

DOI 10.5862/JEST.254.19

УДК 621.762

В.Н. Цеменко, Д.В. Фук, С.В. Ганин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 3: ПРОЦЕСС ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ

V.N. Tsemenko, D.V. Fuk, S.V. Ganin

DETERMINING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND MODELING THE EXTRUSION PROCESS OF POWDER AND POROUS MATERIALS. PART 3: THE HOT EXTRUSION PROCESS

В работе выполнено моделирование процесса уплотнения и деформации в капсуле порошкового материала САП-1 при различных вариантах экструзии. Исследовано влияние коэффициента вытяжки и угла конусности матрицы на уплотнение порошковых заготовок. Установлено, что изменение коэффициента вытяжки оказывает значительно большее влияние на процесс уплотнения заготовки, чем изменение угла конусности матрицы. На основе результатов математического моделирования определены технологические параметры для практической реализации процесса горячей экструзии порошкового композиционного материала САП-1 в капсуле. Математическим моделированием обоснованы технологические параметры процесса горячей экструзии, обеспечивающие уплотнение порошковой заготовки до практически беспористого состояния при минимально необходимом усилии пресса. Для математического моделирования процесса экструзии был использован программный пакет ABAQUS версии 16.4. Порошковый материал представлен встроенной реологической моделью Друкера–Прагера с внедрением подпрограммы, разработанной авторами.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПАКТИРОВАНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ; ПЛОТНОСТЬ.

The paper describes modeling the process of consolidation and deformation in a capsule of the SAP-1 powder material for various types of extrusion. We have investigated the influence of the extrusion coefficient and the matrix coning angle on consolidation of powder procurements. It is established that the change of the extrusion coefficient has a considerably greater influence on the sample consolidation process, than the change of the matrix coning angle. Based on the results of mathematical modeling, we have determined the technological parameters for the process of hot extrusion of the SAP-1 powder composite material in a capsule and substantiated the technological parameters of the hot extrusion process providing consolidation of the powder sample to an almost pore-free condition with minimum necessary effort of the press are proved.

POWDER METALLURGY; COMPACTION; MATHEMATICAL MODELLING; PLASTIC DEFORMATION; DENSITY.

Введение

Методы порошковой металлургии позволяют получать различные дисперсно- и дисперсионно упрочненные материалы (в том числе с наноразмерными включениями, равномерно распределенными по объему частиц порошков) [1–11]. Однако физико-механические и технологические свойства таких материалов ставят их в разряд труднодеформируемых [10]. Поэтому эффективность их применения во многом зависит от технологических процессов компактирования, которые должны быть проанализированы и согласованы. Один из наиболее перспективных методов компактирования таких порошков – экструзия в металлической капсуле. Важнейшее преимущество этого процесса прессования порошков по сравнению с другими – благоприятная схема пластической деформации, близкая к всестороннему сжатию и обеспечивающая высокую степень обжатия исходной заготовки за единственный акт ее обработки давлением. При такой схеме достигается интенсивный сдвиг в очаге деформации и прочное «схватывание» частиц друг с другом, наряду с отсутствием значительных растягивающих напряжений в порошковой заготовке [12]. Осуществление процесса экструзии в металлической капсуле способствует созданию дополнительного гидростатического давления, уменьшению трения между заготовкой и инструментом и защищает порошок от окисления и других негативных внешних воздействий [13–15].

Несмотря на то, что процесс горячей экструзии (ГЭ) порошков широко применяется в практике порошковой металлургии, до настоящего времени не выполнен комплексный анализ влияния различных параметров на процесс уплотнения и деформации порошковых заготовок. Параметры процесса ГЭ в основном подбираются опытным путем, что трудоемко и дорого. Для решения подобных задач целесообразно применять методы математического моделирования.

В работах [16, 17] на основе анализа деформирования элементарной ячейки идеализированной модели порошкового и пористого тела разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик порошкового и пористого материала. Это позволяет при помощи программного пакета ABAQUS

с использованием разработанной подпрограммы [18, 19] осуществить моделирование процесса экструзии порошкового материала.

Цель работы – обосновать с помощью математического моделирования технологические параметры процесса горячей экструзии, обеспечивающие уплотнение порошковой заготовки до практически беспористого состояния при минимально необходимом усилии пресса.

