

периода предотвращает рост концентрации напряжений в зонах сварных шовов (из-за уменьшения числа их переварок), ведет к сокращению време-

ни ремонтных простоев и, таким образом, способствует повышению рентабельности работы экскаваторов. Это особенно актуально в связи с выра-

боткой многими экскаваторами угледобывающих предприятий Кузбасса своего нормативного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. Обоснование числа циклов нагружения металлоконструкций экскаваторов при наличии в них трещиноподобных дефектов. // Труды международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России: Новые подходы к развитию угольной промышленности.» - Кемерово, 16-19 сентября 2003, с. 65-69.
2. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Беленко М.В. Трещинообразование в металлоконструкциях экскаваторов. - Известия вузов. Горный журнал. 2000, № 5, с. 117-122.
3. Музгин С.С. Экскавация крупнокусковой горной массы. – Алма-Ата: Наука. 1973. 121 с.
4. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. К разработке модели взаимодействия режущей кромки ковша шагающего экскаватора со взорванной горной породой. – Кемерово: Вестн. КузГТУ. 2004, №2, с. 37-40.
5. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. О стопорении ковшей шагающих экскаваторов при взаимодействии со взорванной горной породой. – Кемерово: Вестн. КузГТУ. 2003, №6, с. 47-49.
6. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. О поведении крупнокусковой сыпучей среды при вдавливании в нее жестких штампов. – Кемерово: Вестн. КузГТУ. 2004, №1, с. 9-12.
7. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. 376 с.
8. Гольдштейн М.И. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат. 1973. 375 с.
9. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа. 1983. 288 с.

□ Автор 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
- старший преп., каф.
сопротивления материалов

УДК 622.271.4

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

О ВЛИЯНИИ ПРИЗМЫ ВОЛОЧЕНИЯ НА РЕЖИМ НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ДРАГЛАЙНОВ

Режим нагружения всех металлических конструкций экскаватора определяется процессом изменения усилия сопротивления внедрению ковша во взорванную горную массу. Важным обстоятельством, влияющим на характеристики процесса нагружения (амплитуду и частоту изменения усилия), является наличие призмы волочения.

Влияние процессов, связанных с образованием призмы волочения, на изменение усилия

сопротивления внедрению ковша в мелкозернистую сыпучую среду исследовано достаточно подробно [1]. Однако взорванная горная порода представляет собой крупнокусковую среду [2]. Использование для нее результатов, полученных для мелкозернистых материалов, не представляется возможным из-за трудности определения для взорванной горной массы необходимой эмпирической величины - удельного сопротивления срезаемого пласта продольному

сжатию. В этой связи были проведены исследования указанных процессов в случае крупнокусковой среды. Изучена качественная сторона механизма взаимодействия ковша шагающего экскаватора с призмой волочения. Дальнейшие исследования были направлены на выявление количественных зависимостей, позволяющих установить влияние призмы волочения на амплитуду и частоту усилий и напряжений в металлоконструкциях экскаваторов.

Составляющая усилия сопротивления движению ковша в развале, обусловленная наличием призмы волочения (далее Т_{П.В.}) в процессе черпания циклически изменяется. Ее величина определяется на основании решения задачи о динамическом вдавливании штампа в крупнокусковое сыпучее тело. В качестве штампа рассматривалась задняя стенка ковша. Площадь штампа принималась равной площади взаимодействия задней стенки со слоем взорванной горной массы, находящейся в ковше.

Для изучения закономерностей поведения крупнокусковой сыпучей среды при вдавливании в нее жестких штампов были проведены лабораторные эксперименты [3]. В результате было установлено, что процесс деформации сыпучего тела определяется коэффициентом разрыхления и гранулометрическим составом сыпучей среды. Однако при проведении этих экспериментов использовался достаточно плотный сыпучий материал (с коэффициентом разрыхления 1,2-1,5). Тогда как при внедрении режущей кромки в развал происходит разрыхление взорванной горной массы в результате разрушения ее структуры. Отметим, что согласно проведенным исследованиям взорванная горная масса в ковше имеет коэффициент разрыхления 1,35 – 2,1 [4].

