

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ПОРОШКОВ В ОБОЛОЧКАХ

В.Н. Цеменко, С.В. Ганин*, Д.В. Фук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

*e-mail: S.V.Ganin@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты сравнительного анализа моделирования процессов деформации труднодеформируемых порошковых материалов. Качественные картины и величины деформации, полученные при моделировании, практически совпадают с результатами экспериментальных исследований. Таким образом, разработаны адекватные компьютерные модели и исследованы возможности их использования при моделировании сложных процессов пластической деформации порошковых материалов.

1. Введение

Методами порошковой металлургии возможно получение различных дисперсно и дисперсионно упрочненных материалов (в том числе с наноразмерными включениями, равномерно распределенными по объему частиц порошков). Однако физико-механические и технологические свойства таких материалов ставят их в разряд трудно деформируемых [1]. Поэтому эффект от применения таких материалов во многом зависит от технологических процессов их компактирования, которые должны быть проанализированы и согласованы.

Статическое прессование в замкнутых объемах дисперсно упрочненных порошков, покрытых оксидными пленками, связано с определенными трудностями. Для уплотнения подобных материалов могут быть использованы методы компактирования в незамкнутых объемах, такие как экструзия, равноканальное угловое прессование (РКУП), прокатка (Рис. 1) или их комбинации. Такие методы позволяют в процессе больших сдвиговых деформаций реализовывать схему близкую к схеме простого сдвига, обеспечивающую однородное напряженное состояние. Осуществление же этих процессов при повышенных температурах существенно снижает сопротивление деформации при уплотнении.

В результате при компактировании порошковых заготовок происходит увеличение площади контакта частиц, разрушаются оксидные пленки, образуются новые ювенильные поверхности, которые способствуют схватыванию порошков, при значительных сдвиговых деформациях. Однако необходимо реализовывать такую схему нагружения, при которой не происходит разуплотнения и разрушения материалов. В этом случае целесообразно помещать порошковые материалы в металлические оболочки, создающие дополнительный подпор в процессе нагружения. В настоящей работе проанализированы условия деформирования предварительно уплотненных

порошковых материалов методами математического моделирования и проведена последующая экспериментальная реализация ряда технологических процессов.

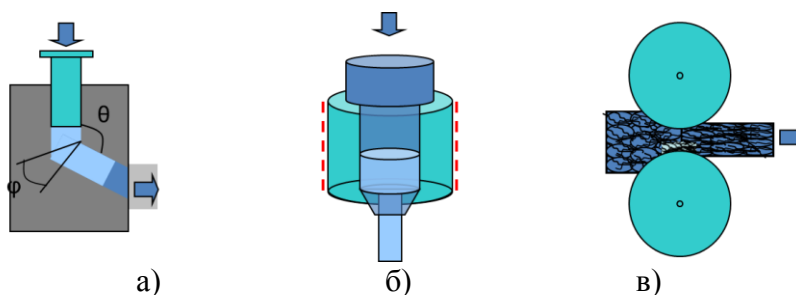


Рис. 1. Методы компактирования порошков в незамкнутых объемах: а – равноканальное угловое прессование; б – экструзия; в – прокатка.

2. Особенности условия текучести порошковых материалов

Большинство систем инженерного анализа либо не позволяют работать с некомпактными материалами, либо не могут дать надежный ответ о степени процессов уплотнения. Для выбора системы, наиболее адекватно описывающей поведение порошковых и пористых материалов при деформировании, рассмотрим наиболее функциональные и известные системы, нашедшие широкое применение в Российской Федерации: ANSYS/LS-DYNA версия 15.0 и DEFORM версия 10.0.1.

В пакете Deform-3D уплотняемый материал может быть описан как пористая среда, реологические характеристики такой модели задаются в виде зависимости предела текучести от температуры и скорости деформации.

В пакете ANSYS/LS-DYNA характеристики порошкового материала адаптируются к модели Geologiccap, в соответствии с которой условие текучести порошкового материала может быть задано на основе условия межчастичного сдвига [2, 3]. Следует отметить, что подобные модели хорошо описывают только те процессы, при которых изменение плотности при деформации происходит в сравнительно узком интервале.

