

УДК 621.762.4.043

Руденко Н. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Пористые металлические материалы находят широкое применение в машиностроении, химической, медицинской и других отраслях промышленности. Чаще всего для их изготовления применяют технологию порошковой металлургии, включающую прессование и спекание порошков или их смесей. Для повышения пористости исходные порошки смешивают с порообразователями, в качестве которых используют полиметаметилкрилат, бикарбонат аммония, хлорид аммония, хлорид натрия, фторид натрия, карбамид и другие материалы [1–4].

Равномерность распределения плотности в прессованных порошковых изделиях определяет не только их качество, но часто и саму возможность изготовления этих изделий. На распределение плотности порошка при его прессовании в матрице существенное влияние оказывает трение. Определение этого распределения представляет интерес, как для теории прессования порошковых материалов, так и для практики изготовления из них пористых и других изделий.

Экспериментальное определение распределения плотности по объему неспеченных прессовок представляет значительные трудности. Поэтому наиболее приемлемым путем нахождения этого распределения является теоретический анализ процесса прессования [5, 6]. Вследствие сложного характера распределения плотности для его определения необходимо применять численные методы анализа. В настоящее время наибольшее распространение для решения задач пластического деформирования нашел метод конечных элементов. Существует ряд конечноэлементных комплексов, позволяющих решать задачи пластического деформирования пористых тел и прессования порошковых материалов. К ним относятся как универсальные комплексы ABAQUS, ANSYS, так и специализированные программы для решения задач обработки давлением Q-FORM и DEFORM. Анализ показал, что для применения универсальных комплексов необходимо выполнять относительно сложную экспериментальную калибровку моделей деформирования пористых материалов для определения входящих в них коэффициентов и функций [7, 8]. Модуль специализированного комплекса Q-FORM, предназначенный для расчета деформирования пористых материалов и прессования порошков, предполагает, что их начальная относительная плотность не может иметь значение меньше 0,65 [9]. Такое высокое начальное значение относительной плотности обычно имеют сферические порошки, подвергнутые виброуплотнению и применяемые для получения изделий горячим изостатическим прессованием. Для большинства других порошков, в том числе используемых в настоящей работе, начальная относительная плотность значительно меньше 0,65. Специализированный комплекс DEFORM-3D не накладывает ограничений на величину начальной относительной плотности [10]. Поэтому он был использован как инструмент теоретического анализа.

Целью работы является определение кривых упрочнения порошков железа и смеси порошков железа бикарбоната аммония для задания их свойств при моделировании процесса прессования методом конечных элементов.

Применялся следующий порядок моделирования. Вначале строилась геометрическая модель заготовки и инструмента (пуансоны и матрица), как это показано на рис. 1, а. Инструмент определялся как жесткий недеформируемый элемент расчетной схемы. Затем на порошковой заготовке генерировалась конечноэлементная сетка, состоящая из 32000 тетрагональных элементов, как показано на рис. 1, б.

Порошковой заготовке присваивали значение начальной относительной плотности. В нашем случае, как для порошка железа, так и для смеси порошков железа и порообразователя применяли одинаковое значение равное 0,423. Затем задавали

коэффициент трения по закону Амонтона–Кулона. Согласно данным работы [11], в случае прессования порошка железа он принимался 0,2.

В работе [12] было установлено, что применение порообразователей снижает напряжение выпрессовки примерно в 3 раза. Поэтому при моделировании прессования смеси порошков железа и порообразователя значение коэффициента трения принимали 0,065. В табличной форме задавали кривые упрочнения основного материала порошка. Методика и результаты определения кривых упрочнения для порошка железа и его смеси с порошком бикарбоната аммония изложены ниже.

