Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. А. Ермоленко, А. Ф. Федотов, Численный анализ влияния размеров оболочки на закономерности уплотнения и формоизменения при СВС-прессовании, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2002, выпуск 16, 75–80

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu100>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 35.173.219.149

26 апреля 2023 г., 14:47:18

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ОБОЛОЧКИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СВС-ПРЕССОВАНИИ

Выполнено исследование на сходимость численного решения краевой задачи пластического деформирования и определены размеры сетки конечных элементов для дискретной модели процесса СВС-прессования. Установлен экстремальный характер изменения плотности заготовки в зависимости от толщины оболочки, которая определяет ее ресурс сжимаемости. Для получения высокоплотных заготовок необходимо, чтобы ресурс сжимаемости оболочки был выше ресурса сжимаемости заготовки. С уменьшением радиальных размеров оболочки возможно усиление искажения формы заготовки из-за неоднородности напряженно-деформированного состояния вблизи поверхностей инструмента с внешним трением.

При прямом способе получения компактных материалов неостывшие продукты самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) подвергаются прессованию в закрытой матрице с передачей давления через сыпучую оболочку (технология СВС-прессования). В качестве оболочки используется песок. Оболочка выполняет две функции: осуществляет теплоизоляцию саморазогревающихся продуктов синтеза от холодного инструмента и передает давление на продукты СВС. Размеры оболочки определяют температурный режим деформации, напряженно-деформированное состояние и закономерности уплотнения продуктов синтеза. Анализ влияния размеров оболочки на температурный режим процесса СВС-прессования выполнен в [1]. Экспериментальных или иных исследований связи размеров оболочки с механикой процесса не проводилось. Цель работы – изучение влияния размеров оболочки на закономерности уплотнения и формоизменения при СВС-прессовании. Наиболее эффективно такое исследование провести на математической модели процесса. Адекватная математическая модель процесса СВС-прессования получена в [2] при решении методом конечных элементов (МКЭ) краевой задачи пластического деформирования в закрытой матрице пористой заготовки из горячих продуктов синтеза и сыпучей оболочки. Эта модель используется в настоящей работе для исследования влияния размеров оболочки на процессы уплотнения и формоизменения при СВС-прессовании.

При численных методах решения к числу основных относится вопрос выбора размеров элементов сетки для дискретной модели объекта. Проблема выбора размеров сетки приобретает особое значение при решении задач с варьированием размеров моделируемого объекта. В этом случае корректное сопоставление результатов исследования возможно при условии инвариантности размеров элементов сетки к размерам объекта. Очевидно, что с увеличением размеров объекта неизбежно растут затраты машинного времени. С целью определения рациональных размеров сетки конечных элементов было проведено исследование на сходимость численного решения краевой задачи пластического деформирования при СВС-прессовании. Для задач, имеющих точное аналитическое решение, сходимость оценивается сопоставлением численного и точного решений. При исследовании сходимости задач, для которых нет точного решения, применяют апостериорную оценку по правилу Рунге [3]. Сначала находят решение при шаге пространственных координат h , потом вычисляют решение при шаге $h/2$ и сравнивают значения $y_h(x_i)$ и $y_{h/2}(x_i)$ в одинаковых узлах:

$$\delta_i = y_h(x_i) - y_{h/2}(x_i), \quad (1)$$

где δ_i – ошибка решения в i -том узле; x_i – вектор узловых координат. Затем выполняется проверка точности полученного решения:

$$\|\delta\| \leq \varepsilon. \quad (2)$$

Здесь $\|\delta\|$ – принятая норма ошибки решения; ε – заданная точность решения задачи. Если условие (2) выполняется, то решение $y_h(x_i)$ принимается за искомое. В противном случае шаг $h/2$ делят пополам и вычисляют решение $y_{h/4}(x_i)$. Контроль точности в вычислении значений $y_{h/4}(x_i)$ осуществляют аналогично предыдущему. Точного решения краевой задачи пластического деформирования при СВС-прессовании нет и исследование численного решения на сходимость в настоящей работе выполнялось по правилу Рунге.

