

2. Бровко Д. В. Визначення відстані до сейсмічного явища в межах кар'єрного поля на основі звукометричних методів контролю / Д. В. Бровко, А. О. Романенко, В. Д. Сидоренко // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2022. – Вип. 54. – С. 178–183.
3. ДБН А.2.2-1:2021 Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС).
4. Медведєва О.О., Гальченко З.С. «Перспективи використання техногенно порушених земель гірничодобувних регіонів»/ О.О. Медведєва, З.С. Гальченко// Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, 17 с. XX Міжнародної науково-технічної конференції «Потураївські читання».
5. Мар'єнков М.Г., Бабік К.М., Глуховський В.П., Самойленко С.М. Особливості науково-технічного супроводу об'єктів будівництва в сейсмічних районах на етапах будівництва та експлуатації/ М.Г. Мар'єнков, К.М. Бабік, В.П. Глуховський, С.М. Самойленко // <http://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/issue/view/33>
6. Білеуш А.І., Фрідріхсон В.Л., Кривоног О.І., Кривоног В.В.Порушення стійкості схилів під дією розриджених ґрунтів/ А.І. Білеуш, В.Л. Фрідріхсон, О.І. Кривоног, В.В. Кривоног // Журнал "Наука та будівництво" 2021'1
7. Lucy Jones, Richard Bernknopf, Susan Cannon, Len Gaydos, John Kiley and others/ Building Resilience in Poetry. : Strategic Plan for the Southern California Multiple Hazards Demonstration Project, USGS Open Report 2007-1255, 31 p., 2007.
8. Giuliano F. Panza (Editor), Kojiro Irikura (Editor), Mihaela Kouteva-Guentcheva (Editor), Antonella Peresan /Advanced Seismic Hazard Assessment: Part I: Seismic Hazard Assessment (Pageoph Topical Volumes) 2011th.
9. A. Alonso-Rodriguez, N. Nikitas, J. Knappett, and G. Kampas/ "System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model", 2018.
10. G. Andreotti, C. G. Lai/ "A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem", 2017.
11. Thomas Jordan, Norm Abrahamson, John G. Anderson, G. P. Biasi / Panel Review of USGS 2023 Conterminous US. Time-Independent Earthquake Rupture Forecast//Bulletin of Seismological Society of America: - 2023. - 36 p.
12. Sukamta D. Advances in Seismic Design and Construction in Indonesia/Davy Sukamta//CTBUH Research Paper, 2014.- 610 p.
13. Tarolli, P., Rizzo, D., Brancucci, G. (2019). Terraced Landscapes: Land Abandonment, Soil Degradation, and Suitable Management. In: Varotto, M., Bonardi, L., Tarolli, P. (Eds.), World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life. Environmental History, vol 9. Springer, Cham.
14. Soil biodiversity and soil erosion. (2018). Joint Research Centre, European Soil Data Centre (ESDAC).<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-biodiversity-and-soil-erosion> [online pecypc].

Рукопис подано до редакції 17.02.24

УДК 621.771.001

В.А. ЧУБЕНКО, Л.Н. САЙГАРЕЄВ, Т.П. ЯРОШ,  
В.В. ПЛОТНИКОВ, кандидати техн. наук, доценти, А.А. ХІНОЦЬКА, ст. викладач  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ГАРЯЧОГО ПРОКАТУВАННЯ ТОВСТИХ ЛИСТІВ

**Мета роботи** полягає в дослідженні параметрів гарячого прокатування товстих листів, використовуючи комп'ютерну програму DEFORM 3D. Результати дослідження забезпечують вирішення актуальної проблеми металургійного виробництва з встановлення раціональних режимів обтиснення, що дозволяють отримати якісну металопродукцію при мінімальній собівартості виробництва.