Методика проведения исследования и свойства материала

Для математического моделирования процесса экструзии был использован программный пакет ABAQUS версии 16.4 [19]. Порошковый материал представлен встроенной реологической моделью Друкера–Прагера с внедрением разработанной нами подпрограммы [18]. Исходная заготовка (с порошковым материалом внутри) имеет радиус $R_H = 15$ мм и высоту $H_H = 60$ мм. Начальная относительная плотность порошкового материала составляет $\theta_0 = 0,60$. В силу осевой симметрии расчет с реализацией явного метода (explicit) выполнялся для половины вертикального сечения заготовки. Построенная конечно-элементная модель порошковой заготовки содержит 3696 элементов типа CAX4R и 3857 узлов. На рис. 1 представлена схема процесса экструзии в капсуле с построением сетки конечных элементов: конечные элементы порошковой заготовки показаны зеленым цветом, а элементы металлической оболочки – синим.

Трение между капсулой с заготовкой и инструментом задавалось по Кулону; коэффициент трения принят $\mu = 0,1$.

Моделирование процесса экструзии осуществлялось при температуре 427 °С. Исследовался материал, состоящий из 92 % (объемн.) порошка алюминия АКВ-2.5 (ТУ 1791-99-043-2001) с размером частиц 160-1000 мкм и 8 % (объемн.) порошка упрочнителя – корунда Al_2O_3 (ТУ 6-09-426-75) с размером частиц менее 50 мкм. На основе выполненных численных экспериментов в соответствии с методикой, представленной в работе [16], получены зависимости реологических характеристик порошкового материала от относительной плотности при температуре $T = 427$ °С (рис. 2).

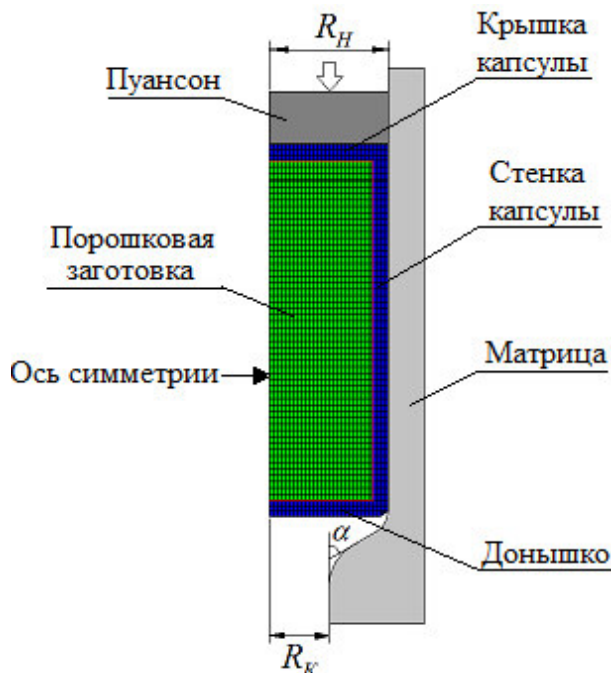


Рис. 1. Схема процесса горячей экструзии и сетка конечных элементов

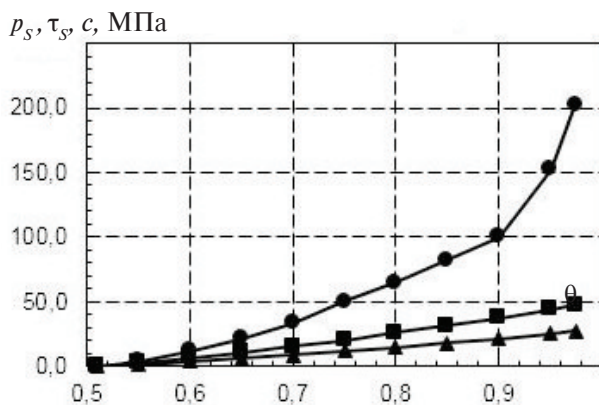


Рис. 2. Зависимости пределов текучести p_s при гидростатическом сжатии и τ_s пластическом сдвиге, а также предела уплотнения c порошкового материала от относительной плотности θ при $427\text{ }^\circ\text{C}$ ($\bullet - p_s$; $\blacktriangle - c$; $\blacksquare - \tau_s$)

На рис. 3 показано семейство поверхностей текучести Друкера–Прагера на плоскости p (гидростатическое давление) и q (интенсивность напряжений) в диапазоне изменения относительной плотности $\theta = 0,550-0,975$.

