

¹ Національний транспортний університет, Київ, Україна

ОЦІНКА НЕДОЛІКІВ ПРОВЕДЕННЯ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ В РІЗНИХ ГІРСЬКИХ МАСИВАХ

A. Lapchenko¹ <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>

¹ National Transport University, Kyiv, Ukraine

DISADVANTAGES'S EVALUATION OF DRILLING AND BLASTING WORKS IN VARIOUS ROCK

Мета. Полягає в оцінці параметрів дефектів які виникають в навколо контурному масиві тунельної виробки при проведенні буровибухових робіт в різних ґрунтах та гірських масивах на основі практичного досвіду і реальних об'єктів будівництва тунелів.

Методика. Застосовувалась комплексна методика дослідження на основі виробничих даних оцінки впливу буровибухових робіт в різних ґрунтах та гірських масивах на контур виробки, що включає метод наукового узагальнення і аналізу, а також експертну оцінку дослідних об'єктів. Комплексна методика проведена на основі вітчизняних і міжнародних об'єктів тунелебудування, включно з метробудуванням.

Результати. За результатами наведених досліджень шорсткість та тріщинуватість після вибухів показали тенденцію зниження в міру оптимізації схеми зарядження. Зона найбільшої шорсткості спостерігалась в арковій частині виробки. Наведено дані досліджень щодо витрат бетону в залежності від шорсткості поверхні контуру виробки. За цими залежностями може бути оцінено витрату бетону залежно від шорсткості поверхні контуру виробки. На основі проведених досліджень зроблено висновок про можливість досягнення високої якості вибухових робіт лише на основі комплексної інтеграції: геологічних даних, проектної схеми, технології заряджання, моніторингу та корекційних заходів.

Наукова новизна. Встановлені залежності тріщинуватості гірського масиву, максимальної шорсткості навколо контурного масиву та додаткових витрат бетону після проведеного вибуху від існуючої тріщинуватості гірського масиву перед вибухом в залежності від виду ґрунту або гірської породи. Для різних видів ґрунтів та гірських порід побудовано узагальнені криві залежностей тріщинуватості гірського масиву, максимальної шорсткості навколо контурного масиву та додаткових витрат бетону від існуючої тріщинуватості гірського масиву перед вибухом, що може бути використано в якості експрес-методу.

Практична значимість. На основі отриманих закономірностей можна проводити контроль за технологічною дисципліною при проведенні буровибухових робіт та оперативно змінювати параметри буровибухових робіт для досягнення конкретної величини розглянутого потрібного параметру.

Ключові слова: буровибухові роботи, витрата бетону, гірський масив, контурна виробка, тріщинуватість, тунель, шорсткість.

Вступ. Серед ключових факторів причин порушення контуру виробки майбутнього тунелю відносно проектного положення виділяють: структурні (наявність слабких прошарків, тріщин, нашарувань між тріщинами) [1], техно-

логія буровибухових робіт (схема свердловин, заряджання, порядок детонації) [2], ступінь пошкодження навколоконтурної виробки під час вибуху [3]. В [1] показано що наявність товстих слабких прошарків призводить до формування перебору в зоні склепіння. Мінімізації переборів може сприяти комбінація контурних та відбійних зарядів з зменшеними інтервалами детонації [2]. Дослідження [3] показало, що максимальна горизонтальна радіальна компонента вібрації у тунелі з «м'якою» породою більша за вертикальну, що у випадку контролю контуру означає необхідність враховувати зону ушкоджень навколо виробки, яка впливає на фактичну винесену гірську породу. Не зважаючи на доцільність і глибину вище наведених досліджень [1–3] вони розглядають по одному виду гірської породи і не носять системний характер стосовно різновиду гірських порід та ґрунтів.

