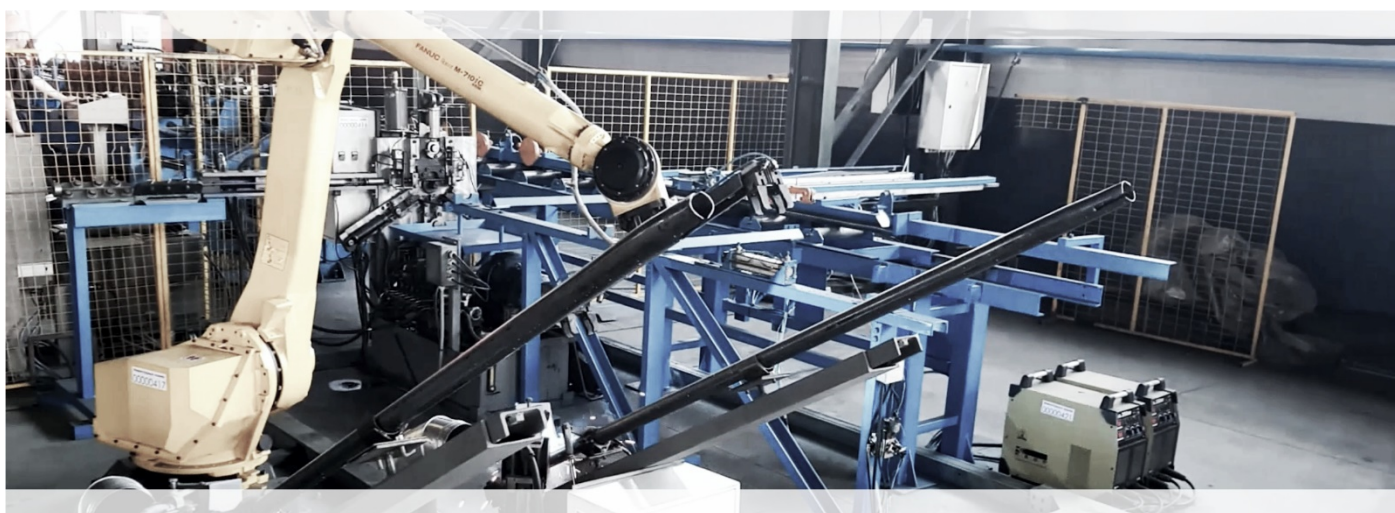


ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АНКЕРНОЙ КРЕПИ С ФРИКЦИОННЫМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ЕЕ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АНКЕРА W-ОБРАЗНОГО ПРОФИЛЯ

INCREASING THE BEARING CAPACITY OF THE ANCHOR SUPPORT WITH FRICTION FASTENING WHILE REDUCING IT METAL CONSUMPTION DUE TO THE USE OF W-SHAPED PROFILE ANCHORS.

Кречетов Андрей Александрович, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, кандидат технических наук, доцент

Krechetov Andrey, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, PhD, Associate Professor



Аннотация

В настоящее время выполняется большое количество работ, направленных на повышение эффективности анкерных крепей с фрикционным закреплением. Одним из вариантов решения этой задачи является применение анкера с W-образным сечением, разработанного и запатентованного компанией ООО «ОКС». Использование этого анкера позволяет повысить несущую способность анкерной крепи без использования каких-либо дополнительных материалов и необходимости выполнения дополнительных операций. В работе приведены результаты оценки предельных допускаемых нагрузок, напряженно-деформированного состояния и распорного усилия при установке в шпур фрикционного анкера с наиболее распространенным в настоящее время С-образным сечением с толщиной стенки 3 мм, и с W-образным сечением с толщиной стенки 2 мм, 2,5 мм и 3 мм. Показано, что при прочих равных условиях несущая способность анкеров с W-образным сечением по сравнению с анкером с С-образным сечением и толщиной стенки 3 мм больше в 1,6, 2 и 3,6 раза для W-образных сечений с толщинами стенок 2 мм, 2,5 мм и 3 мм соответственно. Для оценки эффективности того или иного сечения с точки зрения металлоемкости предложено использовать отношение создаваемого распорного усилия к массе анкера. Для анкера С-профиля с толщиной стенки 3 мм эта величина составляет 57 кН/кг, для анкеров W-профиля эта величина составляет 109 кН/кг, 114 кН/кг и 157 кН/кг для толщины стенки 2 мм, 2,5 мм и 3 мм соответственно.

Введение

В настоящее время для крепления горных выработок широкое распространение получили анкерные крепи с фрикционным закреплением [1-7]. Такие крепи обладают рядом преимуществ по сравнению с анкерными крепями других типов: относительная простота установки, повышение производительности процесса крепления выработки, возможность нагружения крепи сразу после ее установки.

Фрикционный анкер удерживается в шпуре за счет трения между стенками стержня анкера и стенками шпура. Предельная несущая способность фрикционных анкеров оценивается с помощью испытания на выдергивание [8-9]. Результаты исследований показывают, что фрикционные анкеры имеют относительно невысокую несущую способность, в большинстве случаев 40-60 кН на 1 метр длины анкера [10]. Через некоторое время она может увеличиваться вследствие различных явлений: сдвига породы перпендикулярно оси шпура [11], коррозии стержня анкера [12] и других.

Одним из основных факторов, определяющих несущую способность фрикционных анкеров, является величина распорного усилия анкера на стенки шпура. На сегодняшний день разработано большое количество технических решений, направленных на повышение этой характеристики [10-19].

Принцип действия расширяющихся фрикционных анкеров основан на размещении в стержне анкера после установки композитной смеси, которая со временем расширяется. При помещении этой смеси в стержень анкера без установки в шпур, его диаметр увеличивается на 11% через 4 дня, и на 19% через 56 дней [10]. Использование такого решения позволяет повысить несущую способность анкера, однако полная нагрузка на такую крепь возможна только после достаточно продолжительного времени после установки, что снижает производительность крепления, также появляется необходимость использования дополнительных материалов, что отрицательно сказывается на стоимости крепления одного анкера.