Капсулы изготовлены из сплава АМг5 с толщиной стенки 3 мм и толщиной доньшка 3 мм. Механические свойства материала АМг5 при температуре экструзии $T = 427\text{ }^\circ\text{C}$ взяты из спра-

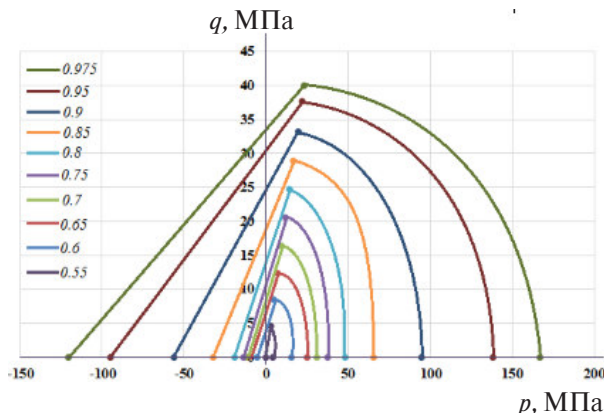


Рис. 3. Кривые текучести Друкера-Прагера для порошкового материала САП-1 в диапазоне относительных плотностей $\theta = 0,550-0,975$

вочника [20]: предел текучести при растяжении $\sigma_s = 92\text{ МПа}$; модуль нормальной упругости $E = 50500\text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$.

В ходе решения данной задачи рассматривали варианты экструзии порошковой заготовки в матрицу с выходными диаметрами 10, 15 и 21 мм (соответствуют коэффициентам вытяжки $\lambda = 9; 4; 2$). Рассмотрены матрицы с углами конусности 2α , равными $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и 150° . Такие значения редукиции и угла конусности были выбраны на основании опыта сотрудников ЦНИИ материалов, занимавшихся практическим изучением процесса горячей экструзии [12].

Математическое моделирование процесса горячей экструзии порошкового материала

Экструзия с девятикратной вытяжкой (коэффициент вытяжки $\lambda = 9$). Рассмотрены варианты экструзии порошковой заготовки диаметром 30 мм в матрицу с выходным отверстием 10 мм. Использовали матрицы с углами конусности 2α , равными $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и 150° . Независимо от угла 2α уплотнение материала достигается за счет его прессования в контейнере, а также за счет уменьшения диаметра заготовки в конической части матрицы.

Можно выделить три характерных стадии уплотнения заготовки. На начальной стадии усилие прессы практически целиком воспринимается оболочкой. Это вызывает перемещение периферийной части доньшка по конической поверхности матрицы. Порошковый материал на этой стадии является наполнителем оболочки, препятствующим потере устойчивости тонкостенного

цилиндра. У вариантов с углом 2α , равным 120° и 150° , очаг уплотнения появился в области, прилегающей к пуансону. У вариантов с углом 2α , равным 90° и 60° , очаг уплотнения появился впервые в области, прилегающей к конусной поверхности матрицы. При одинаковом перемещении пуансона область уплотнения больше в заготовке, экструдируемой через больший угол 2α (рис. 4).

На второй стадии наблюдается постепенное уплотнение порошкового материала по всему объему заготовки с появлением второго очага уплотнения (рис. 5). При этом на центральную область заготовки действуют наименьшие напряжения, поэтому эта часть заготовки уплотняется в последнюю очередь.

