



УДК.679.8

*В.В. ПЕГЛОВСЬКИЙ,
кандидат технічних наук*

*В.І. СИДОРКО,
доктор технічних наук*

*В.Н. ЛЯХОВ, інженер
О.М. ПОТАЛИКО, інженер
Науково-технологічний
алмазний концерн
«АЛКОН»
НАН України*

Оброблюваність природного каміння – об'єктивна основа його класифікації

Частина 7. Урахування спільного впливу фізико-механічних властивостей, особливостей хімічного та мінералогічного складу природних каменів на їх оброблюваність. Побудова моделі для розрахунку оброблюваності природних каменів

Рассмотрено совместное влияние физико-механических свойств, особенностей химического и минералогического состава природных камней на их обрабатываемость, построение модели для расчета обрабатываемости.

Joint influence of physical and mechanical properties is considered, features of chemical and mineralogical composition of natural stone on their workability, construction of model for the calculation of workability.

У першій та другій частинах цієї роботи, присвяченій оброблюваності природних каменів (далі – ПК), було розглянуто відомі класифікації природних напівдорогоцінних та декоративних каменів, досліджено властивості, які визначають у цих групах природних каменів, і виділено ті з них, що безпосередньо впливають на їх оброблюваність [10, 5]. У третій і четвертій частинах наведено дані про енергоємність та трудомісткість обробки багатьох видів напівдорогоцінних і декоративних каменів. Розглянуто взаємозв'язок енергоємності та трудомісткості обробки природних каменів з їхніми міцнісними властивостями [6, 7]. У п'ятій і шостій частинах подано відомості про основні компоненти хімічного складу, які діагностують у природних

каменях, розглянуто вплив окремих компонентів цього складу на міцнісні властивості каменів, трудомісткість та енергоємність їх обробки, а також наведено дані щодо мінералогічного складу цих каменів і його впливу на трудомісткість та енергоємність обробки [8, 9].

Якщо узагальнити всі розглянуті раніше властивості (особливості) декоративних та напівдорогоцінних каменів обраних видів: фізико-механічні властивості – твердість за шкалою Мооса (T_M) та за Вікерсом (H), межу міцності при одноосісному стисканні ($R_{ст}$), середню щільність гірської породи з порами (ρ_0) [5]; особливості хімічного складу каменів – вміст оксидів кремнію (SiO_2), алюмінію (Al_2O_3), заліза (Fe_2O_3 , FeO), кальцію (CaO), магнію (MgO) та ін. компонентів [9]; мінералогічні особливості

природних каменів (складних полікристалічних систем) – твердість основного породотвірного мінералу (H_M), максимальний розмір кристалів цих систем (каменів) (h) та структуру каменів (c) [2-4, 11, 12], а також урахувати значення відносних трудомісткості та енергоємності (t , e) обробки каменів (технологічні параметри обробки) [6, 7], то для обраної певної кількості цих каменів (наприклад, 30) можна отримати повний комплекс досліджуваних властивостей, натуральні значення котрих наведено в таблиці 1.

У таблиці 1 наведено дані для таких видів природних каменів: мармурового оніксу – 1 (Казахстан); мармурів: Росія – 2, Італія – 3, Індія – 5, Гватемала – 8, Куба – 9; офіокальциту – 4 (Росія), скарну – 6 (Росія), лиственіту – 7 (Ро-

Таблиця 1. Властивості, склад, мінералогічні особливості та технологічні параметри обробки ПК