С целью выяснения особенностей поведения рыхлых крупнокусковых сыпучих тел была проведена дополнительная серия опытов по динамическому вдавливанию штампов. При этом использовался копер КМ-30, предназначенный для испытаний металлов на ударную вязкость. Для физического моделирования крупнозернистой сыпучей среды использовался щебень (алевролит и песчаник), насыпаемый в стальной короб. Средний диаметр куска щебня варьировался в интервале 2,8 – 6,6 см. Для изменения гранулометрического состава щебень

рассеивался на фракции, после чего дозировался в нужных пропорциях. Коэффициент разрыхления сыпучей среды изменялся от 1,65 до 1,8.

В качестве жестких штампов использовались прямоугольные стальные пластины размерами 9x9; 9x6,5; 6,5x6,5; 6,5x4; 4x4 см, а также круглые пластины диаметром 9; 6,5; 4 см.

Перемещения ударяемого штампа измерялись с помощью тензорезисторов, соединенных со шлейфовым осциллографом, наклеенных на стальные мембранны размером 390x7x0,08 мм. Мембранны закладывались на глубину, обеспечивающую беспрепятственное перемещение штампа при выдавливании из под него щебня.

Тарировка тензорезистора, наклеенного на мембрану, производилась при статическом вдавливании штампа в сыпучее тело. Для статического вдавливания использовалась гидравлическая разрывная машина типа ГРМ. При этом запись деформаций сыпучего тела и равнодействующей силы отпора с его стороны, действующей на штамп, осуществлялась с помощью диаграммного аппарата. В этом случае тензорезисторы соединялись с измерителем деформаций.

Для изменения давления, передаваемого посредством штампа на сыпучее тело, к молоту копра крепились дополнительные грузы. С целью измерения усилия, прикладываемого к штампу посредством 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. На стержень наклеивался тензорезистор, соединенный с осциллографом. Определенные с его помощью деформации стержня пересчитывались в усилие в нем. Это усилие равно результирующей силе отпора действующей на штамп со сто-

роны сыпучего тела.

В результате проведенных экспериментов установлено, что при динамическом вдавливании штампов в рыхлую сыпучую среду равнодействующая сила отпора, действующего со стороны сыпучего тела на штамп, представляет собой функцию деформации сыпучего тела под штампом (рис. 1)

Из рис. 1 видно, что эта зависимость является полилинейной. В процессе вдавливания

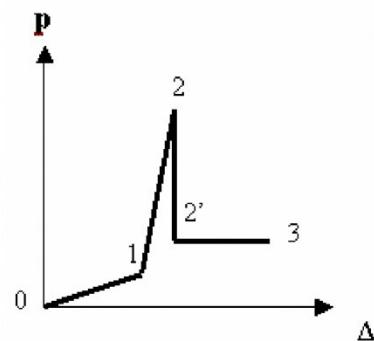


Рис.1. Зависимость равнодействующей силы отпора со стороны крупнокускового сыпучего тела от его деформаций при динамическом вдавливании жестких штампов

штампа можно выделить три этапа. Первому этапу (0-1) соответствуют значительные деформации сыпучего тела при сравнительно малом увеличении равнодействующей силы отпора, действующей на штамп. Это объясняется тем, что происходит выбирание межкусковых пустот в результате взаимного смещения частиц. Деформации, возникающие при этом, являются неупругими. Сопротивление вдавливанию штампа обусловлено наличием внутреннего трения в сыпучем теле. Деформации сопровождаются изменением коэффициента разрыхления ΔK_P в области прилегающей к штампу. Оно определяется по формуле

