

Initiation of residual stress zone during blasting in jointed granite rock mass in operation of Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union

Information about author

V. N. Tyupin¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, tyupinvn@mail.ru
¹Belgorod State University, Belgorod, Russia

Abstract

Russian and foreign technical literature says that blasting in jointed rock mass induces zones with altered physical properties and geomechanical behavior beyond the perimeter holes. These zones are identified as the crushed zone, radially fractured zone, spalling zone and shattered zone. The shattered zone lacks scientific attention although this zone can reach the width of $(30-170)d_b$ (d_b —blasthole diameter) in open pit mines and $(25-75)d_b$ in underground mines. The earlier implemented research answers the question on quantitative change in the stresses and strains of a jointed rock mass during blasting. The initiation mechanism of the shattered zone remains unclear. This study aims to find the initiation mechanism of the shattered zone in jointed rock mass and to determine its stress state after blasting. Three series of full-scale experimental studies have been performed in jointed granite rock mass using acoustic emission methods, ultrasonic techniques and deformation measurements. It is found that in the shattered zone, blocks in the jointed rock mass displace radially from the blast holes with deformation of the joint surfaces and with elastic strains preserved after blasting. For this reason, this zone is qualified as the zone of blast-induced residual stresses. The article gives the formula for the residual radial compressive stresses under short-delay multi-row blasting. The numerical calculation using this formula and the actual mine data prove the formula validity. The method of destressing blasting is proposed to unload rockburst-hazardous rock mass from stresses in the areas of the confining pressure phenomena such as spalling and sloughing. This method has been trialed in Priargunsky's mines in granite rock mass (1400 m long area was unloaded from stresses in mines). The authors highly appreciate participation of I. I. Shishkin, B. M. Belyaev, V. M. Pankov and V. A. Pazdnikova in the experimental research.

Keywords: blast-induced residual stress zone, jointed rock mass, mechanism, formula, rockburst-hazardous rock mass, destressing blasting method.

References

1. Pokrovskiy G. I. Blast. Fourth edition, revised and enlarged. Moscow : Nedra, 1980. 190 p.
2. Pokrovskiy G. I., Fedorov M. S. Effects of shock and blast in deformable media. Moscow : Promstroyizdat, 1957. 276 p.
3. Feshchenko A. A., Eristov V. S. Perimeter control blasting in waterworks construction. Moscow : Energiya, 1972. 119 p.

4. Kutuzov B. N. Methods of blasting operations : Textbook. 3rd ed. Moscow : Gornaya kniga, 2018. Vol. 1. Blast destruction of rocks. 476 p.
5. Mosinets V. N., Abramov A. V. Destruction of fissured and disturbed rocks. Moscow : Nedra, 1982. 248 p.
6. Adushkin V. V., Spivak A. A. Underground blasts. Moscow : Nauka, 2007. 578 p.
7. Kutuzov B. N., Tyupin V. N. Determination of damage zones induced by blasting in jointed rock mass. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1983. No. 4. pp. 53–58.
8. Tyupin V. N. Blasting and Geomechanical Processes in High-Stress Fractured Rock Mass. Belgorod : ID Belgorod NIU BelGU, 2017. 192 p.
9. Rakishev B. R. Prediction of process-dependent parameters in blasted rocks in open pit mines. *Alma-Ata : Nauka*, 1983. 239 p.
10. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 12, No. 13. pp. 3978–3986.
11. Ghiasi M., Askarnejad N., Dindarloo S. R., Shamsoddini H. Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26, Iss. 2. pp. 183–186.
12. Li-Yun Yang, Chen-Xi Ding. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 107. pp. 150–158.
13. Xiang Xia, Haibo Li, Jingtao Niu., Jianchun Li, Yaqun Liu. Experimental study on amplitude change of blast vibrations through steps and ditches. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 71. pp. 77–82.
14. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Konovalov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS Geomix. *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. Vol. 8, Iss. 4. pp. 26809–26818.
15. Eremenko V. A., Rylnikova M. V., Esina E. N. Monitoring stress-strain state of structural defects and udaroopasnost rock mass. *GIAB*. 2015. Special issue 15. Sustainable Performance Conditions for Mineral Resources Sector of Russia. Iss. 3. pp. 105–116.
16. Aksenov A. A., Ozhiganov I. A., Gubanov D. V. The use of pressings-in method with MHS device in order to determine geomechanical state of massif and its physico-mechanical properties. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2015. No. 6. pp. 17–22.
17. Galaov R. B., Kisel A. A., Andreev A. A., Zubkov V. V. Pre-stopping assessment of stress state of ore body S-2 in Skalistaya Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 7. pp. 10–14. DOI: 10.17580/gzh.2016.07.02
18. Eremenko A. A., Shaposhnik Yu. N., Filippov V. N., Konurin A. I. Development of scientific framework for safe and efficient geotechnology for rockburst-hazardous mineral deposits in Western Siberia and the Far North. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 10. pp. 33–39. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.03
19. Rodionov V. N., Sizov I. A., Tsvetkov V. M. Basic geomechanics. Moscow : Nedra, 1986. 300 p.
20. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mechanical processes in rock mass. Moscow : Nedra, 1986. 270 p.