№ з/п	Фізико-механічні властивості				Хімічний склад, %						Мінералогічні особливості			Технологічні параметри обробки	
	T_M , від. од.	H , ГПа	$R_{ст}$, КПа	ρ_0 , г/см ³	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Інші	$H_{пм}$, ГПа	h , мм	c , від. од.	t , від. од.	e , від. од.
1	3,25	1,98	80	2,69	-	-	-	56,0	-	44,0	1,6	1,0	1	1	1
2	3,5	2,3	95	2,73	0,14	0,22	0,06	55,35	0,08	44,15	1,6	1,0	1	1,63	1,16
3	3,5	2,3	96	2,7	8,09	0,46	0,3	49,28	0,72	41,15	1,6	1,0	1	1,3	1,16
4	4,0	2,38	100	2,69	18,4	4,1	0,9	24,6	20,4	31,6	1,6	1,0	1	4,44	1,17
5	4,0	2,76	134	2,74	21,8	0,7	9,2	13,1	17,2	38,0	1,6	1,0	1	6,12	1,2
6	5,5	2,76	150	2,63	23,2	3,5	17,0	7,6	21,6	27,1	5	1,0	1	40,9	1,36
7	4,0	2,76	140	2,93	25,4	0,9	3,68	6,98	25,84	37,2	1,6	1,0	1	12,3	1,13
8	4,0	2,76	134	2,72	26,48	-	0,54	22,38	16,06	34,54	1,6	1,0	1	7,34	1,2
9	4,0	3,36	134	2,65	28,7	1,0	13,3	14,6	22,8	19,6	1,6	1,0	1	6,97	1,2
10	5,5	5,03	150	3,57	39,3	16,7	0,8	1,9	21,8	19,5	5,0	1,0	1	27,8	1,36
11	5,0	6,74	150	2,56	43,6	20,1	0,4	19,6	8,0	51,9	5,0	1,0	1	12,2	1,2
12	4,5	4,5	170	2,63	44,0	25,0	5,0	1,0	14,0	11,0	5,0	1,0	2	8,33	1,34
13	6,0	7,74	191	2,96	45,43	17,32	10,87	11,62	8,37	6,39	8,0	10,0	1	11,2	1,37
14	6,5	8,85	300	3,37	47,0	2,5	50,0	-	-	0,5	8,0	1,0	1	251	1,83
15	6,0	7,74	191	3,1	49,14	16,77	9,57	11,19	6,7	6,63	8,0	10,0	1	52,1	1,37
16	6,0	5,74	300	3	51,4	5,7	1,8	6,8	21,6	12,7	8,0	0,1	2	32	1,75
17	6,0	6,72	200	2,87	52,8	11,7	10,3	6,8	6,0	12,4	8,0	0,1	1	99,8	1,42
18	6,0	7,57	178	2,78	53,55	26,24	5,05	10,5	-	4,66	8,0	5	1	48,1	1,37
19	6,5	7,63	300	3,28	56,8	28,0	2,1	5,6	1,4	6,1	8,0	0,5	2	100	1,92
20	6,0	7,43	178	2,7	66,0	24,3	0,2	1,9	1,4	6,2	8,0	10,0	1	48,1	1,29
21	6,25	8,8	195	2,7	71,36	11,96	4,88	2,56	0,58	8,66	8,0	10,0	1	103	1,76
22	6,25	8,8	195	2,72	71,84	14,59	2,46	1,67	0,63	8,81	8,0	10,0	1	112	1,76
23	5,5	6,26	65	2,32	74,1	17,4	0,3	1,4	1,0	5,8	8,0	100,0	1	185	1,28
24	6,25	8,8	195	2,6	74,53	13,83	1,46	1,25	0,4	8,53	8,0	10,0	1	210	1,76
25	6,25	9,48	220	2,65	79,8	12,4	2,1	0,8	0,4	4,5	12,0	0,1	1	148	1,71
26	6,5	6,58	300	2,61	87,5	4,6	1,4	1,9	5,4	0,2	12,0	0,01	2	761	2
27	6,5	8,98	300	2,66	94,46	2,85	0,74	0,37	0,32	1,26	12,0	1,0	1	494	1,57
28	7,0	8,12	330	2,63	95	2,0	-	2,0	1,0	-	12,0	0,01	2	920	1,99
29	7,0	11,57	330	2,59	91,8	2,8	0,4	1,1	1,6	2,3	12,0	0,01	2	830	1,86
30	7,0	10,12	330	2,64	100,0	-	-	-	-	-	12,0	0,1	1	377	1,75

сія), родоніту – 10 (Росія), лазуриту – 11 (Росія), серпентиніту – 12 (Росія); габро Торчинського род. – 13 (Україна), джеспіліту – 14 (Україна), габро Олександрівського род. – 15 (Україна), лабрадориту Головинського род. – 18 (Україна); нефриту – 16 (Росія), роговику – 17 (Росія), жадеїту – 19 (Росія), біломориту – 20 (Росія); обсидіану – 23 (Вірменія); гранітів: Софіївського род. – 21 (Україна), Маславського род. – 22 (Україна), Межирицького род. – 24 (Україна); яшми технічної – 25 (Росія), агатів – 28, 29 (Росія); скам'янілого дерева – 26 (Україна), кварциту – 27 (Україна), кварцу – 30 (Україна).

