



**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АРОЧНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ТРЕХЗВЕННОЙ ПОДАТЛИВОЙ КРЕПИ**

А. А. Неверов, А. И. Конури, С. А. Неверов, А. О. Кудря

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: nnn_aa@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

С целью верификации и подтверждения заданных характеристик работоспособности арочной податливой крепи из специального взаимозаменяемого профиля рассмотрена задача определения ее напряженно-деформированного состояния. Для разных режимов работы выявлены наиболее уязвимые узлы и элементы крепи, в которых раньше всех наступает предельный случай — развитие пластических деформаций. Показано, что надежность и работоспособность арочной металлической трехзвенной податливой крепи зависит от прочности податливого узла. При этом ее максимальная несущая способность обеспечивается в жестком режиме работы.

Металлическая крепь, арка, податливость, жесткость, напряжения, деформации, предел текучести, численное моделирование, несущая способность, сопротивление крепи

**NUMERICAL SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE
OF ARCHED METAL THREE-LINK YIELDING SUPPORT ELEMENTS**

A. A. Neverov, A. I. Konurin, S. A. Neverov, and A. O. Kudrya

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: nnn_aa@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

In order to verify and confirm the specified performance characteristics of arched yielding support made of a special interchangeable profile, the problem of determining its stress-strain state is considered. Most sensitive assemblies and support elements were identified for different operating modes, in which the limiting case — plastic strain development occurs first. It is shown that reliability and operability of an arched metal three-link yielding support depends on the strength of yielding assembly. At the same time, its maximum bearing capacity is provided in a hard operating mode.

Metal support, arch, yielding, rigidity, stresses, strains, yield strength, numerical modeling, bearing capacity, support resistance

Основные положения. В настоящее время большинство подземных горнодобывающих предприятий сталкиваются с резким ухудшением геологических и геомеханических условий выемки, связанных как с ростом глубины отработки, высокой интенсивностью извлечения минерального сырья, так и со сложившейся горнотехнической обстановкой на месторождении, характеризующейся наличием подработки, надрработки, техногенных пустот, целиков и других объектов [1–7]. Все это накладывает определенные ограничения на условия эксплуатации горных выработок. Особенно остро встает вопрос о поддержании выработок с длительным сроком службы, находящихся под воздействием неустановившегося горного давления. Его решение, как правило, осуществляется благодаря использованию податливых крепей, смещения которых выходят за пределы упругости [8–14]. За счет наличия узлов податливости, обеспечивающих

ограниченное скольжение, обычно верхняка по стойке, данные крепи обуславливают более существенные смещения в сравнении с жесткими (более 300 мм), что на участках влияния очистных работ позволяет значительно повысить их работоспособность.

На стадии конструкторских проработок при поиске и выборе оптимальных параметров и размеров элементов крепи все более востребованным становится использование математического моделирования, позволяющего существенно повысить эффективность и оперативность внедрения в производство. В данной статье для проверки и подтверждения несущей способности крепи в шахтных условиях с помощью конечно-элементного моделирования (МКЭ) проведен анализ прочности серийно выпускаемой по ГОСТ 18662-83 арочной металлической трехзвенной податливой крепи из специального взаимозаменяемого профиля (СВП).

Постановка задачи и краевые условия. Выбор математической модели поведения крепи под нагрузкой основывается на положениях ГОСТа Р 50910-96 “Крепи металлические податливые рамные, методы испытания”, который устанавливает требования к физическим испытаниям, а также знаниях условий и правил их эксплуатации. Этот стандарт распространяется на металлические податливые рамные крепи, предназначенные для поддержания горных выработок с целью сохранения их рабочего состояния, и необходимые размеры поперечного сечения, исключая переход крепи в запредельное состояние. Расчеты необходимо выполнять до предельного состояния, характеризуемого как деформированное, при котором дальнейшая эксплуатация крепи не допустима из-за потери ее работоспособности, т. е. крепь не может быть восстановлена без следа остаточной деформации, наблюдаемой визуально.

Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции крепи использована математическая модель упругой среды [15–19]. Обусловлено это тем, что выбор и обоснование деформирования крепи по линейной прямо-пропорциональной зависимости “напряжение σ – деформация ε ” (по закону Гука) исходит из предположения, что в процессе эксплуатации она должна обеспечивать сохранение площади поперечного сечения выработки. В штатных условиях развитие пластических деформаций (металл течет) в крепи недопустимо, так как это сопряжено с существенным изменением ее формы и соответственно сечения выработки в свету, что снижает безопасность горных работ (работу людей, транспорта, вентиляции). На практике неупруго деформированная крепь подлежит замене. Однако следует отметить, что развитие пластических (неупругих) деформаций в элементах крепи не означает полную потерю ее несущей способности, т. е. крепь сохраняет свою сплошность, но при этом она деформируется таким образом, что становится небезопасно эксплуатировать выработку (поперечные размеры выработки не соответствуют безопасным зазорам и габаритам горных машин).

В соответствии с изложенным расчет осуществлялся до предела текучести (в пределах упругости). Структурный прочностной анализ методом МКЭ проводился с использованием лицензионного программного обеспечения ANSYS. Конструкция арочной металлической податливой крепи показана на рис. 1.

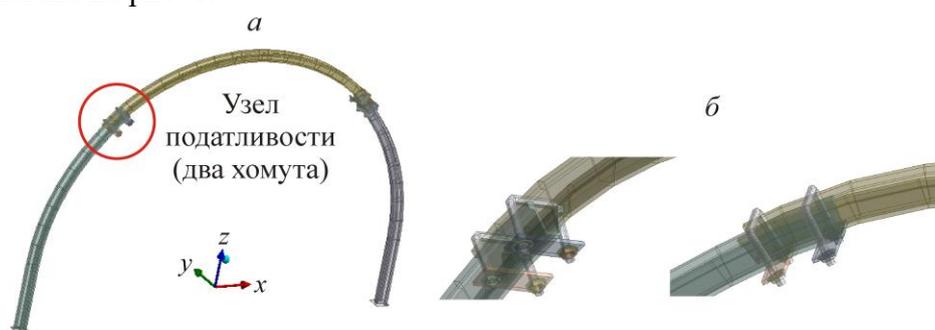


Рис. 1. Арочная металлическая трехзвенная податливая крепь из СВП-27: а — общий вид параметрической модели крепи; б — узел податливости

Свойства материала крепи приняты по техническим характеристикам СВП: предел текучести — 300 и 360 Н/мм² (МПа), модуль упругости — 210 ГПа, коэффициент Пуассона — 0.29, плотность — 7850 кг/м³. Краевые условия представлены в виде действующих нагрузок (сосредоточенных вертикальных сил), а также ограничений (боковой пассивный распор и закрепление опорных плит стоек) и принимались согласно ГОСТу Р 50910-96 (рис. 2). Боковой пассивный распор создавался, исходя из условия отсутствия перемещений стоек крепи в горизонтальном направлении с ее внешней стороны, а закрепление опорных плит стоек — жесткой их заделкой ($u_x = u_z = u_y = 0$). Перемещения во всех трех направлениях принимались равными нулю, т. е. запрещались (соответствует шахтным натурным условиям).

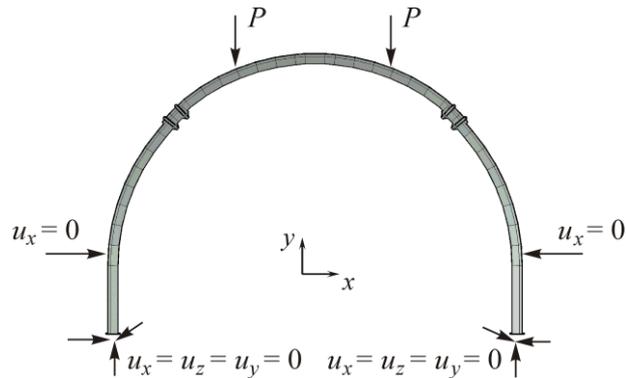


Рис. 2. Схема нагружения арки (крепь из СВП-27)