В статті [4] показано, що застосування контурних зарядів дозволяє зменшити глибину руйнування до 0,25 м проти 0,5 м при стандартному підході. Такі дослідження лише підтверджують наявні результати [5] позитивного застосування контурних зарядів. До того ж доречним буде навести граничне відхилення перебору ґрунту при буровибуховому способі розробки тунелю, яке згідно ДБН В.2.3-7 [6] становить до 10 см. Причому недобори не дозволяються взагалі, а перебори лише в встановлених вище межах. Як показано в [7], це призводить до збільшення об'єму кріплення, погіршення стійкості виробки, збільшення витрат.

Обчислювальне прогнозування тріщин у гірській породі, викликаних вибуховим навантаженням, за допомогою методу скінчених елементів показано в роботі [8]. Науковий підхід з використання методу дискретних елементів використовується для моделювання розвитку тріщини в тріщинуватому твердому тілі [8–12]. Для аналізу вибухових робіт у тунелях в останніх наукових дослідженнях поєднується два обумовлені методи [13, 14].

Проте застосування методу скінчених елементів залишається трудомістким, не зважаючи на часткові спрощення при його поєднанні з методом дискретних елементів, та створює численні проблеми через складність обчислення виникнення та поширення кількох тріщин. Складність проблеми зростає, якщо враховувати вплив тиску газу, що діє всередині тріщин [8, 9].

Основна частина. Метою дослідження – є оцінка параметрів дефектів які виникають в навколо контурному масиві тунельної виробки при проведенні буровибухових робіт в різних ґрунтах та гірських масивах на основі практичного досвіду. Контроль рівності контуру після вибуху розглядається на основі досвіду реальних прикладів будівництва тунелів з метою представити методи контролю та рекомендації для підвищення якості. Методика досліджень передбачала використання вітчизняних і міжнародних досліджень щодо вибухового впливу на контур виробки. При обробці інформації щодо умов будівництва тунелю вибухом враховувались наступні фактори: тип гірської породи, текстура гірського масиву, форма виробки, метод буровибухових робіт, схема заряджання, геодезичні або інші вимірювання після вибуху.

Під час дослідження впливу вибуху на параметри шорсткості та тріщинуватості масиву було проаналізовано стан даного питання в тунелебудуванні, включно з метробудуванням [1–5, 8, 13, 14, 16, 17], зокрема при будівництві Бескидського тунелю, Центрально-Заводської лінії метрополітену. Певна кількість публікацій вказують на перевитрату бетону при виконанні оправи. Зокрема, при прохідці 1 п.м. виробки середнього поперечного перерізу перевитрати бетону становили 2–5 м³.

Спершу було проведено аналіз результатів щодо впливу дії вибуху на тріщинуватість та шорсткість контурної виробки. Вплив дії вибуху на тріщинуватість гірського масиву наведено на рис. 1. Вплив вибуху в залежностях наведених на рис. 1 враховано масою заряду шпура. Оцінка впливу вибуху була виконана для різних видів масиву ґрунтів і побудована для допустимої висоти нерівності, яка враховувала суму максимумів перепаду по недобору та перебору.