У таблиці 1, крім того, подано характеристики окремих мінералогічних особливостей ПК: максимальний розмір зерен мінерального конгломерату (h), будову каменю (c) та мікротвердість основного породотвірного мінералу (H_M).

Розмір зерен мінеральних індивідів у мінеральних утвореннях є однією з основних характеристик мінералів кристалічної будови. Залежно від розмірів зерен мінералів та мінеральних конгломератів вирізняють такі їхні види, які подано у таблиці 2 [3, 11].

У природних каменях також виокремлюють такі основні види мінеральної будови: зернисто-кристалічну, волокнисту різних видів, тичкувату, лускату, сланцювату та ін. або змішані [2-4, 11, 12], але в таблиці 1 усі камені розподілено на дві

групи: ті, що мають кристалічну структуру (більшість видів каменів, $c = 1$), та камені, що мають волокнисту або близьку до неї (наприклад, тичкувату) структуру ($c = 2$).

Щодо основного породотвірного мінералу, то види таких мінералів, їхній вміст у природних каменях (гірських породах) так само, як і їхня мікротвердість [5], розглядалися раніше [9] або описані в літературі [2-4, 11, 12].

Характеристика зернистості (розмір зерен мінерального конгломерату) та структури визначаються при проведенні мінералогічно-петрографічних досліджень [12] і для більшості каменів, представлених у таблиці 1, є відомими з раніше проведених власних досліджень [4] або описаними в літературі [2, 3, 11].

Якщо фактори, наведені в таблиці 1, представити в кодованих значеннях за допомогою відомого прийому [1], коли найменшому значенню досліджуваної величини присвоюють значення "-1", а найбільшому – "+1" і всім іншим значенням відповідно, та провести апроксимацію отриманих залежностей [1], то можна зрозуміти вплив кожного з цих факторів на оброблюваність каменю.

Надалі під оброблюваністю (коефіцієнтом відносної оброблюваності – B) розуміємо комплексну величину – до-

Таблиця 2. Характеристики зернистості мінералів та мінеральних утворень

Назва	Розміри мінеральних утворень
Гігантські	Більше 100 мм
Грубозернисті	10-100 мм
Середньозернисті	1-10 мм
Дрібнозернисті	100 мкм - 1 мм
Тонкозернисті	10-100 мкм
Прихованокристалічні	1-10 мкм
Тонкодисперсні	Менше 1 мкм

буток відносних значень трудомісткості (t) та енергоємності обробки (e) $B=t \cdot e$.

На рисунках 1-3 показано вплив окремо кожного фактора, пов'язаного з фізико-механічними властивостями каменю (T_M , H , R_{CT} , ρ_0 – рис. 1), хімічним складом (вмістом SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 і FeO , CaO , MgO та ін. компонентів – рис. 2) та особливостями мінералогічного складу каменів (H_M , h , c – рис. 3), на коефіцієнт оброблюваності в кодованих значеннях, апроксимованих лінійно: $B_i = k_i x_i + b_i$, де k_i та b_i – коефіцієнти регресії для кожного фактора.

З рисунка 1 та аналізу коефіцієнтів регресії k_i випливає, що коефіцієнт оброблюваності (B) зростає за умови збільшення твердості за шкалою Мооса та за Вікерсом, а також межі міцності при одновісному стисканні, але незначною мірою знижується за умови збільшення середньої щільності гірської породи, причому коефіцієнт регресії k для