Для более сложных процессов деформирования заготовок из порошковых материалов (экструзия, равноканальное угловое прессование, прокатка), при которых интервал изменения плотности лежит в существенно более широком диапазоне, особенно в зонах подпрессовки, необходимо использовать адаптированные к этим условиям математические модели и условия текучести.

Наиболее корректно описывает процессы деформирования порошковых материалов эллиптическое условие текучести [4] (Рис. 2), причем принципиальное значение имеет та часть кривой предельного состояния, которая относится к области уплотнения.



Рис. 2. Эллиптическое условие текучести порошкового материала в координатах T – интенсивность касательных напряжений, σ_0 – среднее (гидростатическое) напряжение.

В этом случае для построения реологической модели материала требуется установить зависимость трех параметров от относительной плотности материала: p_s –

предела текучести при гидростатическом сжатии; τ_s – предела текучести при пластическом сдвиге; c – предела уплотнения.

Эти параметры могут быть определены экспериментально на основе физического моделирования по результатам деформации порошкового материала при одноосном сжатии, сжатии в закрытой матрице и гидростатическом сжатии [5].

Эксперименты по физическому моделированию процесса уплотнения производилось на комплексе *Gleeble-3800*. В качестве модельных материалов использовали порошки алюминия со сферическими частицами. Стандартный порошок ПА-4 и механолегированная композиция на его основе. Для реализации процесса горячего уплотнения в закрытой матрице была изготовлена специальная оснастка (Рис. 3а). Нагрев образца осуществлялся прямым пропусканием тока через захваты.

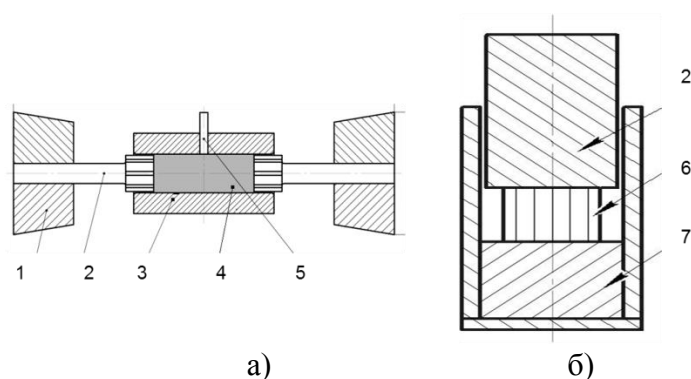


Рис. 3. Схемы проведения испытаний:

- а) – уплотнение порошкового материала на комплексе Gleeble 3800;
 б) – осадка уплотненного образца в специальной оснастке.
 1 - медные захваты; 2 – пуансон; 3 - матрица; 4 – деформируемый порошковый материал; 5 – термопара; 6 – уплотненный образец; 7 – оснастка.