**Методи дослідження** базуються на використанні фундаментальних положень теорії і технології обробки металів тиском і металознавства. Для дослідження параметрів процесів гарячого прокатування товстих листів було використано моделювання за допомогою комп'ютерної програми DEFORM 3D, що дає можливість визначити режими обтиснення при обробці металів і сплавів при мінімальних вартісних витратах на експерименти. Було згенеровано модель гарячого прокатування товстого листа, для якої задано початкові розміри заготовки, режими обтиснення та температура обробки, вибрано оброблюваний матеріал, визначено його властивості та вплив на них ступеня обтиснення і температури деформації. У дослідженнях змінювався ступінь деформації; температура обробки залишалася постійною і дорівнювала 1050<sup>0</sup>С. Було отримано кінцево-елементну сітку і задано 90 кроків моделювання, що дозволило ретельно проаналізувати процес гарячого прокатування.

**Наукова новизна** полягає в дослідженні розподілу активних напружень і зусиль в осередку деформації в результаті моделювання за допомогою методу кінцевих елементів, що дозволяє визначити їх максимальні значення та можливі коливання.

**Практична значимість** полягає в удосконаленні технологічного процесу гарячого прокатування товстого листа за рахунок використання раціональних режимів обробки, що забезпечують мінімальні витрати енергії на процес.

**Результати.** Згенеровано модель гарячого прокатування товстого листа за допомогою комп'ютерної програми DEFORM 3D і визначено зміни властивостей матеріалу під час обробки. Виявлено розподіл напружень і деформацій у зоні обробки, з'ясовано характер розподілу зусилля прокатування в осередку деформації. Визначено, що раціональною є ступінь деформації на рівні 40-50 %, що забезпечить виготовлення якісних листів гарячим прокатуванням при мінімальних витратах енергії.

**Ключові слова:** гаряче прокатування, товстий лист, моделювання, зусилля прокатування, осередок деформації, комп'ютерна програма DEFORM 3D, метод кінцевих елементів, режими обтиснення

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-137-142

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Товстий лист знайшов широке застосування в усіх галузях промисловості: будівництві, машинобудуванні, сільському господарстві тощо. До таких листів висуваються високі вимоги з якості та міцності при мінімальних витратах на виробництво. Активний розвиток інформаційних технологій останнім часом зробив можливим їх розповсюдження при розробці технологічних процесів обробки металів тиском, що дозволяє вирішити проблему підвищення ефективності прокатного виробництва при мінімальних витратах енергії. Удосконалити технологію гарячого прокатування товстих листів за рахунок використання раціональних режимів обтиснення, що забезпечують потрібну якість продукції при мінімальних витратах енергії, є задачею актуальною. Для розробки удосконалених технологій потрібно дослідити процес обробки металу з використанням комп'ютерної програми DEFORM 3D з метою визначення раціональних режимів обробки.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Прокатне виробництво дозволяє виготовляти великий асортимент металопродукції, що використовується в будівництві, машинобудуванні, авіації, приладобудуванні тощо. Теорія та технологія прокатування на теперішній час досягли значних результатів у підвищенні продуктивності прокатного обладнання й якості готових виробів. Подальше удосконалення технологічних процесів прокатування потребує одночасного вирішення великої кількості складних завдань. Для їх розв'язання необхідно поглиблено вивчити особливості процесу обтиснення металу при обробці, встановити фактори і параметри, що найбільш суттєво впливають на структуру та властивості матеріалу, та визначити характер цього впливу на витрати зусиль і енергії при виготовленні металопродукту [1, 2].

Під час прокатування між прокатними валками утворюється осередок деформації [3], в якому відбуваються складні процеси деформації металів і сплавів, які визначають кінцевий результат процесу обробки. Було встановлено, що в цьому осередку з'являється дуже складний напружено-деформований стан [4, 5], який впливає на якість виробів і технологічні параметри обтиснення, що необхідно враховувати при проектуванні й удосконаленні технологій.

У виробництві прокату задіяна велика кількість машин та агрегатів, що забезпечують отримання якісних виробів. Часте перенастроювання таких машин при проведенні досліджень може призвести до виникнення великих похибок. Щоб цього уникнути, було прийнято рішення застосувати комп'ютерне моделювання процесів обробки металів тиском, що дає можливість управління як параметрами процесу прокатування, так і властивостями отриманих виробів [6].

Такі дослідження забезпечують можливість отримати великий обсяг інформації, здійснити всебічне вивчення обробки, визначити особливості процесу та дослідити велику кількість альтернативних технологій прокатування [7, 8].

