

уравнению, идентичному по структуре интегральному уравнению Фредгольма второго рода [5]. Полученное уравнение решается численно.

Поверхность полости заменяется конечным числом плоских фигур (элементов). Границные условия формулируются в центрах тяжестей этих элементов, и интегральное уравнение сводится к системе алгебраических уравнений.

После решения полученной системы уравнений, напряжения в каждой точке массива определяются суммированием напряжений от внешней и действия компенсирующей нагруз-

зок. Подробно об интегральных уравнениях для плоской и объёмной задач и соответствующих им алгебраических см. в [7].

Разрушенные области или зоны нарушения сплошности вокруг выработки находятся как совокупность точек, в которых произошло разрушение материала по критерию прочности Мора. Рассматриваемый массив имеет горизонтальные поверхности ослабления, на которых коэффициент сцепления $K=0$ и угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$. Коэффициент бокового давления принят $\lambda=1$.

Для численной реализации

задачи применялся пакет MATHCAD. Напряжения вычисляются в безразмерных единицах, отнесённых к γH . Размеры выработок тоже в относительных величинах. После нахождения напряжений находятся области разрушения, так называемые зоны нарушения сплошности (З. Н.С.) материала вокруг выработки.

На рис. 2 - 15 показаны зоны нарушения сплошности в виде затемнённых областей в ряде сечений вокруг основной и боковой выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. М.: Недра. - 1992. - 544.
2. Булычёв Н. С. Механика подземных сооружений. - М.: Недра. - 1994. - 382 с.
3. Ержанов Ж. С., Изаксон В. Ю., Станкус В. М. Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчёт устойчивости. Кемерово, 1976. 216 с.
4. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. - М.: Мир. - 1987. - 525 с.
5. Лурье А. И. Теория упругости. - М.: Наука. - 1970. - 940 с.
6. Метод граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике. Под ред. Т. Круза и Ф. Риццо. - М.: Мир. - 1978. - 210 с.
7. Метод граничных интегральных уравнений в задачах механики подземных сооружений / Черданцев Н. В., Шаламанов В. А. // Вестник КузГТУ. 2003. № 4. С. 9 - 13.

□ Автор статьи:

Черданцев
Николай Васильевич
- канд. техн. наук, докторант каф.
строительства подземных сооруже-
ний и шахт

УДК 622.271.4

И.А. Паначев, М.Ю. Насонов, К.В.Антонов

О ПОВЕДЕНИИ КРУПНОКУСКОВОЙ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ В НЕЕ ЖЕСТКИХ ШТАМПОВ

К числу наиболее опасных повреждений металлоконструкций экскаваторов относятся трещины. Процесс их образования и роста может привести к серьезным авариям, для предотвращения которых проводятся ремонтные работы по зачистке трещин. Сроки проведения этих работ назначаются инженерно-техническими ра-

ботниками разрезов интуитивно, на основе личного опыта. При этом в большинстве случаев трещины устраняются задолго до критического размера, по достижении которого происходит разрушение конструкции. Указанные обстоятельства ведут к излишне частым остановкам экскаваторов и необоснованному увеличению времени

простояев экскаваторов, что вызывает снижение их производительности. Кроме того, переварки трещин приводят к дополнительному увеличению концентрации напряжений в зонах сварных швов и способствуют быстрому накоплению в этих зонах дефектов. Поэтому частое проведение сварочных работ по устранению трещин

ведет к более активному образованию и росту трещин. Частые переварки трещин сокращают остаточный ресурс экскаватора, в значительной мере зависящий от количества дефектов, накопленных в его металлоконструкциях за время эксплуатации.

В этой связи существует необходимость создания методики для расчета долговечности металлоконструкций экскаваторов, которая позволяла бы оценивать безопасные сроки эксплуатации металлоконструкций при наличии в них трещин.

Создание такой методики невозможно без разработки моделей процесса нагружения металлоконструкций шагающих экскаваторов при взаимодействии их ковшей со взорванной горной массой. Процесс взаимодействия ковша с развалом взорванной горной массы является определяющим при расчете металлоконструкций экскаватора: от того, как протекает этот процесс, зависит характер и величина усилий, действующих в самом ковше и передающихся на другие металлоконструкции. Разработка таких моделей, в свою очередь, требует выявления закономерностей поведения взорванной горной массы под нагрузкой.