УДК 622.283

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ СТВОЛОВ ШАХТЫ им. ГУБКИНА

С. В. СЕРГЕЕВ¹, проф., д-р техн. наук, sergey.sergeev.v@mail.ru

Е. Д. ВОРОБЬЕВ¹, директор, канд. техн. наук

И. М. ИГНАТЕНКО², директор Института наук о Земле, канд. техн. наук

А. В. ЗИНЧЕНКО³, старший научный сотрудник

¹МИП ООО «ГеоСтройМониторинг БелГУ», Белгород, Россия

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

³ОАО «ВИОГЕМ», Белгород, Россия

Введение

Стволы шахты им. Губкина АО «КМАруда» эксплуатируются с конца 40-х годов прошлого века. Они пройдены в сложных гидрогеологических условиях [1, 2]. Например, при проходке ствола № 1 диаметром в свету 4 м на глубине 72 м произошел прорыв пльвуна в ствол. После ликвидации аварии крепь в интервале глубин от 71,6 до 99,4 м была усилена чугунными тубингами высотой 1,5 м и спинкой толщиной 30 мм. При этом

Приведены результаты обследования состояния крепи существующего и строящегося вертикальных стволов шахты им. Губкина АО «КМАруда». Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния крепи по измеренным деформациям. Определены величины давлений на крепь стволов в наиболее характерных интервалах по глубине. Установлено, что крепь обладает необходимым уровнем эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: шахтный ствол, комбинированная крепь, бетон, тубинг, оперативный контроль, деформометр, напряжения, деформации, нагрузка на крепь.

DOI: 10.17580/gzh.2020.10.05

произошло уменьшение диаметра ствола до 3,4 м. После 70-летней эксплуатации ствола возникла необходимость и была выполнена комплексная диагностика напряженного состояния крепи на всех интервалах, в том числе закрепленных кирпичной, бетонитовой, тубинговой и бетонной крепью.

В настоящее время в связи с понижением горных работ потребовались стволы глубиной до 450 м. Проектом проходки новых стволов диаметром в свету 8 м было предусмотрено предварительное замораживание водонасыщенного массива до глубины 148 м. Ствол в этом интервале крепили тюбингобетонной крепью.

Существуют две основные технологии сооружения стволов в водонасыщенных породах: предварительное замораживание массивов и тампонаж околоствольного пространства [3]. Тампонаж применяют при небольших мощностях и напорах подземных вод, в основном в песчаных породах. Особенностью данной технологии является трудоемкость достижения водонепроницаемости околоствольного массива. При этом в нем возможно образование «окон», через которые будет поступать в ствол вода.

Замораживание позволяет нейтрализовать эти риски в любых типах пород. Однако давление замороженных пород на крепь значительно возрастает, особенно в глинистых породах [4]. Поэтому применение технологии должно сопровождаться мониторингом состояния крепи [5]. Кроме этого, в соответствии с требованиями п. 4.6 СП 91.13330.2012 «Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80», при проектировании наиболее ответственных выработок, повреждение которых ведет к остановке всего предприятия, располагаемых на участках со сложными условиями поддержания, следует предусматривать установку контрольных приборов и замерных станций.

Натурные наблюдения за напряженным состоянием крепи клетового ствола проводили на пяти горизонтах по методике института ВИОГЕМ, ранее апробированной в стволах Яковлевского рудника, рудника «Пийло» и др. [4, 6].