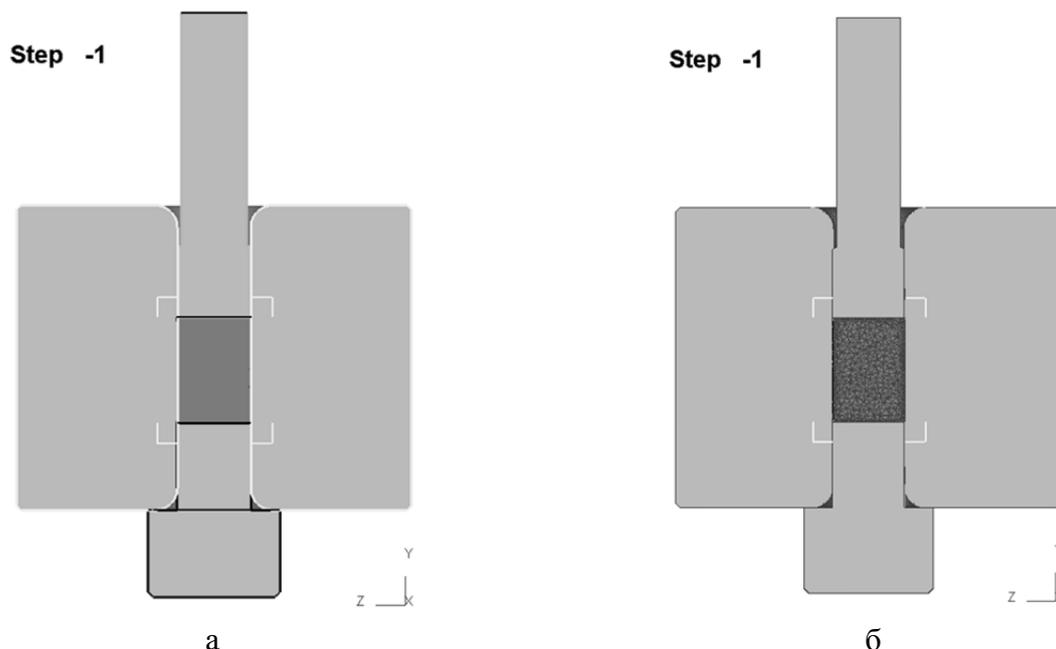


Рис. 1. Геометрическая (а) и конечноэлементная модель (б), используемые при анализе процесса одностороннего прессования порошка в закрытой матрице

Как отмечалось выше, для моделирования процесса прессования порошковых материалов необходимо задавать кривую упрочнения материала основы порошка (например, кривую упрочнения железа). В программном комплексе DEFORM-3D для задания кривых упрочнения используется база данных для свойств деформируемых материалов, включающая данные для стандартных сталей, сплавов и цветных металлов. Однако кривая упрочнения материала основы порошкового тела может очень существенно отличаться от кривой упрочнения литого материала близкого химического состава. Это является следствием повышенной дефектности микроструктуры порошковых материалов: наличия границ между частицами, не полностью исчезающими при спекании, оксидными и другими включениями в частицах порошка, изменением химического состава вследствие взаимодействия с атмосферой и других факторов. Следует ожидать большей прочности и пониженной пластичности материала основы порошка по сравнению со свойствами соответствующего литого материала. Еще большая проблема возникает при задании кривой упрочнения для порошковых смесей, в частности для смесей, содержащих базовый порошок и порошок порообразователя. В этом случае не существует аналогов литых материалов, и можно говорить только о некоторой виртуальной кривой упрочнения, которой, естественно, нет в базах данных конечноэлементных программ.

Для определения кривых упрочнения материала основы порошковых материалов нами была предложена следующая методика. С помощью некоторой мастер-кривой упрочнения в среде комплекса DEFORM-3D моделировалось прессование заданного порошка. Полученная расчетная кривая уплотнения (зависимость относительной плотности от давления прессования) сравнивалась с кривой уплотнения, определенной экспериментально. Затем мастер-кривая упрочнения модифицировалась таким образом,

чтобы расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми уплотнения было минимальным. Соответствующая кривая упрочнения определялась как кривая упрочнения материала основы порошка и использовалась в дальнейших расчетах.

