

УДК 624.078.74

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ АНКЕРА НА ЕГО НАГРУЗОЧНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ПОЛНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ**

М. Багхери¹, Х. Бахшандех Амниех², Х. Джалалифар³

¹*Кашанский университет,*

E-mail: bagheri.327@gmail.com, г. Кашан, Иран

²*Тегеранский университет,*

E-mail: hbakhshandeh@ut.ac.ir, г. Тегеран, Иран

³*Университет Шахида Бахонара в Кермане,*

E-mail: jalalifar@uk.ac.ir, г. Керман, Иран

Проведены испытания на вытягивание нескольких видов зацементированных в полимере арматурных анкеров с целью исследования влияния геометрии их профиля на механизм передачи нагрузки. Рассмотрено 12 наборов образцов трех типов болтов с различными профилями. Исследовано влияние длины анкеровки 75 и 150 мм на примере арматурных анкеров. Показано, что способность анкера передавать нагрузки и смещение при пиковой нагрузке соотносится с конфигурацией профиля и кольцевой толщиной цементирующего полимера. Анкеры с шагом ребер 12.5; 16; 25 и 8 мм продемонстрировали высокую пиковую прочность на сдвиг. При уменьшении шага ребер и длины анкеровки наблюдалось увеличение системной жесткости. При увеличении длины анкеровки с 75 до 150 мм напряжение сдвига и их жесткость уменьшились. При увеличении кольцевой толщины цементирующего полимера пиковая нагрузка снизилась.

Полностью зацементированный анкер, поверхность контакта анкера с полимером, испытание на вытягивание, профиль анкера, длина анкеровки

DOI: 10.15372/FTPRPI20230203

В последние десятилетия в сфере строительства и сфере добычи полезных ископаемых широко применяются системы укрепления подземных выработок и пространств на основе использования анкерных болтов и тросовых анкеров [1]. Стальные анкерные болты (далее анкеры), зацементированные полимером или цементным раствором, получили широкое распространение в качестве системы укрепления породы благодаря экономическому преимуществу и относительно простому монтажу [2].

Разрушение по длине зацементированного анкера может происходить по следующим причинам: разрушение непосредственно анкера, разрушение цементирующего полимера, разрушение по поверхности контакта анкера с полимером и разрушение по поверхности контакта полимера с породой [3 – 5]. Так как площадь контакта анкера с полимером меньше, то прочность на сдвиг поверхности контакта анкера с полимером больше, чем у поверхности контакта поли-

мера с породой. Если прочность полимера и породы одинакова, то разрушение может произойти по поверхности контакта анкера с полимером. Если прочность породы ниже прочности полимера, то разрушение может происходить по поверхности контакта полимера с породой. Исследования поверхности контакта арматурного анкера с полимером показывают, что силы сцепления состоят из трех компонентов: химической связности, трения и механического зацепления. Прочность химической связности между поверхностями анкера и полимера незначительна [6, 7], и она не может быть активизирована прочностью трения в процессе вытягивания [8]. Наиболее значимую роль в обеспечении пиковой прочности на сдвиг по поверхности контакта анкера с полимером играет механическое сцепление. Таким образом, изменение прочности на сдвиг зависит от конфигурации профиля анкера, которая характеризуется геометрической формой, высотой и шириной ребра, углом его наклона, шагом ребер и толщиной полимерного кольца.

В большинстве исследований установлено, что профиль поверхности анкера играет значительную роль в механизме передачи нагрузки полностью зацементированного анкера [1, 9–11]. С помощью испытаний на вдавливание исследована способность арматурных анкеров с различной высотой ребра к передаче нагрузки [12]. Установлено, что анкеры с низкой высотой ребра имеют меньшую жесткость, и сделан вывод о том, что передача нагрузки является функцией таких факторов, как диаметр анкерной скважины, механические свойства цементирующего полимера и геометрические параметры поверхности анкера.

В [13] показано, что увеличение высоты ребра с 0.48 до 1.42 мм повышает способность полностью зацементированных анкеров к передаче нагрузки; в [14] изучено влияние шага ребер стальных арматурных анкеров на способность к передаче нагрузки. На примере арматурного анкера с диаметром 12 мм дана оценка влияния длины анкеровки на прочность на сдвиг [15]. С помощью цементного раствора анкеры были вмонтированы в скважину с диаметром 22 мм, длина анкеровки изменялась в диапазоне 15–32 см. Выявлено, что прочность на сдвиг анкеров не зависит от длины анкеровки. В [7] проведены испытания на вдавливание сцементированных анкеров в стальных трубках диаметром 75 мм с целью изучения различных конфигураций профиля. Исследование передачи нагрузки на поверхности контакта анкера с полимером показало, что форма профиля анкера и шаг ребер оказывают значительное влияние на прочность сцепления анкера с окружающим материалом. В [16] получены аналогичные результаты. Испытания на вытягивание и вдавливание удлиненных стальных анкеров продемонстрировали, что 75 мм — недостаточная длина для получения надежных и корректных результатов испытаний, особенно при шаге ребер 25 мм и выше, так как в сцеплении участвует малое количество ребер [17].

С помощью лабораторных испытаний на вытягивание и вдавливание в [18] показано влияние шага ребер стальных арматурных анкеров на их несущую способность. Выявлено, что анкер с шагом ребер 37.5 мм обладает наибольшей прочностью сцепления по сравнению с другими профилями. В [19] изучено поведение поверхности контакта анкера с полимером на осевое вытягивание, предложена полуэмпирическая формулировка поверхности отклика. Установлено, что преднапряжение анкеров повышает эффективность их работы вокруг выработок [20]. Выполнены лабораторные испытания по вытягиванию арматурных анкеров с различным шагом ребер 12, 24, 36 и 48 мм; в качестве окружающего материала использовался бетон, залитый в стальные трубки. Результаты показали, что для анкера с большим шагом ребер пиковая нагрузка увеличилась на 25.3 %.