Одним из основных элементов крепи является податливый узел (подвижный элемент, малые перемещения), поэтому расчет проводился с учетом контактного взаимодействия (условия поведения контактной поверхности). В предлагаемой модели рассматривался контакт с трением: он допускает скольжение с пропорциональным сопротивлением, определяемым коэффициентом трения, и возможностью свободного разделения без сопротивления. Таким образом в расчетах учитывалась затяжка хомута, от которой зависит податливость. Как правило, значение затяжки выбирается согласно инструкции по креплению на конкретном предприятии, поскольку на смещения в податливом узле оказывают влияние различные факторы, обусловленные конкретными горно-геологическими условиями установки и эксплуатации крепи. Например, контактная сила трения в податливом узле находится как произведение нормальной силы (зависящей от затяжки) и коэффициента трения. В свою очередь коэффициент трения “сталь по стали” может изменяться в 10 и более раз в зависимости от влажности контакта, наличия оксидов железа на поверхности, ее шероховатости и загрязненности. В этом случае при одном и том же усилии затяжки контактная сила трения также будет различаться. Очевидно, что при прочих равных условиях смещения в податливом узле будут тем меньше, чем больше значение затяжки хомутов. Следовательно, теоретически можно реализовать бесконечно большое количество вариантов затяжки хомутов в диапазоне от максимального, обеспечивающего блокирование узлов податливости, до минимального — устойчивость крепи без нагрузок. В расчете крепи с целью определения максимально возможной податливости принято минимальное значение затяжки хомутов (трение “сталь по стали” с учетом прикладываемых сил).

Таким образом, крепь рассчитывалась для двух режимов: податливом и жестком. На практике переход из податливого режима работы крепи в жесткий осуществлялся блокированием узлов податливости. Обычно это реализуется затяжкой резьбовых соединений на хомутах (возможно также исчерпание податливости за счет усадки верхняка до его распора со стойками). Другими словами, в расчетах сдвигения в податливом узле не прекращаются, хотя и уменьшаются до незначительных величин.

Расчет выполнялся с учетом постепенного увеличения вертикальной нагрузки, при котором устанавливалась ее предельная величина в момент исчерпания податливости, т. е. наблюдалось отсутствие роста смещений (близких к нулю) в податливом узле при повышении в нем напряжений. Следующим этапом расчетов стала блокировка узлов податливости (имитация затяжки резьбовых соединений хомутов) с решением задачи в жестком режиме работы крепи (сдеформированная крепь в податливом режиме используется в новом расчете).

Критерий для оценки прочности крепей. Для определения несущей способности, сопротивления крепи и условий ее работоспособности принята четвертая теория прочности, эффективно зарекомендовавшая себя при прочностном анализе [20–22]. Согласно данной теории сложное напряженно-деформированное объемное состояние конструкций оценивается через эквивалентные напряжения теории Мизеса

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

где σ_{eq} — интенсивность напряжений по Мизесу; σ_1 , σ_2 и σ_3 — главные максимальные, промежуточные и минимальные напряжения, полученные из упругого решения.

Считается, что пластичность (текучесть) материала наступает тогда, когда интенсивность напряжений по Мизесу превышает предел текучести $\sigma_{0,2}$ материала (критерий Мизеса применим к расчету пластических зон в металлических конструкциях) $\sigma_{eq} \geq \sigma_{0,2}$.