При достижении заготовкой выходного отверстия матрицы наибольшая плотность наблюдается в случае экструзии в матрицу с углом конусности $2\alpha = 60^\circ$, а наименьшая – при $2\alpha = 150^\circ$

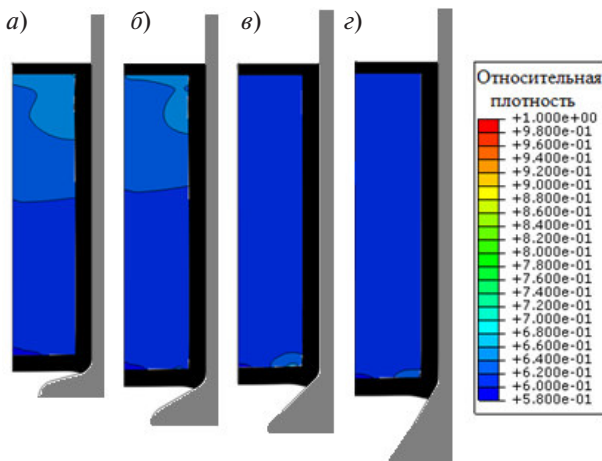


Рис. 4. Изменение плотности на начальной стадии экструзии ($\Delta h = 3,5$ мм) с углом конусности 2α , равным 150° (а), 120° (б), 90° (в), 60° (з)

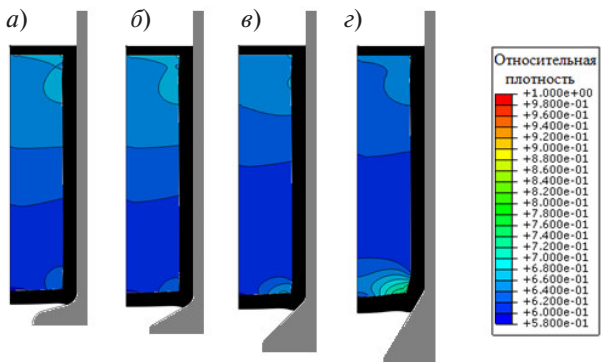


Рис. 5. Два очага уплотнения заготовок с углом конусности 2α , равным 150° (а), 120° (б), 90° (в), 60° (з)

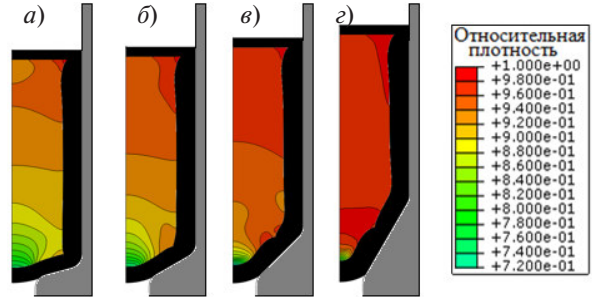


Рис. 6. Распределение плотности заготовок до начала истечения через выходное отверстие матрицы с углом конусности 2α , равным 150° (а), 120° (б), 90° (в), 60° (з)

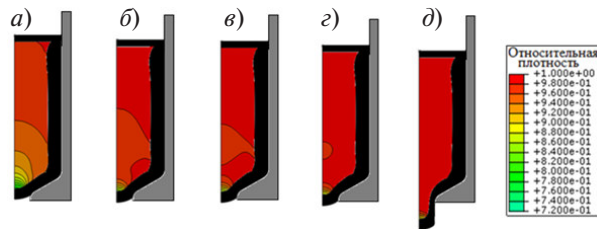


Рис. 7. Заключительная стадия уплотнения заготовки ($2\alpha = 120^\circ$)

Δh равно 17,7 (а), 17,9 (б), 18,1 (в), 19,5 (з), 20,1 (д) мм

(рис. 6). Данный факт, по-видимому, обусловлен большей протяженностью очага деформации матрицы с углом конусности $2\alpha = 60^\circ$, а следовательно, большей протяженностью участка, на котором действуют силы большей величины.

Третий этап уплотнения заготовки связан с ее истечением через выходное отверстие матрицы и формированием конечного диаметра. Наблюдается стремительное уплотнение заготовки до практически беспористого состояния (рис. 7). Процесс экструзии с этого момента начинает подчиняться законам течения компактного материала.

Полученный в результате экструзии пруток согласно данным моделирования имеет плотность компактного материала за исключением небольшой зоны пониженной плотности в задней части заготовки. В данной задаче не обнаружено существенных различий в прутках, получаемых после моделирования экструзии. Все они имеют практически идентичную зону пониженной плотности, протяженность которой составляет 6,5 мм.

