

Технология разработки тонких рудных тел с предварительной лазерной дезинтеграцией прочных горных пород

А. Ю. Чебан

Представлены результаты резания прочных горных пород мощным лазерным излучением. Предлагается технико-технологическое решение для селективной выемки богатых участков тонких рудных жил из массива прочных горных пород с применением горного комбайна, оснащенного комбинированным лазерно-механическим оборудованием. Лазерное воздействие ведется за контурами тонкой жилы с дезинтеграцией минерализованных вмещающих пород и их последующим фрезерованием с целью образования обнаженных поверхностей в нижней части тонкой жилы для последующей отбойки руды гидравлическим молотом. Дифференцированная разработка массива с применением рационального сочетания различных способов дезинтеграции прочных пород обеспечивает реализацию принципа ресурсосбережения в горном производстве.

Ключевые слова: ценное минеральное сырье, лазерная дезинтеграция горных пород, селективная разработка, горный комбайн, комбинированное рабочее оборудование.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-64-69

Введение

В настоящее время важным направлением в сфере науки и техники является развитие исследований в области взаимодействия энергетических потоков с веществом с целью создания высокоэффективных технических средств и инновационных технологий дезинтеграции прочных и весьма прочных горных пород. Данная тенденция обоснована тем, что традиционные способы воздействия на горные породы, основанные на механическом разрушении, практически приблизились к пределу своих технических возможностей. В связи с этим разрабатываются и внедряются в производство более эффективные технологические схемы разрушения горных пород, основанные на применении различных физических спосо-

бов воздействия: электроимпульсного, лазерного, СВЧ и др. [1–3]. В связи с появлением компактных и относительно мощных лазерных излучателей новых конструкций активизировались экспериментальные исследования по резанию и бурению горных пород и строительных материалов мощным лазерным излучением [4]. В процессе экспериментальных исследований выявляются удельная энергоёмкость разрушения материала, глубина лазерного воздействия, подбираются соответствующие типы лазеров и устанавливаются рациональные режимы их работы для достижения наибольшей эффективности.

Экспериментальные исследования по дезинтеграции горных пород лазерами различных конструкций показали, что тепловое воздействие лазерного излучения является универсальным механизмом разрушения, позволяет обеспечить высокую локальность и дозировку нагрева, не создает шума и вибрации при разрушении материалов. Благодаря данным преимуществам лазерное оборудование нашло применение в горном производстве, в настоящее время лазеры задействованы в ос-

Чебан Антон Юрьевич, в.н.с., к.т.н.

E-mail: chebanay@mail.ru

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.
Россия, 68000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51.

Статья поступила в редакцию 07 декабря 2021 г.

© Чебан А. Ю., 2022

новном в технологиях для бурения скважин в горных породах [5–7]. Существуют технологические схемы бурения горных пород, в которых лазеры используются как самостоятельно, так и в комбинации с механическим оборудованием. Применение комбинированного термомеханического воздействия позволяет значительно увеличить скорость бурения скважин в прочных горных породах.

Отсутствие вибраций при воздействии лазерного излучения на горные породы позволяет использовать лазеры в технологии по предотвращению обвалов [8], заключающейся в лазерном бурении отверстий в опасных отвесных участках горных пород, размещении в них взрывчатых веществ и последующем взрывании. Известны конструктивные схемы дистанционного управления процессом лазерного воздействия при нахождении оборудования в опасных зонах [9].

Целью данной работы являлось проведение экспериментальных исследований по дезинтеграции прочных горных лазерным излучением, для подтверждения возможности использования мощных лазеров в комбинированной технологии, заключающейся в раздельной отработке массива с высокоселективной выемкой ценного минерального сырья из тонких сложноструктурных рудных тел.