Для надежной работы конструктивных элементов рассматриваемой крепи нежелательно появление в них весьма обширных зон пластических деформаций, т. е. оценку несущей способности крепи необходимо осуществлять на наличие так называемых “пластических шарниров” — сечения конструктивного элемента, полностью находящегося в пластическом состоянии (предельное состояние сечения конструкции, при котором напряжения по всему сечению равны или больше предела текучести материала). Анализ наиболее напряженных сечений конструкции крепи позволяет установить наличие или отсутствие зон текучести (пластичности) и характер их образования — обширные пересекающиеся зоны текучести, охватывающие все поперечное сечение элемента или участки пластичности, размеры которых распространяются не на все сечение, сохраняя несущую способность и работоспособность. Поэтому, как отмечено ранее, в качестве опасного напряжения принимается предел текучести металла $\sigma_{0,2}$.

Используя поэтапное увеличение прикладываемых вертикальных сил в диапазоне 0–500 кН, вычислялись эквивалентные напряжения по Мизесу. При выполнении условия, когда интенсивность напряжений по Мизесу превышает предел текучести $\sigma_{0,2}$ материала крепи в форме пластического шарнира, фиксировались приложенные силы, которые являются несущей способностью рамы (предельное состояние). Результаты расчетов коэффициентов запаса прочности крепей по теории Мизеса показаны на рис. 3, 4 в виде зон возможных пластических деформаций (выделены красным цветом).

Результаты моделирования. В численных решениях определению подлежали следующие характеристики крепи: *несущая способность* — предельная вертикальная нагрузка в жестком режиме работы с заблокированными узлами податливости, кН/раму; *сопротивление крепи* — среднее арифметическое значение верхнего пика нагрузки в податливом режиме работы, кН/раму; *наработка до отказа* — максимальный прогиб верхняка после исчерпания податливости, мм; *вертикальная податливость* (общая) — величина, на которую уменьшается первоначальная высота рамы при работе податливой крепи до исчерпания податливости, мм; *горизонтальная податливость* — величина, на которую изменяется первоначальная ширина рамы при работе податливой крепи до исчерпания податливости, мм.

НДС и развитие пластичности в арочной металлической трехзвенной крепи из профиля СВП-27 в податливом режиме показано на рис. 3, в жестком режиме — на рис. 4.