Также можно отметить наплыв оболочки в области, прилегающей к пуансону. Это явление

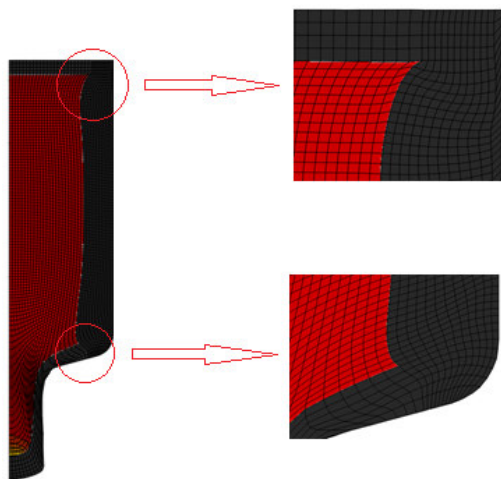


Рис. 8. Появление наплывов оболочки при экструзии с углом $2\alpha = 150^\circ$

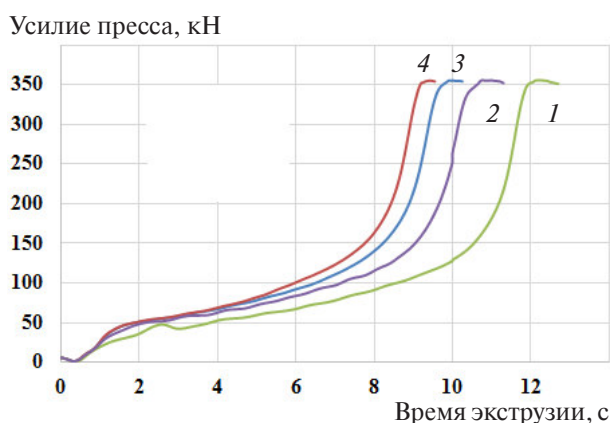


Рис. 9. График изменения усилия прессы экструзии (угол 2α равен 60° (1), 90° (2), 120° (3), 150° (4))

вызвано, по-видимому, силами трения. Наплыв оболочки у вариантов экструзии с углами 2α , равными 60° , 90° , 120° , одинаков. У варианта с углом $2\alpha = 150^\circ$ наплыв появился в областях, прилегающих и к пуансону, и к конической поверхности (рис. 8).

Характерно, что изменение угла конусности 2α практически не оказывает влияния на развиваемое экструзионным прессом давление (рис. 9). Максимальное необходимое усилие прессы составляет 355 кН.

Из графиков (см. рис. 9) видно, что чем меньше угол конусности 2α , тем медленнее развивалось усилие прессы. Это объясняется конструктивным отличием матриц: чем меньше 2α , тем дальше находится выходное очко матрицы от ее заходной части и тем позже формируется конечный пруток.

Экструзия с четырехкратной вытяжкой (коэффициент вытяжки $\lambda = 4$). Рассмотрены варианты экструзии порошковой заготовки диаметром 30 мм в матрицу с выходным отверстием 15 мм. Использовали матрицы с углами конусности 2α , равными 60° , 90° , 120° и 150° .

Вследствие большего диаметра выхода истечение заготовок из контейнера начинается при достижении меньших плотностей, чем у вариантов с девятикратной вытяжкой (рис. 10).

Как и в случае с большей вытяжкой, на центральную часть заготовки действуют наименьшие напряжения, в результате чего эта часть достигает полного уплотнения в последнюю очередь. Для вариантов экструзии с углами 2α , равными 60° и 90° , эта довольно большая зона существует до момента формирования конечных прутков (рис. 11). Очевидно, что при продолжении процесса экструзии материал, находящийся в контейнере, будет продолжать уплотняться, но это может указывать на недостаточность вытяжки

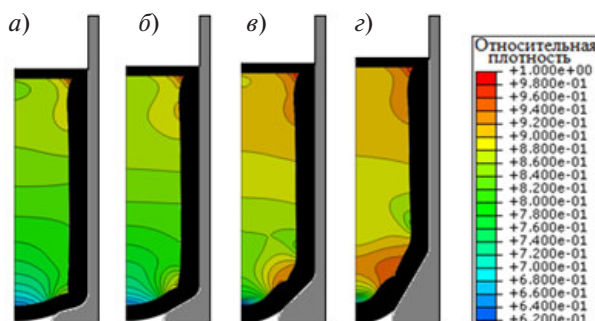


Рис. 10. Распределение плотностей порошковых заготовок до начала истечения через выходное отверстие матрицы с углом конусности 2α , равными 150° (а), 120° (б), 90° (в), 60° (г)