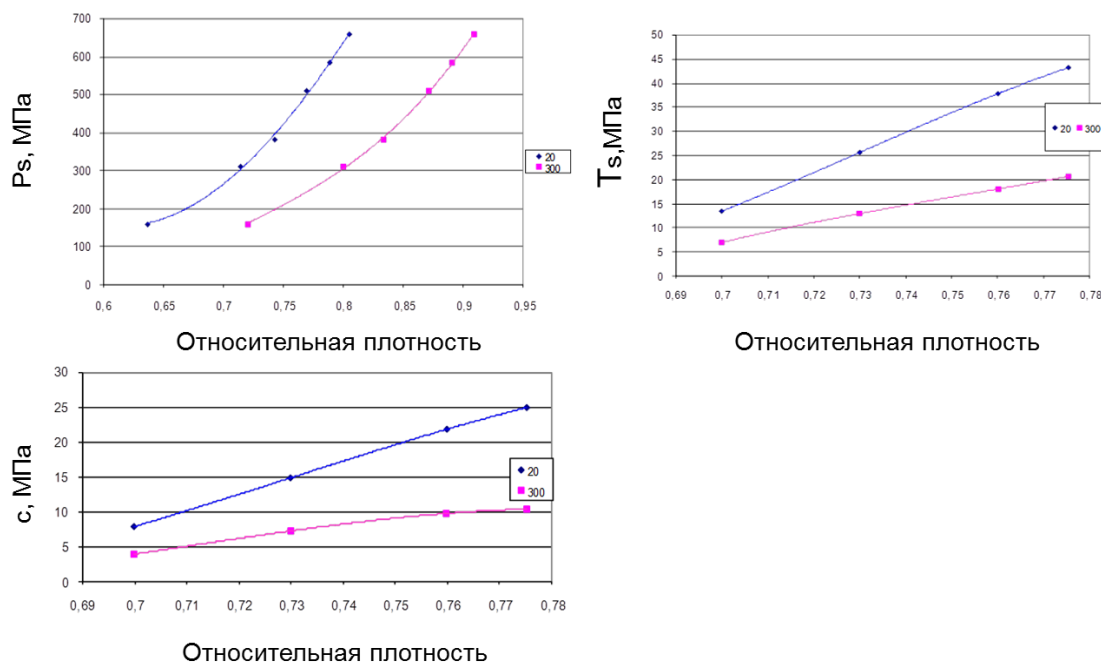


Рис. 4. Зависимости реологических характеристик от плотности материала при температурах 20 (синяя линия) и 300 °С (красная линия): а – предела текучести при гидростатическом сжатии (p_s); б – предела текучести при пластическом сдвиге (τ_s); в – предела уплотнения (c).

После достижения в камере высокого вакуума задавалось давление. После этого образец нагревался электрическим током со скоростью нагрева $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ в интервале температур от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до заданной температуры. После чего проводилась деформация с постоянной скоростью траверсы. После проведения эксперимента проводился расчет уплотнения материала исходя из плотности полученной в конце эксперимента заготовки.

Испытания образцов на одноосное сжатие проводили на универсальной машине Р-10 при температурах 20 и $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для испытания образцов при температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ оснастка вместе с образцом (Рис. 3б) помещалась в камерную печь, нагревалась до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдерживалась при этой температуре в течение 30 мин. После этого оснастка помещалась в рабочую зону машины и производилось нагружение образца. Критерием разрушения образца считалось достижение деформации 1 %.

На Рис. 4 приведены экспериментально определенные значения механических характеристик при температурах 20 и $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, необходимые для построения реологических уравнений. Значения реологических характеристик, как следует из графических зависимостей, при повышении температуры до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижаются почти в 2 раза.

3. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процесса осадки порошкового материала в оболочке

На Рис. 5 приведена схема процесса осадки порошковой заготовки в капсуле, моделирование которого осуществлено в пакете Deform-3D для пористой среды (Рис. 5а) и в пакете ANSYS/LS-DYNA для порошковой среды (Рис. 5б).

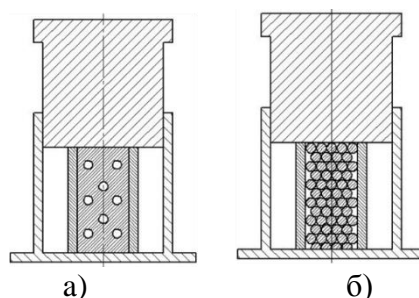


Рис. 5. Схема процесса деформации порошка в капсуле: а) модель, применяемая в пакете Deform-3D; б) модель, применяемая в пакете ANSYS/LS-DYNA.