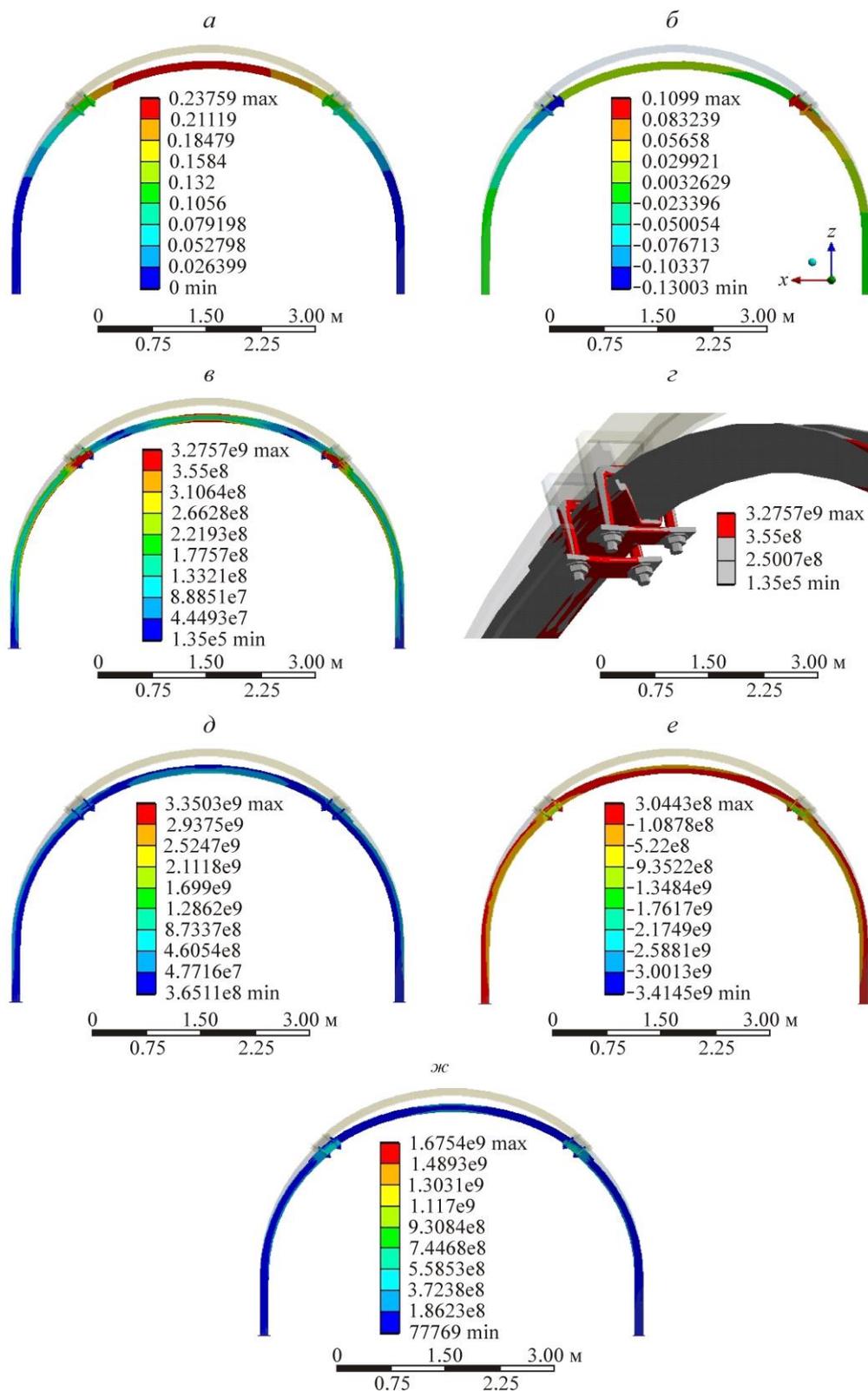


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние крепи (из СВП-27) в податливом режиме: a — полные деформации; $б$ — деформации по оси x ; $в$ — эквивалентные напряжения по Мизесу; $г$ — развитие вероятных зон пластичности в податливом узле; $д$ — главные максимальные напряжения; $е$ — главные минимальные напряжения; $ж$ — максимальные касательные напряжения

Установлено, что при нагрузке 310 кН происходит переход крепи в жесткий режим работы (согласно принятым допущениям). Отсюда, сопротивление крепи составляет 310 кН. Вертикальная податливость на этот момент находится на уровне 240 мм (рис. 3а), горизонтальная

(рис. 3б) — 160 мм (80 мм податливость одной стойки). В условиях перехода крепи в жесткий режим (закрепление узла податливости) получено: наработка до отказа (максимальный прогиб верхняка) 69/76 мм (при пределе текучести соответственно 295/355 кН), несущая способность (предельная вертикальная нагрузка в жестком режиме) соответственно 420/450 кН.