З метою дослідження процесів об'ємного формування при обробці металів тиском велике розповсюдження отримали енергетичний метод балансу потужностей [9] і метод кінцевих елементів. За допомогою методу кінцевих елементів виконано ретельне дослідження дефектоутворення при видавлюванні [10, 11], але в цих роботах не вивчалися процеси гарячого прокатування товстих листів. Суттєві результати дає застосування імітаційного моделювання об'ємного деформування за допомогою методу скінчених елементів [12], що дозволяє вирішити велику кількість технологічних задач. Ретельне дослідження процесів обробки металів тиском дозволяє здійснити комп'ютерна програма DEFORM 3D, яка дозволяє проаналізувати складні тривимірні процеси пластичної деформації при обтисненні металів і сплавів. Ця програма заснована на кінцево-елементному моделюванні [1], основа якого базується на проектно-сіткових методах, що легко адаптуються до розв'язання задач пластичної деформації матеріалів. Моделювання за допомогою програми DEFORM 3D дозволяє розробляти раціональні технології прокатування при суттєвому зменшенні часу на їх дослідження [6]. Таку комп'ютерну програму [13]

було застосовано в дослідженнях гарячого прокатування товстих листів для аналізу тривимірної текучості металів і сплавів при обтисненні, характеру формозміни матеріалу, мікроструктури металовиробів, для оптимізації кількості переходів і вивчення коливання зусиль деформації, але було недостатньо вивчено вплив величини обтиснення на зміни напружено-деформованого стану та не визначено витрати зусиль і моментів на процес прокатування. Тому потрібно більше уваги звернути на розподіл напруженого стану в осередку деформації, зусиль прокатування та витрат енергії на процес гарячого прокатування товстих листів при моделюванні за допомогою програми DEFORM 3D.

**Постановка задачі.** Метою роботи є встановлення витрат зусиль на процес гарячого прокатування товстих листів за допомогою моделювання, використовуючи комп'ютерну програму DEFORM 3D для визначення раціональних режимів обтиснення. Для цього в роботі:

застосовано моделювання за методом кінцевих елементів для дослідження процесів гарячого прокатування товстих листів і вивчення розподілу напруження в осередку деформації;

визначено витрати енергії на процес гарячого прокатування товстих листів.

**Викладення матеріалу та результатів.** Методика дослідження впливу режимів обтиснення на витрати зусиль при гарячому прокатуванні товстих листів. У дослідженнях використовувалася технологія виготовлення товстих смуг гарячим прокатуванням [14-16]. Вихідні дані для моделювання: розміри початкової заготовки – висота  $h_0=20$  мм, ширина  $b_0=1000$  мм, довжина  $l_0=1000$  мм; початкова швидкість прокатування  $v_0=5$  м/с; радіус валків  $R_B=400$  мм. При моделюванні процесу змінювалася величин обтиснення заготовки.

За допомогою комп'ютерної програми DEFORM 3D було згенеровано модель гарячого прокатування товстих листів, розташовано об'єкти в просторі, вказано реологічну модель матеріалу, що деформується при обробці, в якій прийнято жорстко-пластичне середовище. Відстань між прокатними валками визначалася з урахуванням розмірів заготовки та величини обтиснення (рис. 1). Для заготовки було обрано пластичну модель, а для прокатних валків – жорстку. Як вихідний матеріал обрано низьковуглецеву сталь (AISI-1015), характеристики якого було визначено з бібліотеки комп'ютерного забезпечення. Пружні властивості металевого сплаву залишалися незмінними та визначалися модулем Юнга і коефіцієнтом Пуассона, які дорівнюють відповідно  $0.3$  і  $1.5 \cdot 10^5$ .

