

А.В. Агафонов, д-р техн. наук,
М.В. Головин, начальник отдела
(ЗАО "Донецксталь - металлургический завод"),
В.Н. Сергиенко, канд. техн. наук,
В.Н. Трипольский, главный технолог
(ИГТМ НАН Украины)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВДАВЛИВАНИЯ СТОЙКИ КРЕПИ В ПОЧВУ ВЫРАБОТКИ

Викладено результати фізичного моделювання процесу вдавлювання спецпрофілю з підкладкою в піддатливе середовище.

PHYSICAL MODELING OF INDENTATION OF UPRIGHTS OF LININGS IN GROUND OF THE EXCAVATION

The results of physical modeling of the process indentation of special profile with pillow in pliable environment are stated.

Как показали результаты шахтных наблюдений, одной из основных причин быстрого уменьшения поперечного сечения подготовительной выработки в условиях высокого горного давления является вдавливание стоек рамной крепи в почву.

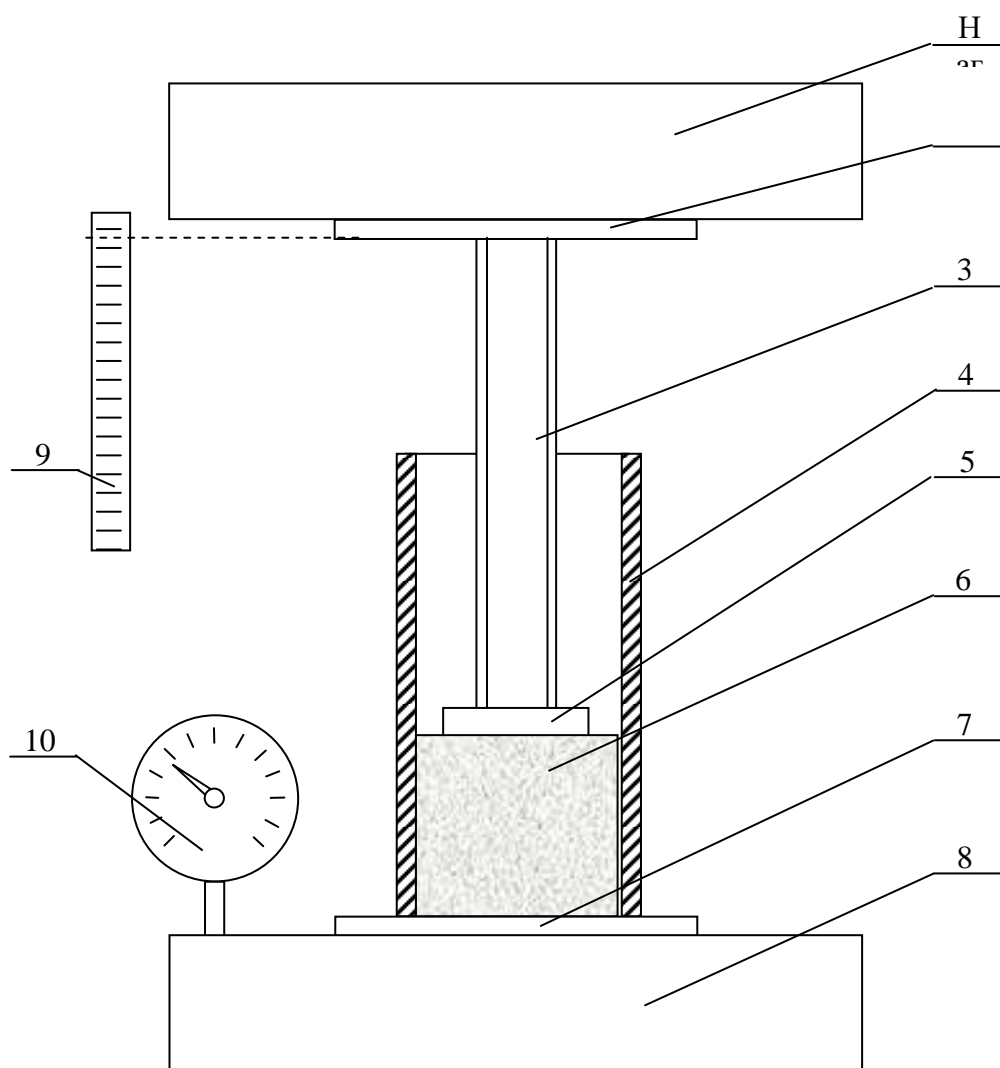
Одним из методов повышения сопротивления вдавливания стоек является установка на их основание специальных подпятников. Существующие конструкции подпятников предусматривают их жесткую установку на стойки рам в цеховых условиях и транспортировку неразборной конструкции по шахте к месту крепления выработки. Такая схема характеризуется следующими недостатками:

- неудобство транспортировки пакета рам;
- невозможность оперативной адаптации к местным горно-геологическим условиям.

Предложена установка дополнительных элементов на нижнюю часть стоек рам непосредственно при монтаже крепи. К указанным элементам предъявляются следующие требования:

- простота изготовления, позволяющая производить их крупными партиями непосредственно на территории поверхностного шахтного комплекса;
- малые габариты и вес;
- невысокая стоимость;
- простота установки на раму.

Для обоснования выбора геометрии и размеров устанавливаемых элементов в лабораторных условиях был выполнен эксперимент по вдавливанию спецпрофиля СВП-27 с дополнительными элементами в виде подкладок различной конструкции в податливую среду. В качестве такой среды служила отвердевшая в течение одних суток водно-алебастровая смесь. Испытательный стенд смонтирован на базе прессы П-500. Его конструкция схематически представлена на рис. 1.



1 – верхняя плита пресса, 2 – верхняя прокладка, 3 – отрезок СВП-27, 4 – труба, 5 – исследуемая подкладка, 6 – имитатор породного слоя, 7 – нижняя прокладка, 8 – нижняя плита пресса, 9 – линейка, 10 – манометр

Рис. 1 – Конструкция стенда для моделирования процесса вдавливания стоек крепи в почву выработки

При разработке методики выполнения эксперимента учтены результаты аналогичных исследований [1-7]. Создание объемного сжатия среды под вдавливаемым штампом обеспечивается путем ее помещения в толстостенную стальную трубу, выполненную без вырезов. Контроль положения вдавливаемого отрезка спецпрофиля производили, фиксируя текущее положение его верхней границы относительно линейки, которая жестко связана с нижней плитой пресса. Процесс вдавливания фиксировали с помощью периодического фотографирования стенда цифровым фотоаппаратом с высокой разрешающей способностью – 12,1 Мпс. При компьютерной обработке последовательной серии фотоснимков определяли смещение верхнего края отрезка спецпрофиля относительно неподвижной части стенда, и, следовательно, величину вдавливания. Для одновременной регистрации усилия вдавливания на стенде был установлен

дополнительный прецизионный манометр (класс 0,4), подключенный к гидросистеме прессы. Для учета силы трения поршня в цилиндре прессы предварительно выполнялась тарировка манометра с использованием образцового динамометра.

Основные сведения о подкладках в моделях представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Конструкция и размеры подкладок под основание спецпрофиля СВП-27

№ варианта	Размеры подкладки		Особенности конструкции
	толщина, мм	площадь сечения, см ²	
1	-	34,37	Базовый вариант. Прокладка отсутствует.
2	10,0+12,0	113,04	Основанием конструкции являются две пластины из конвейерной резины.
3	-	34,37	Деревянный клинообразной формы брус расположен в спецпрофиле. Соединение спецпрофиля и бруса выполнено при помощи хомута.
4	45,0	176,9	Основанием конструкции является пластина из дерева.
5	5,0	204,0	Основанием конструкции является швеллер.

После выполнения компьютерной обработки снимков для каждого из вариантов построены графические зависимости усилия вдавливания от глубины проникновения штампа в отвердевший алебастровый слой, примерно соответствующий по своим физико-механическим свойствам водонасыщенному алевролиту. Указанная зависимость для базового варианта иллюстрируется рис. 2.