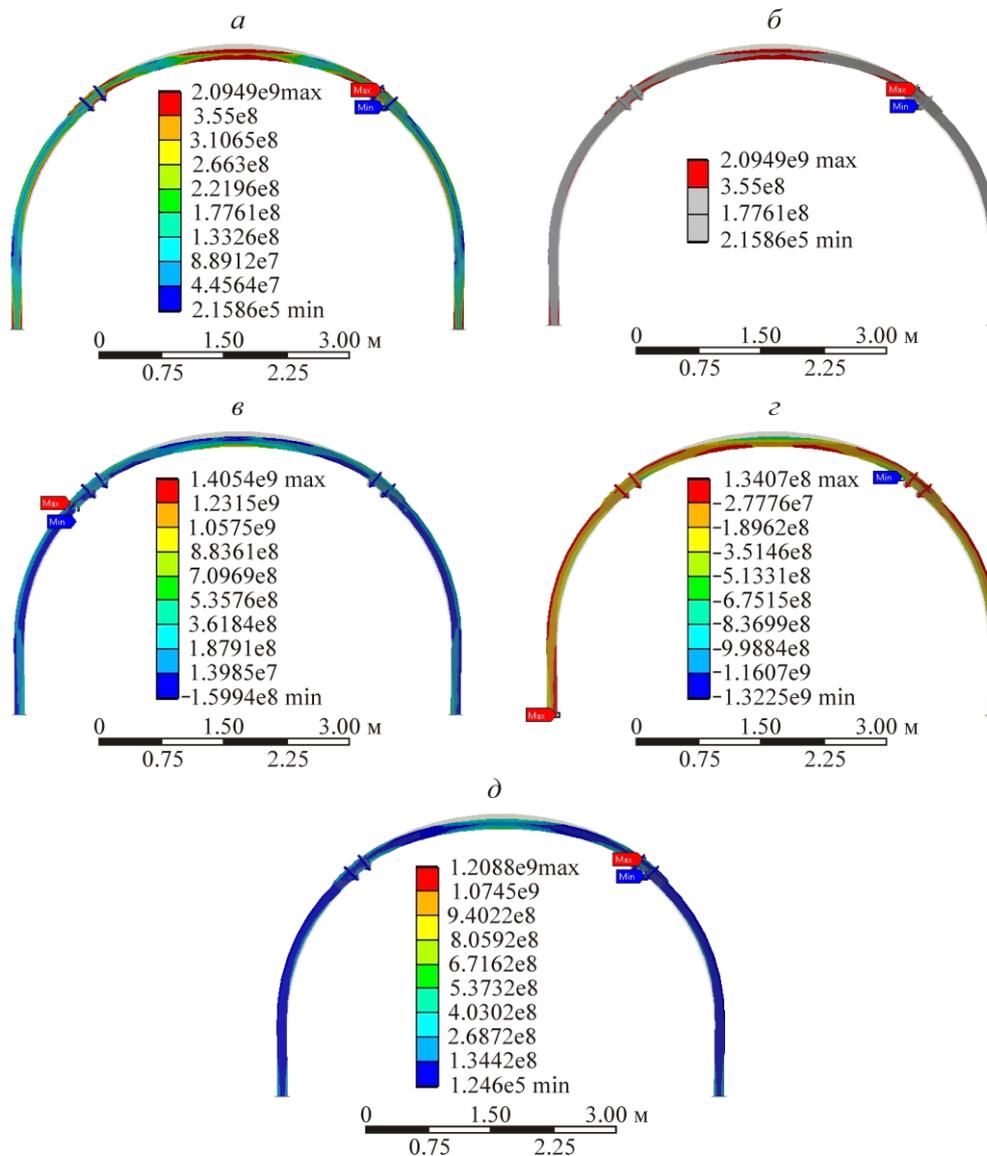


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние крепи (из СВП-27) в жестком режиме: *a* — эквивалентные напряжения по Мизесу; *б* — развитие вероятных зон пластичности в крепи; *в* — главные максимальные напряжения; *г* — главные минимальные напряжения; *д* — максимальные касательные напряжения

Общие характеристики работоспособности рассматриваемой крепи по результатам математического моделирования приведены в таблице.

Основные характеристики работоспособности крепи

Характеристика работоспособности крепи	Предел текучести стали, Н/мм ² (МПа)	
	295	355
Несущая способность, кН/раму	420	450
Сопротивление крепи, кН/раму	310	310
Нарботка до отказа, мм	69	76
Вертикальная податливость, мм	240	240
Горизонтальная податливость, мм	160	160

Выявлены наиболее уязвимые элементы крепи (узлы и элементы, у которых в первую очередь наступает предельный случай, т. е. превышение предела текучести). При работе арочной металлической трехзвенной податливой крепи в режиме податливости наиболее уязвим податливый узел — хомут. Разрушению подвержена нижняя крепежная планка и сам хомут, что не позволяет перейти крепи в жесткий режим работы. При работе в жестком режиме наиболее уязвимыми элементами крепи являются центральный участок верхняка, а также концы верхняка и стоек в районе податливого узла. Незначительная пластичность формируется в основании стоек вблизи опорных плит. При этом высокая вероятность разрушения наблюдается в центре верхняка.

