

УДК 624.046.5:622.012

В. В. ХВОРОСТ, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

**АНАЛІЗ МІЦНОСТІ І НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ  
РАЦІОНАЛЬНИХ ПРОФІЛІВ МЕТАЛЕВОГО ШАХТНОГО КРІПЛЕННЯ**

Виконано аналіз раціональних профілів металевого шахтного кріплення в складних геологічних умовах.

Постійне збільшення глибини розробки в Кривбасі супроводжується ускладненням умов ведення гірничих робіт і зростанням загальної протяжності мережі гірських виробок. В даний час однієї з головних завдань вдосконалення підземної розробки корисних копалин є створення ефективних засобів і способів збереження стійкості гірничих виробок, а також зниження витрат на їх підтримку. Незадовільний стан гірничих виробок ускладнює роботу шахтного транспорту, провітрювання очисних і підготовчих вибоїв, веде до збільшення чисельності робітників, зайнятих на роботах з підтримання виробок, що в кінцевому підсумку знижує техніко-економічні показники роботи шахти. Широке застосування металевого кріплення висуває підвищені вимоги по обґрунтуванню розрахунків паспортів кріплення, які повинні забезпечувати не тільки безремонтне підтримання виробок, а й економне витрачання дефіцитного металу. Тому очевидно, що подальше зниження матеріальних і трудових витрат на підтримку підготовчих виробок може бути досягнуто за рахунок вдосконалення конструкцій кріплень і методів їх проектування. Збільшення несучої здатності кріплення особливо важливо для забезпечення безпеки робіт у шахті. Несуча здатність кріплення залежить від форми і виду кріплення, від величини і форми профілю, а також від матеріалу, з якого виготовлене кріплення, і стабільної роботи вузлів піддатливості [7].

Головним недоліком кріплень з тонкостінних прокатних елементів відкритого профілю є їх низький опір крученню і дії просторових навантажень, що викликають складний вигин [7]. Втрата несучої здатності металевого кріплення часто відбувається до вичерпання її податливості внаслідок просторової гнучко-крутильної деформації елементів кріплення. Тому завдання створення раціональних профілів сталевих кріплень, особливо для виробок, що підтримуються в складних умовах, продовжує залишатися актуальною.

У вітчизняній практиці застосовують такі металеві кріплення: арочні, кільцеві й трапецієподібні податливі кріплення, арочні, кільцеві й трапецієподібні шарнірні жорсткі кріплення.

Розглянемо також характеристики вітчизняних профілів КГВ і ПВ (рис. 1), що впроваджені нині.

На думку авторів профілю КГВ [6] маса цих профілів при декілька великих статичних показниках на 2,7 - 4,5% нижче маси відповідних типорозмірів СВП.

З урахуванням розподілу профілів за типорозмірами середня по всьому параметричного ряду зниження маси профілів КГВ по відношенню до профілів СВП становить 3,5%.

Автори профілю КГВ не врахували показники, що характеризують опір профілю крученню. Були визначені геометрична жорсткість при крученні  $I_e$  і момент опору при крученні  $W_e$  профілю КГВ 21 [7]. Ці параметри відповідно на 25 і 11% менше подібних параметрів профілю СВП 22. Таким чином, в профілі КГВ посилюється головний недолік, властивостей серійного профілем СВП - низький опір крученню.

Розміри профілю ПВ 22 практично збігаються з розмірами профілю КГВ 21 (рис. 1), а лінійна маса профілів відрізняється всього на 2,7%. Таким чином для профілю ПВ характерно слабкий опір крученню. Всі інші розрахункові параметри профілю ПВ теж поступаються відповідним параметрам базового профілю СВП і КГВ [7].

Прискорене широке впровадження профілю ПВ не має наукового обґрунтування. Головною перевагою профілю ПВ його автори вважають застосування високоміцної сталі з гарантованим межею текучості  $45 \text{ кг/мм}^2$ , однак, застосування високоякісної сталі корисно для будь-якого профілю, а ефективність застосування залежить від збігу градації розрахункових параметрів профілю з відмінністю в міцності обраних сталей. Тому використовувати сталь з

гарантованим межею плинності 45 кг/мм<sup>2</sup> більш вигідно для серійного профілю СВП і профілю КГВ, ніж для профілю ПВ.