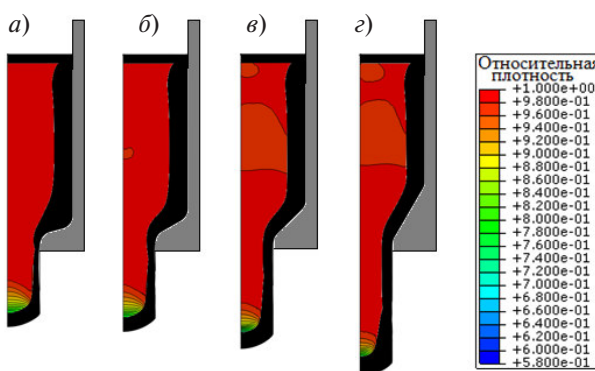


Рис. 11. Заключительная стадия экструзии заготовок через матрицу с углом конусности 2α , равным 150° (а), 120° (б), 90° (в), 60° (г)

$\lambda = 4$ при экструзии прутка в матрицу с такими углами конусности. Напротив, увеличение угла 2α до 150° не приводит к качественному улучшению условий уплотняемости материала, а лишь вызывает появление наплывов оболочки из-за повышенных сил трения (рис. 12).

При всех рассмотренных углах конусности 2α протяженность зоны пониженной плотности практически одинакова (10–11 мм). Эта величина несколько больше, чем в случае экструдирования через матрицу с диаметром 10 мм (при $\lambda = 9$). Тем не менее для вариантов экструзии с углами конусности 2α , равными 60° и 90° , разнотолщинность оболочки в полученных прутках большая, что вызывает дополнительную потерю при последующем отрезании неплотной заходной части прутка (рис. 13).

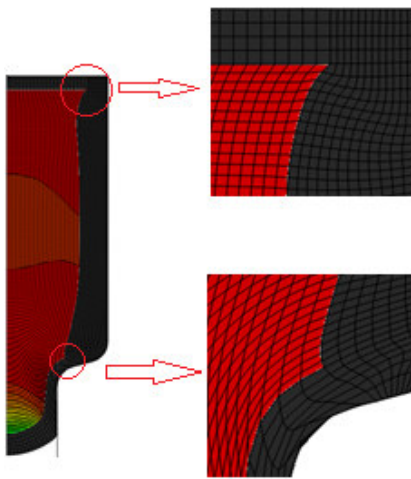


Рис. 12. Появление наплывов у варианта экструзии через матрицу с углом конусности $2\alpha = 150^\circ$

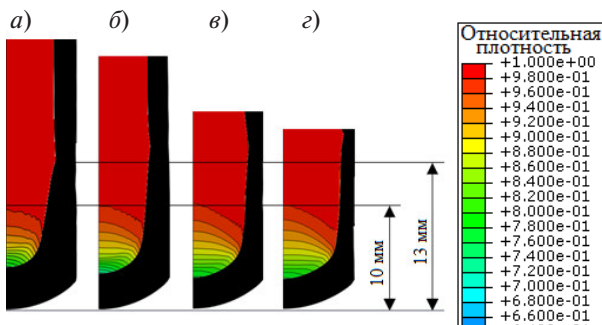


Рис. 13. Заходная часть полученных прутков после экструзии через матрицу с углом конусности 2α , равными 60° (а), 90° (б), 120° (в), 150° (г)

Усилие пресса, кН

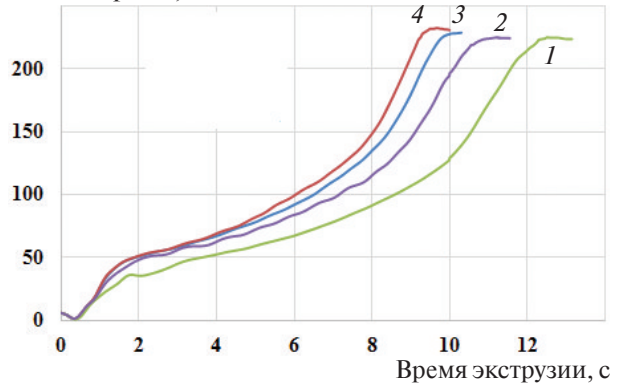


Рис. 14. График изменения усилия пресса экструзии (угол 2α равен 60° (1), 90° (2), 120° (3), 150° (4))