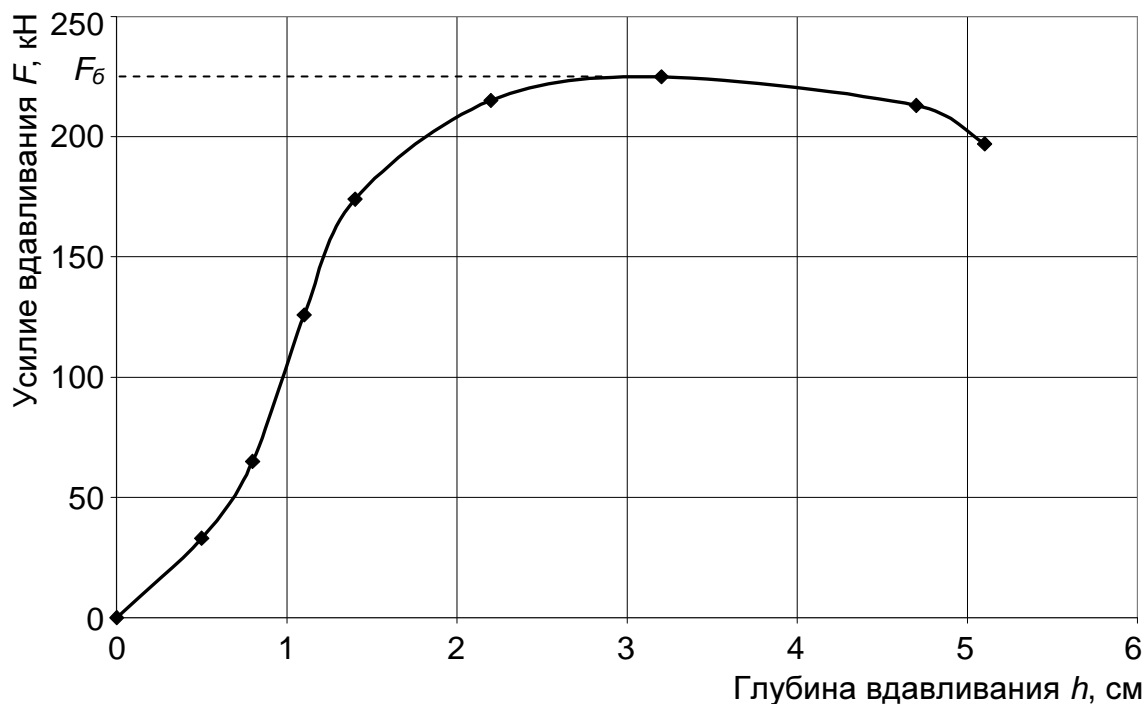


Рис. 2 – Диаграмма вдавливания базового варианта модели

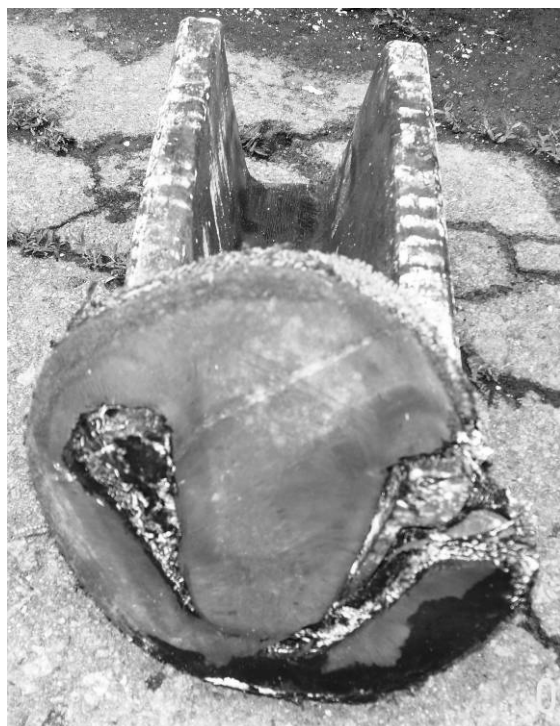
Особенностью базового варианта является участок стабилизации сопротивления вдавливанию. Величина сопротивления F_{σ} на данном участке и является основной оценочной характеристикой эффективности работы подкладки.