Результаты исследования

Институтом горного дела ДВО РАН выполнены исследования по лазерной дезинтеграции (нарезанию щелей) прочных горных пород с использованием технологического ла-

зерного комплекса ТЛК-1А, включающего технологический СО₂ лазер ХЕБР-1А и технологическую лазерную установку ТЛУ-1000 Пловдив (Болгария). Данный лазерный комплекс оснащен системой ЧПУ и предназначен для резки металлов и неметаллов по сложному контуру, номинальная мощность СО₂ лазера – 1100 Вт, длина волны излучения – 10,6 мкм, режим генерирования – непрерывный, расходимость лазерного луча – не более 3 мрад. Лазерная дезинтеграция осуществлялась на образцах вмещающих пород (гранодиоритов) одного из дальневосточных золоторудных месторождений, разрабатываемого подземным способом. Прочность образцов гранодиоритов на одноосное сжатие составляла 182–218 МПа, плотность – 2,68 г/см³. Образцы в форме дисков вырезались из геологоразведочных кернов диаметром 63 мм на отрезном станке Geocat. При проведении экспериментов по дезинтеграции гранодиоритов мощность лазерного излучения равнялась 1100 Вт, скорость резания варьировалась пошагово и составляла 100, 75 и 50 мм/мин.

Всего было произведено резание двенадцати образцов гранодиоритов, по четыре образца для каждой скорости резания. Глубина прорезанной в образце щели измерялась с точностью 0,1 мм с определением на четырех равных условных отрезках щели максимального и минимального заглубления излучения в образец с определением средних значений с точностью до 0,01 мм. Данные экспериментов по резанию образцов гранодиоритов лазерным излучением мощностью 1100 Вт на различных скоростях приведены в таблице.

Таблица

Результаты экспериментов по резанию образцов лазером

Скорость резания, мм/мин	Время нарезания щели, с	Глубина щели, мм	Площадь щели, мм ²	Энергоемкость процесса, Дж	Удельная энергоемкость процесса, Дж/мм ²
100	37,8	12,22	769,9	41580	54,01
75	50,4	15,82	996,9	55440	55,61
50	75,6	22,85	1439,5	83160	57,77

После нарезания щелей в образцах были определены площади полученных щелей и энергоемкость процесса для разных скоростей, равная произведению времени нарезания щели на мощность излучения. Удельная энер-

гоемкость процесса определялась как отношение энергоемкости процесса к площади щели. При уменьшении скорости резания и увеличении глубины прорезаемой щели удельная энергоемкость резания несколько возрастает,

что можно объяснить повышенными затратами энергии на нагрев образцов горных пород до более высоких температур. В области прилегающей к прорезанной щели при температурах соответствующих упруго-хрупкому состоянию породы на стадиях нагрева и охлаждения происходит процесс образования и развития трещин в образцах гранодиоритов (рис. 1), что приводит к существенному снижению прочности горной породы.



Рис. 1. Образец гранодиорита после лазерной дезинтеграции

Практические рекомендации

В горнодобывающей отрасли прослеживаются тенденции по усложнению условий ведения горных работ и снижению качества запасов многих видов ценного минерального сырья. Крупные и средние жильные месторождения благородных металлов с высокими содержаниями полезных компонентов в руде в течение продолжительного времени являлись одними из основных объектов освоения, в результате чего месторождения такого типа к настоящему времени в основном отработаны [10]. Оставшиеся запасы крупных и средних месторождений, а также запасы маломасштабных месторождений преимущественно сосредоточены в тонких жилах, так на месторождениях Дарасунского рудного поля до 85 % запасов золота сосредоточены в жилах мощностью 0,15–0,4 м [10, 11]. Отработка подобных запасов преимущественно ведется подземным способом, при этом в некоторых случаях промышленный интерес могут представлять жилы мощностью менее 0,1 м [10].

Содержание золота в жилах составляет десятки и сотни грамм на тонну руды, а содержание золота в минерализованных вмещающих породах обычно не превышает 1–2 г/т. Минимальная ширина очистного пространства при подземной отработке жил составляет около 0,9 м, что приводит к значительному разубоживанию богатой жильной массы минерализованными вмещающими породами. Так на Дарасунском месторождении при валовой выемке тонких рудных жил и минерализованных вмещающих пород в ряде случаев в товарной руде находится всего 4–10 % жильной массы, при этом содержащей до 95 % золота [1]. Это в последующем ведет к увеличению расходов на переработку минерального сырья, росту количества хвостов, снижению выхода металла. В связи с чем, применение традиционных технологий и оборудования для выемки ценного минерального сырья, сосредоточенного в жилах мощностью менее 0,1–0,2 м становится малоэффективным и не обеспечивает необходимой рентабельности ведения горных работ.