Еще одним направлением повышения распорного усилия анкера на стенки шпура являются различные варианты фрикционного анкера с распорным элементом, который может выполняться в виде сплошного стержня, полый цельной или разрезной трубы, устанавливаемой либо после установки анкера, либо соединенной с анкером тем или иным способом и устанавливаемой совместно с ним [16-19]. Такое решение позволяет повысить распорное усилие анкера, однако дополнительный элемент увеличивает металлоемкость анкера, повышает себестоимость его изготовления и, как следствие, конечную стоимость для потребителя.

Целью работы являлась оценка предельных допускаемых нагрузок, напряженно-деформированного состояния и распорного усилия, создаваемого анкером типа АТФ W-профиля с различной толщиной стенок, разработанным и запатентованным компанией ООО «ОКС» [20], и сопоставление этих характеристик с наиболее распространенным на сегодняшний день анкером с С-профиля.

Методы

Анкер трубчатый фрикционный типа АТФ W-профиля представляет собой вариант фрикционного анкера, отличающийся от наиболее распространенного анкера С-профиля наличием загнутых вовнутрь граней в зоне продольной прорези анкера. При установке такого анкера в шпур и уменьшении его внешнего диаметра загнутые грани продольной прорези приходят в соприкосновение, жесткость сечения существенно повышается, что приводит к увеличению распорного усилия. Существенным преимуществом анкера типа АТФ W-профиля является отсутствие необходимости в каких-либо дополнительных материалах и дополнительных операциях при его установке.

В работе проводилась оценка распорного усилия анкеров С-образного сечения с толщиной стенки 3 мм (далее по тексту С3) и W-образного сечения с толщинами стенки 2 мм, 2,5 мм и 3 мм (далее по тексту W2, W2,5

и W3 соответственно). С-образное сечение показано на рис. 1а, W-образное сечение с толщиной стенки 3 мм показано на рис. 1б. Характеристики сечений и соответствующих анкеров приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики профилей анкеров с различной толщиной стенки

Сечение	S , мм ²	m , кг	I_{xx} , мм ⁴	ΔS , %	Δm , %	ΔI_{xx} , %
C3	346,8	2,71	64 727,2			
W2	291,6	2,27	59 592,9	-15,93	-15,93	-7,93
W2,5	350,7	2,74	70 371,6	+1,11	+1,11	+8,72
W3	424,2	3,31	82 683,9	+22,30	+22,30	+27,74

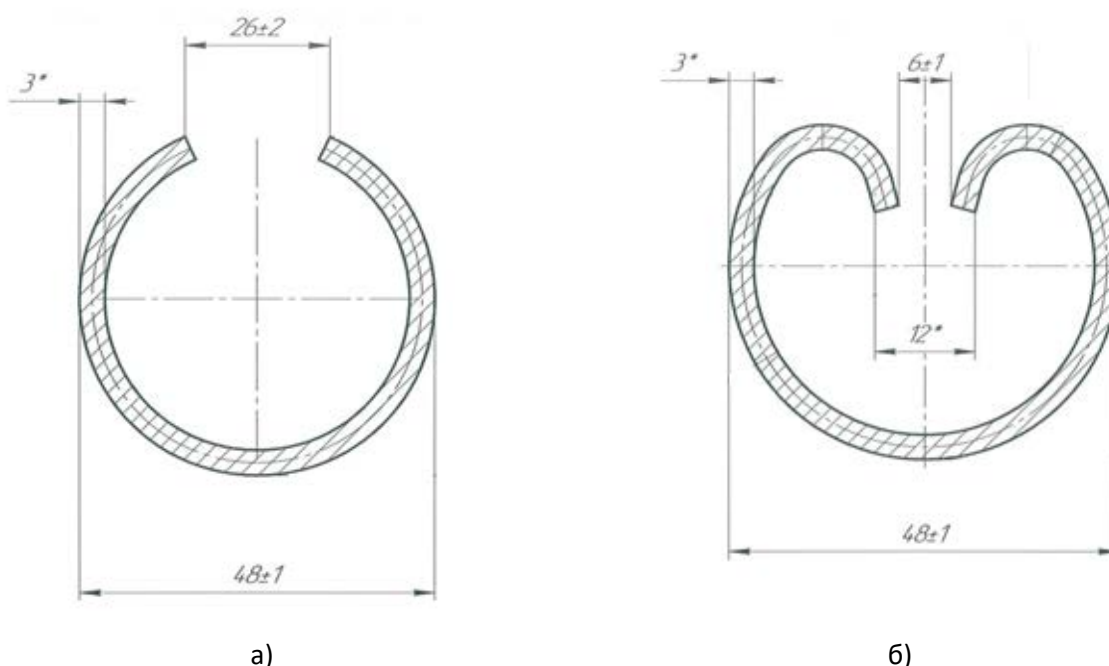


Рисунок 1. Профили фрикционных анкеров: а) АТФ С-профиля с толщиной стенки 3 мм; б) АТФ W-профиля с толщиной стенки 3 мм

В таблице 1 обозначено: S – площадь поперечного сечения; m – масса 1 метра анкера; I_{xx} – момент инерции сечения относительно оси x (горизонтальной оси по рис. 1); ΔS – изменение площади сечения по сравнению с сечением С3; Δm – изменение массы 1 метра анкера по сравнению с анкером сечения С3 и ΔI_{xx} – изменение момента инерции сечения по сравнению с сечением С3.