$$\Delta K_P = 0,033 \cdot K_{P,0} \cdot \frac{d_{cp}}{d}, \quad (1)$$

где $K_{P,0}$ – коэффициент разрыхления до деформации, d –

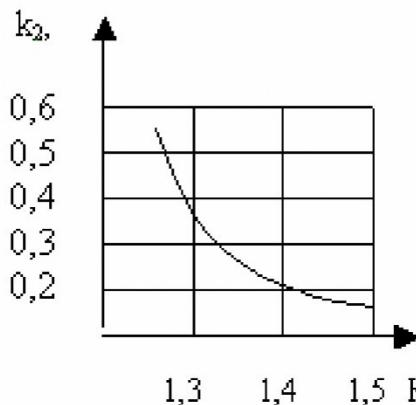


Рис. 2. Зависимость коэффициента k_2 от коэффициента разрыхления K_p

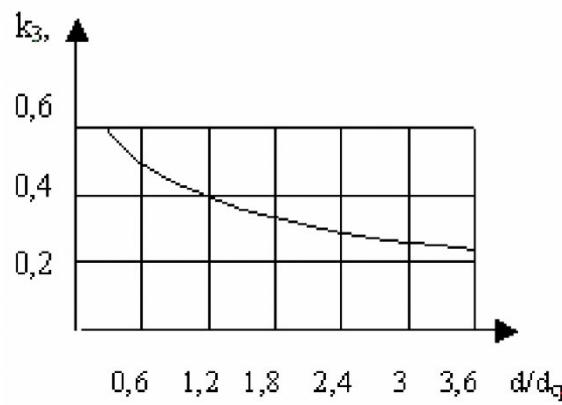


Рис. 3. Зависимость коэффициента k_3 от отношения d/d_{CP}

линейный размер штампа, d_{CP} – диаметр средней частицы сыпучего тела.

Наличие стадии вибириания пустот является отличительной чертой рыхлых крупнокусковых тел. Эта стадия завершается достижением сыпучей средой критического коэффициента разрыхления, то есть коэффициента разрыхления соответствующего критической плотности. В дальнейшем крупнокусковое тело ведет себя, как плотное.

Непосредственно после достижения критического коэффициента разрыхления не наблюдается перехода сыпучего материала в пластическую стадию, так как при этом взаимное смещение кусков затруднено по причине динамического характера нагружения. В связи с этим структурных изменений, не происходит. Деформации сыпучего тела возникают благодаря сжатию материала слагающих его частиц. По этой причине возрастание равнодействующей силы отпора на этой стадии велико, а деформации малы и носят упругий характер. Этому этапу на рис. 1 соответствует участок 1-2. Поведение сыпучего тела в пределах упругих деформаций удовлетворительно описывается гипотезой Винклера, то есть равнодействующая сила отпора, действующая на штамп, прямо пропорциональна перемещению штампа (дефор-

мации сыпучего тела):

$$p = C_d \cdot \Delta \cdot F \quad (2)$$

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

Коэффициент пропорциональности, связывающий две эти величины, называемый коэффициентом упругого сжатия, определяется по известной формуле теории упругости [5] при введении в нее дополнительного множителя k_1 , значение которого зависит от коэффициента разрыхления

$$C_d = \frac{E}{(1-\mu^2)\sqrt{F}} \cdot k_1, \quad (3)$$

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.

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

где K_p – коэффициент разрыхления сыпучей среды.

Формула (4) получена путем регрессионного анализа экспериментальных данных.

Величина упругих деформаций крупнокускового сыпучего тела определяется его ко-

эффициентом разрыхления и гранулометрическим составом. Зависимость упругих деформаций сыпучего тела от коэффициента разрыхления и граностава описывается эмпирической формулой:

$$\Delta_{EL,MAX} = 0,0015 \cdot d \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (5)$$

где $\Delta_{EL,MAX}$ – максимальное значение упругой деформации сыпучего тела, d - линейный размер штампа, k_2 – коэффициент, зависящий от коэффициента разрыхления, k_3 – коэффициент, определяемый соотношением линейного размера штампа к диаметру среднего куска. k_2 и k_3 представляют собой функции, графики которых изображены соответственно на рис. 2 и 3.

