

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СВОДА ЧЕРЕПА

А.В. Колсанова, С.В. Сурудин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

**Обоснование.** Черепно-мозговые травмы, полученные в результате тех или иных несчастных случаев, по сей день остаются актуально-значимой проблемой как в России, так и во всем мире. По данным ВОЗ, количество черепно-мозговых травм не уменьшается, а лишь увеличивается с каждым годом в среднем на 2 %. Среди всех полученных черепно-мозговых травм нередко встречаются случаи, в которых необходимо провести краниопластику (процедуру замещения утраченного участка черепа). Наиболее широко в настоящее время применяется технология селективного лазерного спекания титанового порошка для изготовления персонафицированных имплантатов костей свода черепа [1]. Главный недостаток данного подхода — высокая себестоимость получаемого изделия из-за дороговизны оборудования для 3D-печати металлическим порошком и расходных материалов. В связи с этим, в настоящее время остро стоит вопрос об использовании в краниопластике более гибкой технологии, позволяющей изготавливать персонафицированные имплантаты из титанового сплава. Одним из перспективных направлений является использование технологии инкрементального формообразования (ИФ), суть которого заключается в локальном поэтапном деформировании отдельных частей листовой заготовки по заданной программе [2]. Применение технологии ИФ позволяет снизить себестоимость персонафицированных имплантатов за счет использования более дешевых листовых заготовок.

**Цель** — разработать регрессионную модель, позволяющую комплексно оценить влияние основных технологических параметров на качество титановых имплантатов и определить оптимальные.

**Методы.** Для комплексного исследования влияния параметров процесса инкрементального формообразования на точность получаемого имплантата применяли центральное композиционное планирование. В качестве переменных факторов модели использовали параметры процесса, такие как шаг перемещения деформирующего инструмента, диаметр пуансона, контактное трение на границе инструмент – заготовка, а также траектория и скорость деформирования материала.

Уровни факторов и интервалы варьирования приведены в таблице.

Таблица. Уровни варьирования факторов

Факторы	Уровни		
	+1	0	-1
Шаг перемещения деформирующего инструмента, мм	0,8	0,4	0,2
Диаметр деформирующего инструмента, мм	16	12	8
Контактное трение на границе «заготовка – деформирующий инструмент»	0,18	0,15	0,12
Скорость деформирования, мм/мин	1500	3000	5000

План эксперимента состоял из 27 сочетаний факторов.

В качестве отклика использовалось значение отклонения получаемой модели имплантата в программном комплексе LS-DYNA от эталонной модели, смоделированной по данным МРТ реального человека.

Последующее сравнение влияния параметров процесса инкрементального формообразования на точность получаемого изделия выполняли в программе CloudCompare. Оценка точности формообразования имплантата осуществляли путем расчета расстояний между точками эталонной 3D-модели и модели, полученной при моделировании процесса.

Для анализа отклонения геометрии имплантатов, полученных ИФ, от геометрии исходной модели, использовали максимальное расстояние между сравниваемыми моделями имплантата.