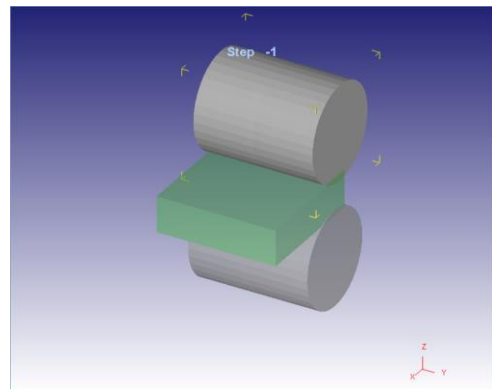


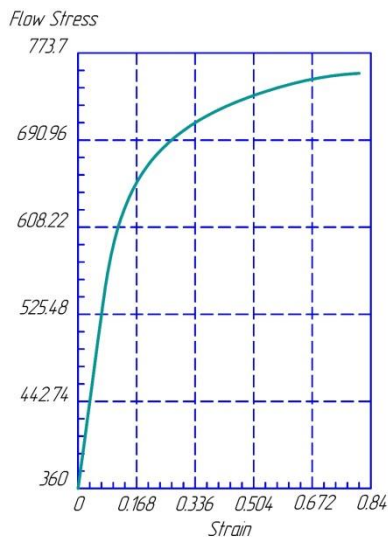
Рис. 1. Схема розташування прокатних валків і оброблюваного матеріалу

Поводження матеріалу заготовки під час деформації описувалось за допомогою діаграми «Напруження-деформація» (рис. 2), яка відображає вплив ступеня обтиснення на величину напруження.

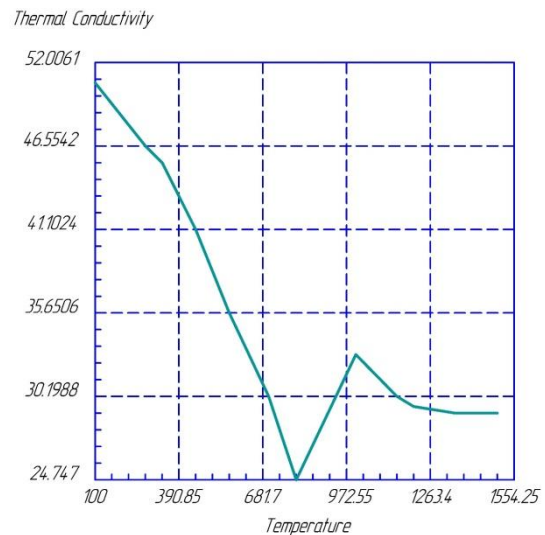
З діаграми (рис 2) видно, що величина напруження інтенсивно зростає зі збільшенням величини обтиснення до тих пір, поки ступінь деформації не досягне  $40\%$ . Далі величина напруження зростає менш інтенсивно через те, що зменшується опір деформації та починається пластична течія матеріалу. У цьому стані металевий сплав легко деформується та набуває необхідної форми і розмірів, досягнення яких не потребує витрати великих зусиль.

Вплив температури на теплопровідність матеріалу представлено на рис. 3, з якого видно, що з підвищенням температури теплопровідність зменшується до тих пір, поки температура не досягне  $800^\circ\text{C}$ . Далі на графіку спостерігається збільшення теплопровідності до температури  $1000^\circ\text{C}$ , після чого показники теплопровідності знову зменшуються. Через те, що обробка матеріалу буде здійснюватися в гарячому стані, потрібно зберегти максимальну теплопровідність. У дослідженнях було прийнято температуру обробки  $1000-1050^\circ\text{C}$ .

Прокатування відбувається завдяки утворенню тертя між інструментом і оброблюваним матеріалом. Було прийнято, що коефіцієнт тертя між заготовкою та валками дорівнює  $0,3$ ; задано контактну взаємодію між інструментом і заготовкою; задано температуру гарячого прокатування на рівні  $1050^\circ\text{C}$ ; прийнято, що швидкість деформації на початку обробки дорівнює  $1$  мм/с.

