

УДК 681.5.017

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАЛЕНИЯ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Д. А. ШЕЛЕПЕНЬ

(Представлено: д-р техн. наук, проф. Н. Н. ПОПОК, канд. техн. наук С. А. ПОРТЯНКО)

*Рассмотрены основные направления по снижению концентрации напряжений и исключению других ошибок, возникающих во время 3D-печати с использованием металлополимерного композитного материала. Приведены результаты напряжений при трёхмерном моделировании удаления связующих.*

**Введение.** Поскольку связующие вещества удаляются во время каталитической очистки, некоторые элементы деталей, не имеющие структурной целостности, могут разрушаться или деформироваться под собственным весом. Часто оказывается, что неправильная конструкция или ориентация печати являются существенным фактором разрушения деталей.

Внутренние напряжения при растяжении-сжатии, возникающие из-за гравитационных сил, должны учитываться при выборе подходящей конструкции и ориентации деталей.

Условия и допущения модели:

1. Моделирование предполагает идеальные результаты печати без расслоения, коробления, пористости или других ошибок, возникающих из-за некачественной печати.
2. Ориентация удаления связующих и спекания должна соответствовать ориентации печати.
3. Моделирование проводится для сплошных деталей со 100 % заполнением.
4. Опоры должны присутствовать в твердотельной модели или быть заданы как фиксированные ограничения детали.
5. При достижении максимальных растягивающих и сжимающих напряжений предполагается разрушение.

**Моделирование процесса удаления связующих.** Для проверки устойчивости деталей из "коричневого" металла (Brown Part Stability) можно использовать любое программное обеспечение для автоматизированного проектирования (САПР) с решателем методом конечных элементов (например, Autodesk Inventor, SolidWorks, Siemens NX) [1]. При анализе удаления связующих используется метод линейно-статического анализа для аппроксимации гравитационных сил во время удаления связующих.

Порядок действий:

1. После загрузки файла детали в выбранную программу САПР, необходимо повернуть деталь в соответствии с ориентацией печати (глобальное направление Z является направлением печати).
2. Создать сетку детали используя трехмерные твердотельные элементы. Убедившись, что в самых тонких частях детали присутствует не менее 3 элементов сетки (чем мельче сетка, тем выше точность).
3. Ограничить область детали, которая контактирует с рабочей пластиной и приложить распределенную гравитационную силу ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ) в направлении, противоположном направлению печати (рис. 1).

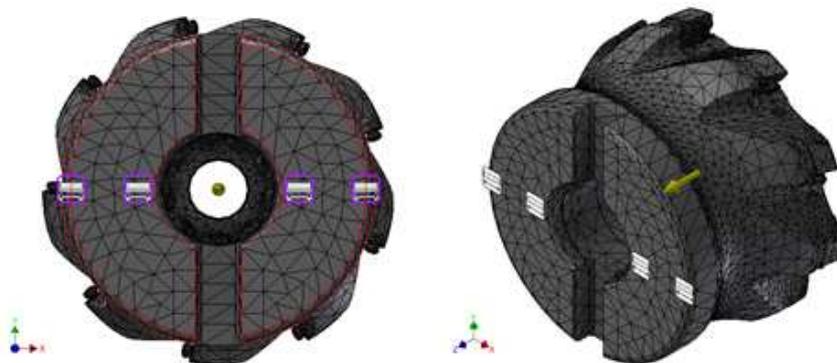


Рисунок 1. – Схема создания области детали (на примере фрезы торцовой), контактирующей с рабочей пластиной с добавлением распределенной гравитационной силы по оси Z

4. Применить к детали модель линейно-упругого материала со следующими параметрами:
  - модуль Юнга:  $E = 210 \text{ ГПа}$ ;
  - коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,4$ ;
  - плотность:  $\rho = 4700 \text{ кг/м}^3$ .
5. Выбрать линейный статический анализ с деформациями и напряжениями в качестве выходных данных и запустить симуляцию.

**Результаты и интерпретация.** Если направление нагрузки и граничные условия были определены правильно, увеличение величины деформации может помочь в выявлении небольших деформаций.

После построения графиков напряжений в глобальных направлениях X, Y и Z, необходимо проверить, находятся ли напряжения в пределах максимальных пороговых значений: при растяжении  $X_{\max}$  и  $Y_{\max} = +6 \text{ кПа}$ , при сжатии  $X_{\max}$  и  $Y_{\max} = -7 \text{ кПа}$ . Для  $Z_{\max}$  при растяжении:  $+0,5 \text{ кПа}$ ; при сжатии:  $-7 \text{ кПа}$ . Растягивающее и сжимающее напряжение, превышающее максимальные пороговые значения, соответствует красным и синим областям (рис. 2-4).