Испытания показали, что диаграммы вдавливания при использовании неметаллических подкладок имеют примерно такой же вид, как и для базовой модели, отличаясь числовыми значениями для участка стабилизации – F_{cm} . Общей особенностью данной группы моделей явилось также то, что усилие вдавливания было значительно меньшим необходимого для деформации отрезка спецпрофиля. После выполнения испытаний он оставался в первоначальном состоянии и мог быть использован повторно. Отличия количественного характера представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Количественные показатели работы неметаллических подкладок в сравнении с базовым вариантом

Номер варианта	Конструкция и материал подкладки	Усилие вдавливания F_{cm} на участке стабилизации	Отношение F_{cm} / F_{σ}
2	два круга из конвейерной ленты	320	1,42
3	деревянный клин	180	0,80
4	пиломатериал ($d = 50$ мм)	110	0,49

При использовании в качестве подкладки конвейерной резины происходит ее продавливание без появления трещин, в то время как деревянная подкладка разрушается и перестает быть цельной конструкцией (рис. 3).



а) – конвейерная резина



б) – дерево

Рис. 3 – Разрушение различных подкладок в процессе испытаний

Испытания показали неэффективность использования деревянных подкладок, поскольку усилие вдавливание в дерево оказалось ниже, чем в породу.

Металлическая подкладка в виде отрезка швеллера оказалась достаточно жесткой и в процессе испытаний спецпрофиль деформировался (рис. 4).



Рис. 4 – Вид модели № 5 после выполнения испытаний

Диаграмма вдавливания при использовании жесткой металлической подкладки также имеет свои особенности. Помимо большого сопротивления вдавлванию не был достигнут участок стабилизации (рис. 5).