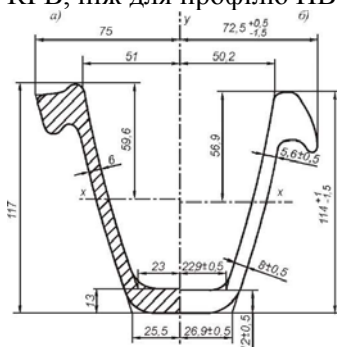


Рис. 1. Поперечні перерізи профілів: а) КГВ 21 (ДонУ-ГІ), б) ПВ 22 (ІГД А.А. Скочинського)

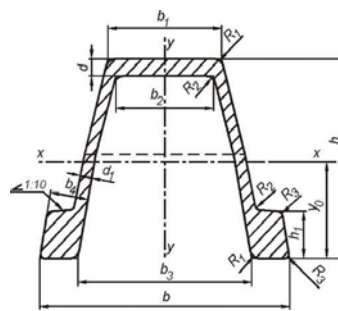


Рис. 2. Спеціальний взаємозамінний профіль (СВП)

У даний час для виготовлення металевих рамних кріплень застосовується, головним чином, лотковий профіль прокату СВП (спеціальний взаємозамінний профіль) (рис. 2) з гарячекатаної сталі марки Ст 5 або низьколегованих сталей. Випускаються профілі шести типорозмірів: 14, 17, 19, 22, 27 і 33 кг/м.

Профілі СВП служать в більшості випадків для виготовлення арочних і кільцевих кріплень податливої конструкції. Ці профілі мають приблизно однакові моменти опору згину в обох головних площинах, що забезпечує їм підвищений опір згину з площини рами. Однак, лоткові профілі, як тонкостінні стержні, характерні тим, що в них внаслідок складного згину і кручення виникають дотичні напруження, що мають той же порядок величин, як і нормальні напруження.

Аналітичні дослідження, підтвержені експериментально, показали, що слабкий опір кріплень з спецпрофілю крутінню при складних просторових навантаженнях призводить до великих переміщень контуру кріплення [7]. При цьому нормальні напруження збільшуються на 30% порівняно з плоскою розрахунковою схемою, а максимальні дотичні напруження вільного кручення часто є причиною втрати несучої здатності кріплення. Було встановлено, що головною причиною втрати несучої здатності металевого кріплення з тонкостінних елементів відкритого профілю є недостатня крутильна жорсткість. Встановлено також, що підвищення несучої здатності за рахунок збільшення моменту опору згину з площини кріплення не дає відчутного ефекту і призводить до невиправданого збільшення витрати металу [1].

Доцільним напрямом вдосконалення металевих кріплень для важких гірничо-геологічних умов слід вважати різке збільшення їх опору крученню, а також підвищення відношення моменту опору згину в площині дії основного навантаження (у площині кріплення) до моменту опору при згині з цієї площини.

У роботі [2] зроблено аналіз за допомогою ЕОМ напруженого стану кріплення з спецпрофілю при можливих поєднаннях навантажень. У результаті аналізу встановлено, що для криволінійних елементів кріплення раціональні величини моментів опору в площині кривизни  $W_x$ , з площини кривизни  $W_y$ , і крученні  $W_k$  повинні задовольнити наступним співвідношенням

$$W_y = \frac{83W_x}{R}, \quad W_k = \frac{32W_y}{R}, \quad (1)$$

де  $R$  - радіус кривизни елемента кріплення, см.

Так, для кільцевого кріплення діаметром 3 м  $W_y=0,533W_x$ ,  $W_k=0,213W_y$  або  $W_x/W_y=1,8$ ,  $W_x/W_k=4,7$ .

Ці відносини не враховують вплив бічного випучування кріплення при втраті стійкості з її площини. У роботі [3] отримано співвідношення, що враховує це явище

$$4[\sigma]W_x R \leq \frac{9EI_y}{\eta_y(4GI_k + EI_y)}. \quad (2)$$

де  $[\sigma]$  - допустиме напруження;  $EI_y$  - жорсткість кріплення при згині з її площини;  $4GI_k$  - жорсткість кріплення при крученні;  $\eta_y$  - коефіцієнт запасу стійкості.

