

### Математическое моделирование и конечно-элементный анализ процесса фрезерования пружинной стали 65Г

В.А. Зотов

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

**Обоснование.** Исследования обработки материалов являются фундаментом для развития высокотехнологичных отраслей. Особое внимание уделяют токарной и фрезерной обработке. Оптимизация этих процессов позволяет снизить затраты и повысить эффективность предприятия, устранив узкие места [1–3]. Использование же конечно-элементного моделирования позволяет рационализировать выбор технологических параметров и снизить материальные затраты на проведение реальных испытаний.

**Цель** — разработать конечно-элементную математическую модель, описывающую процесс фрезерования пружинной стали 65Г.

**Методы.** Для разработки конечно-элементной модели применена программа Abaqus CAE. Для описания процесса фрезерования используется уравнение Джонсона–Кука. Оно позволяет описывать сложное поведение материалов при экстремальных условиях. Уравнение включает три основных компонента: деформационное упрочнение, описывающее рост напряжений при увеличении пластической деформации; зависимость прочности от скорости деформации, отражающая реакцию материала на высокие скорости нагружения; термическое разупрочнение, характеризующее снижение прочности при нагреве. Эти эффекты в совокупности возникают при резании: материал подвергается быстрым деформациям, нагреву из-за трения и пластической деформации, а также наклепу [4].

**Результаты.** На данный момент реализована следующая расчетная схема, представленная на рис. 1. Применен явный динамический анализ (эксплицитный метод), поскольку данный метод оптимален для моделирования высокоскоростных переходных процессов (таких как фрезерование) и обеспечивает точный учет контактных взаимодействий, разрушения материала и нелинейных эффектов.

**Моделирование инструмента.** Инструмент упрощен до абсолютно твердого тела (без учета деформаций). Для задания движения определены: опорная точка; параметры вращательного и поступательного движения.

**Подготовка модели.** Создан прямоугольный блок — геометрическая модель заготовки для фрезерования. В зоне резания выполнено адаптивное сгущение сетки с учетом геометрии фрезы и распределения силовых нагрузок в процессе обработки. В результате получено повышение точности моделирования. Включена функция теплосиловой связаный анализ (Coupled Temp-Displacement) и задана теплопроводность, удельная теплоемкость и коэффициент теплового расширения материала.

**Контактное взаимодействие** моделировалось с использованием опции General Contact, где были заданы механические свойства контакта и условия трения.

**Отделение стружки:** моделирование удаления материала через «удаление элементов» (Element Deletion)

**Кинематика и силовые воздействия.** Движение инструмента: задано вращение шпинделя с технологически обоснованной угловой скоростью. Подача инструмента: определена поступательная скорость перемещения вдоль траектории обработки.

**Граничные условия.** Фиксация заготовки: необрабатываемые участки заготовки из стали 65Г жестко закреплены для исключения нежелательных перемещений.

**Параметры численного моделирования.** Временной шаг: установлен равным 5 с, что обеспечивает сходимость решения при приемлемых вычислительных затратах.

**Материальная модель:** использованы параметры уравнения Джонсона–Кука для стали 65Г (ГОСТ 14959–79). Моделирование выполнено с учетом реальных физических свойств стали 65Г: химический состав,