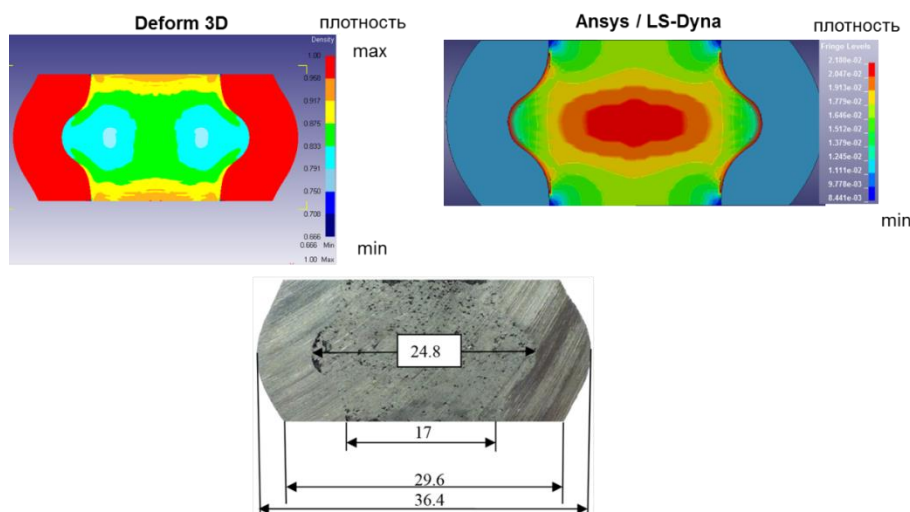


Рис. 6. Сравнение результатов математического моделирования процесса осадки с результатами эксперимента.

Сравнение результатов моделирования в DEFORM и LS-DYNA процесса осадки алюминиевых образцов в капсуле с экспериментальными данными показало, что обе модели позволяют получить адекватные результаты (Рис. 6).

Качественная картина и величина деформации, полученные при моделировании, практически совпадают с результатами экспериментальных исследований. Различие по плотности между практикой и моделированием составляет 8.5 % (для модели LS-DYNA) и 12 % (для модели DEFORM). При этом следует отметить, что в первом случае расчетное значение плотности (0,69) менее полученного экспериментально, а во втором случае (0.84) существенно превышает экспериментальные значения. Это, видимо, связано с особенностями математических моделей материалов и условиями их текучести.

4. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процесса равноканального углового прессования порошкового материала в оболочке

Моделирование осуществлялось в программе Multidef, разработанной в СПбПУ и адаптированной к эллиптическому условию пластичности порошковой среды [1].

Предварительный анализ процесса показал наличие зоны растягивающих напряжений на верхней кромке заготовки, способных приводить к разрыхлению порошковых материалов при сдвиге. Установлено, что незначительное сужение выходного канала позволяет сократить до минимума зону растягивающих напряжений, локализуя ее влияние на компактный материал капсулы

На Рис. 7 представлена сетка конечных элементов и результаты математического моделирования процесса РКУП порошковой заготовки в капсуле. Геометрия и размеры капсулы были определены на основании предварительных исследований.

Результаты моделирования показали, что в отсутствии подпора со стороны выходного канала заготовка начинает терять устойчивость. Происходит ее изгиб в месте начала контейнера с порошком (Рис. 7б). Таким образом, для реализации процесса без потери устойчивости необходим подпор со стороны выходного канала, который можно создать с помощью предварительного продавливания сплошной заготовки. На Рис. 7в представлено модельное изменение плотности порошковой заготовки в процессе РКУП.