С целью уменьшения энергоемкости работ, снижения разубоживания продолжают совершенствоваться технологии и оборудование для добычи ценного минерального сырья из тонких залежей. Известны технологические схемы механической выемки тонких жил и пластов. Методом выбуривания возможна отработка весьма тонких залежей мощностью 0,2–0,3 м скважинами диаметром 0,20–0,27 м [12], данная технология предназначена для отработки весьма ценного минерального сырья, недостатками являются низкая производительность и высокие потери руды, оставляемой в межскважинных целиках. В работе [13] предлагается способ отработки смешанного забоя с применением стрелового проходческого комбайна, оснащенного режущей головкой и гидравлическим молотом. Первоначально в нижней части смешанного забоя режущей головкой ведется выемка тонкого пласта полезного ископаемого с образованием вруба, затем гидравлическим молотом на образованную свободную поверхность отбиваются вмещающие породы, способ обеспечивает существенное снижение энергоемкости работ и увеличение скорости проходки. Недостатком данного стрелового комбайна является невозможность селективной выемки тонких пластов мощно-

стью первые десятки сантиметров, а также низкая эффективность при разработке массива, сложенного прочными горными породами. В работе [14] предлагается комбинированная технология выемки тонких рудных жил, заключающаяся в нарезании щелей двумя алмазными дисками для оконтуривания жилы с последующим выламыванием полученного целика шарошками. Затем производится нарезание щелей во вмещающих породах с двух сторон от извлекаемой жилы с последующим выламыванием вмещающих пород шарошками с целью формирования технологической выемки для размещения и последующего заглубления рабочего оборудования добычного комбайна. Комбинированная технология предусматривает восходящую механическую выемку тонкой жилы и минерализованных

вмещающих пород, а также взрывное рыхление пустых пород с образованием горной выработки для размещения добычного комбайна. Недостатками данной технологии являются: многооперационность и низкая производительность механической выемки, в связи с большим объемом работ по нарезанию щелей; быстрый износ алмазных дисков при работе с кварцсодержащими горными породами [15].

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается способ выемки тонких рудных жил, сложенных прочными горными породами с применением комбинированного лазерно-механического оборудования. Комбинированное оборудование установлено на горном комбайне (на рисунке не показан) и включает два лазерных излучателя 1, двояную дисковую фрезу 2 и гидравлический молот 3 (рис. 2).

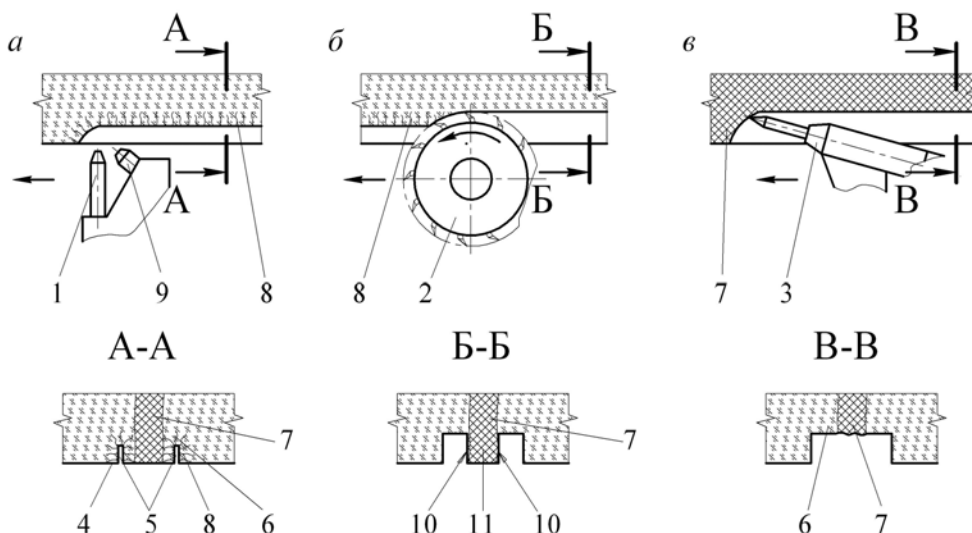


Рис. 2. Схема термомеханической выемки прочных горных пород: а – лазерная дезинтеграция минерализованных вмещающих пород с нарезанием щелей; б – выемка дезинтегрированных минерализованных вмещающих пород двояной дисковой фрезой; в – отбойка обнаженного целика тонкой рудной жилы гидравлическим молотом