Рассматривался процесс СВС-прессования круглых заготовок и осесимметричное пластическое течение в цилиндрических координатах r и z . При дискретизации на КЭ исследуемая

область покрывалась прямоугольниками длиной h_r по координате r и высотой h_z – по координате z . Полученные прямоугольники диагональю разбивались на два треугольника. В механике порошков и пористых тел главное внимание уделяется не исследованию напряженно-деформированного состояния, а изучению параметров, характеризующих состояние материала и, в первую очередь, его плотности. При СВС-прессовании в заготовке и оболочке формируется неоднородное поле плотности. Поэтому в качестве решения рассматривалось распределение относительной плотности оболочки (ρ_2) по радиусу $\rho_2(r)$ и по высоте $\rho_2(z)$ деформируемого объема. Зависимость $\rho_2(r)$ определяли в горизонтальном слое, расположенном вдоль верхней опорной плоскости заготовки; зависимость $\rho_2(z)$ – в вертикальном столбце, прилегающем к боковой поверхности заготовки. За норму $\|\delta\|$ принималась величина максимальной ошибки решения по ансамблю конечных элементов рассматриваемых слоев оболочки:

$$\|\delta\| = \max |\delta_i|. \quad (3)$$

Моделировался процесс СВС-прессования круглых заготовок из сплава TiC-20%Ni радиусом $R_1 = 39$ мм в пресс-форме с матрицей радиусом $R_m = 62,5$ мм, давлении прессования $q = 120$ МПа и скорости плунжера $v_0 = 8$ мм/с. Начальная высота заготовки составляла $h_{10} = 14$ мм; общая высота – 34 мм при одинаковой толщине верхней и нижней оболочек, равной 10 мм. Начальный размер ячеек сетки принимался равным для заготовки – $h_r = 4,87$ мм, $h_z = 3,5$ мм; для оболочки – $h_r = 4,7$ мм, $h_z = 5$ мм. Геометрические характеристики дискретных моделей приведены в табл. 1. Точность решения составляла $\varepsilon = 0,2$ %. Расчет выполнялся на ПЭВМ Pentium-IV с частотой процессора 1600 МГц. Программирование осуществлялось в среде Visual Basic 6.0.

Т а б л и ц а 1

Геометрические и топологические характеристики дискретных моделей

Модель	Объект	Заготовка		Оболочка			Число		Время расчета, ч
	r , мм	0-35	35-39	39-45	45-54,5	54,5-62,5	КЭ	узлов	
1	h_r , мм	4,87		4,70			208	147	0,17
	h_z , мм	3,50		5,00					
2	h_r , мм	3,25		3,36			456	291	1,1
	h_z , мм	2,33		3,33					
3	h_r , мм	2,44		2,6			800	483	7,0
	h_z , мм	1,75		2,5					
4	h_r , мм	3,5	1,33	1,5	4,75	2,0	920	541	12,3
	h_z , мм	1,4		2,0					
5	h_r , мм	3,5	1,0	1,0	4,75	2,0	720	436	5,0
	h_z , мм	2,0		2,5					
6	h_r , мм	3,5	1,33	1,5	4,75	2,0	644	393	3,25
	h_z , мм	2,33		2,5 при $h_{2н} \leq 10$ мм 5,0 при $h_{2в} \geq 15$ мм					

Характер изменения зависимостей $\rho_2(r)$ и $\rho_2(z)$ при измельчении сетки КЭ представлен на рис. 1 и 2. При неоднородном распределении плотности в зонах с малыми градиентами сходимость достигается на более крупных ячейках по сравнению с зонами высоких градиентов плотности (см. рис. 1). Поэтому после получения сходимости в области малых градиентов на следующем шаге измельчения сетки выполняли только в области высоких градиентов плотности. Окончательные размеры неравномерной сетки, обеспечивающие заданную точность решения, соответствуют дискретной модели 6 (табл. 1). При толщине нижней или верхней оболочек свыше 15 мм сходимость обеспечивается при шаге сетки (h_z) в оболочке, равном $h_z = 5$ мм. Вычислительный алгоритм рассматриваемой краевой задачи содержит два вложенных итерационных цикла – внутренний при решении физически нелинейной задачи пластического течения методом гидродинамических приближений и внешний при расчете сил внешнего трения оболочки [2]. От выбранной точности итерационного процесса $\varepsilon_{ит}$ также зависит сходимость численного решения. Численным экспериментом установлено, что сходимость обеспечивается при $\varepsilon_{ит} = 2\%$ для обоих итерационных циклов. Заданная точность решения задачи пластического течения достигалась за счет автоматического выбора шага по времени нагружения Δt . При этом максимальное число итераций в методе гидродинамических приближений для текущей величины шага Δt принималось равным трем. Если за 3 итерации