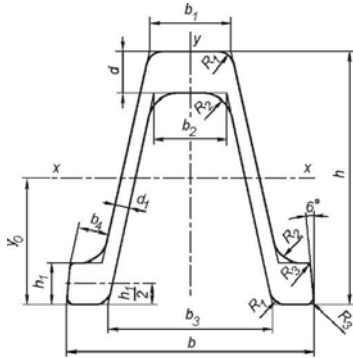
Автор [7] стверджує, що характеристики профілів СВП не відповідають співвідношенням (1) та (2). Наприклад, для кільцевої кріплення діаметром 3 м з спецпрофілю СВП 17, що має  $W_x=50,3$  см<sup>3</sup>,  $W_y=57,9$  см<sup>3</sup> і  $W_k=5,88$  см<sup>3</sup>, необхідний  $W_y=27,44$  см<sup>3</sup>, необхідна величина

$$W_k = 10,7 \text{ см}^3.$$

Таким чином, спецпрофіль має завищений в 2,11 рази опір згину з площини кривизни, а його опір крученню в 1,8 рази менше необхідної величини. Крім того, конфігурація профілів СВП не забезпечує контактування з'єднувальних елементів по всій площі стінок і фланців. Розміри профілів СВП не допускають сполучення елементів кріплення різної лінійної маси.

У зв'язку з цим розроблено новий уніфікований лотковий шахтний профіль СВПУ (спеціальний взаємозамінний профіль уніфікований) (рис. 3), що відрізняється підвищеним опором крутінню і згину в головній площині [7].

Рис. 3. Спеціальний взаємозамінний профіль уніфікований (СВПУ)



Профіль має дванадцять типорозмірів: 14а, 16а, 17б, 18а, 19б, 21а, 22б, 26а, 27б, 27в, 32а, 33б кг/м. Профілі, відмічені індексами "б" і "в" більш технологічні у виготовленні. Усі профілі розроблені ТулГУ спільно з концерном "Кузнецкуголь" і Західно-Сибірським металургійним комбінатом [7].

Для оцінки ефективності застосування профілів СВПУ знайдені всі необхідні геометричні характеристики поперечних перерізів цих профілів [7]. Геометричні характеристики перерізів профілів СВПУ одинадцяти типорозмірів представлені в роботі [7].

З діаграм (рис. 4,5,6) видно, що за всіма розрахунковими параметрами профілі СВПУ перевершують сучасні вітчизняні та зарубіжні профілі. Так, при розрахунку за допустимим напруженням коефіцієнти використання несучої здатності матеріалу при згині в площині кріплення  $W_x/G$  профілів СВПУ: 14а, 17б, 19б, 22б, 27б і 33б більше аналогічних коефіцієнтів профілів СВП: 14, 17, 19, 27 і 33 на 11,2-14,4% (рис. 4); одночасно коефіцієнти використання несучої здатності при крученні  $W_k/G$  профілів СВПУ більше на 18,3-48,4% (рис. 5).

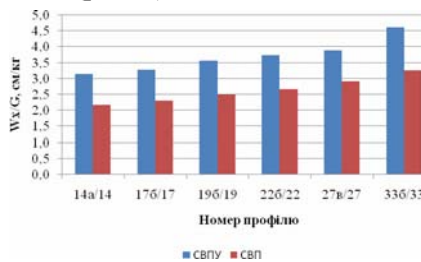


Рис. 4. Діаграма порівняння коефіцієнтів використання несучої здатності матеріалу при згині в площині кріплення  $W_x/G$

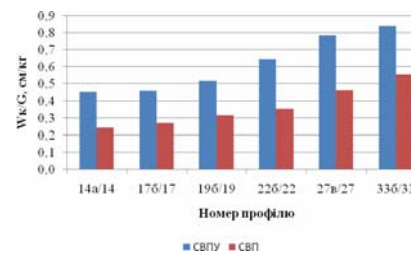


Рис. 5. Діаграма порівняння коефіцієнтів використання несучої здатності матеріалу при крученні  $W_k/G$

Кріплення підготовчих виробок працює в особливих умовах, коли не можна точно визначити величину і напрямок діючого навантаження. Тому при виборі профілю необхідно оцінити його несучу здатність на ділянці пластичних деформацій і розраховувати кріплення за граничним станом. У цьому випадку коефіцієнти використання несучої здатності матеріалу  $W_\delta/G$  профілю СВПУ: 14а, 17б, 19б, 22б, 27б і 33б більше порівнюваних коефіцієнтів профілів СВП: 14, 17, 19, 27 і 33 на 12,1-21,2% (рис. 6).