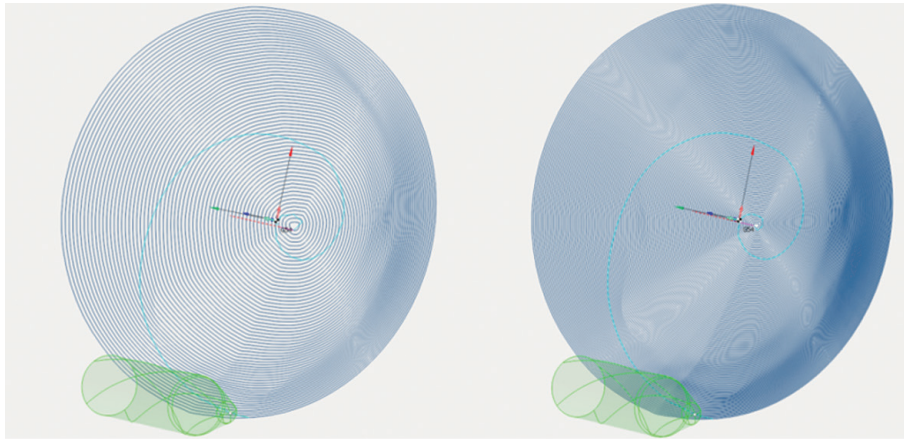


Рис. 1. Траектории движения

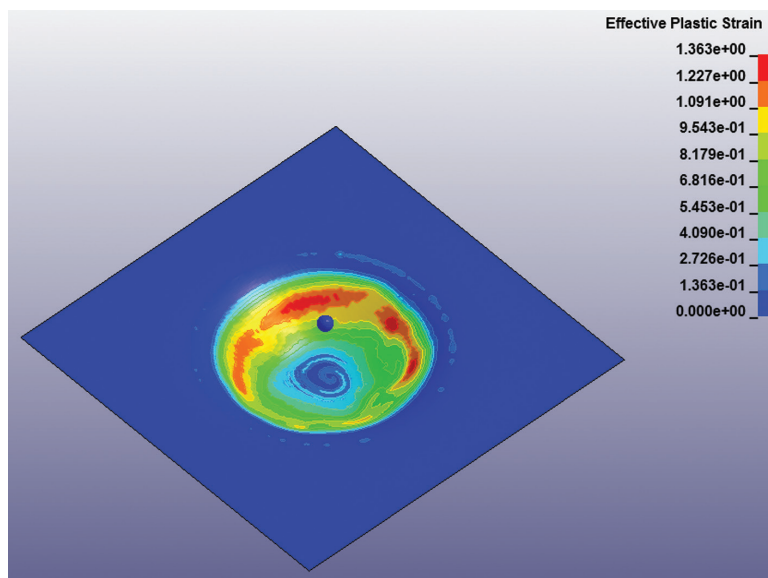


Рис. 2. Моделирование

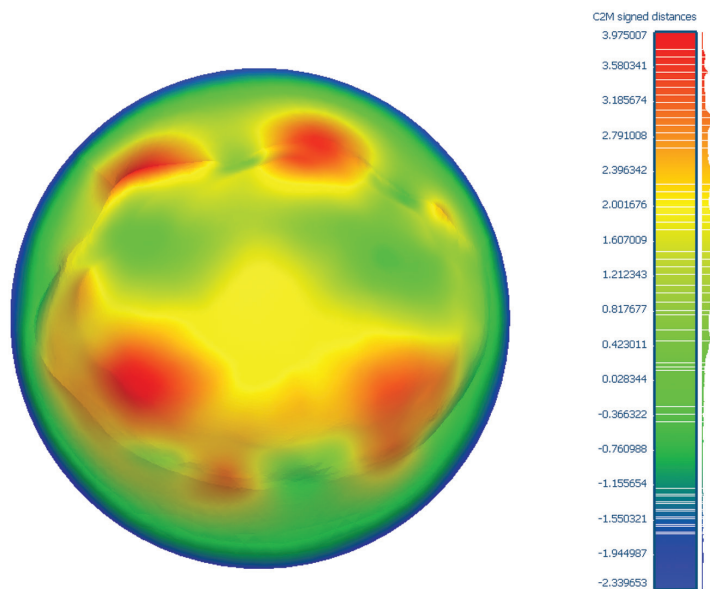


Рис. 3. Сравнение полученных результатов

**Результаты.** Спроектированы различные траектории движения (рис. 1) робота-манипулятора KUKA для создания титанового имплантата в программе SprutCAM.

Проведено планирование экспериментов в программе Statistica, в результате чего определены 27 необходимых и достаточных для сравнения вариантов компоновки различных параметров.

Все 27 вариантов смоделированы и рассчитаны в программе LS-DYNA (рис. 2).

В программе CloudCompare выполнено сравнение полученных моделей (рис. 3) определенного участка черепной коробки с эталонной моделью этого же участка, смоделированной по данным МРТ реального человека.

**Выводы.** Определена зависимость толщины и пластической деформации готового изделия, а также усилия при формообразовании от различных параметров (шаг, диаметр пуансона, траектория движения пуансона, трение, скорость формообразования). Разработана регрессионная модель, позволяющая комплексно оценить влияние основных технологических параметров на качество титановых имплантатов. Путем множественных компьютерных анализов подобран оптимальный набор параметров для инкрементального формообразования имплантатов, устраняющих дефекты свода черепа.

**Ключевые слова:** инкрементальное формообразование; титановые имплантаты; краниопластика; регрессионная модель.

### Список литературы

1. Jardini A., Larosa M., Filho R., et al. Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing // J Craniomaxillofac Surg. 2014. Vol. 42, No. 8. P. 1877–1884. DOI: 10.1016/j.jcms.2014.07.006
2. Cheng Z., Li Y., Xu C., et al. Incremental sheet forming towards biomedical implants // J Mater Res Technol. 2020. Vol. 9, No. 4. P. 7225–7251. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.096

*Сведения об авторах:*

**Анастасия Вадимовна Колсанова** — студентка, группа 1423-150301D, институт авиационной и ракетно-космической техники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: anastasia15anastasia@ya.ru

**Сергей Викторович Сурудин** — научный руководитель, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: innosam63@gmail.com