Лазерные излучатели 1 осуществляют воздействие в приповерхностном слое 4 обрабатываемого массива с нарезанием щелей 5 в минерализованных вмещающих породах 6 вблизи с тонкой рудной жилой 7 (рис. 2, а). При лазерном воздействии в горной породе протекают высоко- и низкотемпературные процессы разупрочнения и дезинтеграции. Высокотемпературный механизм разрушения реализуется в виде плавления и испарения минерализованных вмещающих пород 6 с образованием щелей 5. Низкотемпературные

процессы происходят в области температур упруго-хрупкого состояния породы на стадиях нагрева и охлаждения с образованием и развитием трещин 8 в минерализованных вмещающих породах 6. Для повышения эффективности лазерного разрушения в зону воздействия через форсунки 9 под давлением подается газожидкостная струя для удаления разрушенных (расплавленных) минерализованных вмещающих пород, охлаждения и растрескивания пород в зонах лазерной обработки. Дезинтегрированные минерализованные вмеща-

ющие породы 6 в зонах лазерной обработки разрыхляются сдвоенной дисковой фрезой 2 на глубину разупрочнения горного массива с образованием обнаженных поверхностей 10 целика 11 тонкой рудной жилы 7 (рис. 2, б). Наличие у целика 11 обнаженных поверхностей 10 облегчает последующую отбойку ценной руды гидравлическим молотом 3. Отбитая ценная рудная масса сыпается в бункер горного комбайна.

Процессы дезинтеграции минерализованных вмещающих пород лазером, рыхления их сдвоенной фрезой и отбойки тонкой рудной жилы гидравлическим молотом осуществляются за один проход горного комбайна, затем комбайн возвращается в исходное положение и цикл выемки повторяется. После выемки тонкой рудной жилы на возможную по конструктивным параметрам горного комбайна глубину производится бурение и зарядание шпуров с последующим взрыванием минерализованных вмещающих пород для получения выработки необходимой ширины с целью размещения горного комбайна.

Заключение

Предлагаемая комбинированная технология позволяет вести термомеханическую высокоселективную выемку тонких рудных жил, сложенных прочными горными породами. Для обеспечения максимальной сохранности исходных качественных характеристик и исключения потерь ценного минерального сырья, сосредоточенного в тонкой рудной жиле, лазерное воздействие ведется за контурами жилы с дезинтеграцией минерализованных вмещающих пород и их последующим фрезированием с целью образования обнаженных поверхностей нижней части тонкой жилы. Наличие обнаженных поверхностей обеспечивает значительное повышение производительности работы гидравлического молота при отбойке руды тонкой жилы и снижение энергоемкости данного процесса. Дифференцированная высокоселективная разработка массива с применением рационального сочетания различных способов дезинтеграции горных пород

обеспечивает реализацию принципов ресурсосбережения и малоотходности горного производства. Раздельная переработка богатой рудной массы жилы и минерализованных вмещающих пород позволяет получить высокое общее извлечение металла из руд сложноструктурного массива и уменьшить затраты на переработку минерального сырья за счет исключения из технологической схемы процесса измельчения минерализованных вмещающих пород, направляемых на кучное выщелачивание.

Работа выполнена в рамках
Государственного задания ИГД ДВО РАН,
тема № 0293-2019-0002