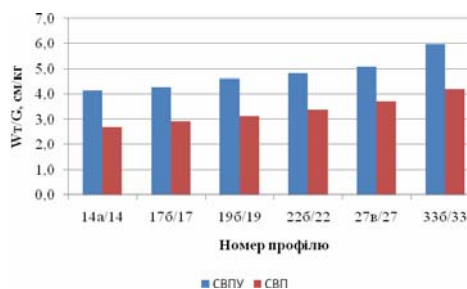


Рис. 6. Діаграма порівняння коефіцієнтів використання несучої здатності матеріалу за граничним станом  $W_\delta/G$

Збільшення коефіцієнта використання несучої здатності матеріалу еквівалентно зменшенню витрати спецпрофілю при кріпленні виробок. Геометрична жорсткість [7] при крутінні  $I_k$  профілів СВПУ: 14а, 17б, 19б, 22б, 27б і 33б більше жорсткості профілів СВП: 14, 17, 19, 27 і 33 на 30,5-64,7%.

Різке (у 1,3-1,7 рази) збільшення моментів інерції при крутінні  $I_k$  до кріплення з профілів СВПУ порівняно з кріпленням з профілів СВП гарантує додатковий економічний ефект за рахунок підвищення коефіцієнта повторного використання кріплення і має вирішальне значення для застосування високоякісної сталі. Застосування такої сталі дає великий економічний ефект. Це

доведено вченими ФРН ще в 1958 р. [4]. В роботі [7] на основі численних дослідів встановлено, що найбільш доцільно застосовувати високоміцні сталі з середнім межею текучості  $60 \text{ кг/мм}^2$ . В результаті застосування високоміцної сталі з межею текучості  $67 \text{ кг/мм}^2$  замість сталі з межею текучості  $24 \text{ кг/мм}^2$  конструктивна вага кріплення в багатьох випадках зменшувався на 50%, а ціна на 30%. Встановлено також, що збільшення межі текучості вище  $70 \text{ кг/мм}^2$  не економічно. Після досягнення цієї межі відношення: *вартість тонни/межа текучості* залишається постійним. Це стимулює застосування сталей високої міцності при одночасному переході до легких профілів. На основі досліджень [7] можуть бути визначені витрати на кріплення при застосуванні сталей різної міцності. Також передбачається, що при застосуванні більш міцних сталей несуча здатність профілю залишається незмінною, а його конструкція полегшується. зважаючи на те, що градація профілів по моментах опору не завжди збігається з різницею в міцності обраних сталей, досягається лише часткове зменшення витрат на придбання матеріалів, однак при застосуванні високоякісних сталей необхідно додатково враховувати наступні технічні та економічні переваги:

Невелика вага окремих елементів кріплення та пов'язане з цим полегшення транспортування, установки рам кріплення і зменшення витрат за цими статтями.

Для високоякісних сталей величина пружного допустимого навантаження, в порівнянні з величиною граничної несучої здатності, зростає, сприяючи зменшенню залишкової деформації матеріалу.

Більш висока несуча здатність і великий термін служби елементів кріплення зменшують кількість перекріплення виробок, а тим самим знижують експлуатаційні витрати, забезпечують більш легке вилучення рам і зменшують обсяг робіт, пов'язаних з випрямлення елементів кріплення перед їх повторним використанням.

Елементи кріплення з високоякісних, нормалізованих і поліпшених сталей можуть бути піддані виправленню у шахті в холодному вигляді. Таким чином, відпадає необхідність видавати металеве кріплення для ремонту в майстерню на поверхні.