Литературный обзор показал, что поведение поверхности контакта анкера с цементирующим материалом в системах анкерной крепи до конца не изучено. Отсутствуют попытки провести оценку влияния всех эффективных параметров на механизм передачи нагрузки различных типов полностью зацементированных арматурных анкеров с разными профилями с помощью испытаний на прямое вытягивание.

Цель настоящей работы — изучение влияния геометрических параметров профиля различных анкеров (форма профиля, шаг ребер, высота профиля и толщина полимерного кольца) на несущую способность анкера при вытягивании, а также на сдвиг полностью сцементированных полимером анкеров. Кроме того, испытания на вытягивание выполнены для оценки влияния длины анкеровки на пиковую и остаточную прочность на сдвиг и на жесткость. Для более глубокого понимания механизма передачи нагрузки рассмотрено поведение поверхности контакта анкера с полимером и представлены экспериментальные доказательства более эффективного проектирования систем анкерной крепи. Для оценки влияния параметров профиля анкеров на их несущую способность проведено 12 лабораторных испытаний на вытягивание анкеров, сцементированных полимером в стальных трубках с длиной анкеровки 75 и 150 мм.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АНКЕРОВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТИРУЮЩЕГО ПОЛИМЕРА

Параметры анкеров. В ходе лабораторных испытаний на вытягивание испытано три типа анкеров. Два типа анкеров *T* и *J* широко применяются угледобывающей компанией Tabas Coal Mining Company в Иране. Тип *G* является немецким анкером и привезен специально для испытаний. Чтобы изучить влияние шага ребер на механизм передачи нагрузки, с анкеров типа *T* и *G* удалены ребра через одно, в результате чего шаг ребер увеличился в 2 раза. Анкер типа *J* использовался для изучения влияния толщины полимера: J_1 — толщина полимера 3.15 мм; J_2 — толщина полимера 4.15 мм. В совокупности испытано пять видов анкеров. На рис. 1 представлен внешний вид проверяемых анкеров, а в табл. 1 их геометрические параметры. Анкеры имеют одинаковый номинальный диаметр, однако различаются конфигурацией профиля.

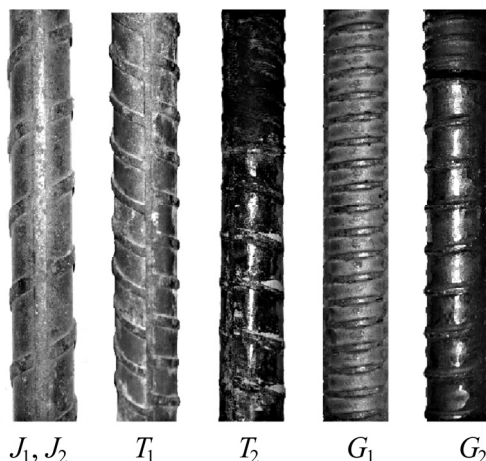


Рис. 1. Виды анкеров, испытанных в рамках проведения исследований

Цементирующий полимер. Наиболее распространенными химическими полимерами для установки анкерных болтов являются эпоксидные и полиэфирные смолы. В настоящей работе использованы Iso-картриджи, содержащие полимерную смесь и отвердитель в отдельных камерах, разделенных многослойной пластиковой пленкой. Полимерная смесь содержит ненасыщенный полиэстер, заполненный минералами, и противоосадочные добавки. Отвердитель, который закодирован по цветовому признаку, содержит органический пероксид.

ТАБЛИЦА 1. Геометрические свойства различных типов анкеров, мм

Тип анкера	Номинальный диаметр	Шаг ребер	Высота ребра	Средняя ширина ребра	Соотношение ширины ребра у основания и в верхней точке	Угол наклона ребра, град
J_1, J_2	21.7	25.0	1.3	4.25	1.43	22.5
T_1	21.7	12.5	1.3	3.00	1.40	22.5
T_2	21.7	25.0	1.3	3.00	1.40	22.5
G_1	22.0	8.0	1.0	3.10	1.82	12.5
G_2	22.0	16.0	1.0	3.10	1.82	12.5

Испытание полимера на одноосное сжатие проводилось с помощью универсальной нагрузочной машины с номинальной нагрузочной способностью 1000 кН в режиме медленного нагружения (4 мин). Среднее значение прочности полимера на одноосное сжатие составило 75.4 ± 4.0 МПа, что согласуется с заявленной производителем прочностью 80 МПа. Испытание прочности полимера на трехосное сжатие выполнено для определения характеристик его прочности на сдвиг (c , φ). Для нагнетания и поддержания постоянного окружающего давления использован гидронасос, подключенный к трехосной нагрузочной установке. Перед приложением какой-либо осевой нагрузки нагнеталось ограничивающее давление 3 МПа. Значения угла внутреннего трения и когезионной прочности составили 25.55° и 27.98 МПа соответственно.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ВЫТЯГИВАНИЕ

Порядок монтажа и последующая эксплуатация анкеров выполняются с учетом того, что они испытывают нагрузку на растяжение и сдвиг. Методом анализа механизма передачи нагрузки и оценки прочности на сдвиг является испытание небольшой части анкера на вытягивание. В этом случае длина анкеровки должна быть не менее 300 мм. Другой метод, принятый в горнодобывающей промышленности, — капсульные испытания на вдавливание или вытягивание. При таких испытаниях в лабораторных условиях анкер устанавливается в стальной цилиндр с длиной более 75 мм. Лабораторное испытание на вытягивание эффективнее испытания на вдавливание, поскольку в данном случае анкер деформируется почти так же, как в реальных условиях. Такие параметры, как прочность сцепления и жесткость системы, наилучшим образом определяются в лабораторных условиях. В капсульных испытаниях на вытягивание наиболее важной составляющей оценки прочности сцепления анкера при осевой нагрузке служит состояние поверхности между анкером и цементирующим материалом.