Анализ данных в табл. 1 показывает, что анкер с сечением W2 имеет массу на 16% меньше, чем анкер с сечением С3, однако за счет геометрии сечения момент инерции I_{xx} снижается на меньшую величину 8%. Анкер с сечением W2,5 имеет массу сопоставимую с анкером с сечением С3, при этом момент инерции I_{xx} возрастает на 9%. Анкер с сечением W3 имеет большую массу, чем анкер с сечением С3, но и больший на 28% момент инерции I_{xx} .

Максимальная допустимая нагрузка на стержень анкера в случае ее приложения по продольной оси определялась по пределу текучести $\sigma_{0,2}$ и по временному сопротивлению разрушению σ_B :

$$P_{0,2} = S\sigma_{0,2}, \quad (1)$$

$$P_B = S\sigma_B. \quad (2)$$

В качестве величин предельных напряжений принимались минимальные значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b для проката толщиной до 10 мм из стали Ст3пс по ГОСТ 535-2005 с учетом требований ГОСТ 31559-2012 к анкерным креплениям с фрикционным закреплением – 245 МПа и 410 МПа соответственно.

Максимальный допустимый изгибающий момент относительно оси x M_x^{max} оценивался с использованием конечно-элементного моделирования. Для этого стержень анкера моделировался стержневыми элементами. Точка оси стержня анкера в начале системы координат жестко фиксировалась, к противоположному концу оси стержня анкера прикладывалась сила P_{Mx} (рис. 2 а). Свойства материала соответствовали свойствам стали Ст3пс. В процессе моделирования определялось максимальное значение силы P_{Mx} , при которой возникающие напряжения не превышали предела текучести $\sigma_{0,2}$ (рис. 2 б). Далее для оценки максимального допустимого момента M_x^{max} это значение умножалось на длину стержня анкера.

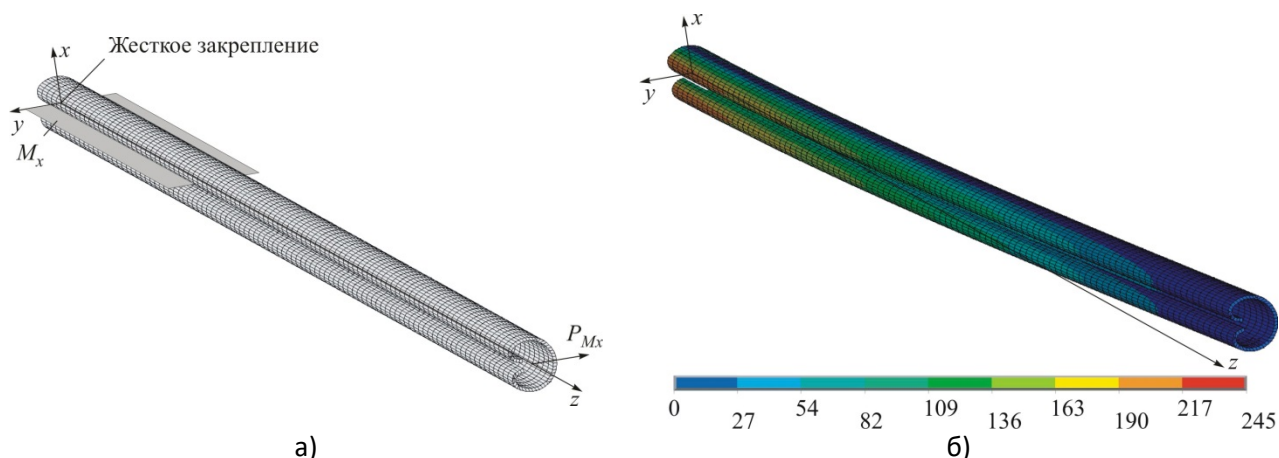


Рисунок 2. Моделирование изгиба стержня анкера: а) – конечно-элементная модель; б) – интенсивность напряжений при приложении максимально допустимой силы P_{Mx} (МПа)

Распорное усилие, создаваемое анкерами диаметром 48 мм с различным сечением при установке в шпур диаметром 43 мм, также определялось с использованием конечно-элементного моделирования. Для этого создавалась конечно-элементная модель, состоящая из сечения анкера единичной длины (1 мм) и упругого кольца с внешней стороны сечения анкера (рис. 3). Свойства материала для сечения анкера соответствовали стали Ст3пс, при этом для этого материала определялись также и пластические свойства, путем задания соответствующей кривой течения.

Между внешней стороной сечения анкера и внутренней стороной упругого кольца моделировалось контактное взаимодействие, для оптимизации процедуры расчета условием контактного взаимодействия являлось сохранение контакта при нагружении модели. Также контактное взаимодействие моделировалось между соприкасающимися при установке в шпур поверхностями граней продольной прорези анкера АТФ W-профиля.

К торцевым поверхностям сечения анкера и упругого кольца прикладывалось ограничение перемещения относительно оси z . Таким образом, расчет напряженно-деформированного состояния происходил в плоскодеформированной постановке. К внешней стороне упругого кольца прикладывались перемещения так, чтобы внутренняя сторона упругого кольца принимала форму шпура – окружность диаметром 43 мм (рис. 4).

В результате моделирования определялись величины напряжений и деформаций. Величина распорного усилия оценивалась как сила реакции опоры в контактной паре между сечением анкера и упругим кольцом в цилиндрической системе координат в радиальном направлении (в направлении оси x при ее повороте на 360° на рис. 5).