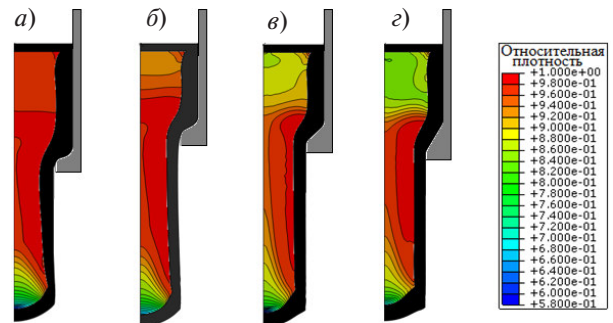


Рис. 15. Заключительная стадия процесса экструзии через матрицу с углом конусности 2α , равными 150° (а), 120° (б), 90° (в), 60° (г)

Давление экструзии при вытяжке $\lambda = 4$ также практически не зависит от угла 2α (рис. 14). Для рассматриваемой задачи максимальное необходимое усилие пресса составляет $P = 225$ кН.

Экструзия с двукратной вытяжкой (коэффициент вытяжки $\lambda = 2$). Рассмотрены варианты экструзии заготовки диаметром 30 мм в матрицу с выходным отверстием диаметром 21 мм. Выбраны матрицы с углами конусности 2α , равными 60° , 90° , 120° и 150° . В ходе решения данной задачи не удалось достигнуть компактного состояния заготовки ни при одном из рассматриваемых углов 2α . На рис. 15 показаны рассматриваемые варианты на заключительной стадии процесса. Зона компактного материала наблюдается лишь в локальной области каждой заготовки в районе матрицы.

Заключение

При помощи программного продукта ABAQUS, с использованием разработанной подпрограммы и методики определения реологических характеристик порошковых материалов смоделирован процесс уплотнения и деформации в капсуле порошкового материала САП-1 при различных вариантах экструзии. Выделены три основных стадии экструзии: на первой стадии начинается уплотнение заготовки в областях, прилегающих к пуансону и матрице, распространяющееся на весь объем заготовки; на второй – происходит нарастание плотности по всему объему заготовки; третья стадия сопровождается началом выхода порошковой заготовки через матрицу и ее доуплотнение. Осевая область заготовки уплотняется в последнюю очередь.

Исследовано влияние коэффициента вытяжки и угла конусности матрицы на уплотнение порошковых заготовок. Установлено, что изменение коэффициента вытяжки оказывает значительно большее влияние на процесс уплотнения заготовки, чем изменение угла конусности матрицы. На основе результатов математического моделирования определены технологические параметры для практической реализации процесса горячей экструзии порошкового композиционного материала САП-1 в капсуле. Коэффициент вытяжки составляет $\lambda \geq 4$. При $\lambda = 4$ целесообразно использовать матрицу с углом конусности $2\alpha = 120^\circ$. В этом варианте усилие пресса $P = 225$ кН. При $\lambda = 9$ матрицы с разными углами конусности позволяют получить практически идентичные результаты экструзии. В этом варианте усилие пресса $P = 355$ кН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.
2. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
3. **Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А.** Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
4. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
6. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А.** Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3(178). С. 148–155.
7. **Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В.** Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
8. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
9. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
10. **Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н.** Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов. СПб.: Наука, 2012. 415 с.
11. **Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжев Е.М., Кондратьев С.Ю.** Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
12. **Гиршов В.Л.** Процессы порошковой металлургии. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 113 с.
13. **Рудской А.И., Цеменко В.Н., Ганин С.В.** Исследование процессов уплотнения и деформирования порошкового композиционного материала системы алюминий – редкоземельные элементы // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 10. С. 25–31.
14. **Borovkov A.I., Shevchenko D.V.** Non-linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process // Computational Mechanics. 2004. № 4. P. 29–35.
15. **Александров А.Э., Рудской А.И., Рыбин Ю.И.** Модель пористого материала и условие пластичности пористых тел // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2008. № 4(89). С. 249–254.

