

ОБОСНОВАНИЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ СЕКЦИИ СТАВА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА НА ПОДСИСТЕМЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Лазарев А.Д.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод суперэлементов, декомпозиция расчётной модели, скребковый конвейер, рештачная секция, коэффициент запаса прочности, сходимость по сетке, сварное соединение, вычислительные затраты.

Аннотация. Рассмотрена задача прочностного расчёта рештачной секции забойного скребкового конвейера методом конечных элементов в условиях комплексного эксплуатационного нагружения. Показано, что прямое решение полной модели секции с детализацией сетки, достаточной для корректного учёта напряжённого состояния в зонах сварных соединений, сопряжено с высокими вычислительными затратами. На серии из девяти расчётов установлены зависимости погрешности и времени счёта от размера конечно-элементной сетки, а сопоставительным расчётом тестового сварного узла оценён вклад упрощённого моделирования швов. Обоснована целесообразность декомпозиции конструкции на подсистемы с применением метода суперэлементов, обеспечивающей снижение вычислительных затрат при сохранении точности.

JUSTIFICATION OF DECOMPOSITION OF THE FINITE-ELEMENT MODEL OF A SCRAPER CONVEYOR PAN SECTION INTO SUBSYSTEMS WHEN ASSESSING THE STRENGTH OF THE STRUCTURE

Lazarev A.D.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: finite element method, superelement method, computational model decomposition, scraper conveyor, pan section, safety factor, mesh convergence, welded joint, computational cost.

Abstract. The paper addresses the strength analysis of an armoured face conveyor pan section by the finite element method under complex operational loading. It is shown that a direct solution of the full section model with a mesh refinement sufficient for the correct evaluation of the stress state in welded-joint zones entails high computational costs. Based on a series of nine computations, the dependences of error and computation time on the finite element mesh size are established, and a comparative analysis of a test welded joint is used to estimate the contribution of the simplified weld modelling. The expediency of decomposing the structure into subsystems using the superelement method is substantiated, which reduces the computational costs while preserving accuracy.

Добыча твердых полезных ископаемых подземным способом сопряжена с необходимостью применения комплекса шахтного механизированного оборудования, включающего в себя в том числе скребковый конвейер.

В процессе эксплуатации секция става конвейера воспринимает совокупность нагрузок (рис. 1): динамические нагрузки от падающей горной массы, статические нагрузки от опор комбайна, тяговых цепей, скребков и механизма подачи [1]. Перечисленные нагрузки действуют на конструкцию одновременно, формируя сложное напряжённо-деформированное состояние

(НДС) с взаимным влиянием отдельных элементов, следствием которого являются усталостные разрушения и преждевременный выход узлов из строя.