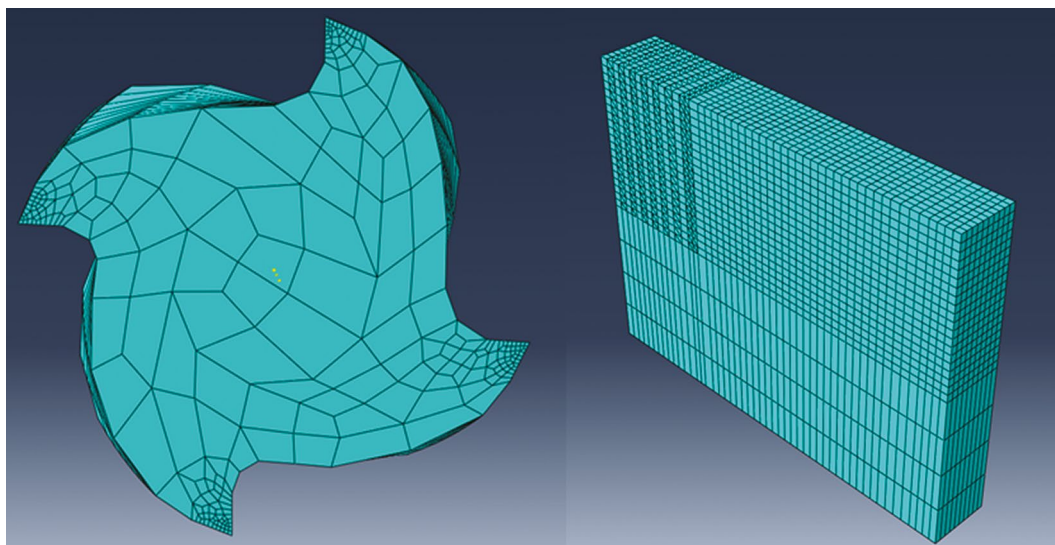


Рис. 1. Упрощенная модель инструмента и заготовки

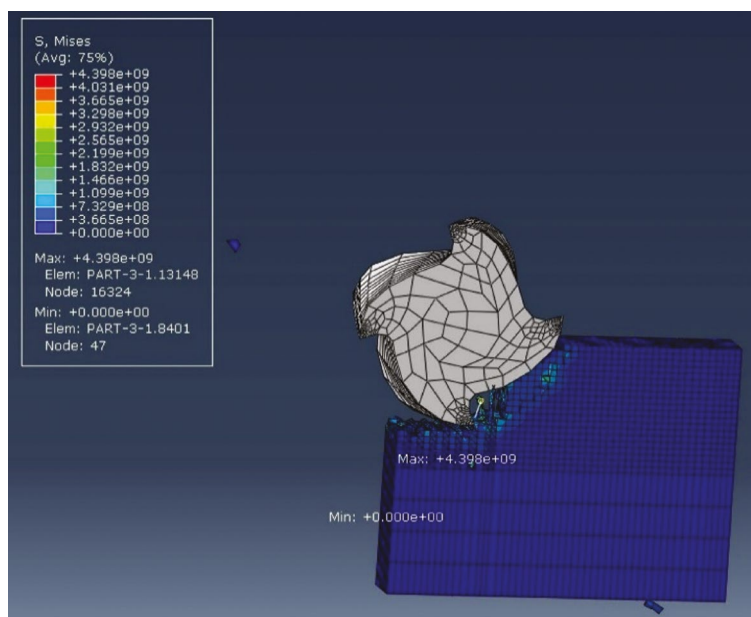


Рис. 2. Процесс фрезерования в Abaqus CAE

механические характеристики, предел прочности, относительное удлинение и твердость. Результаты работы модели представлены на рис. 2.

**Выводы.** Созданная в программном обеспечении ABAQUS имитационная модель резания 65Г реализует моделирование траектории инструмента. В пределах допустимой погрешности рассчитаны фрезерные усилия и остаточные напряжения. В будущем предполагается использование моделей реального инструмента [5].

**Ключевые слова:** математическая модель; конечно-элементный анализ; пружинная сталь 65Г; CAE; фрезерование.

### Список литературы

1. Братухин А.Г., Язов Г.К., Карасев Б.Е., и др. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение, 1997. 416 с. ISBN: 5-217-02875-0
2. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. Москва: Машиностроение, 1988. 240 с. ISBN: 5-217-00060-0
3. Митряев К.Ф. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем регулирования состояния поверхностного слоя при механической обработке: учебное пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 91 с.

4. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Ч. 1. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, 2012. 196 с. EDN: WBIBHZ
5. Павлов В.Г., Штырлов А.Е., Зотов В.А. Адаптация математической модели оценки параметров шероховатости при фрезеровании сплавов Д16 и Л63 // Климовские чтения-2024: перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник статей научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Скифия-принт, 2024. С. 299–304.

---

*Сведения об авторе:*

**Владислав Александрович Зотов** — студент, группа 3413-240305D, институт двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: vlad198189@gmail.com

*Сведения о научном руководителе:*

**Дмитрий Викторович Евдокимов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: evdokimov.dv@ssau.ru