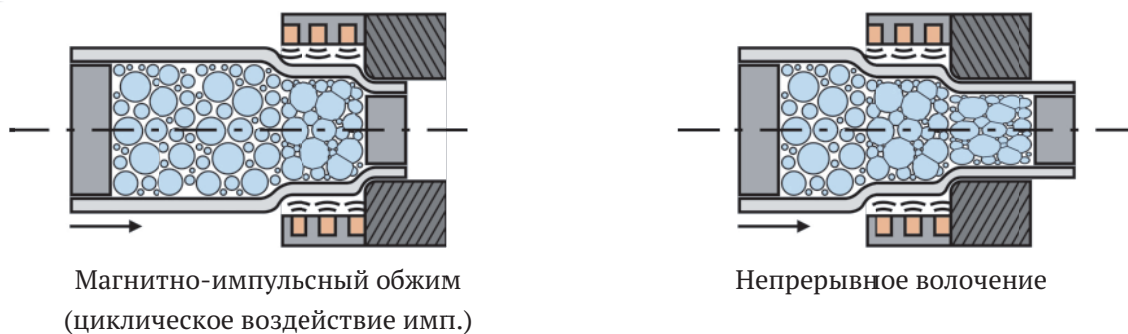


Схема III

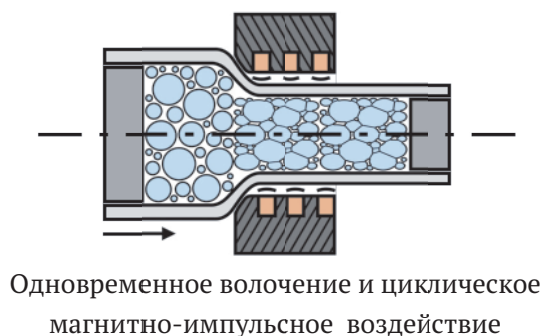


Рисунок 6. Последовательность выполнения операций уплотнения ПК в металлической оболочке по предлагаемым схемам

Разрабатываемые процессы имеют довольно сложный характер деформирования оболочки с ПК и для их качественного понимания необходимо разработать методику компьютерного моделирования, с помощью которой можно было бы понять механизм уплотнения и влияние на него деформационно-силовых параметров таких технологий.

2. ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПК В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ДЛЯ ТРЕХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Для компьютерного моделирования были рассмотрены два различных деформационных этапа деформирования: волочение и магнитно-импульсный обжим. Их, в первую очередь, отличает скорость выполнения реальных процессов. Первый процесс происходит с относительно низкой скоростью, что позволяет пренебречь аспектами, связанными с инерционностью процесса. Во вторую, для процесса магнитно-импульсного обжима инерция является существенной частью процесса деформирования. Кроме того, в силу своих характеристик процесс волочения можно рассматривать без учета инерции, что не относится к процессу магнитно-импульсного обжима, который обязательно требует такого учета. Таким образом, были интегрированы соответствующие методы IMPLICIT и EXPLICIT в комплекс LS-DYNA, что также оптимизирует вычисления и экономит время обработки для численного моделирования [8-11].

Ввиду существенной разницы в скоростях деформирования между двумя упомянутыми процессами, каждый из них моделируется разными методами (IMPLICIT/EXPLICIT), для имитации одновременного проведения обоих процессов, что характеризует схему III, была предложена пошаговая методика моделирования двух последовательных процессов, то есть частичного выполнения каждого процесса. Таким образом, каждый цикл состоит из двух последовательных шагов. Моделирование первого шага – первого процесса (волочения) осуществляется с использованием метода IMPLICIT. Затем происходит переход на конфигурацию EXPLICIT для моделирования второго шага, связанного со вторым процессом (динамический обжим). На первом шаге первого цикла трубка с ПК частично входит в матрицу. Происходит изменение ее конфигурации. Процесс волочения останавливается. Далее следует магнитно-импульсное нагружение – второй шаг, завершающий первый цикл. В следующем цикле труба продвигается в матрице на заданное расстояние, продолжая процесс волочения. Затем процесс осевого статического деформирования останавливается и на новую конфигурацию трубы действует радиальный динамический импульс нагружения. Итак, последовательно, шаг за шагом до полного моделирования реального процесса. Другие особенности моделирования статико-динамического процесса уплотнения ПК разработаны и описаны в работе [12].