В данной работе была определена кривая упрочнения для материала основы порошка железа и его смеси с порошком бикарбоната аммония в соотношении 40/60 по объему. В качестве мастер-кривой упрочнения использовалась кривая упрочнения для стали AISI-1010 из базы данных комплекса DEFORM-3D. Данная сталь по составу и свойствам близка к низкоуглеродистой стали 10. На рис. 2 показаны экспериментальные точки для кривой уплотнения порошка железа. Здесь же приведена расчетная кривая уплотнения, полученная моделированием с использованием кривой упрочнения материала основы порошка железа, определенной по вышеописанной методике.

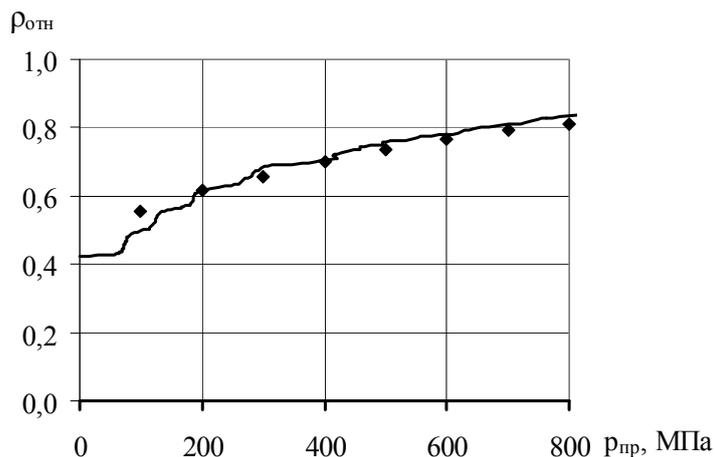


Рис. 2. Экспериментальные точки и расчетная кривая уплотнения для порошка железа

Аналогично, на рис. 3 показаны экспериментальные точки для кривой уплотнения смеси порошка железа и порошка бикарбоната аммония в соотношении 40/60 по объему. Здесь же приведена расчетная кривая уплотнения, полученная с помощью виртуальной кривой упрочнения этой смеси, определенной как описано ранее.

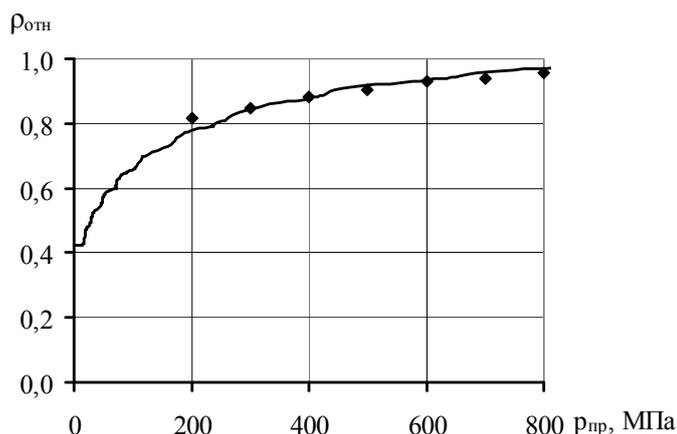


Рис. 3. Экспериментальные точки и расчетная кривая уплотнения для смеси порошков железа и бикарбоната аммония состава 40/60 по объему

На рис. 4 показаны кривые упрочнения для материала основы порошка железа и его смеси с порошком бикарбоната аммония. Для сравнения приведена мастер-кривая упрочнения для стали AISI-1010. Сравнение показывает, что материал основы порошка железа обладает более высокой прочностью, чем сталь AISI-1010. Разработанная методика определения кривой упрочнения материала основы может быть применена и для других порошковых материалов.