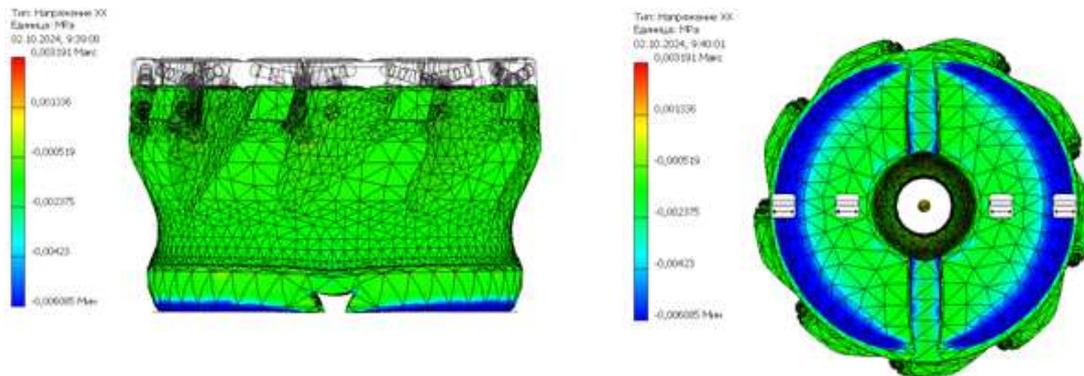


Рисунок 2. – Вид распределения напряжений по оси X во фрезе торцовой

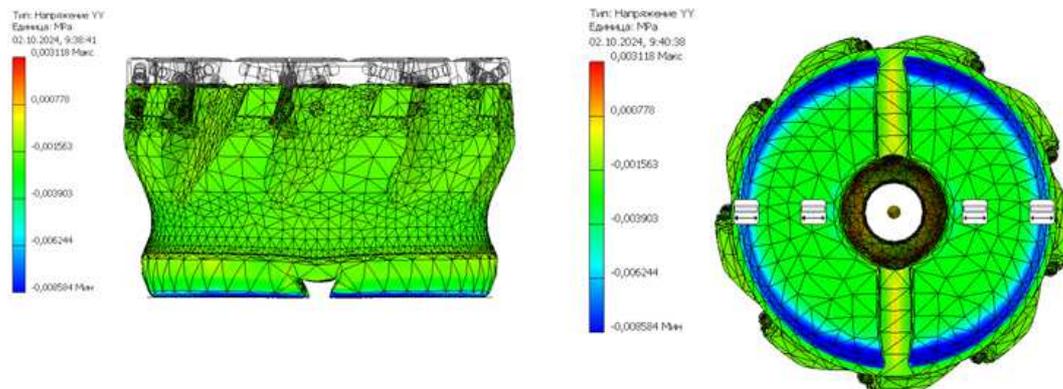


Рисунок 3. – Вид распределения напряжений по оси Y во фрезе торцовой

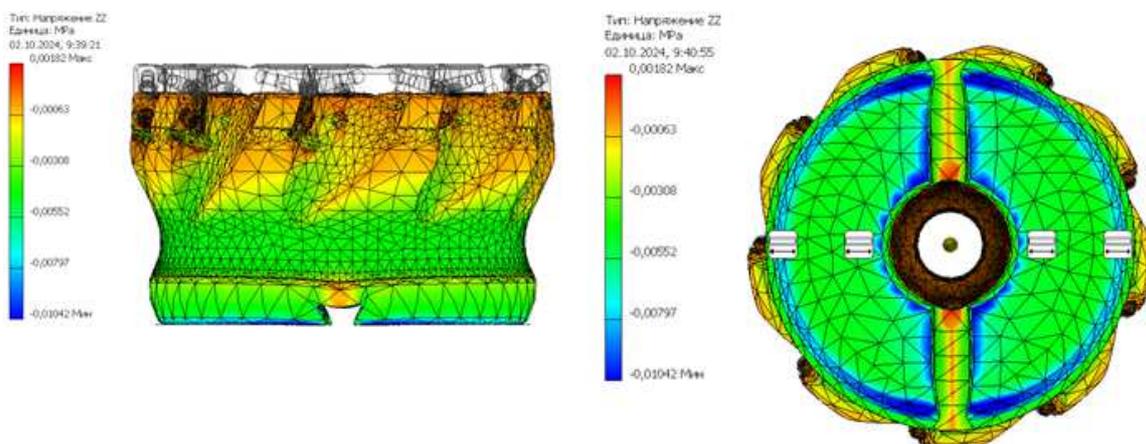


Рисунок 4. – Вид распределения напряжений по оси Z во фрезе торцовой

Если прогнозируется сбой, необходимо выполнить следующие шаги и повторить анализ:

1. Изменить ориентацию деталей как для печати, так и для удаления связующих и спекания.
2. Чтобы избежать концентрации напряжений, необходимо уплотнить тонкие элементы или сгладить острые края.
3. В целом, более мелкие и легкие конструкции деталей уменьшают гравитационные силы и повышают вероятность успеха при удалении связующих и спекания.
4. Размеры деталей 60 x 60 x 60 мм доказали свою эффективность в обеспечении оптимального баланса между устойчивостью [2].
5. Увеличьте количество опор и/или добавьте их непосредственно в твердотельную модель детали.
6. Повторно используйте этот инструмент, чтобы убедиться, что все напряжения выявлены и в пределах максимальных пороговых значений, которые могут возникнуть при перепроектировании.

**Заключение.** Неправильная конструкция детали или её ориентация при 3D-печати являются существенными факторами, вызывающие разрушение деталей во время удаления связующих и спекания. Внутренние растягивающие и сжимающие напряжения, возникающие под действием гравитационных сил, должны учитываться при выборе подходящей ориентации металлических деталей. Результаты моделирования позволяют значительно повысить качество конечных деталей и минимизировать время при 3D-печати.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stainless Steel Composite Metal Filament for 3D Printers [Electronic resource]. – Mode of access: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-316l/>. – Date of access: 02.10.2024.
2. User Guidelines for 3D Printing Metal Parts [Electronic resource]. – Mode of access: [https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Ultrafuse\\_metal\\_User\\_Guideline.pdf](https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Ultrafuse_metal_User_Guideline.pdf). – Date of access: 02.10.2024.