В [21] показано, что в ходе капсульных испытаний длина анкеровки, превышающая диаметр анкера более чем в 4 раза, может быть использована для получения определяющего соотношения между напряжением сцепления и скольжения анкера. Для получения соотношения “сцепление – скольжение” выполнены капсульные испытания трех типов анкеров с диаметром 22 мм на вытягивание при длине анкеровки 75 и 150 мм. Анкеры устанавливались в стальные трубки, заполненные полиэфирной смолой (полимер), с соотношением полимера к катализатору 100:2. Испытания проводились спустя 7 сут после приготовления образцов с помощью 100-тонной нагрузочной машины с сервоуправлением. В ходе испытаний регистрировались значения прилагаемой нагрузки и возникающих смещений анкера.

Для выполнения капсульных испытаний на вытягивание при малой длине анкеровки образцы изготавливались путем установки анкеров в стальные ячейки, заполненные полимером. Ячейка представляла собой стальной цилиндр с внутренней канавкой для предотвращения преждевременного разрушения на поверхности контакта внутренней стенки цилиндра с полимером (рис. 2). Механические свойства анкера и цементирующего полимера представлены ниже:

Механические параметры	Полимер	Сталь
Прочность на сжатие UCS, МПа	75.85	—
Модуль Юнга E , ГПа	12.00	200
Коэффициент Пуассона μ	0.25	0.3
Когезия, МПа	27.98	—
Угол трения, град	25.50	—

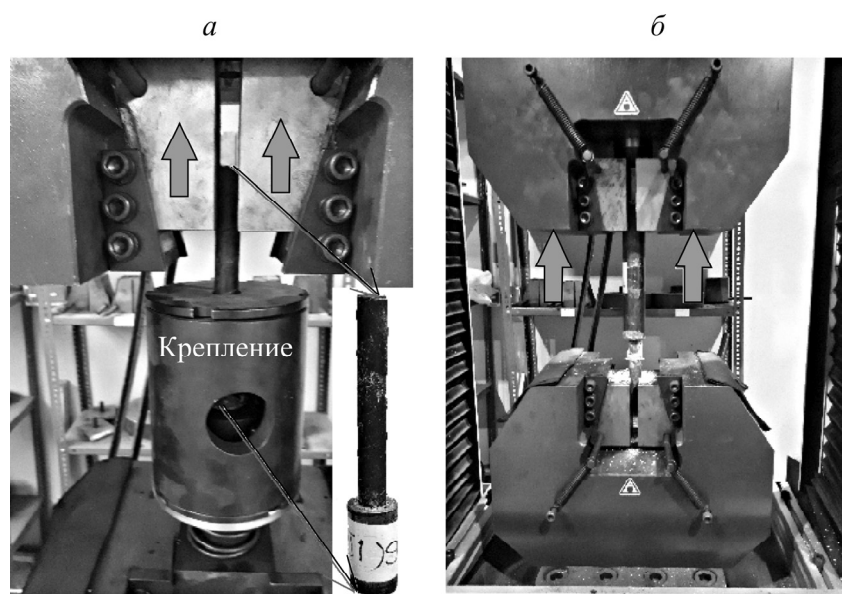


Рис. 2. Обойма крепления анкера с длиной анкеровки 75 мм для испытания на вытягивание (а); оборудование для испытания анкера на вытягивание при длине анкеровки 150 мм (б)

Длина каждого анкера для подготовки образцов при длине анкеровки 75 и 150 мм составляла 250 и 300 мм соответственно. Из рис. 3 видно, что 230 мм от длины анкера, сцентрированные посередине основания при длине анкеровки 150 мм, приходится на стальную трубку из-за особенностей щекового зажима нагрузочной установки. В данный участок стального цилиндра (в его конечной части) вставлен стальной вал длиной 80 мм и диаметром, равным внутреннему диаметру стальной трубки, для предотвращения выкрашивания стенки трубки. Этот вал не оказывает влияния на результаты испытаний.

После испытаний наблюдалось разрушение сдвига вдоль полимерного кольца. Растягивающая сила и смещение автоматически регистрировались датчиками нагрузки и смещения, которые подключены к устройству регистрации данных и компьютеру. После предварительной нагрузки 3 кН и начала испытания на вытягивание нагрузка и смещение измерялись и регистрировались при постоянной скорости вытягивания анкера 1.2 мм/мин до разрушения на поверхности контакта анкера с полимером.



Рис. 3. Подготовленные для испытаний образы анкеров с полимерной цементацией при длине анкеровки 75 мм (а) и 150 мм (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены результаты передачи нагрузки в процессе испытаний на вытягивание шести типов анкеров при длине анкеровки 75 и 150 мм, на рис. 4 — графики “нагрузка — смещение” для всех испытаний при той же длине анкеровки. Видна область линейного соотношения нагрузки и смещения, область пиковой нагрузки на сдвиг и область постпикового смещения (или постпикового разрушения). Так как разрушение сцепления произошло между анкером и полимером, то постпиковую область можно рассматривать как стадию пластической деформации. Все испытанные образцы имеют похожий тренд развития соотношения между нагрузкой и смещением. При длине анкеровки 75 мм анкеры типа T_1 и G_2 показали более высокую нагрузку на сдвиг, тогда как другие типы — меньшую и почти одинаковую нагрузку. Анкеры типа J_1 , J_2 и T_2 продемонстрировали меньшую жесткость, их линии на постпиковой области находятся выше, чем у анкеров типа T_1 , G_2 и G_1 соответственно. В этом преимущество анкеров типа J_1 , J_2 и T_2 , так как они способны выдержать большее смещение до достижения пиковой нагрузки, что актуально для укрепления низкопрочной углесодержащей породы. Отметим, что эти типы анкеров имели одинаковый шаг ребер 25 мм. Жесткость анкеров типа G_1 , G_2 и T_1 оказалась больше, чем у других типов. Данные анкеры имели меньшие смещения и были эффективнее при работе в условиях горных пород с высокой прочностью.