принималось равным трем. Если за 3 итерации процесс не сходиллся, то время Δt уменьшалось вдвое, и расчет повторялся. Начальный шаг по времени составлял $\Delta t = 0,05$ с.

Р и с. 1. Влияние размеров сетки на распределение плотности оболочки по радиусу матрицы $\rho_2(r)$ (обозначения – в табл. 1)

Р и с. 2. Влияние размеров сетки на распределение плотности оболочки по высоте матрицы $\rho_2(z)$ (обозначения – в табл. 1)

Р и с. 3. Влияние толщины оболочки на плотность заготовки при ее расположении в верхней (1), средней (2) и нижней (3) части матрицы

Исследование влияния толщины оболочки на закономерности уплотнения заготовки проводилось на шагах с пространственными координатами h_r и h_z для дискретной модели 6 (см. табл. 1). Начальная толщина оболочки h_{20} включает толщину нижней $h_{2н}$ и верхней $h_{2в}$ оболочек: $h_{20} = h_{2н} + h_{2в}$. Рассматривалось три варианта расположения заготовки в оболочке. В 1-м варианте заготовка размещалась в центральной части матрицы и одновременно изменялась толщина верхней, и нижней оболочек. Во 2-м варианте заготовка находилась в нижней части матрицы. При этом толщина нижней оболочки оставалась постоянной ($h_{2н} = 5$ мм), а варьировалась только толщина верхней оболочки. В 3-м варианте заготовка располагалась в верхней части матрицы. В этом случае фиксировалась толщина верхней оболочки ($h_{2в} = 5$ мм), а изменялась только толщина нижней оболочки.

На рис. 3 приведены зависимости средней относительной плотности заготовки ρ_1 от начальной толщины h_{20} оболочки для трех вариантов расположения заготовки в матрице. Согласно расчетам независимо от положения в матрице максимальная плотность заготовки ρ_1 обеспечивается при начальной толщине оболочки $h_{20} = 35 - 40$ мм. Следует отметить резкое уменьшение плотности прессованной заготовки при $h_{20} < 30$ мм. Для объяснения этого явления рассмотрим процесс совместного деформирования и уплотнения заготовки и оболочки.

Из рис. 1 следует, что в наибольшей степени уплотняются объемы оболочки, расположенные в кольцевой зоне вокруг заготовки. В меньшей степени уплотняется оболочка центральной зоны, в которой находится заготовка. Уплотнение заготовки и оболочки обусловлено, главным образом, осевой деформацией, которая на порядок выше, чем радиальная деформация [2]. Если пренебречь радиальной деформацией, то для качественного анализа процесса деформирования достаточно рассмотреть одномерную механическую модель. Учитывая характер распределения плотности в радиальном направлении (см. рис. 1), эта модель представляет собой два параллельно соединенных элемента – центральная зона с заготовкой и кольцевая зона. Пусть заготовка имеет начальную относительную плотность ρ_{10} и начальную высоту h_{10} . Тогда для уплотнения до беспористого состояния с $\rho_1 = 1$ заготовку необходимо осадить на величину

$$\Delta h_1 = h_{10} (1 - \rho_{10}). \quad (4)$$

Совместно с осадкой заготовки происходит осадка кольцевой зоны оболочки. Максимальная осадка кольцевой оболочки по аналогии с (4) составляет