У роботі [4] особливо наголошується, що на несучу здатність аркового кріплення впливає не тільки допустиме навантаження на вигин в її площині. Необхідно також враховувати зусилля при стисненні і згині з площини кріплення, а також скручувальне навантаження. У зв'язку з цим профілі, за застосовуються, незалежно від величини моменту опору і межі текучості, повинні мати певну площу перерізу і певний момент опору скручування. Якщо важкі профілі замінюють більш легкими, то шляхом підбору кращого матеріалу можна зберегти ту ж величину допустимого навантаження на вигин або навіть збільшити її. При цьому момент опору крученню і площа перерізу профілю зменшуються, в результаті чого збільшується небезпека руйнування внаслідок кручення. Це обмежує застосування дуже легких профілів з високоміцних матеріалів.

Для шахтних профілів прийнята достатньою межа текучості  $60 \text{ кг/мм}^2$ . Тільки у виняткових випадках (наприклад, в штреках з сильним тиском, коли ця межа текучості є недостатньою, а відстань між рамами не може бути зменшено) слід застосовувати сталь з більш високою межею текучості і міцності [7]. У теперішній час у ФРН застосовується кріплення без термічної обробки і термічно оброблена [5]. Термічно не оброблені кріплення мають межу міцності  $36 \text{ кг/мм}^2$ , а термічно оброблені -  $57 \text{ кг/мм}^2$ . Термічно оброблена кріплення допускає багаторазову правку її елементів при повторному багаторазовому використанні.

На підставі досвіду вчених ФРН вигідно замість сталі з межею текучості  $33 \text{ кг/мм}^2$ , з якої виготовляються профілі СВП, застосувати міцну сталь з межею плинності  $50 \text{ кг/мм}^2$ . У цьому випадку з урахуванням градації профілів по моменту опору [7] можна замінити профілі СВП: 14, 17, 19, 27 і 33 відповідно більш легкими профілями СВПУ: 14а, 17б, 19б, 27б і 33б, що призводить до зменшення маси профілів від 15,7 до 19,1%. Несуча здатність профілів СВПУ зі сталі з межею текучості  $50 \text{ кг/мм}^2$  більше несучої здатності профілів СВП зі сталі з межею текучості  $33 \text{ кг/мм}^2$ . Так, збільшення межі текучості в 1,52 рази для згинальних елементів кріплення з профілю СВПУ 27в, що має  $W_x=105 \text{ см}^3$ , еквівалентно збільшенню  $W_x$  в 1,52 рази. В результаті маємо  $W_x=105 \cdot 1,52=159,6 \text{ см}^3$ , що на 15,3 % більше моменту опору профілю СВП 33. Аналогічно для стиснених елементів кріплення розрахункова площа поперечного перерізу з профілю СВПУ 27б на 22,6 % більше площі перерізу профілю СВП 33. Це дозволяє збільшити відстань між рамами, що дає додаткову економію металу. Автор [7] стверджує, що застосування профілів СВПУ з високоміцної сталі дозволить економити не менше 20 % металу, але застосування такої сталі для серійного профілю СВП малоефективне через його слабкого опору крученню.

У роботі [7] відзначається, що профіль СВПУ перевершує вітчизняні та зарубіжні аналоги за всіма розрахунковими параметрами. Це дозволяє ефективно використовувати високоякісні сталі і економити більше 20 % металу при великому зниженні витрат на зарплату, металовироби, внутрішньовиробничий транспорт, що зменшуються з вагою профілів. Зменшується також кількість перекріплення виробок і збільшується термін служби елементів кріплення. Елементи кріплення з високоякісних сталей можуть бути піддані виправленню у шахті в холодному вигляді, що сприяє їх багаторазовому повторному використанню.

Таким чином використання раціональних профілів креслення призводить до зниження трудомісткості гірничих робіт, спрощення зведення аркового кріплення, а також до здешевлення робіт, тобто зниження собівартості однієї тонни видобутої залізної руди.