В испытаниях при длине анкеровки 150 мм анкеры типа T_1 , T_2 и J_2 имели большие нагрузки на сдвиг, а их линии на постпиковой области и их жесткость отличались низкими значениями. В этом преимущество анкеров, которым необходимо выдерживать большие смещения до достижения пиковой нагрузки, что важно для укрепления низкопрочных угольных пластов. Анкер типа J_2 с большей толщиной полимерного кольца показал наименьшую нагрузку на сдвиг и жесткость по сравнению с другими типами анкеров. Такой тип подходит для укрепления низкопрочных пластов со средними значениями давления. Анкер типа G_2 имеет сниженные значения пиковой нагрузки на сдвиг, постпикового смещения и жесткости. Данный тип может использоваться для средних пород. Тип G_1 показал наибольшую жесткость и наименьшее смещение, что подходит для укрепления прочной и компетентной породы. Таким образом, жесткость анкера — значимый фактор до разрушения по поверхности контакта анкера с полимером.

ТАБЛИЦА 1. Результаты лабораторных испытаний шести типов анкеров на вытягивание

Измеренные параметры	Длина анкеровки, мм											
	75						150					
	J_1	J_2	G_1	G_2	T_1	T_2	J_1	J_2	G_1	G_2	T_1	T_2
Толщина полимерного кольца, мм	3.15	4.15	3.00	3.00	3.15	3.15	3.15	4.15	3.00	3.00	3.15	3.15
Шаг ребер, мм	25.00	25.00	8.00	16.00	12.50	25.00	25.00	25.00	8.00	16.00	12.50	25.00
Угол наклона ребра, град	22.50	22.50	13.00	13.00	22.50	22.50	22.50	22.50	13.00	13.00	22.50	22.50
Высота ребра, мм	1.30	1.30	1.00	1.00	1.30	1.30	1.30	1.30	1.00	1.00	1.30	1.30
Средняя ширина ребра, мм	4.25	4.25	3.10	3.10	3.00	3.00	4.25	4.25	3.10	3.10	3.00	3.00
Средняя максимальная нагрузка, кН	126.50	116.2	129.30	164.10	166.70	136.70	257.50	205.90	257.70	252.6	277.60	270.20
Среднее максимальное смещение, мм	11.15	11.33	4.03	7.32	7.95	9.78	22.61	20.48	12.65	19.79	21.28	21.69
Средняя прочность на сдвиг, МПа	29.38	26.79	26.37	35.88	36.84	31.05	30.33	23.89	27.37	32.46	34.17	31.22
Средняя системная жесткость, кН/мм	11.34	10.26	32.14	22.41	20.98	13.98	11.39	10.05	20.38	12.76	13.05	12.46

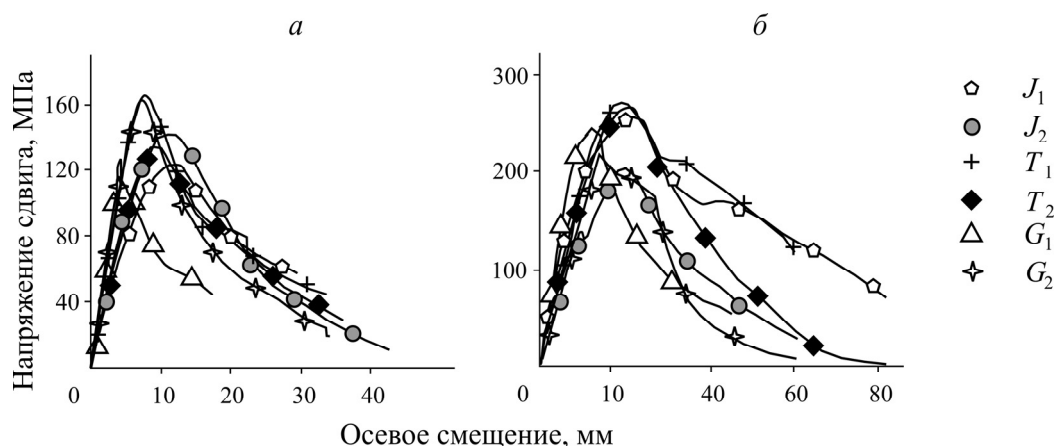


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от осевого смещения образца в испытаниях на вытягивание при длине анкеровки 75 мм (а) и 150 мм (б)

Результаты определения прочности сцепления на сдвиг. Прочность сцепления на сдвиг τ_E определяется делением нагрузки каждой стадии на площадь контакта анкера с полимером, т. е. при увеличении нагрузки длина контакта уменьшается, что влияет на прочность на сдвиг:

$$\tau_E = \frac{\text{Нагрузка}}{\pi D(L - u)}, \quad (1)$$

где D — диаметр анкера; L — длина анкеровки; u — линейное смещение на каждой стадии приложения нагрузки.

Средние значения напряжения сдвига, развивавшиеся вдоль поверхности контакта анкера с полимером в процессе испытаний на вытягивание при длине анкеровки 75 и 150 мм, представлены в табл. 1.

На значения прочности на сдвиг и жесткости системы по поверхности контакта анкера с полимером влияют геометрические параметры профиля анкера. В настоящей работе исследовано влияние таких параметров, как шаг ребер, высота ребра, толщина полимера и длина анкеровки на пиковую нагрузку, смещения при пиковой нагрузке, прочность на сдвиг, жесткость системы и постпиковую нагрузку на поверхности контакта анкера с полимером.