Оценка напряженного состояния крепи ствола № 1

Обследование кирпичной, бетонитовой и бетонной крепи выполняли по ГОСТ 22690–2015 неразрушающими методами контроля. В интервале глубин от 0 до 31,9 м керамический кирпич имеет марку М150, а цементно-песчаный раствор – марки М50. В интервале глубин от 31,9 до 52,5 м – бетонная крепь класса В 15 по прочности на сжатие. Прочностные характеристики крепи соответствуют проектным значениям в обследуемых интервалах. Фрагменты крепи в этом интервале показаны на **рис. 1**.

В интервале глубин от 71,6 до 99,4 м крепь состоит из двух рядов бетонита общей толщиной 75 см. Внутренний слой крепи выполнен из чугунных тюбингов. Ствол здесь проходит через обводненные пески и юрские глины. Сечение ствола в данном интервале показано на **рис. 2**.

Существуют экспериментальные и теоретические методы оценки напряженного состояния существующей крепи [7–11]. Наиболее оптимальным в данном случае является определение напряжений в тюбингах методом разгрузки [12]. На **рис. 3** показан первый этап разгрузки – распил ребра на глубину 11 мм с одной стороны. По измеренным деформациям по закону Гука определены напряжения. Нагрузки на внешний контур крепи рассчитывали по методике проф. Н. С. Булычева с использованием программного обеспечения Stvol V [13, 14].

Напряжения в тюбингах определяли на глубинах 61,6; 76,6 и 84 м.

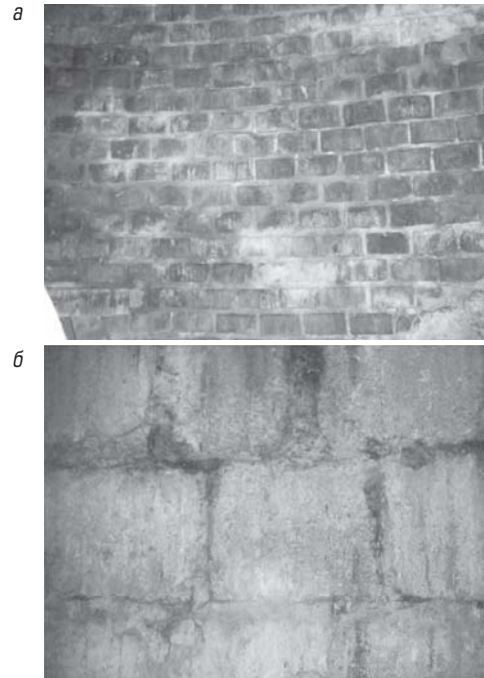


Рис. 1. Фрагменты кирпичной (а) и бетонитовой (б) крепи с южной стороны ствола № 1 шахты им. Губкина

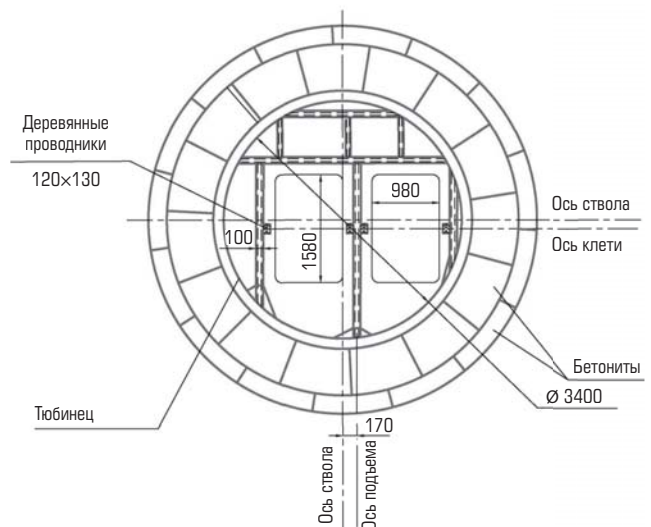


Рис. 2. Сечение ствола в месте усиленного крепления в интервале глубин от 71,6 до 99,4 м

В **табл. 1** приведены величины деформаций ϵ_θ , напряжений σ_θ , горного P_f , гидростатического P_B и общего P_0 давления на крепь ствола, полученные при обработке результатов измерений и расчета.