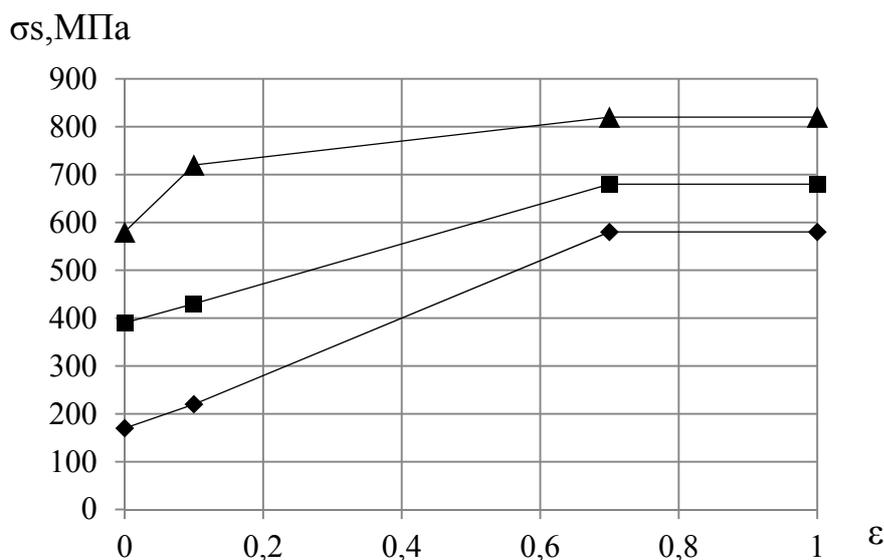


Рис. 4. Кривые упрочнения стали AISI-1010 (■), материала основы порошка железа (▲) и смеси порошков железа и порообразователя состава 40/60 по объему (◆)

ВЫВОДЫ

1. Конечноэлементный программный комплекс DEFORM-3D позволяет проводить моделирование прессования порошковых материалов без проведения сложных экспериментов по калибровке расчетной модели пористого материала.

2. Разработан новый экспериментально-аналитический метод для определения кривой упрочнения материала основы порошков при их прессовании. Метод основан на обратном моделировании кривой уплотнения порошка в матрице по методу конечных элементов. Определена кривая упрочнения материала основы порошка железа, а также виртуальная кривая упрочнения смеси порошка железа и порошка бикарбоната аммония состава 40/60 по объему. Кривая упрочнения материала основы порошка железа отличается от кривой упрочнения малоуглеродистой стали близкого химического состава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Compressive response of Al-foam produced via a powder sintering process based on a leachable space – holder material* / N. Michailidis, F. Stergioudi, A. Tsouknidas, E. Pavlidou // *Materials Science and Engineering A* – 2011. – Vol. 528. – P. 1662–1667.
2. *Analysis of bending strength of porous titanium processed by space holder method* / V. Amigo, L. Reig, D. J. Busquets, J. L. Ortiz, J. A. Calero // *Powder Metallurgy*. – 2011. – Vol. 54. – P. 67–70.
3. Руденко Н. А. Влияние вида порообразователя на прессование и свойства высокопористых спеченных изделий / Н. А. Руденко, А. М. Лаптев // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів тиском у машинобудуванні : зб. наук. праць : ВНУ ім. В. Даля. – Луганск, 2010. – С. 62–69.*
4. Bansiddhi A. *Shape – memory NiTi foams produced by solid – state replication with NaF* / A. Bansiddhi, D. C. Dunand // *Intermetallics*. – 2007. – Vol. 15. – P. 1612–1622.
5. Rahman M. M. *Finite element model of iron powder compaction at above room temperature* / M. M. Rahman, A. K. Ariffin // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1660. – <http://dx.doi.org/10.1063/1.4915799>.
6. *Numerical simulation and experimentation of warm metal powder compaction process* / M. M. Rahman, F. Tarlochan, R. Singh, A. K. Ariffin, S. S. M. Nor // *Key Engineering Materials*. – 2015. – Vols. 462–463. – P. 704–709.
7. *ABAQUS 6.9 Theory manual* / Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, Rhode Island : Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, 2009. – 1168 p.
8. Каплун А. Б. *ANSYS в руках инженера* / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