Влияние шага ребер. С целью изучения влияния различного шага ребер на напряжение сдвига и остаточную прочность при постпиковой нагрузке выполнен анализ результатов испытаний анкеров типов J_1 , T_1 , T_2 , G_1 и G_2 . На рис. 5а показаны усредненные кривые соотношения напряжения сдвига и осевого смещения, полученные в ходе испытаний, где каждая кривая характеризует тот или иной шаг ребер. Среднее напряжение сдвига распределяется по убыванию для кривых S_2 , S_4 , S_3 и S_1 с шагом ребер 12.5; 25; 16 и 8 мм соответственно. Исходя из результатов табл. 2 и рис. 5б, анкера с шагом ребер 12.5; 16; 25 и 8 мм при длине анкеровки 75 и 150 мм имеют наибольшую пиковую прочность на сдвиг по убыванию. Образцы с меньшей длиной анкеровки (75 мм) показывают немного большую прочность на сдвиг, однако прочность образцов с шагом ребер 25 мм не зависит от длины анкеровки.

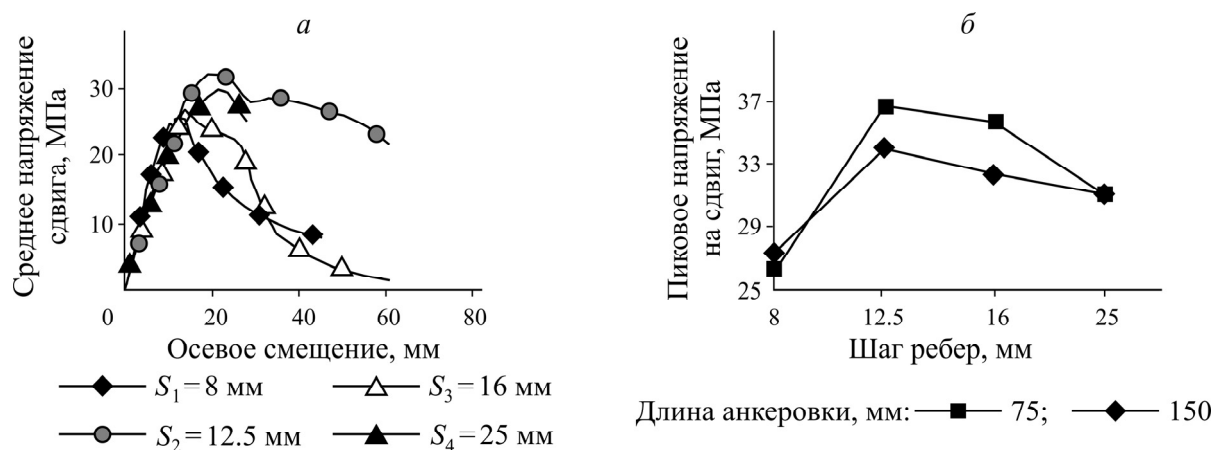


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига от осевого смещения образца при различных шагах ребер анкеров (а) и пикового напряжения сдвига от шага ребер анкеров (б)

Анкер типа T_1 показал наибольшую остаточную постпиковую прочность по поверхности контакта анкера с полимером и наибольшее смещение сдвига перед разрушением. Анкер данного типа подходит для укрепления низкопрочных формаций, таких как углесодержащие породы, поскольку воспринимает большие деформации породы, а также после его разрушения происходит постепенное снижение сдвиговой нагрузки. Анкер типа G_2 с шагом ребер 16 мм показал наибольшее пиковое напряжение сдвига и жесткость по сравнению с типами J_1 и T_2 с шагом ребер 25 мм. Жесткость анкеров типа J_1 и T_2 оказалась наименьшей, т. е. они подходят для низкопрочных породных формаций.

На рис. 6 приведены кривые соотношения напряжения сдвига и осевого смещения при испытаниях на вытягивание анкеров типа G и T при длине анкеровки 150 мм. Из рис. 6а видно, что при увеличении шага ребер анкера типа G с 8 до 16 мм пиковая прочность на сдвиг увеличилась на 18.6 %, а системная жесткость уменьшилась на 37.4 %. При увеличении шага ребер анкера типа T с 12.5 до 25 мм пиковая прочность на сдвиг уменьшилась на 8.6 %, а системная жесткость на 4.5 %. Можно сделать вывод о том, что оптимальным диапазоном шага ребер анкеров типа G и T является 12.5 – 16.0 мм.

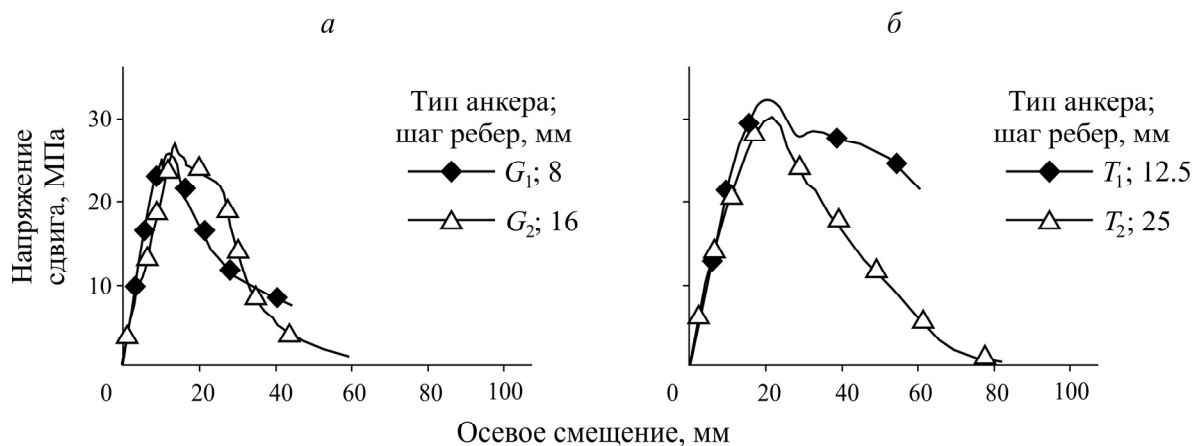


Рис. 6. Кривые “напряжение сдвига – смещение” в испытаниях на вытягивание при длине анкеровки 150 мм для различных шагов ребер: тип анкера G (а); тип анкера T (б)

Влияние шага ребер на системную жесткость образцов при длине анкеровки 75 и 150 мм показано на рис. 7. Видно, что при увеличении шага ребер системная жесткость снижается. Образцы с меньшей длиной анкеровки имеют более высокую системную жесткость, однако при шаге ребер 25 мм системная жесткость не зависит от длины анкеровки.