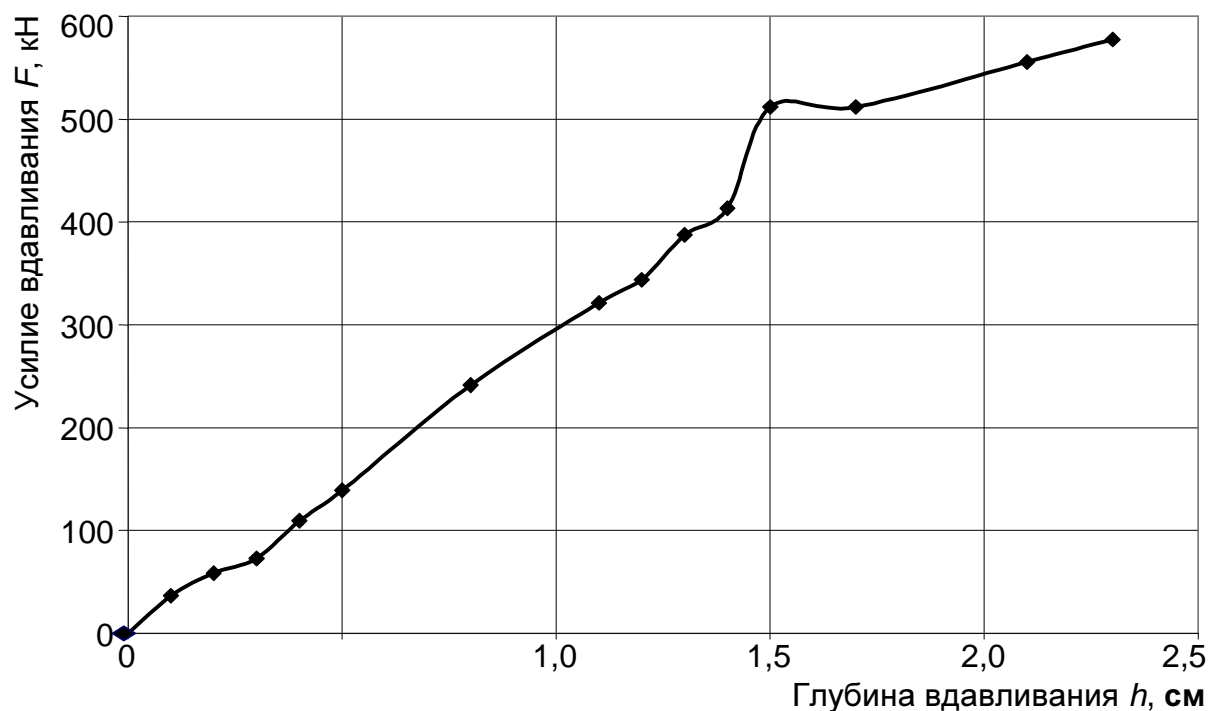


Рис. 5 – Диаграмма вдавливания модели № 5

Стабилизированная величина удельного давления отрезка спецпрофиля СВП-27 на имитирующую породный массив гипсовую заливку имеет значение 65 МПа. Исходя из указанных данных, оценочный прогнозный расчет сопротивления стойки из профиля СВП-33 (поперечное сечение 42,53 см²) составляет порядка 270 кН. Соответственно, для двух стоек, входящих в комплект рамы, сопротивление вдавливания в почву может составлять порядка 540 кН. Указанная величина соизмерима с величиной сопротивления рамы при податливом режиме работы. В реальной действительности происходит одновременный процесс выбора податливости рамы и ее вдавливание в почву выработки.

При наличии податливой подкладки между стойкой и почвой диаграмма деформирования также имеет участок стабилизации, соответствующий продавливанию стойкой материала подкладки. Далее возможны варианты. При достаточно слабой породе после продавливания может наблюдаться снижение сопротивления, а при более прочной – увеличение.

Наличие продавливаемой подкладки имеет как недостатки, так и преимущества. К преимуществам следует отнести:

- простоту изготовления и установки под стойку;
- возможность использования отходов производства;
- отсутствие деформации стоек ввиду податливого характера их взаимодействия с системой «подкладка – массив».

Основным недостатком неметаллических подкладок при слабых породах почвы является ограниченная величина диапазона эффективной работы, определяемая толщиной подкладки.

Использование металлических подкладок позволяет достичь высокого сопротивления при внедрении охранной конструкции в почву выработки. Однако такие подкладки более сложны в изготовлении, дороже и склонны к выскальзыванию из-под основания стойки.

Взаимодействие в системе «стойка – подкладка – почва» можно свести к трем основным вариантам.

При первом варианте общее сопротивление вдавливания двух стоек меньше рабочего сопротивления рамы. Уже при небольших нагрузках на крепь происходит быстрая потеря сечения за счет внедрения стоек в почву. С учетом криволинейной формы рам процесс внедрения затормаживается и начинается выбор конструктивной податливости арки. К моменту подхода лавы значительная часть сечения уже потеряна, резервы податливости исчерпаны и в дальнейшем рама работает в жестком режиме с сопутствующими деформациями кручения и изгиба.

Второй вариант – общее сопротивление двух стоек при вдавливании в почву выше предельной несущей способности рамы. В этом случае подкладку в первом приближении можно считать идеально жесткой. Этот вариант предпочтительней первого, поскольку начало процесса уменьшения сечения происходит при более значительных нагрузках на раму. Однако, после выбора конструктивной податливости, которая может быть небольшой, дальнейшая потеря сечения происходит с изменением формы рам.

При третьем варианте общее сопротивление двух стоек рамной крепи при вдавливании в почву несколько больше рабочего сопротивления рамы, но существенно меньше предельной несущей способности. Уменьшение сечения подготовительной выработки, как и во втором варианте, происходит первоначально за счет выбора податливости соединений звеньев рамы. После этого начинается процесс вдавливания стоек в почву, который в определенном диапазоне деформаций позволяет сохранить форму рамы и восстановить сечение выработки путем подрывки почвы. Этот вариант, по нашему мнению, является наиболее приемлемым.