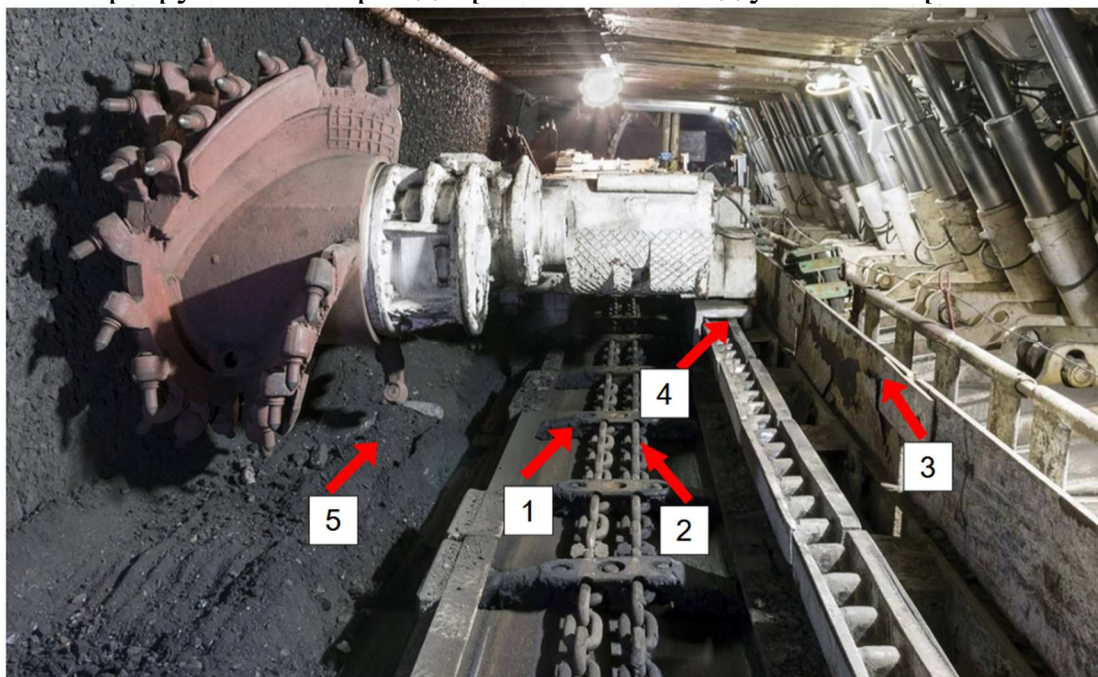


Рис. 1. Механизированный очистной комплекс и основные структурные элементы

В существующей инженерной практике оценка прочности секции выполняется преимущественно по отдельным конструктивным элементам – рассчитываются габаритные параметры боковин, прочность узла направляющей рейки, отдельных сварных соединений [2-4]. Такой подход не позволяет учесть комплексный характер нагружения и не выявляет участки, в которых при совместном действии нагрузок формируются критические концентрации напряжений. До настоящего времени не разработаны научно обоснованные практические рекомендации по совершенствованию конструкции секции става.

Для определения НДС секции при комплексном нагружении целесообразно применение метода конечных элементов (МКЭ), позволяющего учесть сложную геометрию конструкции, полный комплекс граничных условий и одновременное действие нескольких нагрузок [5].

Вместе с тем прямое применение МКЭ к полной модели секции става сопряжено с рядом трудностей. Ввиду геометрической сложности конструкции и наличия сварных соединений, корректный учёт которых требует дополнительного времени и трудозатрат в процессе их моделирования, применение мелкой сетки ко всей полноразмерной модели введет к росту конечных элементов (КЭ) на несколько порядков, что в свою очередь приводит к резкому росту необходимых вычислительных затрат.

Для количественной оценки данной проблемы выполнена серия из девяти расчётов полной модели секции при варьировании абсолютного размера сетки в диапазоне от 40 до 9 мм. Расчёты проведены в программном комплексе T-FLEX CAD совместно с модулем T-FLEX Анализ на персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 5 5600H и 16 ГБ оперативной памяти. Для каждого варианта фиксировались число КЭ, погрешность δ определения максимальных эквивалентных напряжений и полное время расчёта (табл. 1).

Табл. 1. Результаты расчёта полной модели при варьировании размера конечно-элементной сетки (составлено автором)

№	Размер сетки, мм	Количество КЭ	Погрешность δ , %	Время расчёта, с
1	40	133 952	23	22
2	35	164 541	22	24
3	30	208 364	20	28
4	25	288 006	20	42
5	20	453 373	15	66
6	15	873 020	14,5	136
7	10	2 625 991	10	680
8	9,5	2 945 028	8	1490
9	9	3 469 199	6	3260

Зависимость погрешности δ от размера сетки h имеет монотонный характер с замедляющимся убыванием в области малых h и аппроксимируется логарифмической функцией:

$$\delta(h) = 10,963 \cdot \ln(h) - 16,785. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации аппроксимации $R^2 = 0,97$.

Зависимость времени расчёта t от размера сетки имеет резко нелинейный характер: при уменьшении h от 40 до 10 мм время возрастает умеренно (с 22 до 680 с), тогда как при дальнейшем измельчении до 9 мм достигает 3260 с.

Зависимость времени t от размера сетки h (при $h \leq 15$) описывается функцией:

$$t(h) = 3,19 \cdot 10^{17} \cdot h^{-14,66}. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации аппроксимации $R^2=0,9$.

Инженерная погрешность 5%, принятая в качестве базового критерия точности, достигается при $h \approx 7$ мм, чему соответствует время расчёта около 6000 с. Приведённая оценка относится только к погрешности численного решения и не учитывает погрешность от упрощений расчётной модели, а именно отсутствие околошовной зоны сварного соединения.