Упругое кольцо - диаметр уменьшается до 43 мм

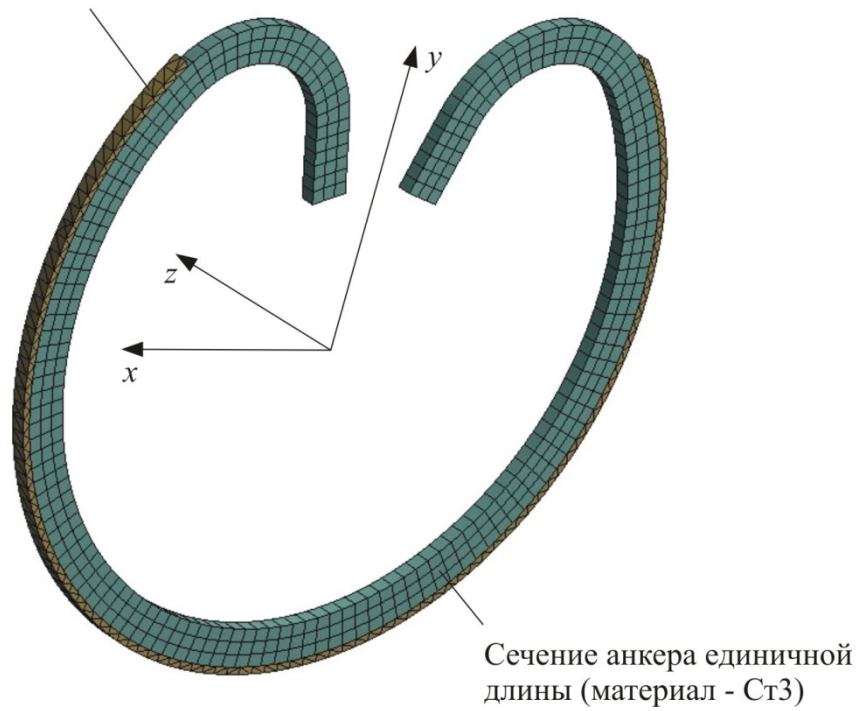


Рисунок 3. Конечно-элементная модель сечения анкера и упругого кольца

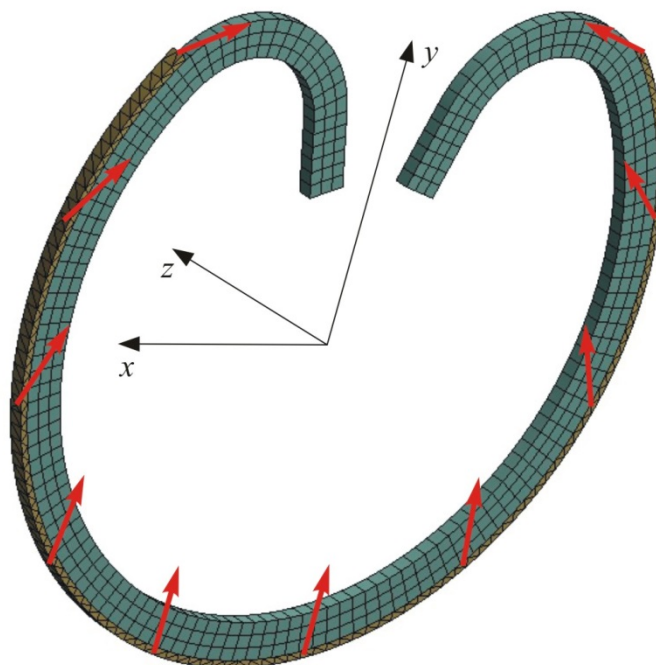


Рисунок 4. Перемещения, приложенные к упругому кольцу

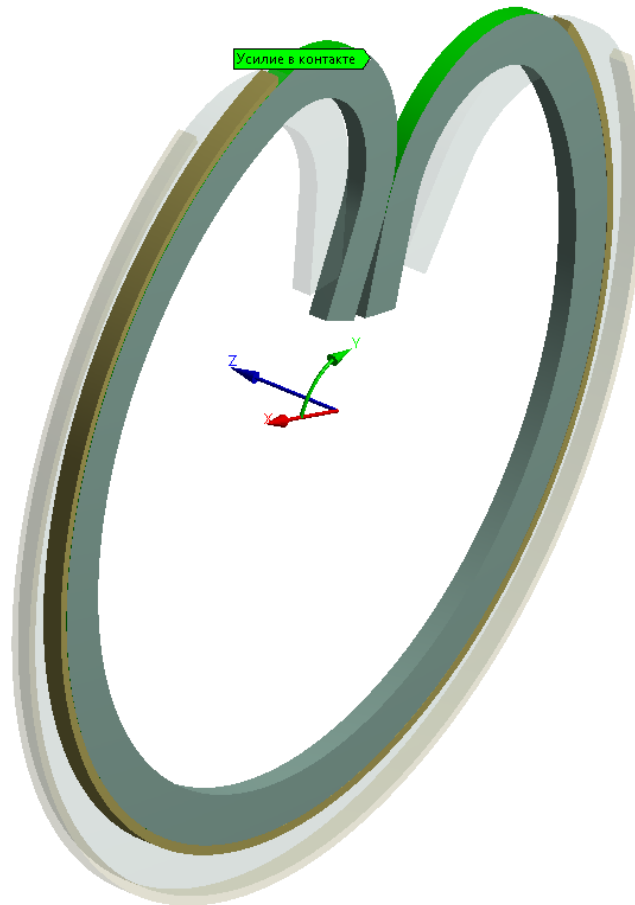


Рисунок 5. Оценка распорного усилия при установке анкера в шпур

Результаты и обсуждение

Максимальные допускаемые нагрузки на стержень анкера приведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные допускаемые нагрузки на стержень анкера

Сечение	$P_{0,2}$, кН	P_B , кН	M_x^{max} , Н·м	$\Delta P_{0,2}$, %	ΔP_B , %	ΔM_x^{max} , %
C3	84,98	128,33	630,18			
W2	71,44	107,89	634,32	-15,93	-15,93	+0,66
W2,5	85,92	129,76	760,68	+1,11	+1,11	+20,71
W3	103,93	156,95	884,52	+22,30	+22,30	+40,36

В таблице 2 обозначено: $P_{0,2}$ – максимальное допускаемое усилие по пределу текучести; P_B – максимальное допускаемое усилие по временному сопротивлению разрушению; M_x^{max} – максимальный допускаемый изгибающий момент относительно оси x ; $\Delta P_{0,2}$ – изменение максимального усилия по пределу текучести по сравнению с анкером с сечением C3; ΔP_B – изменение максимального усилия по временному сопротивлению разрушения по сравнению с анкером с сечением C3; ΔM_x^{max} – изменение максимального допускаемого момента относительно оси x по сравнению с анкером с сечением C3.