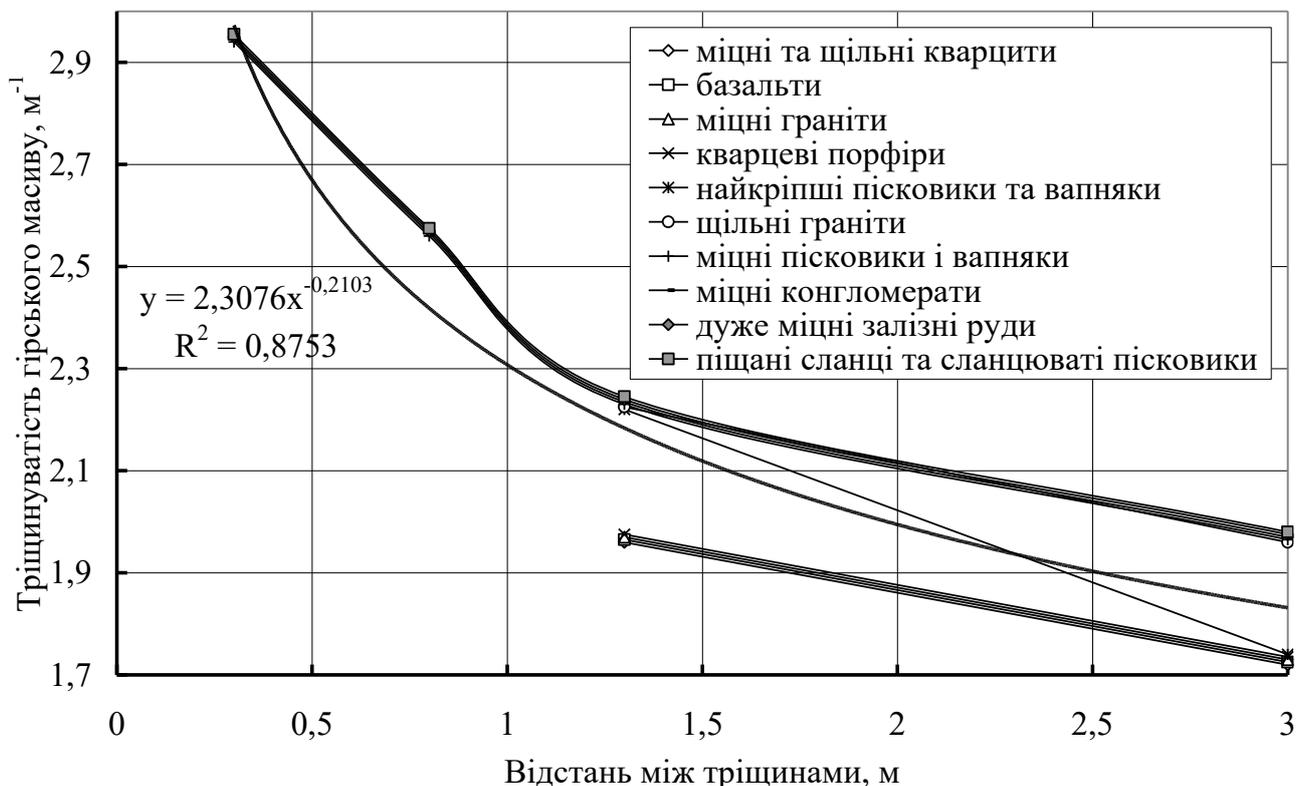


Рис. 1. Залежність тріщинуватості гірського масиву (T , м⁻¹) від відстані між тріщинами (l , м)

Важливу роль в формуванні витрат ресурсів грає шорсткість контуру тунельної виробки, яку оцінюють висотою виступів або впадин. Вплив дії вибуху на максимально можливу висоту нерівності на поверхні контуру виробки наведено на рис. 2. У відповідності до рис. 2 на шорсткість поверхні контуру тунельної виробки після вибуху впливає будова гірського масиву та його тріщинуватість.