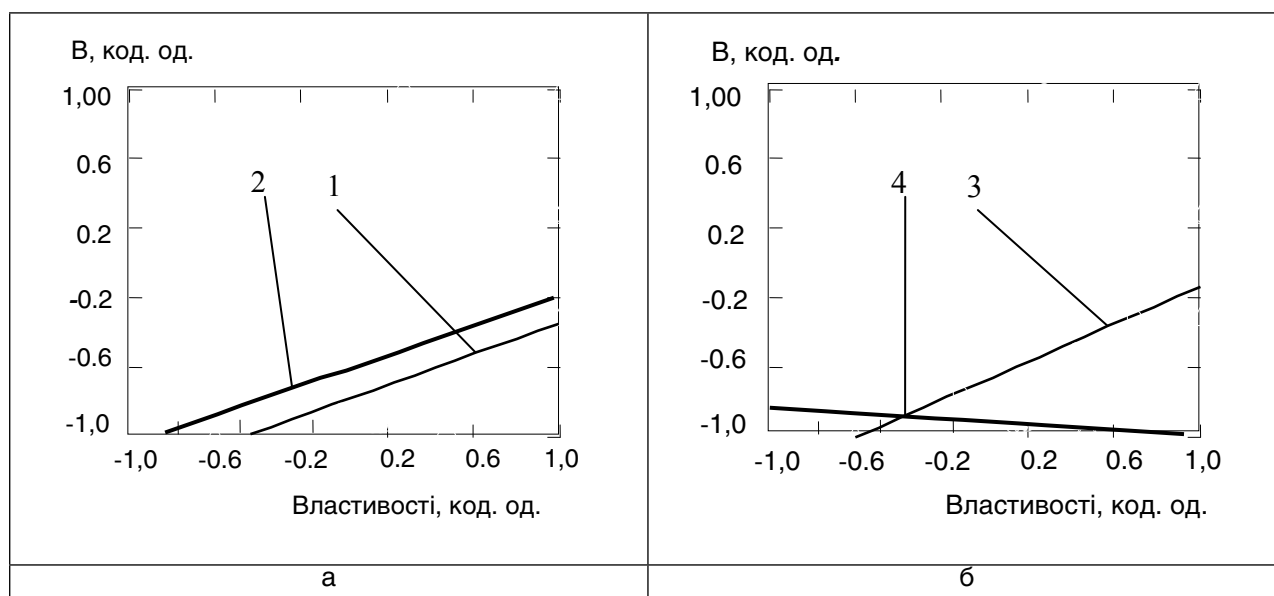


Рисунок 1. Залежність коефіцієнта оброблюваності (B) ПК від його фізико-механічних властивостей: а – твердості за шкалою Мооса – T_M (1), твердості за Вікерсом – H (2); б – межі міцності при одновісному стисканні – R_{CT} (3), середньої щільності гірської породи з порами – ρ_0 (4)

середньої щільності гірської породи також значно менший за інші та може бути зіставлений з похибкою досліджень, що не дозволяє зробити достовірний висновок про його вплив.

Під час аналізу впливу компонентів хімічного складу каменів на коефіцієнт оброблюваності з усіх каменів, представлених у таблиці 1, обирали такі їхні види, в яких вміст кожного з компонентів зростає (або зменшується) приблизно через однакові інтервали – 5-10 %.

З рисунка 2 робимо висновок, що коефіцієнт оброблюваності (B) зростає при збільшенні вмісту оксиду кремнію, алюмінію і заліза та зменшується при зростанні вмісту оксидів кальцію, магнію та інших компонентів.

Рисунок 3 показує, що коефіцієнт оброблюваності (B) зростає, якщо гірська порода має волокнисту структуру, при зменшенні розміру зерен мінерального конгломерату та збільшенні мікротвердості за Вікерсом основного породотвірного мінералу.

Слід зазначити, що існують різні моделі для опису процесу обробки ПК, але найбільш наочну інформацію про досліджуваний процес можна отримати, розглянувши тривимірну модель залежності коефіцієнта оброблюваності від двох узагальнених чинників, які враховують: спільні особливості хімічного і мінералогічного складу ПК (X_{11}) та його фізико-механічні властивості (X_1), а також взаємний вплив цих факторів (X_2).