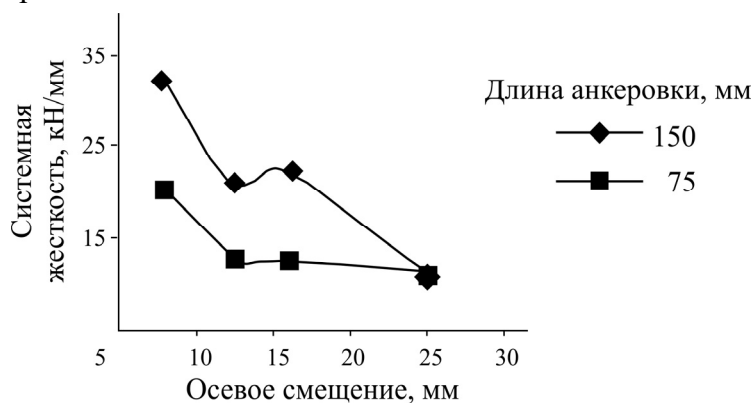


Рис. 7. Зависимость системной жесткости анкеров при различных длинах анкеровки

Влияние высоты ребер. Анкеры типа J и T имеют бóльшую высоту профиля, чем анкер типа G , поэтому они способны воспринять более высокий уровень напряжения сдвига (рис. 8).

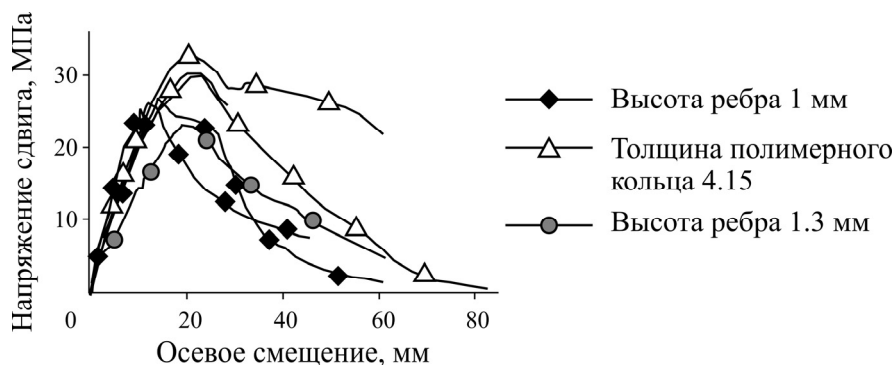


Рис. 8. Кривые “напряжение сдвига – смещение” в испытаниях на вытягивание при длине анкеровки 150 мм для различных значений высоты ребра

Большая высота ребра анкера приводит к более высокой нагрузке его разрушения. Этот результат согласуется с ранее опубликованной работой [9]. При увеличении высоты ребра относительно длины анкера происходит передача большей части осевой нагрузки на полимерное кольцо параллельно оси анкера. Такой тип анкеров может быть использован в низкопрочных формациях, таких как угольные пласты.

Влияние толщины полимерного кольца. Испытание на вытягивание образцов анкеров типа J проводилось при толщине полимерного кольца 3.15 и 4.15 мм с длиной анкеровки 75 и 150 мм. На рис. 9а показано снижение растягивающей силы между двумя толщинами полимерного кольца при длине анкеровки 75 мм. При увеличении толщины полимерного кольца с 3.15 до 4.15 мм пиковая нагрузка и жесткость уменьшились на 8.1 и 9.5 % соответственно. При длине анкеровки 150 мм происходило значительное снижение растягивающей силы между двумя толщинами полимерного кольца. При увеличении толщины полимерного кольца с 3.15 до 4.15 мм пиковая нагрузка и жесткость уменьшились на 25 и 11.8 % соответственно (рис. 9б). Таким образом, повышение толщины полимерного кольца приводит к снижению прочности анкера на сдвиг при длине анкеровки 150 мм. Данный результат согласуется с ранее опубликованными работами.

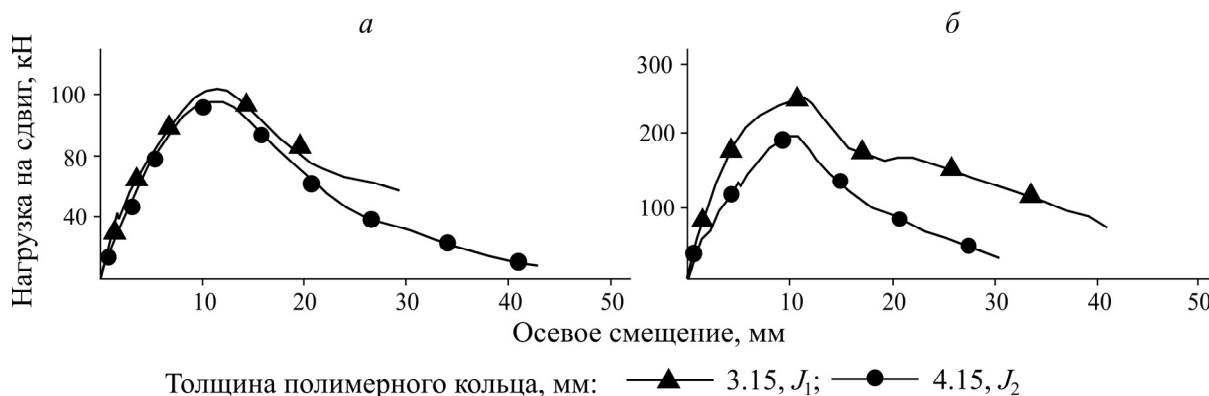


Рис. 9. Кривые “нагрузка на сдвиг – смещение” в испытаниях на вытягивание при различных значениях толщины полимерного кольца: длина анкеровки 75 мм (а) и 150 мм (б)

Влияние длины анкеровки. Для изучения влияния изменения длины анкеровки на прочность на сдвиг выполнены испытания на вытягивание шести наборов анкеров при длине анкеровки 75 и 150 мм.