ВЫВОДЫ

В результате расчетов определены области и элементы крепи, в которых при принятой схеме нагружения наиболее вероятно ожидать максимальную концентрацию механических напряжений, в том числе зоны, где превышен предел текучести материала рамы. Таким образом прогнозируются пластические деформации, оказывающие существенное влияние на их несущую способность, сопротивление и работоспособность.

Установлено, что надежность применения арочной металлической трехзвенной податливой крепи зависит, главным образом, от прочности податливого узла. При этом максимальная несущая способность крепи обеспечивается в жестком режиме работы. Прогнозная прочностная оценка арочных податливых крепей из профиля СВП-27 дает полное представление об их напряженно-деформированном состоянии, условиях работы элементов крепи и соответственно несущей способности (прочности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Wang K., Wang L., and Ren B.** Failure mechanism analysis and support technology for roadway tunnel in fault fracture zone: a case study, *Energies*, 2021, 14(13): 3767.
2. **Sun Y.** Research on the deformation mechanism of mining roadway stratiform surrounding rock with nonuniform stress field, *Shock and Vibration*, Art. ID 6624045, 2021, 19 pp.
3. **Aynbinder I. I., Galchenko Yu. P., Ovcharenko O. V., and Patskevich P. G.** Basic trends of advance in geotechnologies for deep-level ore mining, *Mining Journal*, 2017, no. 11, pp. 65–71. [**Айнбиндер И. И., Галченко Ю. П., Овчаренко О. В., Пацкевич П. Г.** Основные направления развития геотехнологий подземной разработки рудных месторождений на больших глубинах // *Горный журнал*. — 2017. — № 11. — С. 65–71.]
4. **Freidin A. M., Neverov A. A., and Neverov S. A.** Underground mining of ore deposits, Textbook, Part 1, 2, Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences – Novosibirsk State University, 2012. [**Фрейдin А. М., Неверов А. А., Неверов С. А.** Подземная разработка рудных месторождений / Учеб. пособие. Ч. 1, 2. — Новосибирск: ИГД СО РАН–НГУ, 2012.]
5. **Neverov A. A., Konurin A. I., Neverov S. A., Medvedeva N. P., and Khmelinin D. P.** Geomechanical analysis of extraction of subcardial reserves at the makmal mine, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2018, 18(1.3), pp. 427–433.
6. **Shaposhnik Y. N., Neverov A. A., Neverov S. A., Konurin A. I., and Shokarev, D. A.** Development of Technology for Filling Voids between Metal Frame Support and Adjacent Rock Mass by Foam Materials, *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 237–247. [**Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Конурин А. И., Шокарев Д. А.** Разработка технологии забутовки закрепных пустот вспенивающимися материалами // *ФТПРПИ*. — 2018. — № 2. — 63–74.]
7. **Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., Shokarev D. A., Shaposhnik S. N., and Konurin A. I.** Improvement of support technology in Artemevsk mine of Vostoksvetmet. *Journal Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 1096–1102. [**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шокарев Д. А., Шапошник С. Н., Конурин А. И.** Совершенствование технологии крепления выработок на Артемьевской шахте ТОО “Востокцветмет” // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 6. — С. 140–148.]