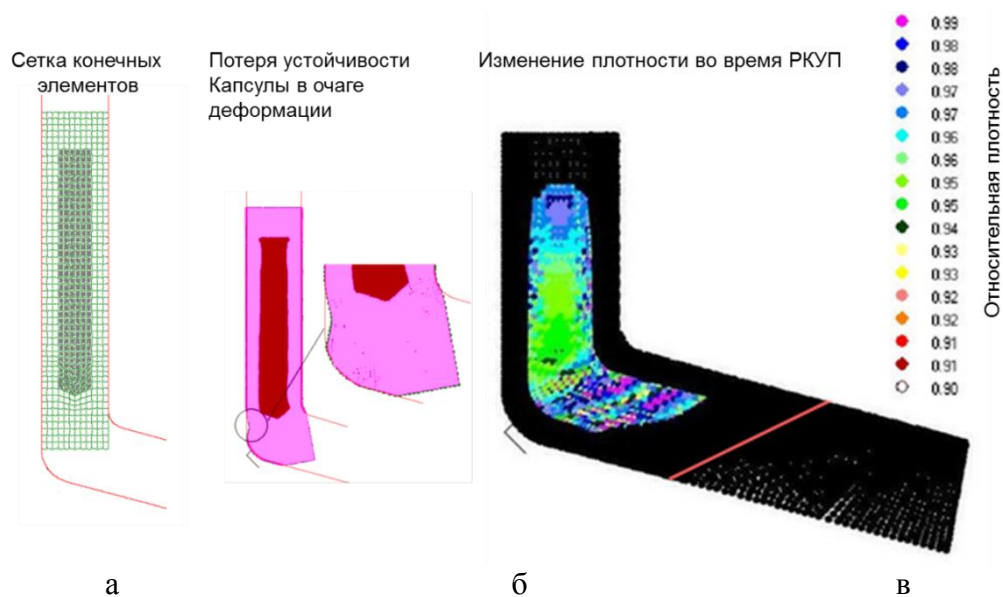


Рис. 7. Результаты математического моделирования процесса РКУП.

Натурный эксперимент проводился на гидравлическом прессе ПСУ-125. В процессе эксперимента последняя капсула с порошком продавливалась не полностью,

после чего матрица разбиралась, исследовалась микроструктура оставшегося образца. На Рис. 8 представлена микроструктура порошковой части образца, находящаяся в вертикальном канале, в которой относительная плотность изменилась от 0,72 до плотности 0,91. В начале очага деформации образец уплотнился до плотности 0,94. В результате прохождения заготовки через весь очаг деформации материал уплотняется до плотности 0,98.

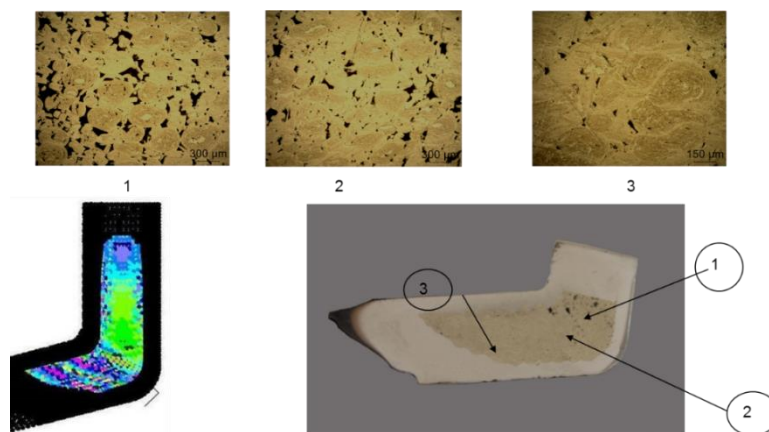


Рис. 8. Исследование макроструктуры материала после РКУП.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами математического моделирования.

5. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процесса горячей экструзии порошка в оболочке

На Рис. 9а представлена сетка конечных элементов порошковой заготовки в капсуле в исходном состоянии. На Рис. 9б приведен пример исследования влияния заходного угла матрицы на формирование структуры в носовой части заготовки.

Показано, что увеличение угла матрицы создает условия деформирования, при которых распределение относительной плотности более однородно.