$$\Delta h_2 = h_0 (1 - \rho_{20}), \quad (5)$$

где h_0 – начальная высота всего деформируемого объема: $h_0 = h_{10} + h_{20}$. Конечная плотность заготовки будет определяться соотношением начальной плотности и высоты заготовки, а также кольцевой оболочки. Рассмотрим предельный случай, когда заготовка и оболочка имеют одинаковую начальную высоту: $h_{10} = h_0$. Если начальная плотность заготовки выше, чем у оболочки ($\rho_{10} > \rho_{20}$), то получим $\Delta h_1 < \Delta h_2$ и теоретически возможно получение беспористой заготовки. Напротив, при более высокой начальной плотности оболочки ($\rho_{10} < \rho_{20}$) имеем $\Delta h_1 > \Delta h_2$ и сначала до беспористого несжимаемого состояния уплотняется кольцевая оболочка, а заготовка остается пористой. Именно этот случай имеет место при СВС-прессовании сплава TiC – 20% Ni в песчаной оболочке. Начальная относительная плотность продуктов синтеза составляет $\rho_{10} = 0,5$; песка – $\rho_{20} = 0,61$. В рамках одномерной модели для получения беспористой заготовки необходима осадка на половину ее начальной высоты: $\Delta h_1 = 0,5 h_{10}$. Но кольцевая оболочка уже после осадки на 39% исчерпывает запас сжимаемости. С увеличением начальной высоты оболочки h_{20} повышается ресурс сжимаемости кольцевой зоны Δh_2 , что в итоге приводит к повышению плотности прессуемой заготовки. Таким образом, для получения методом СВС-прессования высокоплотных или беспористых заготовок необходимо обеспечить определенный ресурс сжимаемости оболочки, который характеризуется толщиной оболочки. Минимально допустимая толщина оболочки h_{2min} зависит от начальной высоты заготовки и начальной плотности уплотняемых материалов. Для рассматриваемого процесса расчетная величина этого параметра составляет $h_{2min} = 35 - 40$ мм.

На характер зависимости $\rho_1(h_{20})$ при $h_{20} > 40$ мм оказывает влияние положение заготовки в матрице. При расположении заготовки в верхней или средней части матрицы увеличение h_{20} свыше 40 мм практически не приводит к изменению плотности заготовки. Если заготовка находится в нижней части матрицы, то с увеличением толщины оболочки плотность заготовки уменьшается. В этом случае проявляется влияние сил внешнего трения оболочки. Известно, что из-за внешнего трения порошкового материала давление прессования уменьшается от верхней к донной части матрицы. Для малой толщины оболочки ($h_2 < 40$ мм) перепад давления по высоте незначителен и конечная плотность заготовки не зависит от ее положения в матрице. При

толщине оболочки свыше 40 мм давление в нижней части становится заметно меньше, чем в средней и особенно в верхней части матрицы, и плотность заготовки снижается.

Плотность заготовки – не единственный показатель качества процесса СВС-прессования. Важной технической характеристикой является размерная точность заготовки, которая определяет трудоемкость последующих операций механической обработки. Различие реологических свойств продуктов СВС и песка приводит к искажению формы заготовки – высота ее центральной части меньше, чем периферийной и опорные

Р и с. 4. Форма сечения заготовки при ее расположении в верхней (1), средней (2) и нижней (3) частях матрицы

поверхности являются вогнутыми [2]. Количественной мерой размерной точности может слу-

жить разность высот боковой поверхности h_6 заготовки и ее центра $h_{ц}$: $\Delta h_{заг} = h_6 - h_{ц}$. На рис. 4 показана форма радиального сечения заготовки в зависимости от ее положения в матрице с радиусом $R_m = 62,5$ мм. При расположении заготовки в верхней или нижней части матрицы максимальное искажение имеют опорные поверхности со стороны оболочки с малой толщиной – соответственно верхняя (рис. 4а) или нижняя (рис. 4в). При расположении заготовки в центральной части матрицы опорные поверхности искажаются в равной степени (рис. 4б). Для этого варианта имеет место минимальное искажение формы заготовки $\Delta h_{заг}$.