Для выявления этих закономерностей был проведен лабораторный эксперимент, в ходе которого осуществлялось динамическое вдавливание жестких штампов в крупнозернистую сыпучую среду с помощью копра для испытаний стали на ударную вязкость. При проведении опытов основное внимание уделялось зависимости поведения сыпучей среды от ее гранулометрического состава и коэффициента разрыхления, так как именно эти параметры взорванной горной массы оказывают наибольшее влияние на долговечность металлоконструкций экскаваторов.

Для моделирования крупнозернистой среды служил щебень

(алевролит и песчаник), который насыпался в стальной короб. Гранулометрический состав щебня варьировался. С этой целью щебень рассеивался на фракции, после чего дозировался в нужных пропорциях. При этом средний диаметр куска крупнозернистой среды менялся в интервале 2,5 – 6,5 см. Коэффициент разрыхления сыпучей среды изменялся путем трамбования от 1,5 до 1,25.

В качестве жестких штампов использовались стальные пластины прямоугольной формы, размерами 9×9, 9×6,5, 6,5×6,5, 6,5×4, 4×4 см, а также круглой формы диаметром 9, 6,5, 4 см.

Для определения перемещений ударяемого штампа использовались стальные мембранны размером 390×7×0,08 мм с наклеенными на них тензорезисторами, соединенными со шлейфовым осциллографом. Эти мембранны закладывались в сыпучую среду на равную глубину, обеспечивающую беспрепятственное перемещение штампа при выдавливании из под него щебня.

Тарировка тензорезисторов, наклеенных на мембранны, осуществлялась при статическом вдавливании штампа в сыпучее тело. Для статического вдавливания использовалась гидравлическая разрывная машина типа ГРМ, работающая как на сжатие, так и на растяжение. При статическом нагружении достигалась та же величина деформаций сыпучего тела, что и при динамическом. При этом запись деформаций сыпучего тела и равнодействующей силы отпора с его стороны, действующего по подошве жесткого штампа, осуществлялась с помощью диагностического аппарата. В этом случае тензорезисторы соединялись с измерителем деформаций.

Изменение давления, передаваемого посредством штампа на сыпучее тело, осуществлялось путем крепления дополнительных грузов к молоту копра.

Для измерения усилия, прикладываемого к штампу с помощью молота, к центру штампа, со стороны его открытой поверхности, перпендикулярно ей, крепился стальной стержень длиной 25 мм и диаметром 12 мм. Удар наносился молотом по этому стержню, усилие, приложенное к штампу, оказывалось равным усилию, действующему в стержне. Вдоль образующей стержня наклеивался тензодатчик, соединенный со шлейфовым осциллографом. В результате расшифровки осциллограмм, полученных при испытаниях, определялись деформации стержня, которые затем пересчитывались в усилие в нем. Это усилие равно результирующей силе отпора действующей на штамп со стороны сыпучего тела.

На основании данных, полученных в ходе проведенных экспериментов, установлено, что равнодействующая сила отпора, действующая со стороны крупнокускового сыпучего тела на штамп, динамически вдавливаемый в него, является кусочно-аналитической функцией перемещения штампа вглубь сыпучего тела. В общем виде график этой функции представлен на рис. 1, откуда видно, что в процессе динамического вдавливания жесткого штампа в крупнокусковое сыпучее тело можно выделить три

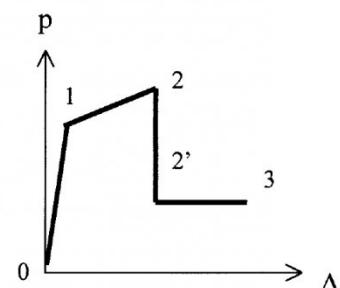


Рис.1. Зависимость равнодействующей силы отпора со стороны крупнокускового сыпучего тела от его деформаций при динамическом вдавливании жестких штампов

этапа.