3. ВИЗУАЛИЗАЦИОННЫЕ КАРТИНЫ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧКИ И СООТВЕТСТВУЮЩЕГО УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ.

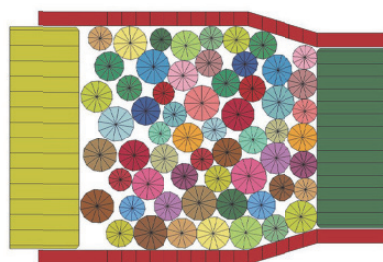
Разработанные методики компьютерного моделирования гибридно-комбинированного процесса уплотнения ПК в металлической оболочке позволили:

- получить визуализационные поэтапные во времени картины процессов уплотнения для всех трех технологических схем;
- понять качественную картину процессов деформирования оболочки и уплотнения порошковой композиции, реализуемых в разной последовательности;
- оценить плотность упаковки в зависимости от начальных и граничных условий процессов;
- дать сравнительный анализ разных схем для выбора необходимой для решения конкретной задачи.

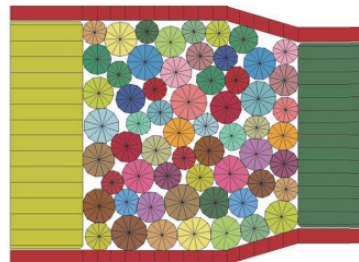
На рисунке 7 в качестве примера представлены полученные визуальные картины уплотнения ПК при использовании волокна диаметром 16 мм при исходном диаметре трубы с порошком 18мм и энергетическом воздействии P_0 для всех трех схем процессов уплотнения. Порошковая композиция – однородный порошок со сферическими частицами порошка разных размеров. Силовое воздействие магнитно-импульсного обжима P_0 определялось пересчетом через значения наведенных вихревых токов в трубе равное 31000 ампер, взятое из эксперимента [13]. Процесс уплотнения начинается со свободной засыпки порошка в трубку и последующей предварительной его подпрессовкой с помощью гидравлического пресса с максимальным усилием, определяемым переходом трубы в пластическое состояние.

Из приведенных картин видно, что характер уплотнения неравномерный, особенно по сечению, и отличается для разных схем уплотнения. Появилась возможность получить визуализационные картины процессов при различных геометрических, начальных и промежуточных размерах трубы, диаметров волокна и интенсивности магнитно-импульсного воздействия. Конечный резуль-

Предварительные операции

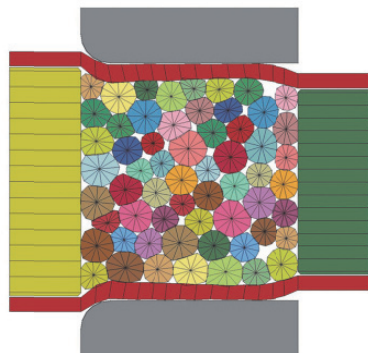


а) засыпка ПК в трубу

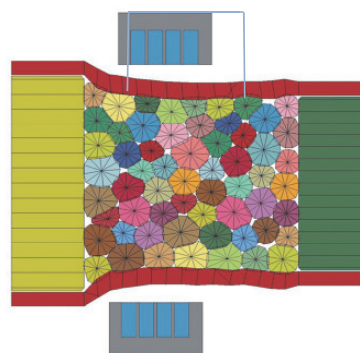


б) предварительная подпрессовка ПК

Уплотнение ПК по схеме I

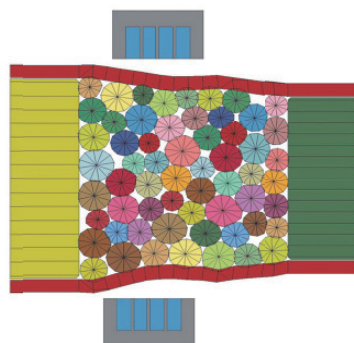


в) непрерывное волочение

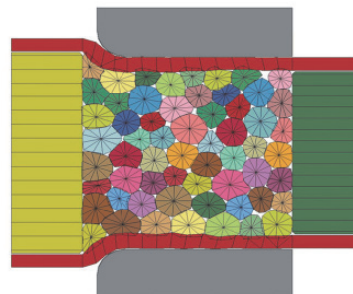


г) магнитно-импульсный обжим
(циклическое воздействие имп.)