Таким образом, одним из критериев выбора конструкции и размеров подкладки под основание стойки рамы является необходимая величина ее жесткости, определяемая в свою очередь деформационно-силовыми характеристиками рамной крепи и свойствами пород почвы.

Необходимую величину сопротивления вдавливанию каждой из двух подкладок при первой прикидочной оценке принимаем на 20% выше паспортного значения сопротивления рам в податливом режиме. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3 – К выбору величины сопротивления вдавливания подкладок для некоторых типов рамных крепей на базе спецпрофиля СВП-33

Тип рамной крепи	Проектное сечение, м ²	Рабочее сопротивление, кН	Предельная несущая способность, кН	Сопротивление вдавливанию на одну стойку, кН
КМП-А3	15,5	300	550	180
КМП-А3Р2	15,5	593	890	355
КШПУ-М	15,1	268	586	160
КВТ-2	16,2	392	607	235

В соответствии с данными исследований можно сделать предварительные выводы, что для некоторых типов крепей нормальный режим их взаимодействия с почвой выработки не может быть реализован использованием податливых подкладок и требуется применение более жестких конструкций, выполненных из металла.

Необходимо учитывать также влияние почвы на работу подкладки. При слабой почве, когда требуется большая площадь опоры для создания достаточного сопротивления вдавливанию, предпочтительными являются жесткие металлические подкладки. При более прочных породах почвы небольшая площадь металлической подкладки может обеспечить сопротивление вдавливанию, превышающее оптимальную величину. В то же время улучшаются условия работы податливых прокладок, зажатых между жестким штампом и сравнительно жестким основанием, работающих на продавливание.

С учетом комплекса указанных условий построена ориентировочная матри-

ца для определения категории средств по увеличению сопротивления вдавливания стоек рам в почву, которая представлена в табл. 4.

Таблица 4 – Матрица для определения типа подкладок с целью увеличения сопротивления вдавливания стоек рамной крепи в почву

Породы почвы		Тип крепи			
описание	категория	КМП-А3	КМП-А3Р2	КШПУ-М	КВТ-2
довольно мягкие	VI, VIa	жесткая	жесткая	жесткая	жесткая
средние по крепости	V, Va	податливая	жесткая	податливая	жесткая

Табл. 4 определяет область рационального использования податливых и жестких подкладок для рамной крепи подготовительных выработок для условий, характерных для шахт Донбасса. Следует отметить, что чем слабее породы почвы, тем более эффективным является использование подкладок. Для пород категории IV и крепче они в большинстве случаев не нужны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шрейнер Л.А. Зоны пластической деформации и механизм разрушения пластичных горных пород при вдавливании / Л.А.Шрейнер, О.П. Петрова // Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении. - М.: ГОСИНТИ, 1961, с. 116—131.
2. Шрейнер Л.А. Методическое пособие по использованию результатов испытаний механических свойств горных пород вдавливанием штампа / Л.А. Шрейнер и др. - М.: Недра, 1967. - 79 с.
3. Филимонов Н.М. К вопросу о развитии трещиноватости в горной породе при статическом вдавливании штампа / Н.М. Филимонов, К.И. Вдовин, М.Р. Мавлютов // Горный журнал. – 1969. - № 1. - С. 19 - 37.
4. Вдовин К.И. Формы зон разрушения горной породы при вдавливании штампа с плоским основанием / К.И. Вдовин, М.Р. Мавлютов, Н.М. Филимонов // Труды Уфимского нефтяного ин-та. - Уфа, 1969. – Вып. 7. - С. 53 -74.
5. Барон Л.И. Контактная прочность горных пород / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман - М.: Недра, 1966. – 184 с.
6. Ивлев Д.Д. О вдавливании индентора в идеальную жесткопластическую полосу / Д.Д. Ивлев, Л.А. Максимова // Изв РАН, МТТ. – 2000. - № 3. – С. 131 -135.
7. Ревуженко А.Ф. К вопросу о плоском деформировании упрочняющихся -разупрочняющихся пластических материалов / А.Ф. Ревуженко, Е.И. Шемякин // Прикл. механика и техническая физика. – 1977. - № 3. – С. 157 – 173.