За период длительной эксплуатации ствола № 1 вследствие коррозии произошло уменьшение толщины спинок тюбингов на 1,5–2 мм, а горизонтальных ребер – на 3–4 мм (двусторонняя коррозия). Это привело к снижению несущей способности тюбинговой крепи на 5–7 %. Однако фактические напряжения



Рис. 3. Распил ребра тьюбинга на глубину 11 мм для определения фактических напряжений

не превышают 22 МПа, что в 10 раз меньше допускаемого по СП 16.13330.2017 расчетного сопротивления при сжатии для серого чугуна. Следовательно, комбинированная крепь сохраняет свою несущую способность с достаточным запасом. Обследование крепи из бетона и кирпича показало, что за период эксплуатации ствола не произошло снижения их марки. Это объясняется благоприятными температурно-влажностными условиями эксплуатации ствола.

Величину тангенциальных напряжений в бетонной крепи определим с использованием величины давления на тьюбингобетонную крепь, расположенную ниже: $P_{\phi} = 0,66$ МПа (см. табл. 1). В результате расчета по формуле Ляме тангенциальные сжимающие напряжения в бетоне крепи составляют 3,7 МПа. Это ниже предела прочности бетона марки М200 на одноосное сжатие.

Оценка напряженно-деформированного состояния крепи клетевоегo ствола

В клетевом стволе по мере проходки были установлены пять замерных станций в различных типах пород. Для измерения деформаций тьюбингов применяли маяки-стержни, расположенные на расстоянии 300 мм друг от друга (замерная база).

Таблица 1. Основные данные измерений и расчетов

Глубина, м	Номер тьюбинговых колец	Тип пород	$\epsilon_{\theta} \cdot 10^{-5}$	σ_{θ} , МПа	P_{ϕ} , МПа	Расчетные величины		P_{σ} , МПа
						P_{ρ} , МПа	P_{ν} , МПа	
61,6	4	Песок, насыщенный водой	8	12	0,72	0,38	0,06	0,44
76,6	14	Песок, насыщенный водой	16	22	1,31	0,47	0,15	0,61
84,1	19	Глина	6	10	0,60	0,79	0	0,79

Таблица 2. Результаты натурных наблюдений в клетевом стволе шахты им. Губкина

Номера замерных станций	Номера колец	Глубина, м	Тип пород	Тангенциальные деформации сплюсок ϵ_{θ} , $1 \cdot 10^{-5}$	Тангенциальные напряжения в сплюсках σ_{θ} , МПа	Фактическая нагрузка на крепь, P_{ϕ} , МПа	Расчетная нагрузка на крепь P_{σ} , МПа
1	4	32	Мел белый плотный	10,3	10,8	0,8	0,3
2	29	69	Песок кварцевый мелкозернистый	17,3	18,1	1,3	0,4
3	41	86	Аргиллит и глина	24,0	25,1	1,8	0,8
4	67	128	Кварцит	5,4	6,0	0,4	0,9
5	81	147	Кварцит	6,2	6,5	0,5	1,1

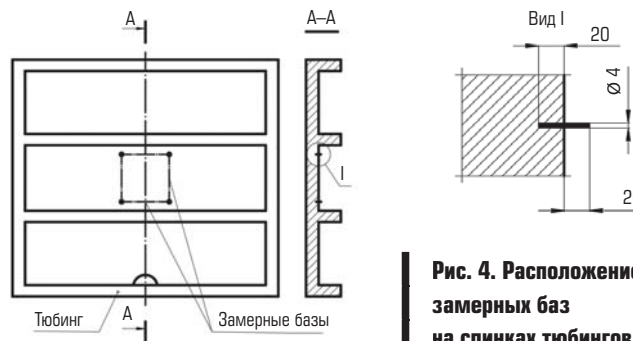


Рис. 4. Расположение замерных баз на спинках тьюбингов

Маяки, представляющие собой металлические стержни диаметром 4 мм, запрессовали в спинки тьюбингов (рис. 4). Расстояние между ними периодически измеряли механическим тензотроном конструкции ЦНИИС с точностью до 0,01 мм [4]. В общей сложности на 22 тьюбингах было установлено 68 замерных баз, из них 33 в вертикальном и 35 в горизонтальном направлениях. Первоначальные замеры проводили после установки тьюбингов в ствол. По измеренным деформациям определяли тангенциальные напряжения, а по ним – нагрузки на крепь P_{ϕ} [13]:

$$P_{\phi} = \frac{\sigma_{\theta(2)}}{k_{0(3)}(m'_{1(2)} - k_{0(2)}m'_{2(2)})}$$

где $\sigma_{\theta(2)}$ – измеренные тангенциальные напряжения в тьюбингах; $k_{0(3)}$, $k_{0(2)}$ – коэффициенты передачи напряжений через слои крепи; $m'_{1(2)}$, $m'_{2(2)}$ – коэффициенты, учитывающие размеры слоев крепи.