16. **Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В.** Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 1. Порошковое тело // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2016. № 2(243). С. 124–133. DOI: 10.5862/JEST.243.13.

17. **Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В.** Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 2. Пористое тело. Научно-технические ведомости СПбПУ. 2016. № 2(243). С. 134–143. DOI: 10.5862.243.14.

18. **Фук Д.В., Ганин С.В., Цеменко В.Н.** Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2016. № 1(238). С. 100–110. DOI: 10.5862/JEST.238.10.

19. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials / Abaqus 6.14.

20. Металлические порошки и порошковые материалы: Справочник / Б.Н. Бавич, Е.В. Вершинина, В.А. Глебов [и др.]; под ред. Ю.В. Левинского. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 520 с.

REFERENCES

1. **Tsemenko V.N.** Deformirovaniye poroshkovykh sred. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2001. 104 s. (rus.)

2. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynnogo elektronno-luchevoogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

3. **Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A.** Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevoogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)

4. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynnogo sinteza izdeliy elektronnyim luchom. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. T. 85. № 11. S. 91–96. (rus.)

5. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

6. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)

7. **Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

8. **Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

9. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Algoritm i tekhnologicheskkiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnyim luchom v vakuume. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

10. **Rudskoy A.I., Rybin Yu.I., Tsemenko V.N.** Teoriya i modelirovaniye protsessov deformirovaniya poroshkovykh i poristykh materialov. SPb.: Nauka, 2012. 415 s. (rus.)

11. **Kokorin V.N., Rudskoy A.I., Filimonov V.I., Bulyzhev Ye.M., Kondratyev S.Yu.** Teoriya i praktika protsessov pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)

12. **Girshov V.L.** Protsessy poroshkovoy metallurgii [Processes of powder metallurgy]. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 113 s. (rus.)

13. **Rudskoy A.I., Tsemenko V.N., Ganin S.V.** Issledovaniye protsessov uplotneniya i deformirovaniya poroshkovogo kompozitsionnogo materiala sistemy alyuminiy – redkozemelnyye elementy. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 10. S. 25–31. (rus.)

14. **Borovkov A.I., Shevchenko D.V.** Non-linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process. *Computational Mechanics*. 2004. № 4. P. 29–35.

15. **Aleksandrov A.E., Rudskoy A.I., Rybin Yu.I.** Model poristogo materiala i usloviye plastichnosti poristykh tel. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2008. № 4 (89). S. 249–254. (rus.)

16. **Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V.** Opredeleniye reologicheskikh kharakteristik i modelirovaniye protsessov ekstruzii poroshkovykh i poristykh materialov. Chast 1. Poroshkovoye telo. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbPU*. 2016. № 2(243). S. 124–133. (rus.). DOI: 10.5862/JEST.243.13.

17. **Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V.** Opredeleniye reologicheskikh kharakteristik i modelirovaniye protsessov ekstruzii poroshkovykh i poristykh materialov. Chast 2. Poristoye telo. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbPU*. 2016. № 2 (243). S. 134–143. (rus.). DOI: 10.5862/JEST.243.14.

18. **Fuk D.V., Ganin S.V., Tsemenko V.N.** Modelirovaniye i issledovaniye protsessov uplotneniya poroshkovykh materialov s ispolzovaniyem programmnoy paketa ABAQUS. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 1(238). S. 100–110. (rus.). DOI: 10.5862/JEST.238.10.

19. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials / Abaqus 6.14.

20. Metallicheskiye poroshki i poroshkovyye materialy: [i dr.]; pod red. Yu.V. Levinskogo. M.: ЕКОМЕТ, 2005. Spravochnik / B.N. Bavich, Ye.V. Vershinina, V.A. Glebov 520 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич – доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: plast-ftim@mail.ru

TSEMENKO Valerii N. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: plast-ftim@mail.ru

ФУК Доан Ван – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: fukdoan@mail.ru

FUK Doan Van – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: fukdoan@mail.ru

ГАНИН Сергей Владимирович – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

GANIN Sergei V. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com