9. QFORM 2D/3D. Программа моделирования объемной штамповки. Версия 4.3. Руководство пользователя. 3D моделирование / Кванторформ. – М. : Кванторформ, 1991–2008. – 176 с.
10. DEFORM-3D Version 6.1 : User's manual / Scientific Forming Technologies Corporation. – Columbus, Ohio : Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 416 с.
11. Mosbah P. Experimental techniques for analysis of die pressing and ejection of metal powder / P. Mosbah, D. Bouvard, E. Ouedraogo, P. Stutz // Powder Metallurgy. – 1997. – Vol. 40. – № 4. – P. 269–277. – ISSN 1068–1302.
12. Rudenko N.A. Compaction and properties of highly porous powder parts produced with various pore formers / N. A. Rudenko, A. M. Laptev // 11th International Conference RaDMI 2011: Proceedings on CD-ROM. – Soko Banja, Serbia. – 2011. – Vol. 2. – P. 1240–1244.

REFERENCES

1. Compressive response of Al-foam produced via a powder sintering process based on a leachable space – holder material / N. Michailidis, F. Stergioudi, A. Tsouknidas, E. Pavlidou // Materials Science and Engineering A – 2011. – Vol. 528. – P. 1662–1667.
2. Analysis of bending strength of porous titanium processed by space holder method / V. Amigo, L. Reig, D. J. Busquets, J. L. Ortiz, J. A. Calero // Powder Metallurgy. – 2011. – Vol. 54. – P. 67–70.
3. Rudenko N. A. Vlijanie vida poroobrazovatelja na pressovanie i svojstva vysokoporistih spechennyh izdelij / N. A. Rudenko, A. M. Laptev // Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki materialiv tiskom u mashinobuduvanni : zb. nauk. prac' : VNU im. V. Dalja. – Lugansk, 2010. – S. 62–69.
4. Bansiddhi A. Shape – memory NiTi foams produced by solid – state replication with NaF / A. Bansiddhi, D. C. Dunand // Intermetallics. – 2007. – Vol. 15. – P. 1612–1622.
5. Rahman M. M. Finite element model of iron powder compaction at above room temperature / M. M. Rahman, A. K. Ariffin // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1660. – <http://dx.doi.org/10.1063/1.4915799>.
6. Numerical simulation and experimentation of warm metal powder compaction process / M. M. Rahman, F. Tarlochan, R. Singh, A. K. Ariffin, S. S. M. Nor // Key Engineering Materials. – 2015. – Vols. 462–463. – P. 704–709.
7. ABAQUS 6.9 Theory manual / Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, Rhode Island : Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, 2009. – 1168 p.
8. Kaplun A. B. ANSYS v rukah inzhenera / A. B. Kaplun, E. M. Morozov, M. A. Olfer'eva. – M. : Editorial URSS, 2003. – 272 s.
9. QFORM 2D/3D. Programma modelirovanija ob#emnoj shtampovki. Versija 4.3. Rukovodstvo pol'zovatelja. 3D modelirovanie / Kvantorform. – M. : Kvantorform, 1991–2008. – 176 s.
10. DEFORM-3D Version 6.1 : User's manual / Scientific Forming Technologies Corporation. – Columbus, Ohio : Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 416 с.
11. Mosbah P. Experimental techniques for analysis of die pressing and ejection of metal powder / P. Mosbah, D. Bouvard, E. Ouedraogo, P. Stutz // Powder Metallurgy. – 1997. – Vol. 40. – № 4. – P. 269–277. – ISSN 1068–1302.
12. Rudenko N.A. Compaction and properties of highly porous powder parts produced with various pore formers / N. A. Rudenko, A. M. Laptev // 11th International Conference RaDMI 2011: Proceedings on CD-ROM. – Soko Banja, Serbia. – 2011. – Vol. 2. – P. 1240–1244.

Руденко Н. А. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. МПФ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: RudenkoNataliia@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.08.2016 г.