В табл. 2 представлены основные результаты измерений и расчетов по замерным станциям. Приведенные величины напряжений в крепи являются наибольшими, так как соответствуют наименьшим температурам замораживания околоствольных пород.

Из данных табл. 2 следует, что расчетные величины давлений на крепь в замороженных породах превышают в 1,5–2 раза проектные величины. Это соответствует результатам натурных наблюдений, проведенных институтом ВИОГЕМ на Яковлевском руднике [4, 15]. Наибольшие напряжения в тьюбингах крепи зафиксированы в замороженных глинах, а наименьшие – в трещиноватых кварцитах.

Заключение

1. Натурные наблюдения, выполненные на шахте им. Губкина, направлены на повышение безопасной эксплуатации стволов в период дальнейшей разработки полезных ископаемых на более глубоких горизонтах.

2. Диагностика напряженного состояния крепи ствола № 1 показала, что крепь сохраняет свою несущую способность во всех

типах пород. Это позволяет продолжить безопасную эксплуатацию и исключить затраты на усиление крепи.

3. Натурные наблюдения в клетевом стволе показали, что давление на крепь в замороженных породах превышает в 1,5–2 раза проектные величины. Рекомендуется их продолжить для оценки возможного влияния процесса сдвижения массива на крепь ствола в ходе дальнейшей разработки месторождения.

Библиографический список

1. *Бабаянц Г. М., Вертлейб Л. К., Журин Н. Я.* и др. Подземная разработка железистых кварцитов. – М.: Недра, 1988. – 168 с.
2. *Казикаев Д. М., Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Иофис М. А.* Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. – М.: Горная книга, 2016. – 490 с.
3. *Qing Yu, Kexin Yin, Jinrong Ma, Hideki Shimada.* Vertical shaft support improvement studies by strata grouting at aquifer zone // *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 2018. ID 5365987. DOI: 10.1155/2018/5365987
4. *Казикаев Д. М., Сергеев С. В.* Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. – М.: Горная книга, 2011. – 244 с.
5. *Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D.* Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 105. P. 160–171.
6. Методические рекомендации по проведению натурных наблюдений в стволах, сооружаемых в сложных горно-геологических условиях. – Белгород: ВЮГЕМ, 1985. – 35 с.
7. *Сентябов С. В.* Исследование и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния крепи шахтных стволов на Гайском руднике // *ГИАБ*. 2018. № 10. С. 79–85.
8. *Саммал А. С., Сергеев С. В., Анциферов С. В., Деев П. В.* Определение области применения бетонной крепи стволов в зонах тектонических нарушений // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018. № 4. С. 317–326.
9. *Анциферов С. В., Саммал А. С., Деев П. В.* Оценка напряженно-деформированного состояния многослойной крепи вертикального ствола с учетом отклонений форм поперечных сечений от проектных // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2017. Т. 4. № 2. С. 19–25.
10. *Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao.* Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling // *Processes*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. DOI: 10.3390/pr7010002
11. *Kunui Hong, Eunchol Han, Kwangsong Kang.* Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9. Iss. 4. P. 702–708.
12. *Влох Н. П.* Напряженное состояние обделки из чугунных тубингов // *Метрострой*. 1990. № 1. С. 17–19.
13. *Булычев Н. С.* Механика подземных сооружений: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016616080. Оценка технического состояния основных видов несущих конструкций подземных выработок по измеренным деформациям «Stvol-V» / С. В. Сергеев, Е. Д. Воробьев, А. В. Зинченко // *Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных; дата регистрации 06.06.2016*.
15. *Xiangdong Hu, Tao Fang, Jin Chen, Hui Ren, Wang Guo.* A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 72. P. 55–63. **FXI**

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 10, pp. 64–67
DOI: 10.17580/gzh.2020.10.05