Уплотнение ПК по схеме II

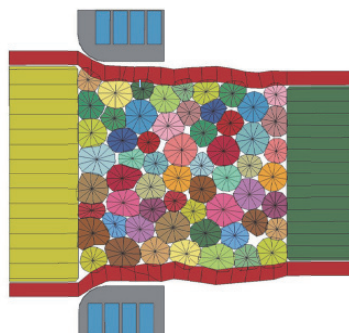


д) магнитно-импульсный обжим
(циклическое воздействие имп.)



е) непрерывное волочение

Уплотнение ПК по схеме III



ж) одновременные волочение и магнитно-импульсный обжим

Рисунок 7. Визуализационные картины уплотнения ПК, полученные с помощью разработанной методики моделирования для трех технологических схем. Волока $\varnothing 16\text{мм}$. Величина магнитно-импульсного воздействия P_0

тат моделирования - определение плотности упаковки ПК. За плотность упаковки Π_1 можно принять площадь пор по отношению ко всей площади, занятой порошком в данном сечении. Так, на рис. 8 приведен пример полученной с помощью моделирования зависимости изменения плотности упаковки при использовании схемы I (диаметр трубы 18 мм, волокни 16,0 мм. и четырех значениях относительного магнитно-импульсного воздействия $P_i/P_0 = 0,5, 1,0, 1,2$ и $1,4$.



Рисунок 8. Изменение плотности уплотнения ПК на всех этапах процесса уплотнения по схеме I

Полученный график дает возможность осмысленно управлять предложенным гибридным процессом уплотнения. За показатель плотности упаковки можно взять и отношение изменения площади частиц порошка к площади сечения трубы, в которой они располагаются Π_2 . Следовательно, качество упаковки можно оценивать через показатель Π_1 - относительное изменение количество пор или через показатель Π_2 - относительное изменение плотности деформированных частиц порошка внутри трубы. Π_1 имеет своим абсолютным значением свободную площадь сечения, то есть пустая площадь внутри трубки, которая не занята зернами, вытекающую из $S_{\Pi} = S_T - S_3$. На рисунке 9, например, показан график изменения плотности (показатель Π_2) при использовании технологии, соответствующей схеме I для разных размеров волокни, на рисунке 10 – для схемы II при трех значениях силового воздействия магнитного импульса, на рисунке 11 - для третьей схемы при одном размере волокни и одной величине силового воздействия. Показатели плотности упаковки приведены в относительных величинах. Для показателя Π_1 (рис. 8) за исходное значение принято состояние ПК после ее засыпки в трубу (100%), а для Π_2 – после подпрессовки (1,0).

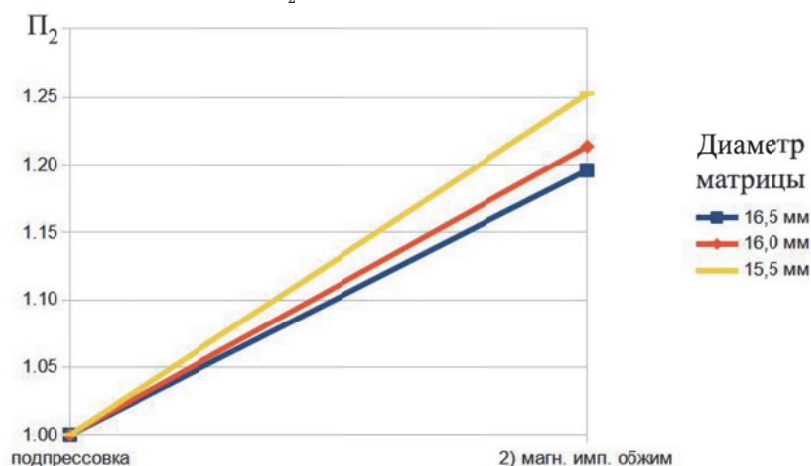


Рисунок 9. Изменение показателя плотности Π_2 при использовании технологической схемы I

Таким образом, созданная методика компьютерного моделирования позволила получить визуализационные картины гибридных статико-динамических процессов уплотнения ПК в металлической оболочке для всех трех схем их реализации. При этом появилась возможность оценить влияние на процесс уплотнения геометрических размеров технологической оснастки и интенсивности силового воздействия.