В табл. 2 представлена процентная разница в пиковой нагрузке, пиковом напряжении сдвига, в смещении при пиковой нагрузке и в системной жесткости для длины анкеровки 75 и 150 мм. Результаты показывают, что максимальная способность к восприятию напряжения сдвига для анкеров типа T_2 , J_1 и G_1 значительно не меняется, тогда как при увеличении длины анкеровки анкеров типа T_1 и G_2 напряжение сдвига снизилось на 7.8 и 10.5 % соответственно, а их максимальное смещение увеличилось на 63 %. Далее при увеличении длины анкеровки жесткость анкеров типа G_2 , T_1 и G_1 снизилась на 75.6; 60.8 и 57.7 % соответственно.

На рис. 10 приведены кривые соотношения “напряжение на сдвиг – смещение” испытаний на вытягивание пяти типов анкеров с длиной анкеровки 75 и 150 мм. Видно, что при увеличении длины анкеровки пиковое напряжение анкеров типа T_1 и G_2 уменьшается, однако их максимальное смещение и остаточная прочность повышаются. Следовательно, при увеличении длины анкеровки анкеров с шагом ребер в диапазоне 12.5 – 16.0 мм способность восприятия напряжения сдвига снижается, а максимальное смещение и остаточная прочность повышаются.

ТАБЛИЦА 2. Относительная разница в значениях пиковой нагрузки на сдвиг, пикового напряжения на сдвиг, смещения при пиковой нагрузке и жесткости между длиной анкеровки 75 и 150 мм для анкеров трех типов, %

Тип анкера	Разница в пиковой нагрузке	Разница в пиковом напряжении	Разница в смещении	Разница в жесткости
J_1	50.87	3.16	50.69	–0.37
G_1	49.81	3.65	68.17	–57.66
G_2	35.02	–10.52	62.99	–75.61
T_1	39.94	–7.80	62.65	–60.80
T_2	49.41	0.54	54.90	–12.19

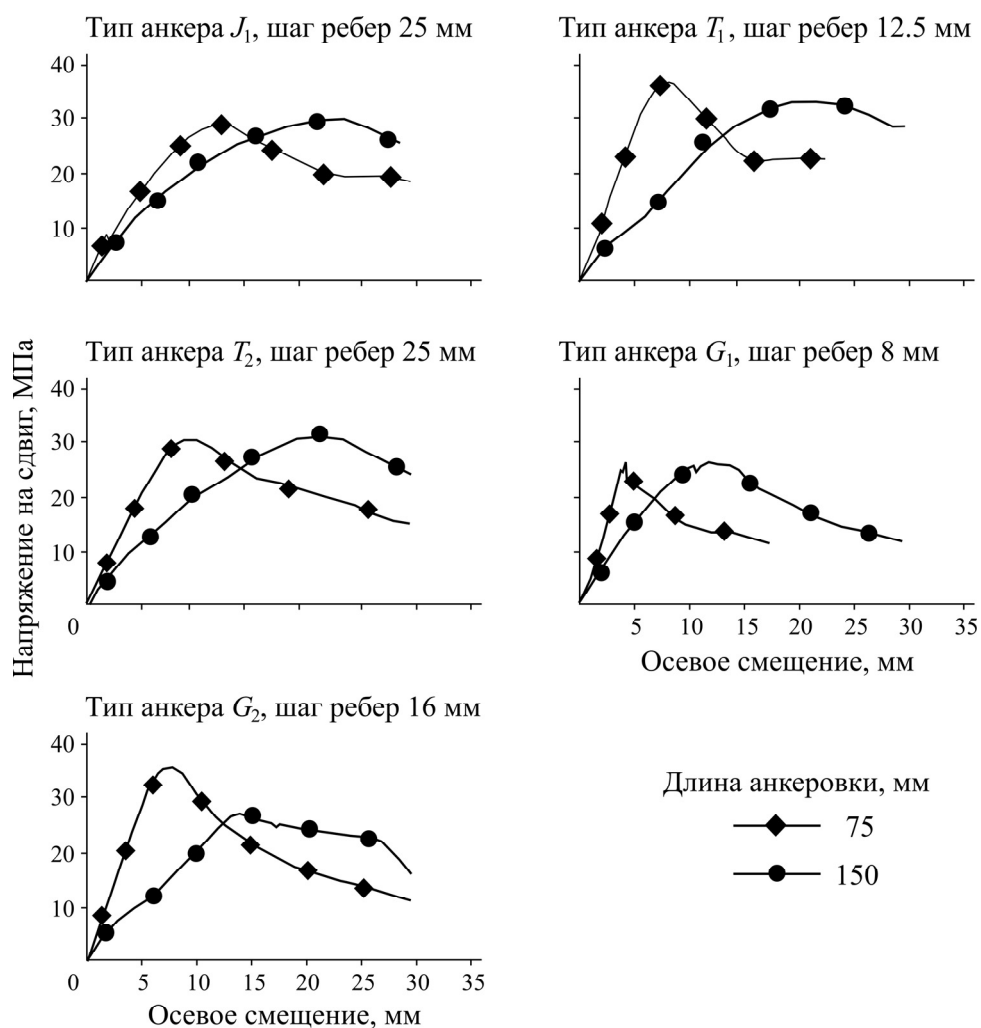


Рис. 10. Кривые “напряжение на сдвиг–смещение” в испытаниях на вытягивание анкеров различных типов при длине анкеровки 75 и 150 мм

ВЫВОДЫ

Испытания на вытягивание арматурных анкеров с различными геометрическими параметрами профиля показали, что анкеры типа T_1 , G_2 , T_2 и J_1 имеют более высокую прочность на сдвиг по сравнению с другими образцами. Анкеры типа J_1 и J_2 продемонстрировали меньшую жесткость. Они подходят для укрепления низкопрочных формаций пород, таких как

угольные пласты, поскольку воспринимают большее смещение до достижения пиковой нагрузки. Анкер типа G_1 имел наибольшую жесткость из-за малого шага ребер (8 мм). Такие анкеры подходят для укрепления высокопрочных пород. Анкер типа J_2 с большей толщиной полимерного кольца проявил наименьшую прочность на сдвиг и жесткость по сравнению с другими типами.