Расчёт тестового сварного узла (рис. 2) показал, что моделирование соединения без явного выделения околошовной зоны занижает максимальное эквивалентное напряжение со 132,8 до 127,6 МПа, что соответствует расхождению около 4%. Таким образом, при суммарном допустимом уровне погрешности 5% на сходимость по сетке остаётся лишь 1%, чему по полученной зависимости $t(h)$ соответствует время расчёта порядка 23500 с. Это значение является нижней границей, поскольку явное введение сварных швов в полную модель потребует дополнительного локального сгущения сетки и многократно увеличит число КЭ.

Решение данной проблемы осуществляется декомпозицией полной модели секции на отдельные подсистемы с применением метода суперэлементов (МСЭ) – модификации МКЭ, основанной на разделении полной конструкции на отдельные расчетные подсистемы.

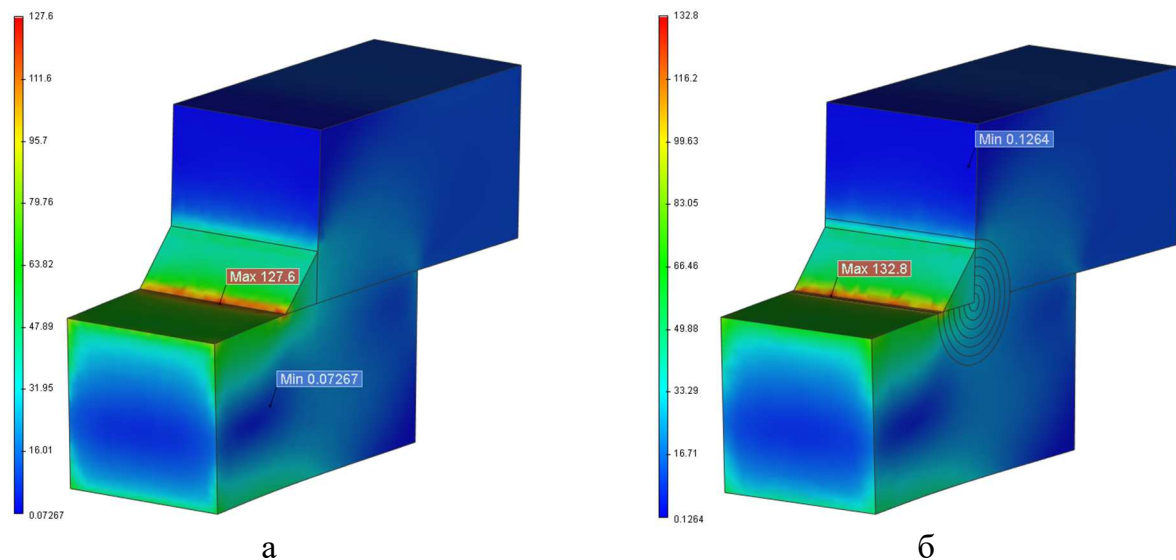


Рис. 2. Расчет сварного соединения: а – без явного задания околошовной зоны, б – с явным заданием околошовной зоны

Предлагается разделить секцию как минимум на две подсистемы. Первая подсистема направляющей рейки – представляет собой зубчатую рейку, закреплённую на боковине кронштейнами и соединительными пальцами. Вторая – подсистема желоба конвейера – является основной несущей конструкцией и образована двумя боковинами и двумя листами желоба. Раздельный расчёт подсистем позволяет идентифицировать конструктивные элементы, лимитирующие несущую способность секции, без прямого решения полной модели.

Декомпозиция конструкции на подсистему направляющей рейки и подсистему желоба с применением метода суперэлементов позволяет обеспечить корректный учёт комплексного характера эксплуатационного нагружения при приемлемых вычислительных затратах.

Список литературы

1. Feng Yu, Miaotian Zhang, Li Guoping, Meng Guoying. Finite Element Analysis and Structure Optimization of the Middle Groove of Scraper Conveyor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 616, p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/616/1/012022.
2. Косарев И.В., Мезников А.В., Волотов А.Е., Кондрахин В.П. Повышение технического уровня и безопасности эксплуатации забойных скребковых конвейеров // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2020. – №4(22). – С. 11-21.
3. Бабокин Г.И. Исследование энергетических параметров системы очистной комбайн-скребковый конвейер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №8. – С. 290-296.
4. Шавлак В.Ф. Алгоритм и особенности расчета горизонтально-наклонного скребкового конвейера с высокими скребками // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №3(9). – С. 52-56.
5. Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, №1(51). – С. 142-150. – doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150.

Сведения об авторе:

Лазарев Артур Дмитриевич – аспирант.