#### Список літератури

1. Каретников В.Н., Клейменов В.Б. Рациональный профиль элементов металлической крепи // Проектирование и строительство угольных предприятий, 1971. – № 8 (151). – С. 19.
2. Попов В.Л., Каретников В.Н., Еганов В.М. Расчет крепи подготовительных выработок на ЭВМ. - М.: Недра, 1978. - 230 с.
3. Каретников В.Н., Кпейшеное В.Б., Чижик А.С. Определение секториальных характеристик новых шахтных профилей//Механика подземных сооружений. - Тула: ТулГУ, 1995. - С. 51-60.
4. Несущая способность профилей и технико-экономическая эффективность их применения при креплении штреков. Пер. с нем. - М.: ЦИТИ уголь, пром-сти, 1958. -49 с.
5. Малиюков Ц.П., Белан Н.А., Тихонюк П.С. Механизация работ при проведении подготовительных выработок на шахтах ФРГ. Обзор. - М.: ЦНИЭИуголь, 1982. - 29 с.
6. Зигель Ф.С., Компанец В.Ф., Сытник А.А. Новые шахтные специальные профили для крепей горных выработок/Шахт. стр-во., 1988. -№ 10.-С. 15-17.
7. Залесский К.Е., Клейменов В.Б. Рациональные профили металлической шахтной крепи // Горный информационно-аналитический бюллетень: Сб. научн. тр. МГГУ, 2008. - №8. - С. 317-326.
8. Саммаль А. С. Оценка надежного состояния крепи горных выработок при действии вертикальной локальной нагрузки / А. С. Саммаль, О. А. Тормышева // Гірничий вісник Криворізький національний університет. – 2012. – Вип. 95(1). – С. 67-69.
9. Касьян Н. Н. Шахтные исследования особенностей деформирования и разрушения пород, вмещающих выработки с рамно-анкерной крепью / Н. Н. Касьян, Новиков А. О., И. Н. Шестопалов, В. И. Каменец // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – Вип. 95(1). – С. 31-35.
10. Калинин В. А. Исследование влияния параметров анкерной крепи на высоту выемочных ширеков / В. А. Калинин, И. А. Горбатенко // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – Вип. 95(1). – С. 183-186.
11. Петренко Ю. А. Равнорядная металлическая крепь / Ю. А. Петренко, А. О. Новиков, А. В. Резник, И Н Шестопалов // Вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – Вип. 32. – С. 219-222.
12. Петренко Ю. А. Равнорядная металлическая крепь направленной податливости / Ю. А. Петренко, А. О. Новиков, А. В. Резник, И Н Шестопалов // Вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – Вип. 31. – С. 38-41.
13. Андреев Б. М. Технологія проходки устя вертикального ствола із застосуванням способу опускного кріплення / Б. М. Андреев, О. М. Родько // Вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – Вип. 31. – С. 67-71.
14. Нестеренко О.С. Зміна форми поперечного перерізу склепистої частини камери та її кріплення / О. С. Нестеренко, І. М. Лихина // Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – Вип. 29. – С. 64-68.
15. Козарі В. Я. Обгрунтування конструктивних елементів кріплення гідравлічних підйомників для підвищення проходницького обладнання при спорудженні вертикальних стволів шахт / В. Я. Козарі, Т. В. Селін // Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – Вип. 29. – С. 87-90.
16. Сосновская Е. Л. Обоснование видов крепи горных выработок по выявленным закономерностям формирования тектонических структур / Е. Л. Сосновская, В. Е. Боликов, В. А. Вицинский, Л. И. Сосновский, А. М. Павлов, Л. Г. Рубцов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Вып. № 5. – С. 15-21.
17. Сыркин П. С., Мартыненко И. А., Данилкин М. С. Шахтное и подземное строительство. Технология строительства горизонтальных и наклонных выработок: Учеб. пособие/ Шахтинский ин-т ЮРГТУ. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. 403 с.
18. Рамные крепи горных выработок. (обзорная информация и справочные материалы) / Сытник А. А., Зигель Ф. С., Компанец В. Ф., Поляковский В. С.; Отв. за вып. Таранюк Г. В. - Донецк:ДонУГИ, 1992.
19. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизованных породах / Усаченко Б. М., Чередниченко В. П., Головачанский И. Е.; Отв. ред. Зорин А.Н.; АН УССР. Ин-т геотехнологической механики – Киев: Наук. думка, 1990. – 144с.
20. Широков А. П. Теория и практика применения анкерной крепи. - М.: Недра. 1981

Рукопис подано до редакції 28.10.13

УДК 622.062: 622.281

Д.В. БРОВКО, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© Бровко Д.В., 2014