Engineering diagnostics of shaft lining in Gubkin Mine

Information about authors

S. V. Sergeev¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, sergey.sergeev.v@mail.ru
E. D. Vorobiev¹, Director, Candidate of Engineering Sciences
I. M. Ignatenko², Director of the Institute of Earth Sciences, Candidate of Engineering Sciences
A. V. Zinchenko³, Senior Researcher

¹GeoStroiMonitoring BelGU, Belgorod, Russia

²Belgorod State University, Belgorod, Russia

³VIOGEM, Belgorod, Russia

Abstract

Shafts in Gubkin Mine, KMAruda have been in operation since the late 1940s. The shafts are sunk in difficult hydrogeological conditions. At the present time, due to transition to deeper levels, deeper mine dumps are required. It is necessary to reinforce shaft lining in watered rocks.

During long-term service of shaft 1, due to corrosion, thickness of liner plates and horizontal ribs has decreased by 1.5–2 and 3–5 mm, respectively (two-side corrosion). As a result, the load-bearing capacity of the tubing has lowered by 5–7%. At the same time, the actual stresses are not higher than 22 MPa, which is 10 times less than the design compression resistance of gray cast iron as per Construction Code SP 16.13330.2017. Field studies have been performed in Gubkin Mine toward improvement of operating safety of shafts during mineral mining at deeper levels.

Stress state diagnostics of lining in shaft 1 shows that the lining preserves its load-bearing capacity in all types of rocks. Thus, safe operation can be continued without extra expenses connected with the lining reinforcement. The field studies in the cage shaft show that pressure on the lining in frozen rocks is 1.5–2 times higher than the design values. It is recommended to continue the studies to estimate effects of possible rock displacements on the lining during further mining.

Keywords: mine shaft, mixed-type support, concrete, tubing, operational control, deformometer, stresses, strains, load on lining.

References

1. *Babayants G. M., Vertleyb L. K., Zhurin N. Ya.* et al. Underground mining of ferruginous quartzites. Moscow: Nedra, 1988. 168 p.
2. *Kazikaev D. M., Kozzyrev A. A., Kaspariyan E. V., Iofis M. A.* Geomechanical behavior control in mineral mining: Teaching aid. Moscow: Gornaya kniga, 2016. 490 p.

3. *Qing Yu, Kexin Yin, Jinrong Ma, Hideki Shimada.* Vertical shaft support improvement studies by strata grouting at aquifer zone. *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 2018. ID 5365987. DOI: 10.1155/2018/5365987
4. *Kazikaev D. M., Sergeev S. V.* Diagnostics and monitoring of stressed state of vertical shafts' timbering. Moscow: Gornaya kniga, 2011. 244 p.
5. *Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D.* Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 105. pp. 160–171.
6. *Guidelines on Field Studies in Mine Shafts Constructed in Difficult Geological Conditions.* Belgorod: VIOGEM, 1985. 35 p.
7. *Sentyabov S. V.* Analysis and prediction of change in stress state of shaft lining in Gaisky mine. *GIAB*. 2018. No. 10. pp. 79–85.
8. *Sammal A. S., Sergeev S. V., Antsiferov S. V., Deev P. V.* Estimating concrete shaft lining application field in zones of tectonic disturbance. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018. No. 4. pp. 317–326.
9. *Antsiferov S. V., Sammal A. S., Deev P. V.* Stress-strain state estimation in multilayer support of vertical shafts, considering off-design cross-sectional deformation. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2017. Vol. 4, No. 2. pp. 19–25.
10. *Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao.* Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling. *Processes*. 2019. Vol. 7, Iss. 1. DOI: 10.3390/pr7010002
11. *Kunui Hong, Eunchol Han, Kwangsong Kang.* Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9, Iss. 4. pp. 702–708.
12. *Vlokh N. P.* Stress state in lining made of cast iron tubing. *Metrostroy*. 1990. No. 1. pp. 17–19.
13. *Bulychev N. S.* Mechanics of underground structures: Textbook. 2nd enlarged and revised edition. Moscow: Nedra, 1994. 382 p.
14. *Sergeev S. V., Vorobiev E. D., Zinchenko A. V.* Engineering assessment of basic load-bearing structures in underground mines by deformation measurements using Stvol-V. Software State Registration Certificate No. 2016616080. Unified Register of Russian Programs for Computers and Databases. Registered: 06.06.2016.
15. *Xiangdong Hu, Tao Fang, Jin Chen, Hui Ren, Wang Guo.* A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 72. pp. 55–63.