Высота и шаг ребер оказывают определяющее влияние на сдвиг анкера по поверхности его контакта с полимером. Результаты испытаний анкеров с различным шагом ребер на вытягивание показали, что пиковое напряжение на сдвиг для анкеров с шагом ребер 12.5; 16; 25 и 8 мм убывает. Оптимальный шаг ребер для анкеров типа G и T лежит в диапазоне 12.5–16.0 мм. При снижении шага ребер увеличивается системная жесткость и такие анкеры не подходят для укрепления низкопрочных пород. Анкеры типа J и T с большей высотой профиля по сравнению с анкерами типа G показали более высокий уровень прочности на сдвиг. Они могут быть использованы для укрепления низкопрочных пород.

При увеличении длины анкерования анкеров типа T_1 и G_2 напряжение сдвига снизилось на 8–10%, для других типов это изменение оказалось незначительным. Анкеры с меньшей длиной анкерования показали большую системную жесткость, при большей длине анкерования жесткость не зависит от шага ребер.

Авторы выражают благодарность руководству Иранской угледобывающей компании Tabas Parvadeh за финансовую поддержку. Лабораторные испытания выполнены на базе кафедры машиностроения Университета Шахида Бахонара в Кермане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao C., Jan N., Ren T., and Naj A. A study of rock bolting failure modes, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2013, Vol. 23. — P. 79–88.
2. Ma S., Nemcik J., and Aziz N. An analytical model of fully grouted rock bolts subjected to tensile load, *Constr. Build. Mater.*, 2013, Vol. 49. — P. 519–526.
3. Hyett A. J., Bawden W. F., and Reichert R. D. The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1992, Vol. 29. — P. 503–524.
4. Stillborg B. Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1985, Vol. 22, No. A65.
5. Ren F. F., Yang Z. J., Chen J. F., and Chen W. W. An analytical analysis of the full-range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model, *Constr. Build Mater.*, 2010, Vol. 24. — P. 361–370.
6. Signer S. P. Field verification of load transfer mechanics of fully grouted roof bolts, *Rep. Investig.*, United States: Bur Mines, 1990.
7. Aziz N. and Webb B. Study of load transfer capacity of bolts using short encapsulation push test, *Proc. Symp. on Coal Oper.*, Wollongong, 2003. — P. 72–80.
8. Yazici S. and Kaiser P. K. Bond strength of grouted cable bolts, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1992, Vol. 29. — P. 279–292.
9. Aziz N. and Jalalifar H. The role of profile configuration on load transfer mechanism of bolt for effective support, *J. Mines Met. Fuels.*, 2007, Vol. 55. — P. 539–545.
10. Ghadimi M., Shahriar K., and Jalalifar H. Optimization of the fully grouted rock bolts for load transfer enhancement, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2015, Vol. 25. — P. 707–712.
11. Tao W., Chen C., Jun H., and Ting R. Effect of bolt rib spacing on load transfer mechanism, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2017, Vol. 27. — P. 431–434.

- 12. Fabjanczyk M. W. and Tarrant G. C.** Load transfer mechanisms in reinforcement tendons, 11th Int. Conf. on Ground Control in Min., University of Wollongong, 1992. — P. 212–219.
- 13. Kang H. P., Lin J., Wu Y. Z., Cheng P., Meng X. Z., and Ren S.** Mechanical performances and compatibility of rock bolt components, Meitan Xuebao, J. China Coal Soc., 2015, Vol. 40. — P. 11–23.
- 14. Blümel M.** Performance of grouted bolts in squeezing rock, Proc. Int. Symp. ISRM, EUROCK, 1996. — P. 885–891.
- 15. Kilic A., Yasar E., and Celik A. G.** Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt, Tunn. Undergr. Sp. Technol., 2002, Vol. 17. — P. 355–362.
- 16. Moosavi M., Jafari A., and Khosravi A.** Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure, Cem. Concr. Compos., 2005, Vol. 27. — P. 103–109.
- 17. Jalalifar H.** A new approach in determining the load transfer mechanism in fully grouted bolts, Dissertation, University of Wollongong, 2006.
- 18. Aziz N., Nemcik J., Cao C., and Jalalifar H.** Bolt profile configuration and load transfer capacity optimisation, Proc. of 28th Int. Symp. Gr. Control Mining, ICGCM, 2009. — P. 48–52.
- 19. Blanco Martín L., Tijani M., Hadj-Hassen F., and Noiret A.** Assessment of the bolt-grout interface behaviour of fully grouted rockbolts from laboratory experiments under axial loads, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 63. — P. 50–61.
- 20. Ranjbarnia M., Fahimifar A., and Oreste P.** A simplified model to study the behavior of pretensioned fully grouted bolts around tunnels and to analyze the more important influencing parameters, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50. — P. 533–548.
- 21. Benmokrane B., Chennouf A., and Mitri H. S.** Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1995, Vol. 32, No. 7. — P. 633–642.

Поступила в редакцию 17/IV 2021

После доработки 05/I 2023

Принята к публикации 16/III 2023