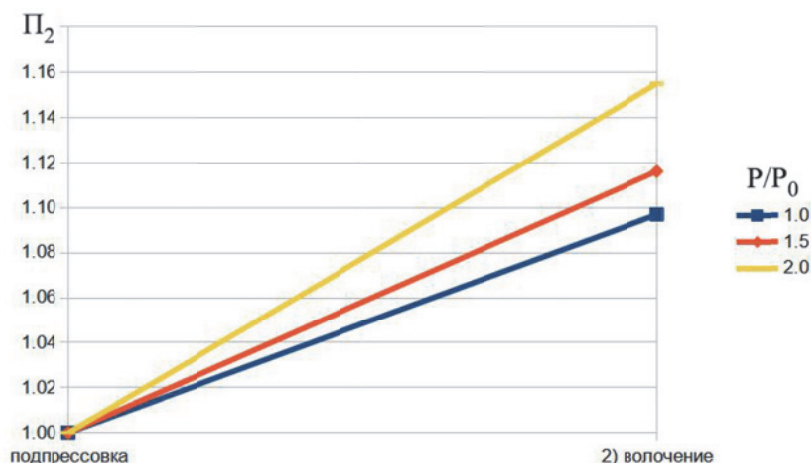


Рисунок 10. Изменение показателя плотности Π_2 при использовании технологической схемы II

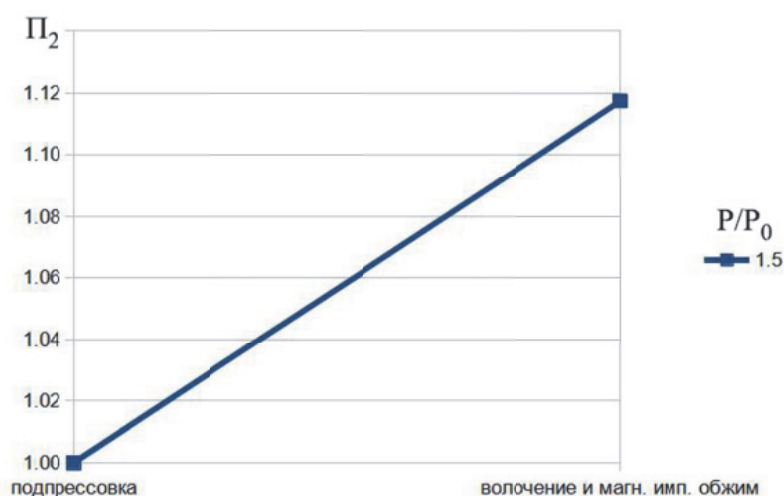


Рисунок 11. Изменение показателя плотности Π_2 при использовании технологической схемы III

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Схема I. Анализ полученных визуализационных картин показывает, что, при выполнении первого этапа – волочения – происходит деформация частиц порошка, уменьшается количество пор. Плотность зерен увеличилась с 20% до 25%. Однако плотность упаковки, при осевом воздействии, неравномерна – частицы порошка в большей степени деформируются на периферии трубы и в меньшей степени в центре трубы. «Проработка» порошка в центральной части недостаточна (остаются поры). Магнитно-импульсное радиальное нагружение приводит к дополнительной возрастающей деформации частиц порошка при распространении волн напряжений к оси трубы, что приводит к получению максимальной плотности (отсутствие пор) по всему сечению.

Схема II. Плотность зерен увеличилась с 10% до 16%. Как видно из приведенных картин, величина магнитно-импульсного воздействия не должна вызывать деформацию трубы, превышающую внутренний диаметр волокна. Плотность упаковки практически с самого начала достигает максимума, проработка порошка происходит на всю глубину. Волочение в этом случае приводит к выравниванию (выглаживанию) поверхности трубы после циклического магнитно-импульсного обжима. Можно предположить, что часть энергии, поступившей в систему (труба-порошок) поглощалась частицами порошка, вызвав предварительное их перемещение до деформации.