Деформации сыпучего тела на начальном этапе нагружения (0 - 1) являются упругими. Они обусловлены сжатием материала частиц, слагающих сыпучее тело. Структурных изменений на этом этапе не происходит. Поведение сыпучего тела в пределах упругих деформаций удовлетворительно описывается гипотезой Винклера, то есть равнодействующая сила отпора, действующая на штамп, прямо пропорциональна перемещению штампа (деформации сыпучего тела):

$$p = C_d \cdot \Delta \quad (1)$$

где p - равнодействующая сила отпора, действующая на штамп, Δ - перемещение штампа, C_d - коэффициент упругого сжатия при динамическом вдавливании штампа.

Коэффициент упругого сжатия, то есть коэффициент пропорциональности, связывающий две эти величины, определяется по известной формуле теории упругости [1] при введении в нее дополнительного коэффициента, представляющего собой функцию коэффициента разрыхления

$$C_d = \frac{E}{(1-\mu^2)\sqrt{F}} \cdot k_1, \quad (2)$$

где C_d - коэффициент упругого сжатия при динамическом нагружении, E , μ - соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала частиц слагающих сыпучее тело, F - площадь штампа, k_1 - эмпирический коэффициент

$$k_1 = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{(K_P - 1)^4}, \quad (2')$$

где K_P - коэффициент разрыхления сыпучей среды.

Формула (2') получена регрессионным анализом экспериментальных данных.

Величина упругих деформаций крупнокускового сыпучего тела зависит от его гранулометрического состава и является функцией среднего диаметра частицы сыпучего материала. Кроме того, на величину упругих деформаций оказывает влияние коэффициент разрыхления. Зависимость упругих деформаций сыпучего тела от коэффициента разрыхления и граносостава описывается эмпирической формулой

$$\Delta_{EL,MAX} = 0,0015 d k_2 k_3, \quad (3)$$

где $\Delta_{EL,MAX}$ - максимальное значение упругой деформации сыпучего тела, d - линейный размер штампа, k_2 , k_3 - коэффициенты, зависящие от разрыхления и диаметра среднего куска и представляющие собой функции, графики которых изображены соответственно на рис. 2 и 3.

Для второго этапа (1 - 2) характерны пластические деформации сыпучего тела, связанные со структурными изменениями в нем. Эти изменения происходят путем сдвига. На этой стадии сопротивление сыпучего тела вдавливанию в него штампа вызвано, главным образом, касательными напряжениями, действующими по поверхностям сдвига и препятствующими взаимному перемещению частиц. Эти напряжения обусловлены наличием в сыпучем теле внутреннего трения. Сопротивление вдавливанию штампа на этом этапе также может быть охарактеризовано равнодействующей силой отпора со стороны сыпучего тела. При пластических деформациях сыпучего тела зависимость этой силы от глубины вдавливания можно с приемлемой точностью считать линейной. Величина изменения равнодействующей силы отпора на этой стадии Δp_{PL} возрастает с увеличением размера штампа и может быть приближенно определена по формуле

$\Delta p_{PL} = 0,02d \cdot p_{EL,MAX}, \quad (4)$

где d - размер штампа, $p_{EL,MAX}$ - максимальное значение равнодействующей силы отпора, достигнутое за период упругих деформаций сыпучего тела.

Третий этап (2' - 3) - установившееся пластическое течение. Значение равнодействующей силы отпора p_{PL} при установившемся пластическом течении с достаточной для практических расчетов точностью может быть определено из соотношения

$$p_{FL} = 0,7 p_{EL,MAX} \quad (5)$$

Геометрическое подобие сыпучего материала, используемого при проведении эксперимента, и взорванной породы в развале обеспечивалось соответствующим подбором зерен для модели [2]. Отбирались частицы, линейные размеры которых соотносятся между собой

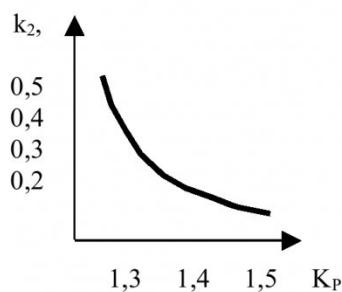


Рис. 2. Зависимость коэффициента k_2 от коэффициента разрыхления K_p

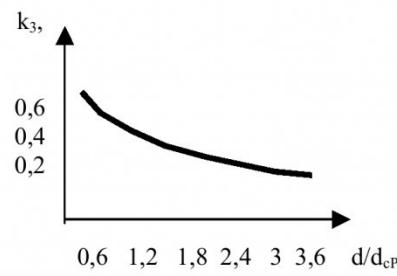


Рис. 3. Зависимость коэффициента k_3 от отношения d / d_{CP}

также, как линейные размеры кусков в развале [3]. Физическое подобие процессов, происходящих в модели и в натуре в упругой стадии, соблюдалось благодаря равенству безразмерных комплексов, составленных из величин, определяющих количественные характеристики описанного процесса. В пределах упругих деформаций процесс динамического вдавливания описывается выражением (см. формулу 1)