На третьем этапе (2'-3) имеет место пластическое течение сыпучего материала, при котором величина равнодействующей силы отпора является постоянной при возрастающих деформациях. Значение равнодействующей силы отпора p_{FL} на этой стадии с достаточной для практических расчетов точностью может быть определено из соотношения

$$p_{FL} = 0,7 \cdot p_{EL,MAX} \quad (6)$$

где $p_{EL,MAX}$ – максимальное значение равнодействующей силы отпора в упругой стадии.

Полученные зависимости позволяют описать поведение

крупнокусковой сыпучей среды с целью определения амплитуды усилия $T_{П.В.}$.

Геометрическое подобие сыпучего материала, использованного в ходе эксперимента, и взорванной породы в развале обеспечивалось соответствующим подбором кусков для модели [6]. Отбирались частицы, у которых соотношение линейных размеров между собой тоже, что и у кусков в развале [7]. Физическое подобие в пределах упругой стадии соблюдалось благодаря равенству безразмерных комплексов, составленных из величин, определяющих количественные характеристики описанного процесса. В соответствии с формулами (2), (3), в пределах упругих деформаций процесс динамического вдавливания описывается выражением

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

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 [6,8].

При этом

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

$$\Pi'_2 = \frac{I}{I - \Pi_2^2}, \quad \Pi_2 = \mu.$$

Кроме получения величины размахов рассматриваемого усилия, необходимо определить частоту его циклического изменения. При разработке расчетной схемы в качестве одного цикла изменения этого усилия принимаем период между «соседними» моментами окончания пластического течения в области контакта горной массы, находящейся в ковше и призме волочения. Частота изменения рассматриваемой составляющей усилия сопротивления внедрению ковша в развал определялась экспериментально.

Для того, чтобы отследить изменение усилия $T_{П.В.}$, на зад-

нюю стенку ковша наклеивались тензорезисторы, соединенные со шлейфовым осциллографом. Предварительно было установлено, что при отсутствии призмы волочения (на начальном этапе черпания) деформации задней стенки ковша отсутствуют. Это указывает на обусловленность деформаций задней стенки только воздействием усилия, возникающего из-за наличия призмы волочения. Таким образом, был сделан вывод о совпадении частоты изменения усилия $T_{П.В.}$, обусловленного наличием призмы волочения, с частотой изменения деформаций задней стенки ковша.

По результатам проведенного эксперимента было установлено, что величина перемещения ковша в течение одного нагрузочного цикла L увеличивается по мере продвижения ковша в сыпучей среде. Эта величина изменяется в геометрической прогрессии со знаменателем

$$m = \frac{1,2 b_K}{d_{cp}}, \quad (7)$$

где b_K – ширина ковша.

Определение числа нагрузочных циклов усилия $T_{П.В.}$ (а следовательно и частоты) и величины перемещения ковша за каждый нагрузочный цикл осуществляется на основе решения системы уравнений

$$\begin{cases} L_n = L_1 \cdot m^{n-1}, \\ S = \frac{L_n \cdot m - L_1}{m - 1}, \end{cases} \quad (8)$$

где L_n – перемещение ковша за n -й нагрузочный цикл, L_1 – перемещение ковша за первый нагрузочный цикл, n – число нагрузочных циклов, S – путь наполнения ковша.

$$L_1 = 0,3 L_K,$$

где L_K – длина ковша.

Кроме того, установлено, что частота изменения исследуемого усилия не зависит от коэффициента разрыхления раз-

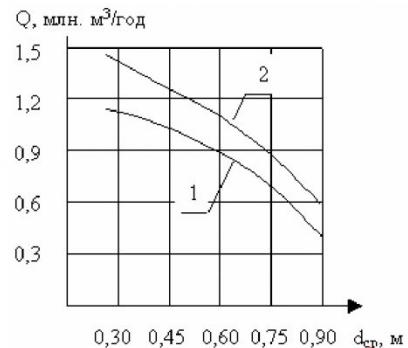


Рис. 4. Зависимость производительности экскаватора ЭШ 10/70 от диаметра среднего куска развали.