Анализ результатов в табл. 2 показывает, что максимально допускаемые нагрузки на стержень анкера для сечения W2 на 16% меньше, чем для сечения C3, при этом допускаемый изгибающий момент для этого

сечения имеет большую величину. Допускаемые нагрузки на стержень анкера для сечения W2,5 сопоставимы с сечением С3, при этом допускаемый изгибающий момент выше на 20%. Допускаемые нагрузки на анкер с сечением W3 имеют большее значение на 22% по сравнению с сечением С3, допускаемый изгибающий момент – на 40%.

Несмотря на меньшие значения допускаемой нагрузки на стержень анкера с сечением W2 по сравнению с анкером с сечением С3, минимальное значение (71,44 кН по пределу текучести) больше нормативно установленной минимально допускаемой нагрузки (50 кН по ГОСТ 31559-2012) на 43%. Также важным является то обстоятельство, что фрикционный анкер за счет действия распорного усилия передает часть нагрузки на стенки шпура. Поэтому при нагружении фрикционного анкера до его сдвига в шпуре несущая способность определяется не только стержнем анкера, но и окружающей его породой. Именно это обстоятельство обуславливает в ряде случаев значение усилия при выполнении теста на выдергивание большее, чем допускаемая нагрузка не только по пределу текучести, но даже и по пределу прочности. В связи с этим решающее значение для повышения несущей способности имеет величина распорного усилия, создаваемого анкером при его установке в шпур.

Распорное усилие для сечений приведено в табл. 3. В таблице приведены значения распорного усилия для единичной длины, полученные в результате моделирования, для длины стержня анкера 1850 мм и 2700 мм. Также приведено изменение распорного усилия по сравнению с сечением С3 – ΔF_p .

На рис. 6 показано распределение интенсивности напряжений при установке анкеров с различным сечением в шпур, на рис. 7 – распределение интенсивности пластических деформаций.

Анализ распределения интенсивности напряжений показывает, что напряжения для сечения С3 имеют минимальное для всех моделируемых сечений и составляет 260 МПа. Интенсивность напряжений максимальна для сечения W2,5 и достигает 311 МПа, для сечения W3 снижается до 301 МПа.

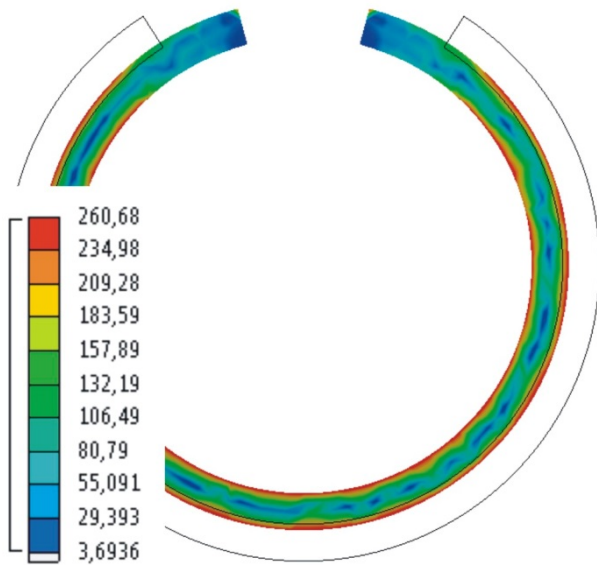
Интенсивность пластических деформаций в W-образных сечениях концентрируется в зонах начала загнутых граней сечения, с увеличением толщины возрастает с 0,016 для сечения W2 до 0,036 для сечения W3.

Распорное усилие анкеров с W-образным сечением намного выше, чем распорное усилие анкеров с С-образным сечением. Так, для анкера с сечением W2, который имеет на 16% меньшую массу по сравнению с анкером с сечением С3, распорное усилие на 60% больше. Распорное усилие анкера с сечением W2,5 более чем в 2 раза выше, чем анкера с сечением С3, при сопоставимой массе этих анкеров. Анкер с сечением W3 при увеличении массы анкера на 22% обеспечивает распорное усилие более чем в 3 раза большее, чем анкер с сечением С3. Увеличение распорного усилия анкеров с W-образным сечением достигается за счет контактного взаимодействия загнутых граней, при смыкании которых существенно повышается жесткость сечения.