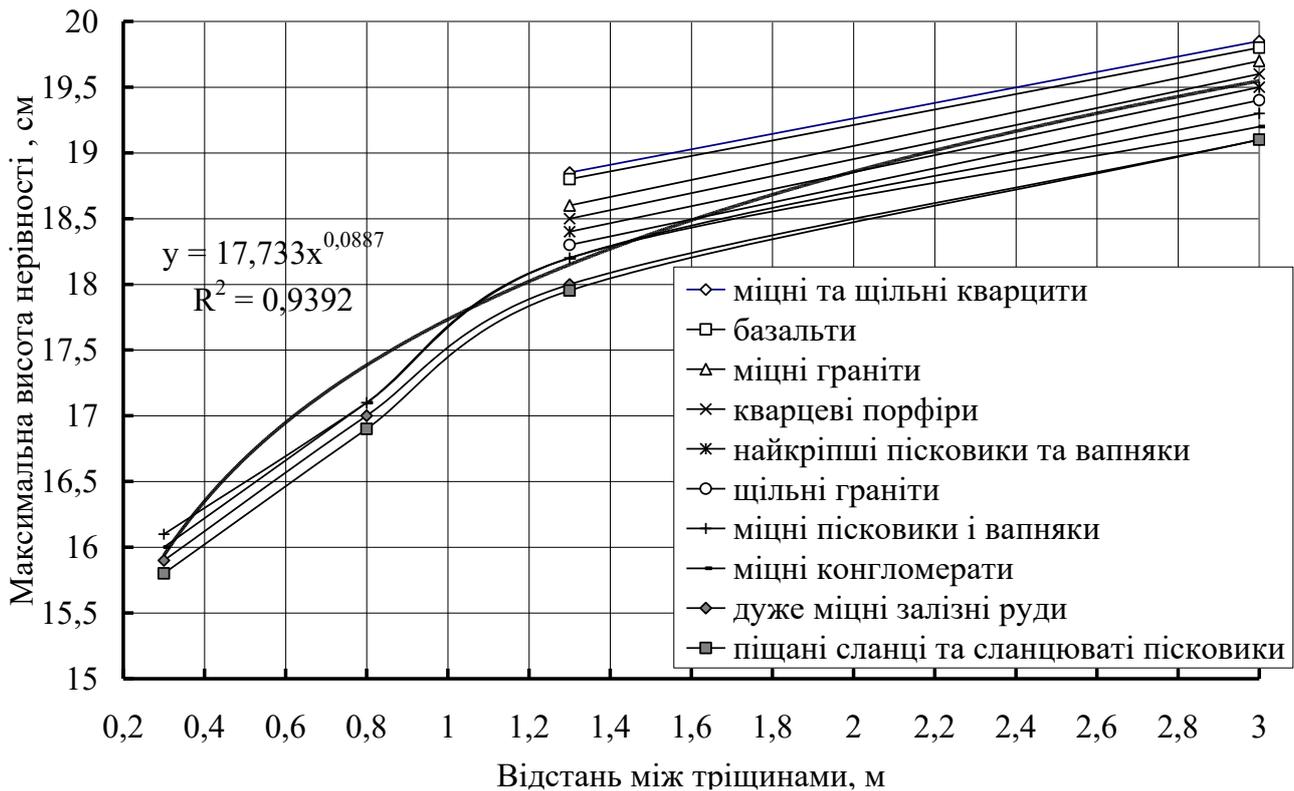


Рис. 2. Залежність максимальної висоти нерівності (h , см) на поверхні контуру виробки від відстані між тріщинами (l , м)

За результатами спостережень (див. рис. 1, 2) шорсткість та тріщинуватість після вибухів показали тенденцію зниження в міру оптимізації схеми зарядження. Зона найбільшої шорсткості спостерігалась в арковій частині виробки, що узгоджується з теорією ушкоджень в арковій зоні [15]. Аналіз також показав, що застосування контурних зарядів зменшує шорсткість мінімум в 2 рази. Зменшення тріщиностійкості за рахунок зменшення величини одиночного відбійного заряду пояснюється зниженням рівня вібрацій та пошкоджень навколо контурного масиву [3, 7]. Таким чином, результати дослідження підтверджують підвищення рівності контуру, коли застосовується технологія зарядження, що враховує геомеханічні характеристики навколоконтурного масиву.

На рис. 3 наведено дані щодо перевитрат бетону в залежності від шорсткості поверхні контуру виробки. За цими залежностями може бути оцінено перевитрату бетону залежно від шорсткості поверхні контура виробки.

На основі отриманих закономірностей, представлених на рис. 1–3 можна дати прогнозовану оцінку тріщинуватості навколо контурного масиву, оцінити висоту виступів або впадин контурної виробки, розрахувати потрібні перевитрати бетонної суміші, проводити контроль за технологічною дисципліною при проведенні буровибухових робіт, оперативно змінювати параметри буровибухових робіт для досягнення конкретної величини розглянутого потрібного параметру, надавати перевагу заощадливим параметрам буровибухових робіт при яких забезпечується можливість використання найменш трудомістких і матеріаловитратних типів контурного кріплення або відсутності такого.

