

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВС-ЭКСТРУЗИИ ДЛЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ПРОГНОЗА ПО ПРИМЕНЕНИЮ НОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СХЕМ

Л.С. Стельмах\*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия  
[stelm@ism.ac.ru](mailto:stelm@ism.ac.ru)

Развитие процесса СВС-экструзии экструзии зависит от разнообразных влияний: режимных факторов (скорости плунжера прессы, давления на плунжере), собственных свойств материала (объемной и сдвиговой вязкостей и их зависимости от плотности, температуры, структурного параметра), тепловых и граничных условий, теплофизических характеристик и их зависимости от плотности, геометрии установки и образца. Эти факторы определяют значения характерных времен основных процессов: экструзии, уплотнения, тепловой релаксации и структурных превращений. Уже первые эксперименты по отработке новых и совершенствованию имеющихся экспериментальных схем СВС-экструзии выявилось необходимость попадания технологических параметров в оптимальную область. Весьма эффективным здесь оказался метод математического моделирования.

В докладе рассмотрены тепловые и реодинамические модели процессов деформирования порошковых материалов в условиях СВС-экструзии с целью их использования для рекомендаций, прогноза и приемов по применению новых экспериментальных схем [1–4]. Проведены численные исследования влияния реодинамических и тепловых факторов на процесс уплотнения и формования продуктов горения.

Обоснованы наиболее эффективные приемы получения длинномерных образцов больших диаметров (более 5 мм) и длиной более 100 мм методом СВС-экструзии: увеличение высоты таблетки; повышение температуры горения; улучшение тепловых условий выдавливания: использование теплоизолятора (асбеста толщиной 3 мм) на профилирующей матрице и в ее отверстии, подогрев калибра и матрицы. Даны рекомендации по влиянию масштабного фактора (геометрических размеров исходной заготовки) на особенности получения длинномерных образцов большого диаметра методом СВС-экструзии. Показано, что изменение масштабного фактора существенным образом влияет на длину и качество экструдированных стержней за счет равномерности температурного поля. Обнаружено, что существует предельное

значение диаметра исходной заготовки, выше которого материал практически не выдавливается из камеры [2, 3]. Отметим, что сделанные рекомендации и прогнозы установлены для состава TiC(70%)+Ni(30%), однако можно ожидать, что качественный характер особенностей получения крупногабаритных изделий не изменится для других составов.

Предложена новая модель СВС-экструзии с двухступенчатым обжатием материала, исследовано влияние технологических параметров и тепловых условий на длину и плотность получаемых длинномерных образцов. Показано, что двухступенчатое обжатие увеличивает длину выдавленной части материала: применение схемы двухступенчатого обжатия позволяет получать стержни длиной 95% от максимально возможной, в то время как при одноступенчатой схеме экструзии только 63%. В некоторых случаях можно выявить оптимальный переходной радиус, для получения более качественных экструдатов [4].

Теоретические исследования возможности получения нагревательных стержней методом СВС-экструзии из дисилицида молибдена показали, что при определенных параметрах методом СВС-экструзии можно получить образцы стержней лучшего качества и большей длины, что хорошо согласуется с экспериментом.

Проведен теоретический анализ по влиянию внешнего трения на процесс уплотнения порошковых материалов. Получены аналитические соотношения для скорости поршня и характерного времени прессования, из которых видна природа количественной поправки на величину внешнего трения. Показано, что из-за внешнего трения даже при самых благоприятных условиях одностороннее прессование практически непригодно для получения прессовок с отношением высоты к диаметру свыше 2.5.

## Литература

1. А.М. Столин, Л.С. Стельмах. Общие принципы математического моделирования СВС-технологий. *Вестник ТГТУ*, 2014, т. 20, № 4. стр. 684–692.
2. D.A. Parshin, L.S. Stelmakh, and A.M. Stolin. SHS Extrusion of Thick Rods: A Numerical Simulation. *Int. J. of SHS*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 74–77.
3. Л.С. Стельмах, А.М. Столин, Э.В. Стельмах. Роль масштабного фактора в процессе СВС-экструзии (на примере системы TiC+Co). *Теор. осн. хим. тех.*, 2016 (принята к печати).
4. Д.А. Паршин, Л.С. Стельмах, А.М. Столин. Математическое моделирование твердофазной плунжерной экструзии с двухступенчатым обжатием композитных материалов. *Теор. осн. хим. тех.*, 2015, т. 49, № 3, стр. 361–366.