ЛИТЕРАТУРА

1. Li M., Han B., Zhang S., Song L., He Q. // *Optic Laser Technology*. 2018. Vol. 106. P. 52.
2. Менжулин М. Г., Соколова Н. В. // ГИАБ. 2002. № 9. С. 82.
3. Чебан А. Ю., Хрунина Н. П., Леоненко Н. А. // *Прикладная физика*. 2014. № 5. С. 34.
4. Васильев М., Журба В., Митькин В., Романов В., Щепкин А. // *Фотоника*. 2013. № 1. С. 18.
5. Heng Y., Xiong K., Wang H., Duan X. // *Petroleum Science and Technology*. 2017. Vol. 35. № 10. P. 963.
6. Zhurba V. M., Kobilov I. M., Mit'kin V. M., Ivanov V. N. // *Journal of Optical Technology*. 2007. Vol. 74. № 8. P. 559.
7. Wang Y., Shi Y., Jiang J., Zhou G., Wang Z. // *Heat Mass Tran.* 2020. Vol. 56 № 1. P. 161.
8. Wignarajah S. Sugimoto K., Nagai K. / XV International Symposium on gas flow, chemical lasers and high-power lasers. Proc. SPIE. 2004. Vol. 5777. P. 829.
9. Журба В. М., Иванов В. Н., Кобилов И. М., Митькин В. М. // *Оптический журнал*. 2007. Т. 74. № 8. С. 61.
10. Гораши Ю. Ю. // ГИАБ. 2004. № 11. С. 154.
11. Рогизный В. Ф., Хромов В. М. // *Рациональное освоение недр*. 2019. № 2-3. С. 88.
12. Поздняков М. В., Михайлов Ю. В., Курбанмагомедов К. Д. // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2013. № 2. С. 52.
13. Лабутин В. Н. // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2016. Т. 3. № 2. С. 108.
14. Чебан А. Ю. // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2021. № 1. С. 261.
15. Герике П.Б., Герике Б.Л. // ГИАБ. 2012. № S2. С. 241.

Technology of development of thin ore bodies with preliminary laser disintegration of strong rocks

A. Yu. Cheban

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the RAS
51 Turgenev st., Khabarovsk, 680000, Russia
E-mail: chebanay@mail.ru

Received December 07, 2021

The article presents the results of cutting strong rocks with a powerful laser. A technical and technological solution is proposed for the selective mining of rich areas of thin ore veins from a strong rock mass using a mining combine equipped with a combined laser-mechanical equipment. Laser exposure is carried out behind the contours of a thin ore vein with the disintegration of mineralized host rocks and their subsequent milling in order to form exposed surfaces in the lower part of the thin vein for subsequent breaking off of the ore with a hydraulic hammer. Differentiated development of the massif using a rational combination of various methods of disintegration of strong rocks ensures the implementation of the principles of resource conservation in mining.

Keywords: valuable mineral raw materials, laser disintegration of rocks, selective mining, mining combine, combined working equipment.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-64-69

REFERENCES

1. M. Li, B. Han, S. Zhang, L. Song, and Q. He, *Optic Laser Technology* **106**, 52 (2018).
2. M. G. Menzhulin, and N. V. Sokolova, *Mining inform. and analyt. bull.*, No. 9, 82 (2002).
3. A. Yu. Cheban, N. P. Khrunina, and N. A. Leonenko, *Applied Physics*, No. 5, 34 (2014) [in Russian].
4. M. Vasiliev, V. Zhurba, V. Mitkin, V. Romanov, and A. Schepkin, *Photonics*, No. 1, 18 (2013).
5. Y. Heng, K. Xiong, H. Wang, and X. Duan, *Petroleum Science and Technology* **35** (10), 963 (2017).
6. V. M. Zhurba, I. M. Kobilov, V. M. Mit'kin, and V. N. Ivanov, *Journal of Optical Technology* **74** (8), 559 (2007).
7. Y. Wang, Y. Shi, J. Jiang, G. Zhou, and Z. Wang, *Heat Mass Tran.* **56** (1), 161 (2020).
8. S. Wignarajah, K. Sugimoto, and K. Nagai, XV International Symposium on gas flow, chemical lasers and high-power lasers. *Proc. SPIE*, **5777**, 829 (2004).
9. V. M. Zhurba, V. N. Ivanov, I. M. Kobilov, and V. M. Mitkin, *Optical journal* **74** (8), 61 (2007).
10. Yu. Yu. Gorash, *Mining inform. and analyt. bull.*, No. 11, 154 (2004).
11. V. F. Rogiznyy and V. M. Khromov, *Mineral mining & conservation*, No. 2-3, 88 (2019).
12. M. V. Pozdnjakov, Ju. V. Mihajlov, and K. D. Kurbanmagomedov, *Journal Newsletter Of North-Caucasus State Technical University*, No. 2, 52 (2013).
13. V. N. Labutin, *Fundamental And Applied Issues Of Mining Sciences* **3** (2), 108 (2016).
14. A. Yu. Cheban, *Izvestiya Tula State University Earth Science Series. Earth sciences*, No. 1, 261 (2021).
15. P. B. Guericke and B. L. Guericke, *Mining inform. and analyt. bull.*, No. S2, 241 (2012).