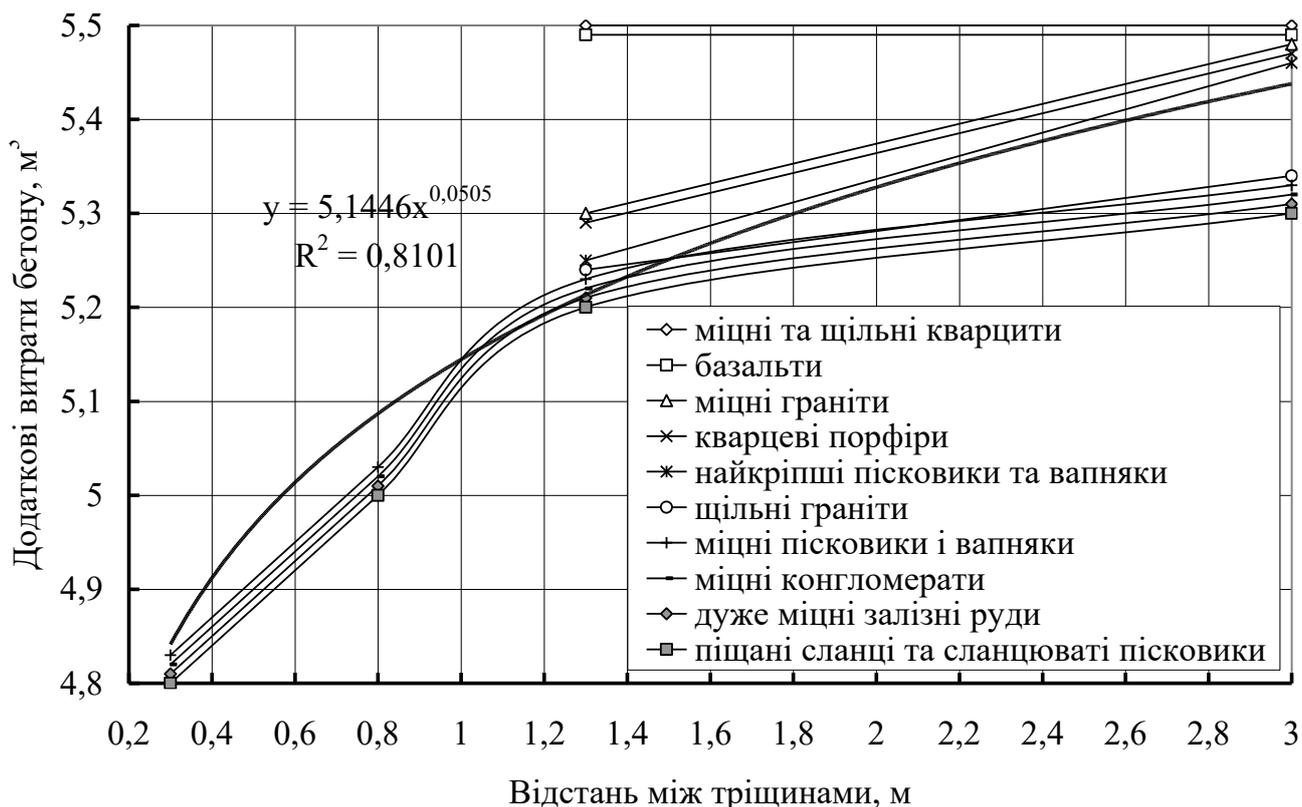


Рис. 3. Залежність додаткових витрат бетону (V , m^3) від відстані між тріщинами (l , m)

За залежностями отриманими з рис. 1–3 можна робити експрес оцінку щодо тріщинуватості гірського масиву, максимальної висоти нерівності контуру виробки та додаткових витрат бетону залежно від відстані між тріщинами, що оцінювались на передодні вибуху. Ця залежність наведена жирною чорною лінією (див. рис. 1–3), що об'єднує різні види гірських порід під єдину залежність.