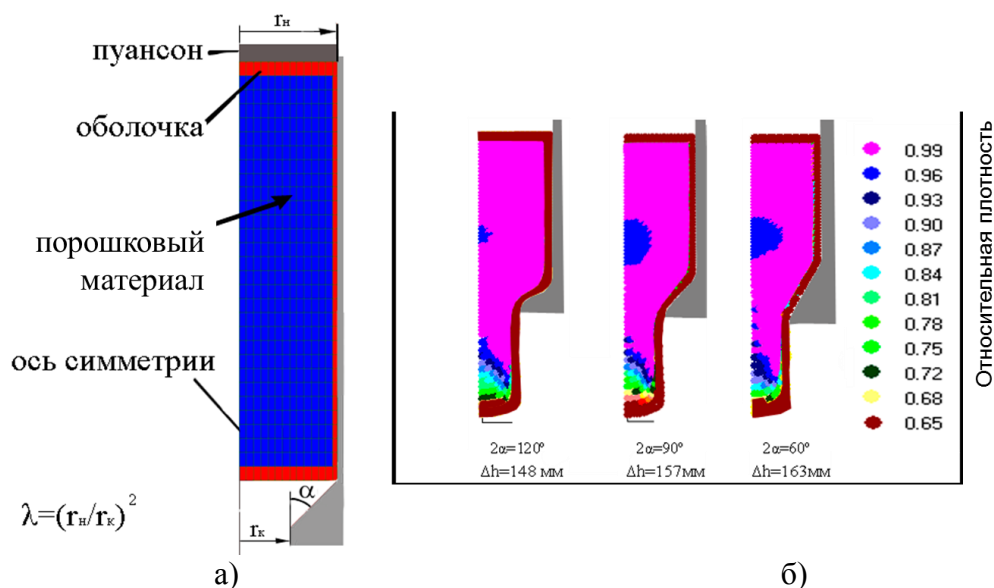


Рис. 9. Результаты математического моделирования процесса экструзии: а – сетка конечных элементов; б – исследование процесса уплотнения в зависимости от угла матрицы.

Натурный эксперимент проводился на гидравлическом прессе ПСУ-125. На Рис. 10 представлены заготовка после экструзии и микроструктура порошковой части в очаге деформации.



Рис. 10. Результаты проведения горячей экструзии:

а – общий вид заготовки после экструзии;

б) – микроструктура порошковой части полученного образца

6. Моделирование и реализация уплотняющей прокатки полученных материалов

Для исследования процессов дальнейшего деформирования образцов был рассмотрен метод горячей прокатки. Анализ напряженно-деформированного состояния и пластического течения слоистой композиционной заготовки при горячей прокатке осуществлен с использованием математического моделирования в пакете Deform-3D (Рис. 11).

На основе экстраполяции экспериментальной зависимости предела текучести при пластическом сдвиге (τ_s) от относительной плотности выбран беспористый модельный материал с аналогичными реологическими характеристиками. Модель деформирующего инструмента создана на основе геометрических параметров лабораторного прокатного стана 210.

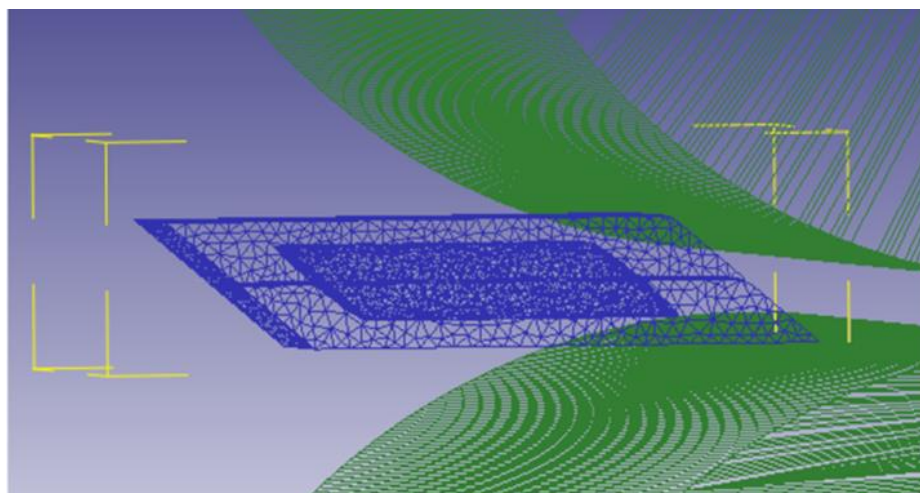


Рис. 11. Сетка конечных элементов при моделировании прокатки.

По результатам опытной прокатки установлено предельное обжатие (60 %), при котором происходит разрушение центральной (композиционной) части слоистой заготовки. Это позволило оценить предельную величину критерия разрушения Кокрофта-Латама для деформации слоистого материала [3]. На Рис. 12 показано, что критерий разрушения достигает своего критического значения на боковых кромках центральной части заготовки. Экспериментальные исследования показали, что именно

на этих частях заготовки возможно трещинообразование. Определение предельного значения критерия разрушения для данного материала позволило установить характер течения слоистого материала при различных обжатиях, а также смоделировать и опробовать неразрушающие режимы многопроходной горячей деформации композиционного материала при иной геометрии контейнера.