Т а б л и ц а 2

Влияние радиуса матрицы R_m на среднюю плотность заготовки

R_m , мм	62,5	55	50		45
q , МПа	120	156	188	233	233
ρ_1	0,986	0,99	0,992	0,994	0,995

Наряду с анализом влияния осевых размеров (толщины h_{20}) оболочки проведено исследование влияния радиальных размеров оболочки (радиуса матрицы R_m) на закономерности уплотнения и формоизменения заготовки. Выбор радиальных размеров матрицы имеет принципиальное значение, так как усилие пресса ограничено по величине и именно радиус матрицы определяет рабочее давление прессования. В табл. 2 приведены результаты численного анализа влияния радиуса матрицы R_m на плотность прессованных заготовок при постоянном усилии прессования, равном $Q_k = 1480$ кН. Исследование проводилось при толщине оболочки $h_{20} = 40$ мм и расположении заготовки в средней части матрицы. С уменьшением радиуса матрицы R_m при $Q_k = \text{const}$ давление прессования q увеличивается и средняя плотность заготовки ρ_1 возрастает (табл. 2).

С точки зрения получения высокоплотных заготовок естественна ориентация на использование малогабаритных пресс-форм и высоких давлений прессования. Вместе с тем не известно как происходит формоизменение заготовок с изменением радиальных размеров оболочки. Изменение формы и размерной точности $\Delta h_{заг}$ заготовок в зависимости от радиуса матрицы представлено на рис. 5. Минимальное значение $\Delta h_{заг}$ соответствует прессованию в матрице с радиусом $R_m = 45$ мм. Однако при этом происходит существенное искривление самих опорных поверхностей (рис. 5д). Как уже отмечалось, с уменьшением радиуса матрицы растет давление прессования. Поэтому снижение размерной точности заготовок при $R_m = 45$ мм может быть связано либо с геометрическим фактором (радиус R_m), либо силовым фактором (давление q). Для ответа на этот вопрос был выполнен расчет прессования в матрице радиусом $R_m = 50$ мм, но при давлении прессования, которое соответствует прессованию в матрице с $R_m = 45$ мм. Результаты расчета показывают, что при одинаковом давлении q искажение формы заготовки при прессовании с $R_m = 50$ мм (рис. 5г) существенно меньше, чем при прессовании $R_m = 45$ мм (рис. 5д). Следовательно, на размерную точность заготовки оказывают влияние радиальные размеры инструмента и оболочки. С точки зрения размерной точности оптимальным является прессование в матрице с $R_m = 50$ мм (рис. 5в).

Закономерности уплотнения и изменения формы заготовки обусловлены напряженно-деформированным состоянием, которое при СВС-прессовании является неоднородным. Эта неоднородность вызвана как различием реологических свойств заготовки и оболочки [2], так и внешним трением оболочки. Именно области прессовок вблизи поверхностей (и с трением) характеризуются сильной неоднородностью напряженно-деформированного состояния и поля плотности [4]. Поэтому при уменьшении радиальных размеров оболочки часть заготовки попадает

Р и с. 5. Влияние радиуса матрицы на форму заготовки:
а – $R_m = 62,5$ мм; б – $R_m = 55$ мм; в – $R_m = 50$ мм, $q = 188$ МПа;
г – $R_m = 50$ мм, $q = 233$ МПа; д – $R_m = 45$ мм

в область сильной неоднородности, вызванной силами внешнего трения, и ее размерная точность уменьшается.

Таким образом, выполнено исследование на сходимость численного решения краевой задачи осесимметричного пластического деформирования и определены оптимальные размеры сетки конечных элементов для дискретной модели процесса СВС-прессования.

Установлен экстремальный характер изменения плотности заготовки в зависимости от толщины оболочки, которая определяет ее ресурс сжимаемости. Для получения высокоплотных заготовок необходимо, чтобы ресурс сжимаемости оболочки был выше ресурса сжимаемости заготовки.

Размерная точность СВС-прессованной заготовки зависит от ее положения в матрице и радиальных размеров оболочки. С уменьшением радиальных размеров оболочки возможно усиление искажения формы заготовки из-за неоднородности напряженно-деформированного состояния вблизи поверхностей инструмента с внешним трением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Конечно-элементная плоская модель теплового режима при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе заготовок в сыпучей оболочке // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 5. С. 160-166.
2. Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Конечно-элементная модель процесса осесимметричного пластического деформирования при СВС-прессовании // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.– мат. науки. 2001. Вып. 12. С. 91-103.
3. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы. Т. 2. М.: Наука. 1977. 399 с.
4. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1991. 432 с.