Результати отриманих даних дозволяють сформулювати рекомендації та методи покращення рівності контуру виробки: перед виконанням вибуху завжди потрібно проводити детальне геологічне обстеження (виявляти слабкі прошарки, тріщинуватості); розробляти схему заряджання з фокусом на відбійні снаряди та зменшення одиночного заряду на контурі виробки; використовувати сучасні точніші методи вимірювання після вибуху (лазерне сканування, 3D моделювання перерізу); впроваджувати систему контролю вібрацій та деформацій навколо контурного масиву, зокрема в зоні склепіння; застосовувати коригування на місці (ліквідація недоборів, ручне або механічне доочищення); ведення обліку з накопиченням даних результатів вибухів і фактичних недоборів чи переборів для корекції наступних етапів вибуху; підвищення якості виконання робіт за рахунок систематичного навчання персоналу новим передовим розробкам і впровадженням проведення вибухових робіт.

Висновки. Рівність контуру виробки після вибуху є важливим параметром якості тунельного будівництва, який впливає на стійкість виробки, витрати на кріплення та безпеку. За результатами наведених досліджень шорсткість та тріщинуватість після вибухів показали тенденцію зниження в міру оптимізації

схеми зарядження. Зона найбільшої шорсткості спостерігалась в арковій частині виробки. В статті наведено залежності шорсткості контуру виробки, тріщинуватості гірського масиву та додаткових витрат бетону в залежності від відстані між тріщинами, що оцінені до проведення вибуху. Ці залежності враховують різні ґрунти та види гірських порід. Такий прогноз можна виконувати в якості експрес-методу. Аналізуючи практичний досвід, встановлено, що застосування контурного заряду з урахуванням геомеханічних умов дозволяє суттєво знизити шорсткість контурної виробки за рахунок зменшення недоборів та глибини ушкоджених зон. Методика контролю фактичного контуру виробки лазерним скануванням або геодезичними вимірюваннями є ефективним інструментом для верифікації якості вибуху. Для досягнення високої якості потрібна комплексна інтеграція: геологічні дані, проектна схема, технологія заряджання, моніторинг та корекційні заходи. Для своєчасної корекції вибухових робіт необхідне впровадження цифрових систем моніторингу і аналізу даних з метою пришвидшення обробки даних.

Перелік посилань

1. Lei, M., He, R., Liu, L., Sun, N., Qin, G., & Zhang, Y. (2022). Mechanical Mechanism and Shaping Effect of Tunnel Blasting Construction in Rock with Weak Interlayer. *Sustainability*, 14(20), 13278. <https://doi.org/10.3390/su142013278>
2. Zhang, Y., Zhou, J., Li, J., He, B., Armaghani, D. J., & Huang, S. (2025). Advancing overbreak prediction in drilling and blasting tunnel using MVO, SSA and HHO-based SVM models with interpretability analysis. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00963-1>
3. Shi Jian-Jun , Guo Shu-Cheng , Zhang Wei (2022) Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science*. 10, 889504. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504>
4. Imashev, A., Mussin, A., & Adoko, A. C. (2024). Investigating an Enhanced Contour Blasting Technique Considering Rock Mass Structural Properties. *Applied Sciences*, 14(23), 11461. <https://doi.org/10.3390/app142311461>
5. Айвазов, Ю.М. (2005). *Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів. Ч.1.* НТУ, Київ.
6. *ДБН В.2.3-7:2018 Метрополітени. Основні положення.* (2018). Київ.
7. Cao, H., Wang, D., Guo, J., Zhang, Q., & Wu, T. (2024). Blasting safety criterion of existing high speed railway tunnel over tunnel. *Journal of Vibroengineering*, 26(7), 1670–1685. <https://doi.org/10.21595/jve.2024.24186>
8. Löhner, R. (2001). *Applied CFD Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods* (2nd ed.). J. Wiley and Sons, Chichester.
9. Labra, C., Rojek, J., Oñate, E. et al. (2008). Advances in discrete element modelling of underground excavations. *Acta Geotech.* 3, 317–322. <https://doi.org/10.1007/s11440-008-0071-2>
10. Onate, E., Labra, C., Zarate, F., Rojek, J., & Miquel, J. (2005). Avances en el desarrollo de los métodos de elementos discretos y de elementos finitos para el análisis de problemas de fractura. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 22, 27–34. https://researchgate.net/publication/238567500_Avances_en_el_desarrollo_de_los_metodos_de_elementos_discretos_y_de_elementos_finitos_para_el_analisis_de_problemas_de_fractura
11. Onate, E., & Rojek, J. (2004). Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(27–29), 3087–3128. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.12.056>