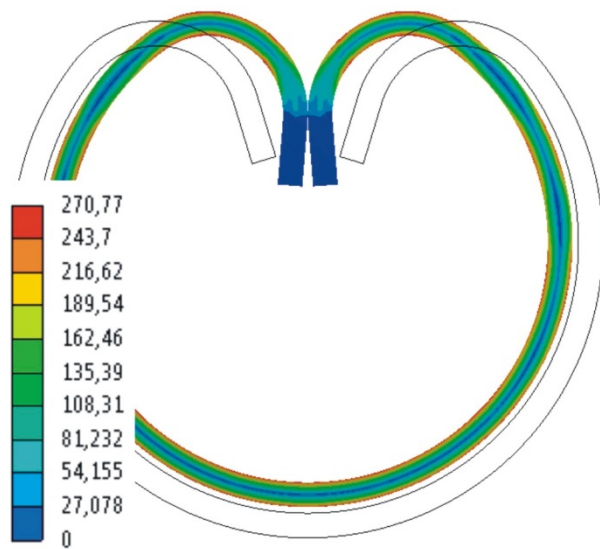
Таблица 3

Величина распорного усилия

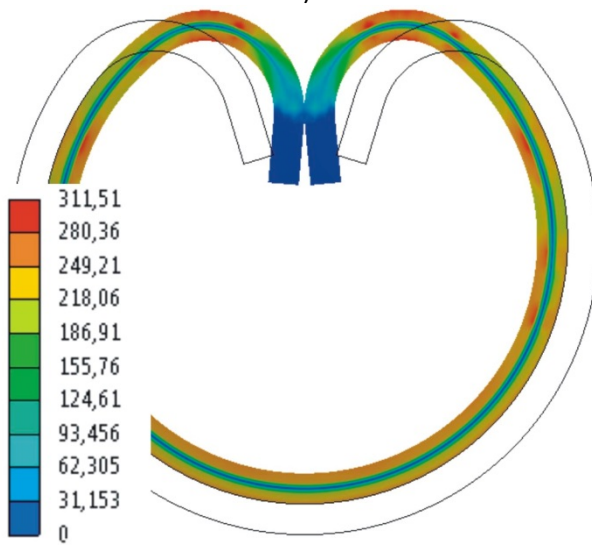
Сечение	Распорное усилие F_p , кН			
	На 1 мм длины	На 1850 мм длины	На 2700 мм длины	ΔF_p , %
С3	0,155	286,75	418,5	
W2	0,248	458,8	669,6	+60
W2,5	0,312	577,2	842,4	+101
W3	0,521	963,85	1 406,7	+236



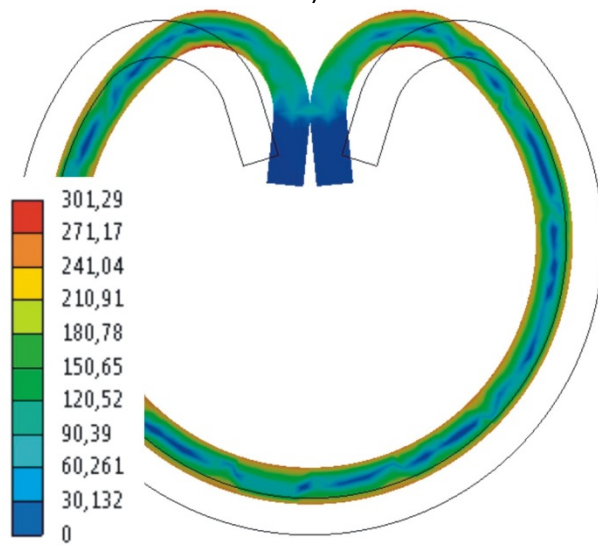
а)



б)



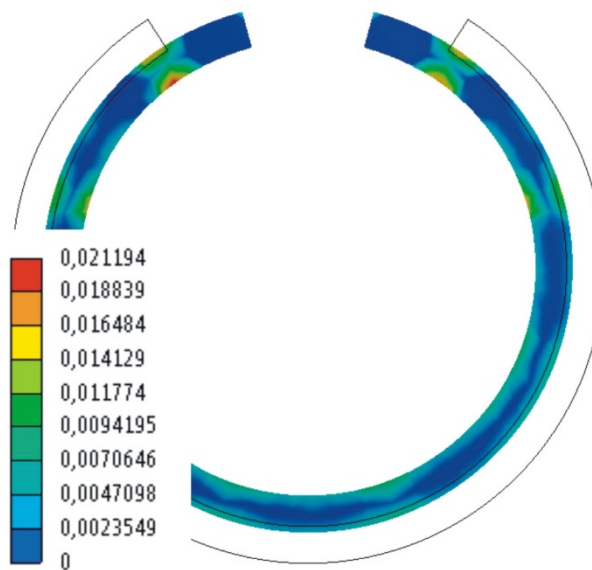
в)



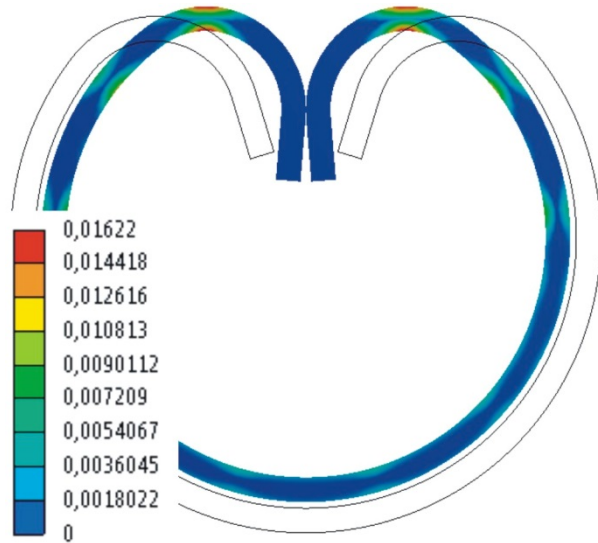
г)

Рисунок 6. Распределение интенсивности напряжений при установке анкеров в шпур, МПа:

а) – сечение С3; б) – сечение W2; в) – сечение W2,5; г) – сечение W3



а)



б)