8. **Seryakov V. M. and Krasnovsky A. A.** Assessment of the stress-strain state of the rock mass when filling the rock dumps in the roof of the mine with phenolic resins, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 144–148. [Серяков В. М., Красновский А. А. Оценка напряженно-деформированного состояния массива при заполнении вывалов пород в кровле выработки фенольными смолами // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 144–148.]
9. **Kaiser P. K., Diederichs M. S., Martin C. D., Sharp J., and Steiner W.** *Underground works in hard rock tunnelling and mining*, ISRM International Symposium 2000; 2018.
10. **Zheng L., Zuo Y., Hu Y., and Wu W.** Deformation mechanism and support technology of deep and high-stress soft rock roadway. *Advances in Civil Engineering*, 6634299. 2021.
11. **Kazikaev D. M., Kozyrev A. A., Kasparyan E. V., and Iofis M. A.** Management of geomechanical processes in the development of mineral deposits, Teaching Aid, Moscow, Publishing house “Gornaya kniga”, 2016, 490 pp. [Казикаев Д. М., Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Иофис М. А. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых / Учеб. пособие. — М.: Изд-во “Горная книга”, 2016 — 490 с.]
12. **Tajdus A.** Geomechanika w budownictwie podziemnym, Projektowanie i budowa tuneli, Antoni Tajdus, Marek Cała, Krzysztof Tajdus. – Wydawnictwo AGH: Kraków, 2012, 762 pp.
13. **Hoek E. and Guevara R.** Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, vol. 42, no. 2, 389–418 pp.
14. **Litvinsky G. G. and Smekalin E. S.** Efficiency of frame structures of support, Collection of scientific works of Donbass State Technical University, 2015, issue 44, 18–25 pp. [Литвинский Г. Г., Смекалин Е. С. Эффективность рамных конструкций крепи // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — 2015. — Вып. 44. — С. 18–25.]
15. **Bugara M. I. Vishnevetsky V. V., Halimendik V. Yu., et al.** New pliable support with a reinforced top, Coal of Ukraine, 2012, 18–20 pp. [Бугара М. И., Вишневецкий В. В., Халимендик В. Ю. и др. Новая податливая крепь с усиленным верхняком // Уголь Украины. — 2012. — С. 18–20.]
16. **Makshankin. D. N., Gogolin V. A., and Remezov A. V.** Mathematical modeling of bench tests of arch supports in a rigid mode, *Economy of Kuzbass: Scientific and innovative and socio-economic journal*, 2009, no. 6 (47), pp. 28–30. [Макшанкин Д. Н., Гоголин В. А., Ремезов А. В. Математическое моделирование стендовых испытаний арочных крепей в жестком режиме // Экономика Кузбасса: Научно-инновационный и социально-экономический журнал. — 2009. — № 6(47). — С. 28–30.]
17. **Mitelman A. and Elmo D.,** 2019. Analysis of tunnel-support interaction using an equivalent boundary beam. *Tunnelling and Underground Space Technology* 84: 218–226.
18. **Zhou J., Yang X.-A., Ma M.-J., and Li L.-H.** The support load analysis of deep-buried composite lining tunnel in rheological rock mass, *Computers and Geotechnics*, 2021, vol. 130, 103934.
19. **Lu H., Kim E., and Gutierrez M.** Monte Carlo simulation (MCS)-based uncertainty analysis of rock mass quality Q in underground construction, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 94, 103089.
20. **Li C., Zhou J., Armaghani D.J., Cao W., and Yagiz S.** Stochastic assessment of hard rock pillar stability based on the geological strength index system, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, vol. 7(2), no. 47.
21. **Skvortsov Yu. V. and Glushkov S. V.** Using the FEM-package ANSYS for solving problems of mechanics of deformable solids [Electronic resource]: interactive. multimedia. allowance, Ministry of Education and Science of Russia, Korolev Samara State Aerospace University, Samara, 2011. [Скворцов, Ю. В., Глушков С. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела [Электронный ресурс]: интерактивное мультимедийное пособие, Минобрнауки России, СГАУ, Самара, 2011.]
22. **Mezhetsky G. D., Zagrebin G. G. and Reshetnik N. N.** Resistance of materials, Textbook, Moscow, 2016, 432 pp. [Межецкий Г. Д., Загребин Г. Г., Решетник Н. Н. Сопротивление материалов / Учебник. — М., 2016. — 432 с.]