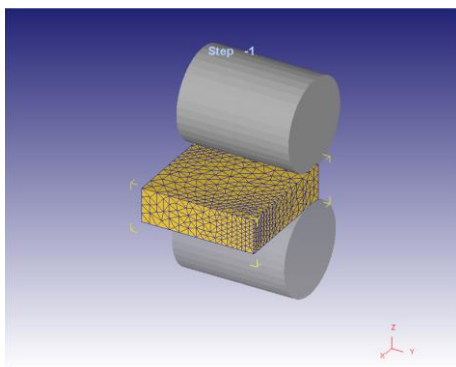


**Рис. 2.** Вплив деформації на величину напруження



**Рис. 3.** Вплив температури на теплопровідність матеріалу

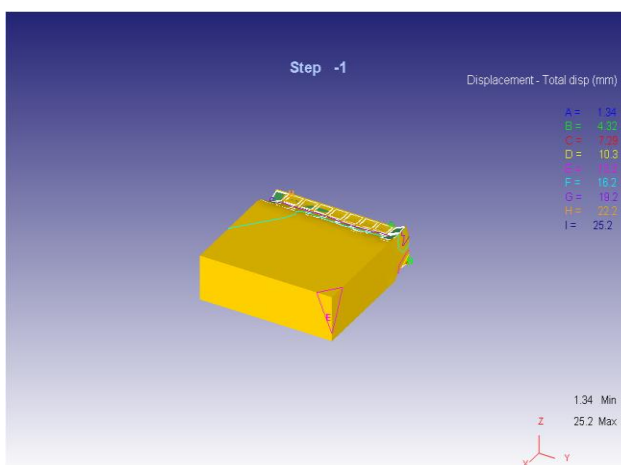
Моделювання процесу деформації було розбито на 90 кроків. З метою розбиття заготовки на кінцеві елементи було згенеровано елементну сітку (рис. 4). У дослідженні був використаний автоматичний режим генерації сітки.



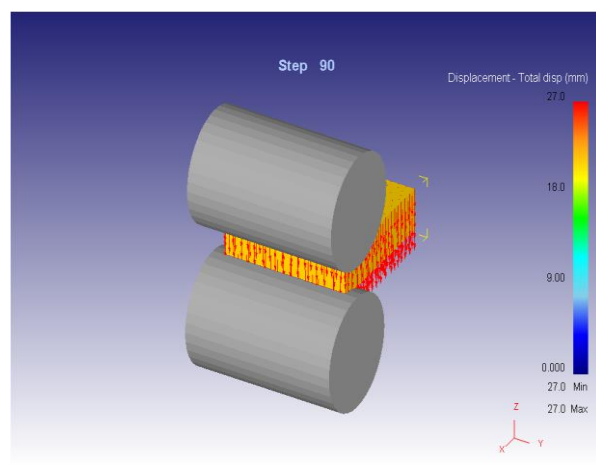
**Рис. 4.** Кінцево-елементна модель оброблюваного матеріалу

На рисунку 4 показано кінцево-елементну модель, що складається з  $1,37 \cdot 10^3$  вузлів і  $5,62 \cdot 10^3$  елементів. Для точного розташування об'єктів було виконано ретельне взаємне позиціонування прокатних валків і заготовки. Таким чином, за допомогою комп'ютерної програми було побудовано модель гарячого прокатування товстих листів для дослідження процесів, що відбуваються в осередку деформації.

Дослідження динаміки руху деформації при прокатуванні в оброблюваний матеріал дозволили визначити переміщення металу, який обтискується прокатними валками (рис. 5). З рисунку видно величину переміщення та її розподіл по осередку деформації.



**Рис. 5.** Переміщення металу в осередку деформації при обтисненні



**Рис. 6.** Векторне поле переміщення металу під час деформації

У результаті моделювання було згенеровано поле переміщення металу під час обтиснення заготовки (рис. 6), де видно напрямок руху металу при обробці та переміщення вузлів сітки.

Переміщення відбувається під дією верхнього прокатного валка і спрямовано вертикально вниз. На рисунку показано схему на останньому кроці обробки.

Під час моделювання було побудовано графік зміни зусилля деформації в часі (рис. 7), який показав, що зусилля стрімко збільшуються від нуля до 1,73 МПа у перші секунди обробки. Далі зусилля повільно зростають до 4,3 МПа

Під час гарячого прокатування товстих листів на оброблюваний матеріал діють нерівномірні напруження, які забезпечують пластичну деформацію. Встановлено, що при деформації виникають як дотичні, так і нормальні напруження.