$$P = \frac{E}{(1 - \mu^2) \sqrt{F}} \cdot k_1 \cdot \Delta,$$

которое было приведено к безразмерному виду

$$\Pi = \Pi_1 \Pi_2',$$

где Π , Π_1 и Π_2' – безразмерные комплексы, составленные в соответствии с принципами теории подобия [3].

При этом

$$\Pi = \frac{P}{EF}, \quad \Pi_1 = \frac{\Delta}{\sqrt{F}},$$

$$\Pi_2 = \mu, \quad \Pi_2' = \frac{1}{1 - \Pi_2^2},$$

Из зависимостей (3) и (4) следует, что стадия упругого деформирования является определяющей для последующих стадий: равнодействующая сила отпора, действующая на штамп на второй и третьей стадиях, является функцией от величи-

ны равнодействующей силы отпора при максимальной упругой деформации.

Поэтому при обеспечении физического подобия модели и натуры на этапе упругих деформаций процессы, протекающие на последующих стадиях, могут считаться автомодельными.

Полученные результаты используются при описании процесса взаимодействия ковша с кусками взорванной горной породы в развале с целью теоретического определения параметров циклического нагружения ковшей и других металлоконструкций экскаватора при разработке взорванной горной массы. Определение этих характеристик является одним из ключевых звеньев методики расчета долговечности металлоконструкций экскаватора при наличии в них трещин.

Теоретически обоснованный прогноз влияния горнотехнических условий, в частности гранулометрического состава и коэффициента разрыхления взорванной горной массы, на процесс трещинообразования в металлоконструкциях экскаваторов позволяет адекватно оценивать сроки их безопасной эксплуатации. Этим может быть обеспечено увеличение межре-

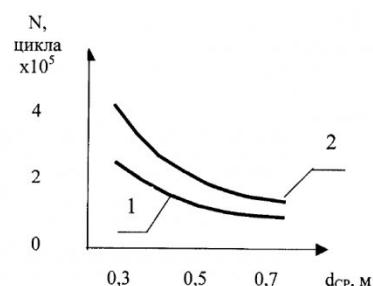


Рис. 4. Зависимость средней продолжительности межремонтного периода экскаватора ЭШ-10/70 от диаметра среднего куска в развале:

- 1 – без учета горнотехнических условий;
2 – с учетом горнотехнических условий.

монтных периодов без риска аварий (рис. 4).

Увеличение периодов, в течение которых обеспечивается безаварийная эксплуатация экскаваторов, в свою очередь способствует сокращению объемов работ по заварке трещин. Уменьшение числа переварок приводит к снижению концентрации напряжений в зонах трещин, что делает процесс трещинообразования менее интенсивным. Все это в конечном счете ведет к сокращению ремонтных простоеов и способствует повышению производительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. - Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение. 1972. 207 с.
- Кирпичев М.В. Теория подобия. - М.: АН СССР. 1953. 95 с.
- Бюрюков А.В., Репин Н.Я., Семенычев В.М., Ташкинов А.С. Вероятностно-статистическое исследование кусковатости горных пород. Математические методы в механике горных пород. Сборник научных трудов КузПИ, № 28.-Кемерово. 1970.
- Дидух Б.И., Каспэ И.Б. Практическое применение методов теории размерностей и подобия в инженерно-строительных расчетах. - М.: Стройиздат. 1975. 49 с.

□ Авторы статьи:

Паначев
Иван Андреевич
- докт. техн. наук, проф., зав. каф.
сопротивления материалов

Насонов
Михаил Юрьевич
- канд. техн. наук, доц. каф. сопро-
тивления материалов

Антонов
Кирилл Викторович
- ассистент каф. сопротивления
материалов