ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/137

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

¹Черепанов Р.О., ¹Криницын М.Г., ¹Федоров В.В., ²Крекутулева Р.А., ³Черепанов О.И.

¹НИ Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия

Селективное лазерное сплавление (selective laser melting, SLM) порошков металлов и сплавов является одной из основных технологий аддитивного производства металлических изделий (на ряду с селективным электронно-лучевым сплавлением, electron-beam melting, EBM). Технология селективного лазерного плавления предполагает послойное нанесение порошковых материалов с локальным плавлением порошка лазерным излучением. Характерные размеры частиц порошка как правило лежат в пределах от 5 до 100 мкм, толщина наносимых слоев составляет сотни мкм, лазерный луч имеет диаметр от 50 до 300 мкм, мощность, скорость движения и другие параметры луча подбираются таким образом, чтобы обеспечить проплавление, достаточное для надежного соединения соседних слоев и минимизировать пористость конечного материала. После послойного изготовления изделия нерасплавленный порошок удаляется механически, а полученное изделие требует минимальной дополнительной обработки или не требует ее вообще.

Качество изделий, получаемых методом SLM, в значительной степени зависит от правильного подбора режимов работы лазера. Существенное влияние оказывает эффект Марангони, который приводит к формированию шероховатости на поверхности слоев, которые могут вызывать механические поломки оборудования дозирования и нанесения порошка. Кроме того, малые размеры зоны плавления, высокие скорости нагрева и охлаждения и большие градиенты температуры при формировании слоев приводят к формированию значительных внутренних напряжений, для устранения которых требуется длительный отжиг изделий после изготовления. Однако, довольно часто внутренние остаточные напряжения приводят к неприемлемой деформации и даже к разрушению изделий непосредственно в процессе изготовления, что ограничивает список применимых материалов или требует длительного и дорогостоящего экспериментального подбора режимов плавления.

В данной работе рассматривается трехмерная математическая модель процесса селективного лазерного плавления металлического порошка и эволюция полей внутренних деформаций и напряжений в окрестности зоны плавления. Для моделирования гидродинамического течения порошка при плавлении и кристаллизации использован бессеточный метод гладких частиц (smoothed particle hydrodynamics, SPH) с коррекцией положения узлов (δ^+SPH [1]), для расчета нестационарных процессов теплопроводности использован метод XSPH [2].

Расчет остаточных напряжений, формирующихся при остывании расплава до комнатной температуры осуществляется вариационным методом гладких частиц [3] в два этапа:

Пока присутствуют области расплавленного металла решается совместно задачи теплопроводности, гидродинамики (в расплаве) и упруго-пластичности (в твердой фазе), при этом для определения положения фронтов плавления и кристаллизации численно совместно с задачей распространения тепла решается задача Стефана. На этом этапе процесс теплопроводности моделируется в динамической постановке, гидродинамическое течение расплава рассматривается в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости, а решение задачи упруго-пластического деформирования твердой фазы осуществляется итерационным методом.

После полной кристаллизации расплава состояние материала принимается за начальное для статической задачи термоупругопластичности, расчет полей температур прекращается, и вариационным методом находится конечное распределение напряжений и деформаций, соответствующее конечной температуре изделия.

Секция 3. Проблемы компьютерного конструирования материалов с иерархической структурой

Использование бессеточных методов существенно упрощает реализацию трехмерных алгоритмов, так как при таком подходе исчезает необходимость в перестроении конечно-элементной сетки при больших деформациях.

В данной работе использован бессеточный метод гладких частиц (SPH), в отличие от распространенного подхода с использованием метода конечных элементов, например [4] или метода подвижных клеточных автоматов [5],[6]. Выбор метода обусловлен тем, что SPH позволяет в рамках единого подхода реализовать расчет упруго-пластических и гидродинамических течений и расчет нестационарных тепловых полей, при этом обеспечивает относительно высокую точность расчетов и позволяет моделировать большие деформации и перемешивание материалов без трудоемких операций перестроения сеток.

В работе рассматриваются результаты моделирования формирования полей остаточных напряжений в различных материалах при различных параметрах плавления. Установлено, что при больших мощностях и скоростях движения лазерного луча формируются более компактные зоны плавления, характеризующиеся большими градиентами температуры и как следствие – более неоднородным полем внутренних напряжений с большими пиками по сравнению с режимами с меньшими мощностями и скоростями движения лазерного луча.

Литература

1. P.N. Sun, A. Colagrossi, S. Marrone, A.M. Zhang, The δ plus-SPH model: Simple procedures for a further improvement of the SPH scheme, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 315, 2017, Pp. 25-49, ISSN 0045-7825, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.10.028>.
2. M.B. Liu, G.R. Liu, Restoring particle consistency in smoothed particle hydrodynamics, *Applied Numerical Mathematics*, Vol 56, Issue 1, 2006, Pp. 19-36, ISSN 0168-9274, <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2005.02.012>.
3. R.A. Krektuleva, O.I. Cherepanov, R.O. Cherepanov, Numerical investigation of residual thermal stresses in welded joints of heterogeneous steels with account of technological features of multi-pass welding, *Applied Mathematical Modelling*, Vol 42, 2017, Pp. 244-256, ISSN 0307-904X, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.10.005>.
4. Zäh M.F, Lutzmann S., Modelling and simulation of electron beam melting, *Production Engineering*, Volume 4, Issue 1, February 2010, Pages 15-23
5. Koepe J.A., Gotterbarm M.R., Markl M., Körner C., 3D multi-layer grain structure simulation of powder bed fusion additive manufacturing, *Acta Materialia*, Volume 152, 15 June 2018, Pages 119-126
6. Smolin, A.Y., Eremina, G.M., Sergeev, V.V., Shilko, E.V. Three-dimensional movable cellular automata simulation of elastoplastic deformation and fracture of coatings in contact interaction with a rigid indenter, *Physical Mesomechanics*, Volume 17, Issue 4, 25 November 2014, Pages 292-303