Розроблена модель враховує напрямок переміщення металу при прокатуванні, зміну зусилля при обтисненні в осередку деформації, розподіл діючого напруження та його зміну. За результатами дослідження запропонована технологічна схема, застосування якої дозволяє підвищити якість металовиробів при раціональному використанні енергосилових параметрів. Дослідження дозволили встановити параметри процесу гарячого прокатування та витрати зусилля в залежності від режимів обтиснення.

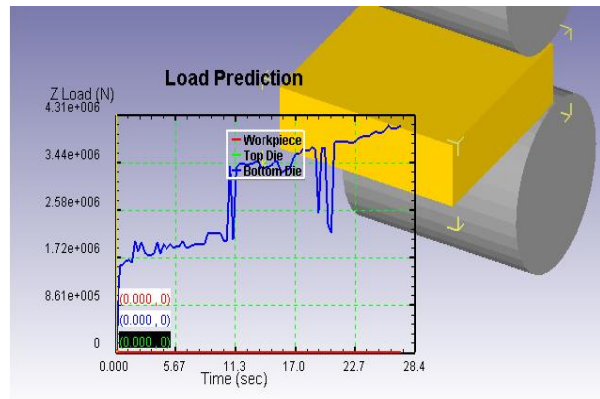


Рис. 7. Зміни зусилля, що діють на інструмент

З таблиці видно, що раціональний ступінь обтиснення дорівнює близько 40-50% через те, що при його збільшенні суттєво зростають зусилля прокатування та погіршуються умови захоплення заготовки, а при зменшенні – уповільнюється обробка та знижується продуктивність процесу.

Таблиця 1

Параметри процесу гарячого прокатування\*

$h_0$ , мм	$\epsilon$ , %	$\Delta h$ , мм	$h_1$ , мм	$P$ , МН
20	50	10	10	24,5
20	25	5	15	17,25
20	75	15	5	31,5
20	40	8	12	19,2

\* $\epsilon$ , % - ступінь деформації;  $\Delta h$  – величина обтиснення;  $h_1$  – висота готового листа;  $P$  – зусилля прокатування

#### Висновки та напрямки подальших досліджень.

У результаті проведених досліджень: за допомогою методів кінцевих елементів комп'ютерної програми DEFORM 3D встановлено розподіл напруження в осередку деформації при гарячому прокатуванні товстих листів, що дозволило визначити зусилля обробки;

визначено раціональний ступінь обтиснення для отримання товстолистової продукції, яка забезпечує отримання якісних металовиробів.

У подальших дослідженнях потрібно розробити удосконалені технології виготовлення товстих листів.

#### Список літератури

1. Теорія процесів обробки металів тиском: Підручник [Текст] / В.М. Данченко, В.О. Гринкевич, О.М. Головка. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
2. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров: Монография [Текст] / И.К. Огинский, В.Н. Данченко, А.А. Самсоненко, В.В. Бояркин. – Днепропетровськ: Пороги, 2011. – 355 с.
3. Исследование очага деформации при продольном прокатывании с точки зрения реологической концепции [Текст] / Н.Н. Бережной, В.А. Чубенко, А.А. Хиноккая, С.О. Мацишин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – том 1 № 7 (73) (2015), - с. 31-35 doi:10.15587/1729-4061.2015.38059.
4. Faraji, G. Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique [Text] / G. Faraji, H. Jafarzadeh // Materials and Manufacturing Processes. – 2012 – Vol. 27, Issue 5 – P. 507-511. doi: 10.1080/10426914.2011.593235.
5. Kodjaspirov, G.E. Effect of thermomechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 steel [Text] / G.E. Kodjaspirov, A.I. Rudkoy, V.V. Rybin // Advanced Materials Research. – 2010 – Vol. 89-91. – P. 769–772. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.89-91.769.
6. Компьютерное моделирование процесса обработки металлов давлением [Текст] / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск. Системны'е технологии, 2005. – 448 с.