Дальнейшая холодная прокатка с небольшими обжатиями позволила нам получить слоистый композиционный материал с сохранением исходной микроструктуры композиционной сердцевины. Геометрические размеры полученных образцов позволяют им служить основой для разработки технологии крупногабаритных листовых материалов сваркой.

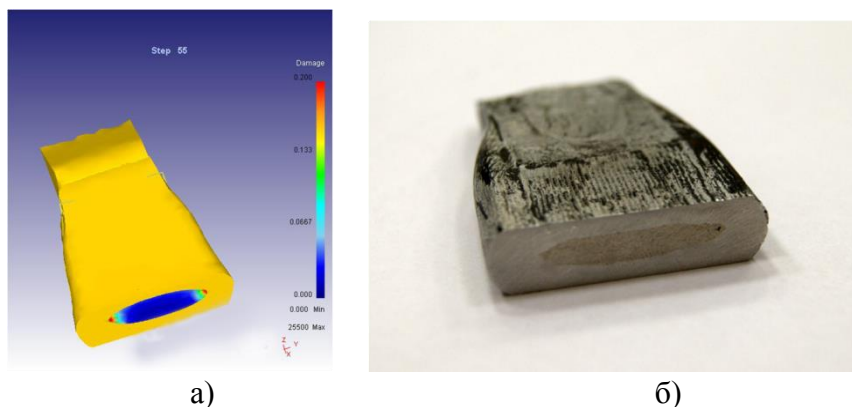


Рис. 12. Сравнение геометрии образцов, полученных:

а – в результате численного эксперимента; б – в результате опытной прокатки.

7. Выводы

На основе моделирования процессов деформации и экспериментального исследования разработаны практические рекомендации по осуществлению технологических процессов получения заготовок из дисперсно-упрочненных порошковых материалов на основе алюминия методами интенсивной пластической деформации. Показано положительное влияние применения контейнера при обработке давлением подобных материалов, определены технологические параметры прокатки, позволяющие осуществить совместную деформацию слоистого материала с сохранением целостности менее пластичной композиционной сердцевины. Методами математического моделирования определен характер течения порошкового материала в капсулах в процессах пластической деформации. Установлены неразрушающие режимы многопроходной горячей деформации слоистого композиционного материала.

Литература

- [1] А.И. Рудской, *Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов* (Наука, СПб., 2012).
- [2] М.В. Илюшкин, *Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA* (Ульяновск, 2012).
- [3] S.G. Selig, *Finite element simulation of the compaction and spring back of an aluminum powder metallurgy alloy* (Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, 2012).
- [4] Б.А. Друянов, *Прикладная теория пластичности пористых тел* (Машиностроение, М., 1989).
- [5] А.И. Рудской, В.Н. Цеменко, С.В. Ганин // *Металловедение и термическая обработка металлов* **10** (2014) 25.

RESEARCH AND SIMULATION OF THE DEFORMATION PROCESS OF DISPERSION-HARDENED POWDER IN A CAPSULE

V.N. Tsemenko, S.V. Ganin*, D.V. Phuc

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St.Petersburg, 195251, Russia

*e-mail: S.V.Ganin@gmail.com

Abstract. The results of a comparative analysis of process modeling deformation of powder materials. Qualitative pattern and the amount of deformation obtained through simulation, substantially coincide with the experimental results. Thus, appropriate computer model developed and studied the possibility of their use in modeling complex processes of plastic deformation of the powder materials.

References

- [1] A.I. Rudskoy, *Theory and modeling of deformation processes of powder and porous materials* (Science, St. Petersburg, 2012). (In Russian).
- [2] M.V. Ilyushkin, *Modeling of processing of metals pressure in the ANSYS/LS-DYNA program* (Ulyanovsk, 2012).
- [3] S.G. Selig, *Finite element simulation of the compaction and spring back of an aluminum powder metallurgy alloy* (Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, 2012).
- [4] B.A. Druyanov, *Applied theory of plasticity of porous bodies* (Mechanical Engineering, Moscow, 1989). (In Russian).
- [5] A.I. Rudskoy, V.N. Tsemenko, S.V. Ganin // *Metal Science and Heat Treatment* **56(9-10)** (2015) 542.