Схема III. Плотность зерен увеличилась на 12%. Третья схема реализации гибридной технологии приводит к одновременной смешанной деформации частиц порошка (продольной и радиальной), что видимо, облегчает деформацию всего объема ПК и при этом обеспечивается требуемая геометрия поверхности трубы.

Графики изменения плотности упаковки позволяют оценить в первом приближении качество процесса уплотнения. Однако, выбор схемы определяется не только требуемым значением плотности согласно техническому заданию, но и другими факторами: качеством внешней поверхности трубы, энергетическими затратами, простотой технологической оснастки, наличием оборудования и др.

5. ВЫВОД

Предложены три схемы гибридной статико-динамической технологии уплотнения порошковой композиции в металлической оболочке, определяемыми последовательностью выполнения операций волочения и магнитно-импульсного обжима.

Для анализа гибридных процессов уплотнения ПК разработана и опробована методика их компьютерного моделирования с учетом особенностей и взаимоувязки параметров статического и динамического воздействий.

Получены визуализационные картины, отражающие характер деформаций частиц порошка во времени и по сечению для различных технологических схем гибридного уплотнения.

Разработанная методика моделирования позволила оценить влияние конструктивно-технологических параметров гибридных процессов на плотность упаковки. Показана возможность достижения более высоких значений плотности упаковки при гибридных технологиях, чем при существующих технологиях, реализуемых под действием только одного вида нагружения.

Сформулированы рекомендации по выбору схемы гибридной технологии в зависимости от требуемых плотности упаковки, качества поверхности полуфабриката, энергозатрат и существующих условий производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов, Г.А. Основные теории прокатки и волочения труб: учебное пособие / Г.А. Орлов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2016. – 204 с.
2. Глуценков, В.А. Технология магнитно – импульсной обработки материалов: монография / В.А. Глуценков, В.Ф. Карпучин. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
3. Беляева, И.А. Гибридные и комбинированные технологии, сочетающие статическое и магнитно-импульсное нагружения, в машиностроении и в металлургии: монография / И.А. Беляева, В.А. Глуценков. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2021. – 146 с.
4. Патент РФ №2651094 от 24.07.18.
5. Глуценков, В.А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов: учебное пособие / В. А. Глуценков. – Самара: Издательский дом «Учебная литература», 2013. – 148 с.
6. Юсупов, Р.Ю. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография / Р.Ю. Юсупов, В. А. Глуценков. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2013. – 128с.
7. Гаршин, А.П. Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семенов. – М.: Научтехлитиздат, 2003. - 384с.
8. Кравчук, А.С. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач», курс лекций / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 122 с.
9. Ma, N., & Umez, Y. (2009). Application of explicit FEM to welding deformation: Analysis. Welding International: Translations from the Worlds Welding Press, 23(1), 1-8.
10. Jiang, Y. Z., Hu, Y. F., Fu, Z. G., & Zhu, S. S. (2022). Defects analysis of the ultra-thick steel pipes using a mixed explicit-implicit FEM. Metallurgical Research & Technology, 119(1), 111.
11. Chang, J. M., Tyau, T., El-Bakly, M., Cheng, J., Marpu, A., Zeng, Q., & Santini, J. (2007). Implicit and explicit finite element methods for crash safety analysis. SAE Transactions, 1025-1037.
12. Глуценков В.А. Визуализация статико-динамического процесса уплотнения порошковой композиции в металлической оболочке / В.А. Глуценков, Р. де Алваренга, И.А. Беляева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 3. – С.43-49.
13. Карпучин, В. Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки / В. Ф. Карпучин // Самолето-строение России. Проблемы и перспективы: материалы симпозиума с международным участием. – Самара: СГАУ, 2012. – С. 209-210.