7. **Зенкевич О.** Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. [Текст] / О. Зинкевич, К. Морган – Мир, 1986. – 318 с.
8. **Кузьменко В.І.** Вступ до методу скінчених елементів: Навч. посіб. [Текст] /В.І.Кузьменко – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2002. – 84 с.
9. **Hwang B.C.** A UBET analysis of the non-axisymmetric combined extrusion process [Text] / B.C. Hwang, H.I. Lee, W.B. Bae // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – №139. – С. 547-552.
10. **Huey-Lin Ho.** A study of improving warped characteristics during flange forging [Text] / Huey-Lin Ho, Su-Hai Hsiang, Chia-Ju Chang // Journal of materials processing technology 201. – 2008. – P. 14-18.
11. **Monaghan J.** An investigation of plane-strain lateral extrusion to form components having staggered branches [Text] / J. Monaghan // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – 77. – P. 305-313.
12. **Fereshteh-Saniee F.** A new CAD system for finisher die design of an axisymmetric forging component with arbitrary profile [Text] / F. Fereshteh-Saniee, B. Daneshzad-Moghaddam // J. Mater. Process. Technol. 2004. 153-154. – P. 157-163.
13. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие [Текст] / **В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов и др.** – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
14. Дослідження об'ємноструктурних і енергетичних перетворень в сталях при прокатуванні. Монографія [Текст] / **В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька,** – Кривий Ріг: Видавництво (ФО-П Чернявський Д.О.), 2018. – 178 с.
15. Дослідження об'єму осередку деформації та часу перебування металу в ньому при валковій розливці сталі для виготовлення тонких смуг [Текст] / **В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька, В. Чубенко** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2017. – Вип. 45. – С. 185-289.
16. Вплив швидкості деформації на зміну напруження при поздовжньому прокатуванні [Текст] / **В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька** // Гірничий вісник. – 2019, Випуск 105. – С. 42-46.

Рукопис подано до редакції 22.04.24

UDC 622.1

V. D. SIDORENKO, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kryvyi Rih National University  
 A. O. ROMANENKO, Ph.D, Mine surveyor of the rock movement monitoring of the pit, PJSC  
 "CGZK"; Student of Group 122-23-1-M, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC

## CLASSIFICATION OF METHODS FOR DETECTING VOIDS IN ROCK MASSIF

**Purpose.** The paper aims to thoroughly analyze and classify methods for detecting voids in rock formations to establish a systematic approach to their use in geotechnical investigations. The main tasks include studying the physical principles of operation of each method, identifying its advantages and disadvantages, and determining the specific conditions and tasks under which it can be most effective. The research also involves exploring various classification approaches, considering the physical properties of rocks, measurement principles, method purposes, field types, information transmission methods, and other criteria. Each approach will be examined to elucidate its unique characteristics and capabilities.

**Methodology.** The research will involve the examination of various classification approaches, taking into account the physical properties of rocks, measurement principles, method purposes, field types, information transmission methods, and other criteria. Each approach will be studied to elucidate its unique characteristics and capabilities, serving as the basis for further research and development in this field of knowledge.

**Results.** The obtained research results aim to facilitate understanding and selection of the optimal method for detecting voids in a mining massif, depending on specific tasks, research conditions, and geological circumstances. Such an approach will contribute to a more effective utilization of geophysical methods in geotechnical and hydrogeological investigations, enabling a qualitative assessment of mining reserves and prevention of potential hydrogeological issues.

**Scientific novelty.** For the first time, through analysis and systematization, a classification of methods for detecting voids in a rock massif has been developed, considering measurement accuracy. This classification enables scientists, engineers, and geologists to better understand the variety of approaches to this task. Additionally, for the first time, a ranking of method classes for detecting voids in a rock massif has been performed, based on comprehensive effectiveness with equal weighting of method determination factors: 1. Seismic, 2. Optical, 3. Acoustic, 4. Gravitational, 5. Electromagnetic and Magnetic, 6. Biofield, 7. Radiofrequency and Microwave.

**Practical implementation.** The conclusions drawn from the research can have practical applications in conducting a comprehensive assessment of the geophysical condition of a rock massif.

**Keywords:** Keywords: geophysical condition, detection of voids in rock massif, classification of methods.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-142-148

**Problem and its connection with scientific and practical tasks.** Modern geological and hydrogeological investigations are closely linked to the detection of voids in rock massif. For the effective and precise determination of geological structures, assessment of mineral reserves, and prevention of