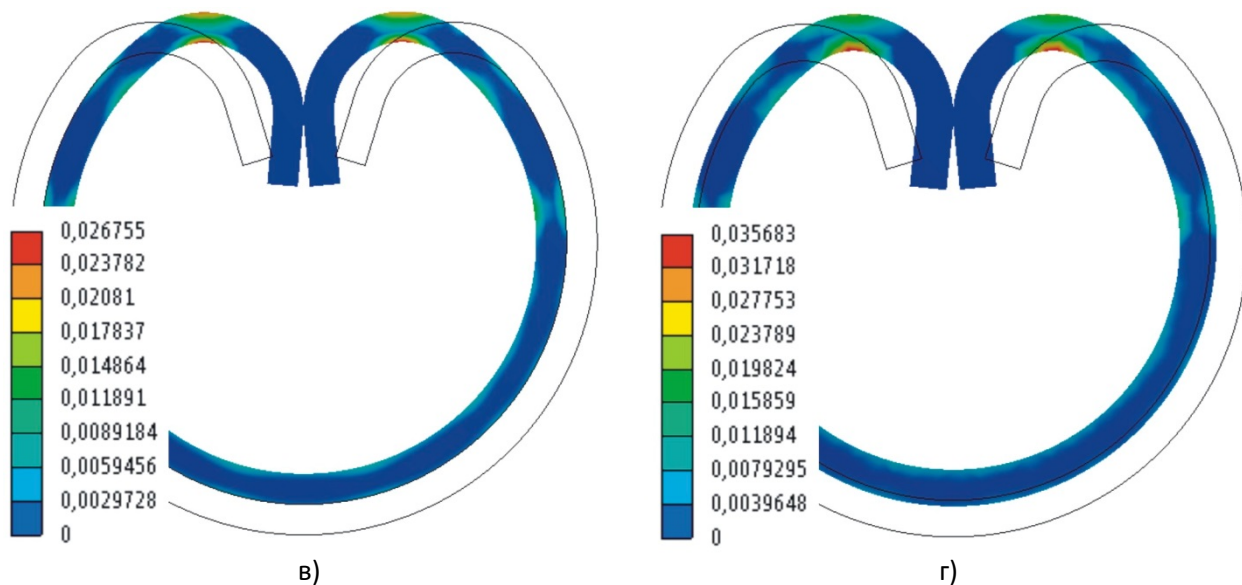


Рисунок 7. Распределение интенсивности пластических деформаций при установке анкеров в шпур, МПа:

а) – сечение С3; б) – сечение W2; в) – сечение W2,5; г) – сечение W3

Эффективность сечения с точки зрения металлоемкости можно оценить с использованием отношения величины распорного усилия к массе анкера:

$$\frac{F_{p1m}}{m_{1m}}, \quad (3)$$

где F_{p1m} – величина распорного усилия при длине анкера 1 м; m_{1m} – масса одного метра анкера.

Для С-образного сечения с толщиной стенки 3 мм эта величина составляет 57 кН/кг, для W-сечения эта величина составляет 109 кН/кг, 114 кН/кг и 157 кН/кг для толщины стенки 2 мм, 2,5 мм и 3 мм соответственно. Таким образом, W-образное сечение гораздо более эффективно с точки зрения металлоемкости фрикционных анкеров.

Полученные значения распорного усилия могут использоваться для прогнозирования несущей способности анкера. Сопротивление сдвигу анкера соответствует силе трения между стенками стержня анкера и стенками шпура и может быть рассчитано по формуле

$$F_{сд} = F_{тр} = \mu F_p, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения между стенками стержня анкера и стенками шпура.

В соответствии со справочными данными, в разных условиях коэффициент трения стали по породе составляет от 0,25 до 0,5. Соответственно усилие сдвига $F_{сд}$ для анкера с сечением W2 с длиной стержня 1850 мм может достигать 229,4 кН, а анкера с сечением W2,5 – 288,6 кН. Как было отмечено выше, до сдвига анкера в шпуре за счет действия распорного усилия при нагружении анкер и окружающая порода работают совместно, поэтому несущая способность фрикционного анкера определяется усилием сдвига. Полученные расчетные значения подтверждаются результатами опытно-промышленных испытаний – в ряде случаев предельная нагрузка на анкер с сечением W3 при проведении испытания на выдергивание составляла 260 кН.

При этом следует учитывать, что реальное значение усилия сдвига может быть меньше расчетного вследствие нарушения целостности стенок шпура, а также повышенной трещиноватости породы в зоне бурения шпура.

Однако, в любом случае, при прочих равных условиях анкер с сечением W2 будет иметь на 60% большую несущую способность, чем анкер с сечением С3, анкер с сечением W2,5 – в два раза большую несущую способность, а анкер с сечением W3 – в 3,6 раза большую несущую способность, чем анкер с сечением С3.

Выводы

1. В работе проведена оценка предельных допускаемых нагрузок, напряженно-деформированного состояния, а также распорного усилия при установке в шпур для трубчатых фрикционных анкеров типа АТФ С-профиля с толщиной стенки 3 мм и анкеров типа АТФ W-профиля с толщиной стенки 2 мм, 2,5 мм и 3 мм.
2. Установлено, что предельные допускаемые нагрузки для стержня анкера типа АТФ W-профиля имеют большие значения, чем для анкера типа АТФ С-профиля. Исключением является анкер АТФ W-профиля с толщиной стенки 2 мм, однако минимальное предельное значение (71,44 кН по пределу текучести) больше минимально допускаемых нормативных значений (50 кН по ГОСТ 31559-2012) на 43%. При этом этот вариант исполнения анкера имеет на 16% меньшую массу по сравнению с анкером типа АТФ С-профиля с толщиной стенки 3 мм, и больший максимальный допускаемый изгибающий момент.
3. Показано, что анкеры с W-образным сечением обеспечивают большее значение распорного усилия по сравнению с С-образным сечением в 1,6, 2 и 3,6 раза для W-образных сечений с толщинами стенок 2 мм, 2,5 мм и 3 мм соответственно.
4. W-образное сечение является более эффективным с точки зрения металлоемкости. Для С-образного сечения с толщиной стенки 3 мм отношение распорного усилия к массе анкера составляет 57 кН/кг, для W-сечения эта величина составляет 109 кН/кг, 114 кН/кг и 157 кН/кг для толщины стенки 2 мм, 2,5 мм и 3 мм соответственно.
5. Установлено, что усилие сдвига анкера относительно стенок шпура для анкера с W-образным сечением при толщине стенки 2 мм и длиной стержня 1850 мм может достигать 229,4 кН, а при толщине стенки 2,5 мм – 288,6 кН, расчетные результаты хорошо соотносятся с результатами опытно-промышленных испытаний.
6. Показано, что так как несущая способность фрикционного анкера определяется силой трения стенок анкера и стенок шпура, прямо пропорциональной распорному усилию, при прочих равных условиях несущая способность анкеров с W-образным сечением будет больше по сравнению с анкером с С-образным сечением в 1,6, 2 и 3,6 раза для W-образных сечений с толщинами стенок 2 мм, 2,5 мм и 3 мм соответственно.
7. Для обычных условий эксплуатации рекомендуется использовать анкер W-образного сечения с толщиной стенки 2 мм, который по сравнению с анкером с С-образным сечением обеспечивает увеличение несущей способности в 1,6 раз при снижении металлоемкости анкера на 16%.
8. Для сложных условий эксплуатации рекомендуется использовать анкер W-образного сечения с толщиной стенки 2,5 мм, который по сравнению с анкером с С-образным сечением обеспечивает увеличение несущей способности в 2 раза при сопоставимой металлоемкости анкера.
9. Для особо сложных условий эксплуатации рекомендуется использовать анкер W-образного сечения с толщиной стенки 3 мм, который по сравнению с анкером с С-образным сечением обеспечивает увеличение несущей способности в 3,6 раза при незначительном увеличении металлоемкости анкера (на 22%).