1 – при определении сроков постановки на ремонт без использования комплекса методик; 2 – при определении сроков постановки на ремонт с помощью комплекса методик

вала.

С целью проверки расчетной методики определения амплитуды и частоты изменения усилия $T_{П.В.}$ были проведены лабораторные эксперименты с использованием установки, моделирующей систему «развал – ковш». В ходе них осуществлялось волочение моделей ковша по щебеночной насыпи. Кроме того, были выполнены натурные эксперименты на разрезах «Кедровский» и «Черниговский». В ходе лабораторных и натурных экспериментов производились измерения деформаций в задней стенке ковша с помощью тензорезисторов и шлейфового осциллографа. На основе данных о деформациях вычислялись напряжения в стенке и значения изучаемого усилия. Сравнение результатов, полученных с помощью описанной расчетной методики, с экспериментальными осуществлялось с использованием критерия Фишера. При этом искомые статистики, равные отношению остаточной дисперсии к дисперсии параллельных наблюдений, не превышали критических значений. Это указывает на адекватность предложенной модели.

При оценке долговечности экскаваторов представленная расчетная методика применяет-

ся в комплексе с ранее разработанными [10,11]. Совместное использование этих методик позволяет получить все необходимые данные о распределении размахов напряжений в металлоконструкциях шагающего экскаватора при взаимодействии его ковша со взорванной горной массой. Применение комплекса указанных методик для оценки долговечности металлоконструкций экскаваторов способствует повышению производительности (рис. 4).

Изменение производительности, представленное на рис. 4, является значимым, что установлено с помощью критерия Вилкоксона. При этом

сравнивались две выборки. Элементами первой являлись значения производительности экскаваторов, достигаемой при использовании разработанного комплекса методик для определения продолжительности межремонтных сроков. В качестве элементов второй выборки принимались значения производительности при постановке экскаваторов на ремонт без учета результатов, полученных с помощью комплекса методик. Обе выборки объединялись в одну. После чего элементам объединенной выборки присваивались ранги. Минимальная из сумм рангов, полученных для элементов каждой из двух первона-

чальных выборок, принималась в качестве искомой статистики и сравнивалась с критическим значением.

Повышение производительности достигается благодаря предотвращению ремонтных остановок в тех случаях, когда в этом нет необходимости. Сокращение числа переварок трещин, ведет к снижению концентрации напряжений в зонах трещинообразования. Это делает процесс образования и роста трещин менее интенсивным и является дополнительным фактором, способствующим сокращению времени ремонтных простоев и увеличению производительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

10. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М. «Машиностроение», 1968. 376 с.
11. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1994. 228 с.
12. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. О поведении крупнокусковой сыпучей среды при вдавливании в нее жестких штампов. – Кемерово: Вестник КузГТУ. 2004, №1, с. 9-12.
13. Ташкинов А.С. Исследование влияния качества взрывной подготовки пород на эффективность их безтранспортной разработки с использованием драглайнов (применительно к условиям Кузбасса). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово: КузПИ. 1971
14. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. – Л. Стройиздат, Ленинградское отделение. 1972. 207 с.
15. Кирличев М.В. Теория подобия. - М.: АН СССР. 1953. 95 с.
16. 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.
17. Диудух Б.И., Каспэ И.Б. Практическое применение методов теории размерностей и подобия в инженерно-строительных расчетах. - М.: Стройиздат. 1975. 49 с.
18. Проноза В.Г. Обоснование структур эффективных технологических комплексов перевалки вскрышных пород. Диссертация на соискание ученой степени доктора тезнических наук. – Кемерово: КузПИ. 1992.
19. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. К разработке модели взаимодействия режущей кромки ковша шагающего экскаватора со взорванной горной породой. – Кемерово: КузГТУ.
20. Паначев И.А., Насонов М.Ю., Антонов К.В. О некоторых аспектах трещинообразования в ковшах шагающих экскаваторов. – Кемерово: Вестник КузГТУ. 2003, №6.

Автор статьи:

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

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

Антонов
Кирилл Викторович
- старший преп., каф.
сопротивления материалов