HYBRID STATIC-DYNAMIC TECHNOLOGY FOR COMPACTION OF A POWDER COMPOSITION INSIDE A METAL SHELL

© 2025 V.A. Glushchenkov, R. de Alvarenga

Samara National Research University named by academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

The paper considers three possible schemes for implementing the hybrid technology of compacting a powder composition inside a deformable metal shell: sequential execution of operations “drawing – pulse-magnetic crimping”, sequential execution of operations “pulse-magnetic crimping – drawing”. The third scheme assumes the simultaneous execution of these operations, for implementation of which a design of a ceramic drawing die with a built-in current conductor of the inductor, connected to a pulse-magnetic installation, is proposed. A technique of computer simulation of the hybrid static-dynamic technology for compaction a powder composition inside a deformable tubular shell has been developed for all three schemes. Using it, visualization pictures of the processes have been obtained, which gives a qualitative idea of the mechanism (features) of compaction, of the influence of deformation-force parameters of the process on the packing density of the powder composition. An analysis of each of the proposed schemes, their advantages and disadvantages are given, which ensures their justified choice depending on the specific technical task when obtaining a composite material and structures from it.

Key words: powder composition, metal shell, hybrid technology, compaction, drawing, pulse-magnetic crimping, packing density, computer simulation, visualization pictures.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-147-155

EDN: RJSBHV

REFERENCES

1. Orlov, G.A. Osnovnye teorii prokatki i volocheniya trub: uchebnoe posobie / G.A. Orlov. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2016. – 204 s.
2. Glushchenkov, V.A. Tekhnologiya magnitno – impul'snoj obrabotki materialov: monografiya / V.A. Glushchenkov, V.F. Karpuhin. – Samara: Izdatel'skiy dom «Fedorov», 2014. – 208 s.
3. Belyaeva, I.A. Gibridnye i kombinirovannye tekhnologii, sochetayushchie staticheskoe i magnitno-impul'snoe nagruzheniya, v mashinostroenii i v metallurgii: monografiya / I.A. Belyaeva, V.A. Glushchenkov. – Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2021. – 146 s.
4. Patent RF №2651094 ot 24.07.18.
5. Glushchenkov, V.A. Induktory dlya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov: uchebnoe posobie / V. A. Glushchenkov. – Samara: Izdatel'skiy dom «Uchebnaya li-teratura», 2013. – 148 s.
6. Yusupov, R.Yu. Energeticheskie ustanovki dlya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov: monografiya / R. Yu. Yusupov, V. A. Glushchenkov. – Samara: Izdatel'skiy dom «Fedorov», 2013. – 128s.
7. Garshin, A.P. Keramika dlya mashinostroeniya / A.P. Garshin, V.M. Gropyanyov, G.P. Zajcev, S.S. Semenov. – M.: Nauchtekhlitizdat, 2003. – 384s.
8. Kravchuk, A.S. Lekcii po ANSYS/LS-DYNA i osnovam LS-PREPOST s prime-rami resheniya zadach», kurs lekcij / A. S. Kravchuk, A. I. Kravchuk. – Minsk: BGU, 2013. – 122 s.
9. Ma, N., & Umezu, Y. (2009). Application of explicit FEM to welding deformation: Analysis. Welding International: Translations from the Worlds Welding Press, 23(1), 1-8.
10. Jiang, Y. Z., Hu, Y. F., Fu, Z. G., & Zhu, S. S. (2022). Defects analysis of the ultra-thick steel pipes using a mixed explicit–implicit FEM. Metallurgical Research & Technology, 119(1), 111.
11. Chang, J. M., Tyan, T., El-Bkaily, M., Cheng, J., Marpu, A., Zeng, Q., & Santini, J. (2007). Implicit and explicit finite element methods for crash safety analysis. SAE Transactions, 1025-1037.
12. Glushchenkov, V.A. Vizualizaciya statiko-dinamicheskogo processa uplotneniya poroshkovoj kompozicii v metallicheskoj obolochke / V.A. Glushchenkov, R. de Alvarenga, I.A. Belyaeva // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2023. – T. 25. – № 3. – S.43-49.
13. Karpuhin, V. F. Opredelenie parametrov magnitno-impul'snoj formovki / V. F. Karpuhin // Samoletostroenie Rossii. Problemy i perspektivy: materia-ly simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem. – Samara: SGAU, 2012. – C. 209-210.

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Forming.

E-mail: imp@ssau.ru

Roberto de Alvarenga, Engineer of the Department of Metal Forming. E-mail: de_alvarenga.r@ssau.ru