Список литературы

1. Зубков А.А., Латкин В.В., Неугомонов С.С., Волков П.В. Перспективные способы крепления горных выработок на подземных рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. № S1-1 с. 106-117.
2. Rahimi B., Sharifzadeh M., Feng X. Ground behavior analysis, support system design and construction strategies in deep hard rock mining – Justified in Western Australian's mines // Journal of Rock Mechanics

and Geotechnical Engineering. Volume 12, Issue 1, February 2020, Pages 1-20.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.01.006>.

3. Ghorbani M., Shahriar K., Sharifzadeh M., Masoudi R. A critical review on the developments of rock support systems in high stress ground conditions // International Journal of Mining Science and Technology. Volume 30, Issue 5, September 2020, Pages 555-572. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.002>.
4. Li C.C. Principles and methods of rock support for rockburst control // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 13, Issue 1, February 2021, Pages 46-59. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.001>.
5. Toscano-Alor C., Castillo-Rodil A., Pehovaz-Alvarez H., Raymundo C., Mamani-Macedo N., Moguerza J.M. (2020) Hydrabolt and Split Set Rock Bolt Selection Method Under the Bieniawski Rock Mass Rating for Improving Horizontal Access Support in Peruvian Mid-Scale Mining Activities. In: Kantola J., Nazir S., Salminen V. (eds) Advances in Human Factors, Business Management and Leadership. AHFE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1209. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50791-6_46.
6. Li C.C. Principles of rockbolting design // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 9, Issue 3, June 2017, Pages 396-414. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.002>.
7. Li C.C. Rockbolting. Principles and Applications. Butterworth-Heinemann. 2018. 284 p. ISBN: 978-0-12-804401-8. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01742-7>.
8. Tomory, P.B., Grabinsky, M., Curran, J., & Carvalho, J. (1998). Factors influencing the effectiveness of Split Set friction stabilizer bolts. Cim Bulletin, 91, 205-214.
9. Nicholson L., Hadjigeorgiou J. (2018) Interpreting the results of in situ pull tests on Friction Rock Stabilizers (FRS), Mining Technology, 127:1, 12-25, <https://doi.org/10.1080/14749009.2017.1296669>.
10. Davison G.R., Fuller P.G. 2013. Investigation of expanding Split Sets. In: Potvin Y., Brady B. (eds), Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 163-170, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1304_09_Davison
11. Зубков А. А., Калмыков В. Н., Кутлубаев И. М., Найденова М. С. Обоснование характеристик анкерных крепей фрикционного типа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 35–43. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-35-43>.
12. Stimpson B. Split Set friction stabilizers: an experimental study of strength distribution and the effect of corrosion. Canadian Geotechnical Journal. 35(4): 678-683. <https://doi.org/10.1139/t98-025>.
13. Xu S., Yang Z., Caiab M. Hou P. An experimental study on the anchoring characteristics of an innovative self-swelling Split-set // Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 112, June 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103919>.
14. Hao Y., Wua Y., Ranjith P.G., Zhang K., Hao G., Teng Y. A novel energy-absorbing rock bolt with high constant working resistance and long elongation: Principle and static pull-out test // Construction and Building Materials. Volume 243, 20 May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118231>.
15. Cai M., D. Champaigne, Coulombe J.G., Challagulla K. Development of two new rockbolts for safe and rapid tunneling in burst-prone ground // Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 91, September 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103010>.
16. Копытов А.И., Войтов М.Д., Трипус Т.Е. Расчет трубчатого анкера фрикционного типа на несущую способность // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 4 (92). С. 8-10.
17. Масаев Ю.А., Политов А.П., Копытов А.И., Масаев В.Ю. Совершенствование конструкций анкерных крепей для сооружения горных выработок // Вестник НЦ ВостНИИ. – 4-2018. – с. 66-73. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2018.8.24.006>.
18. Першин В.В., Фадеев Ю.А., Трипус Т.Е. Обоснование параметров и разработка новой конструкции многослойного анкера фрикционного типа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 2. с. 47-53.

19. Зубков А.А., Зубков А.Е., Жданова Ю.И. Усиленная самозакрепляющаяся анкерная крепь. Патент на полезную модель RU 168801 U1, 21.02.2017. Заявка № 2016134870 от 25.08.2016.
20. ООО "Окс-Трейд": фрикционный анкер нового поколения // Горная промышленность. 2017. № 6 (136). с. 54-55.