12. Oñate, E., Zárate, F., Miquel, J. *et al.* (2015). A local constitutive model for the discrete element method. Application to geomaterials and concrete. *Comp. Part. Mech.*, 2, 139–160. <https://doi.org/10.1007/s40571-015-0044-9>
13. Zárate, F., Gonzalez, J. M., Miquel, J., Löhner, R., & Oñate, E. (2018). A coupled fluid FEM-DEM technique for predicting blasting operations in tunnels. *Underground Space*, 3(4), 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.002>
14. Zarate, F., Cornejo, A., & Onate, E. (2018). A three dimensional FEM DEM technique for predicting the evolution of fracture in geomaterials and concrete. *Computational Particle Mechanics*, 3(5), 411–420. <https://doi.org/10.1007/s40571-017-0178-z>
15. Zhang, J., Li, M., & Yang, X. (2017). Analysis and optimization of mutual influence of single channel tunnel construction blasting. *Vibroengineering Procedia*, 11, 79–84. <https://doi.org/10.21595/vp.2017.18464>
16. Akdag, S., Karakus, M., Nguyen, G. D., Taheri, A., & Bruning, T. (2021). Evaluation of the propensity of strain burst in brittle granite based on post-peak energy analysis. *Underground Space*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.08.002>
17. Yi, C. P., Nordlund, E., Zhang, P., Warema, S., & Shirzadegan, S. (2021). Numerical modeling for a simulated rockburst experiment using LS-DYNA. *Underground Space*, 6(2), 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.11.002>

ABSTRACT

Purpose. To assess the parameters of defects that arise in the surrounding contour massif of the tunnel excavation during drilling and blasting operations in various soils and rock masses based on practical experience and real tunnel construction sites.

Methodology. The comprehensive research methodology was applied based on production data to assess the impact of drilling and blasting operations in various soils and rock masses on the tunnel contour, which includes the method of scientific generalization and analysis, as well as expert assessment of research objects. The comprehensive methodology was carried out on the basis of domestic and international tunnel construction projects, including metro construction.

Results. According to the results of the above studies, the roughness and cracking after blasting showed a tendency to decrease as the charging scheme was optimized. The zone of greatest roughness was observed in the arched part of the working. Research data on concrete consumption depending on the roughness of the surface of the excavation contour are presented. Based on these dependencies, concrete consumption depending on the roughness of the surface of the excavation contour can be estimated. Research data on concrete consumption depending on the roughness of the tunnel contour's surface are presented. Based on these dependencies, concrete consumption depending on the roughness of the surface of the tunnel contour can be estimated. Based on these dependencies, the concrete consumption can be estimated depending on the surface roughness of the tunnel contour. Based on the conducted research, it was concluded that it is possible to achieve high quality blasting work only on the basis of comprehensive integration: geological data, design scheme, charging technology, monitoring and corrective measures.

The originality. The dependences of the rock massif's fracturing, the maximum roughness around the contour massif, and the additional concrete consumption after the blasting on the existing fracturing of the rock massif before the blasting, depending on the type of soil or rock, have been established. For different types of soils and rocks, generalized curves of the dependence's the rock massif fracturing, the maximum roughness around the contour massif, and the additional concrete consumption on the existing fracturing of the rock massif before the blasting were constructed, which can be used as an express method.

Practical implementation. Based on the obtained patterns, it is possible to monitor technological discipline during drilling and blasting operations and promptly change the parameters of drilling and blasting operations to achieve the desired parameter's specific value under consideration.

Keywords: *drilling and blasting, concrete consumption, rock massif, contour mining, fracturing, tunnel, roughness.*

дата першого надходження статті до видання	03.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	07.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025