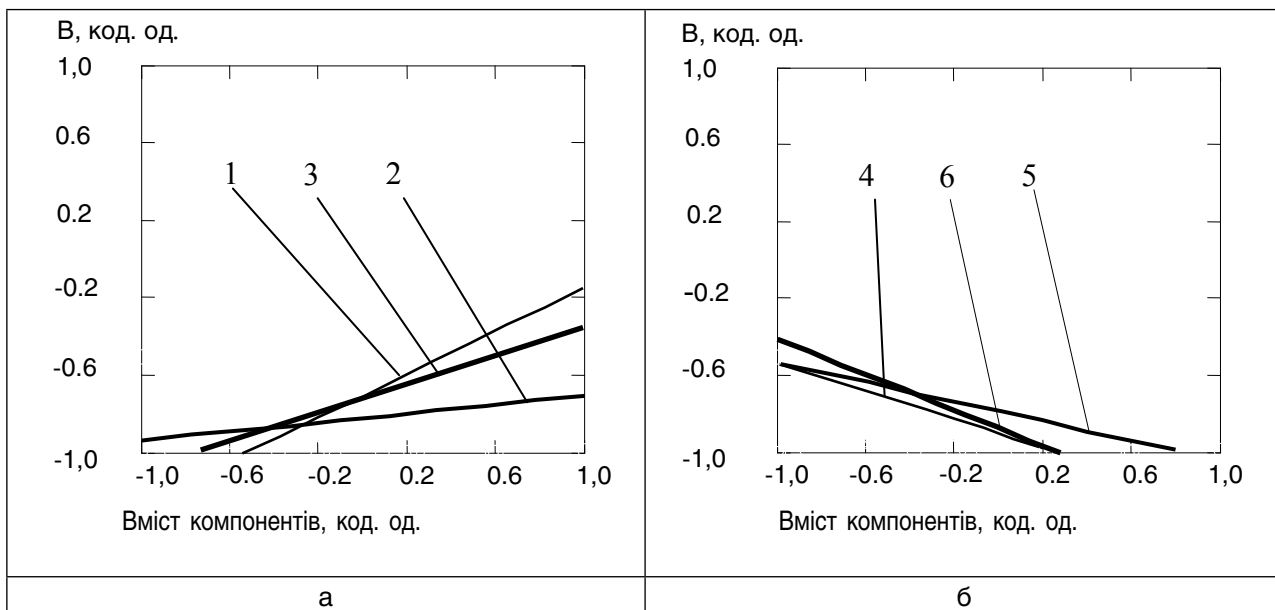


Рисунок 2. Залежність коефіцієнта оброблюваності (B) ПК від вмісту в його хімічному складі: а – оксидів кремнію (1), алюмінію (2) та заліза (3); б – оксидів кальцію (4), магнію (5) та інших компонентів (6)

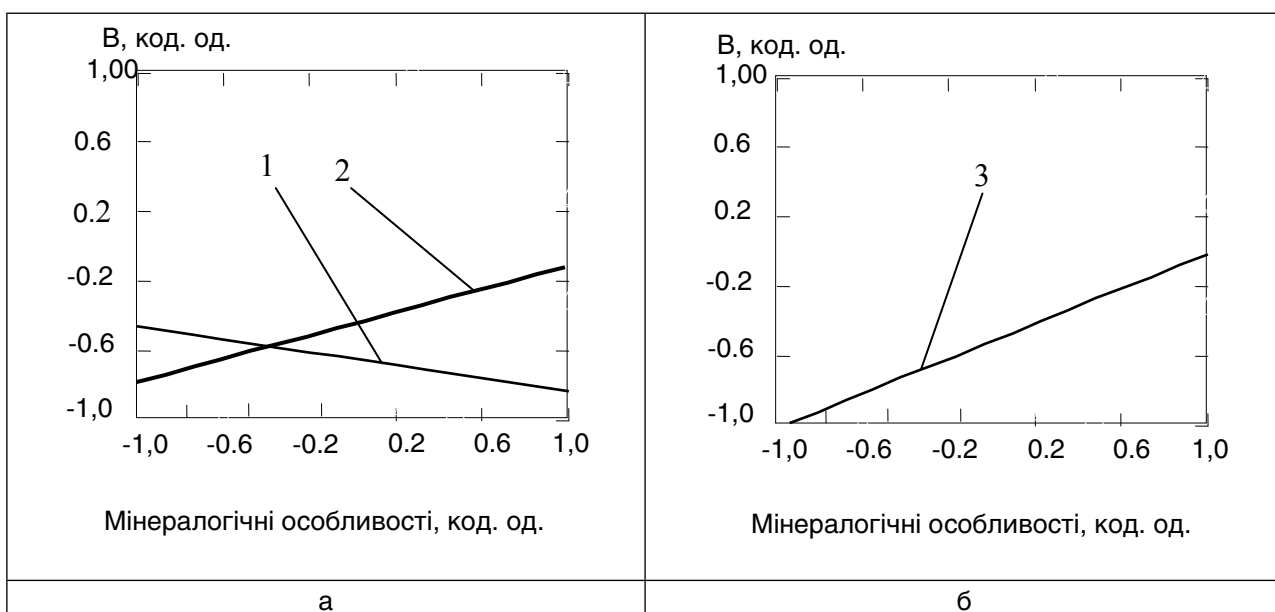


Рисунок 3. Залежність коефіцієнта оброблюваності (B) ПК від мінералогічних особливостей: а – найбільшого розміру зерен мінерального конгломерату (1), структури гірської породи (2); б – мікротвердості за Вікерсом основного породотвірного мінералу (3)

Комплексний чинник X_{11} , що бере до уваги спільні особливості хімічного та мінералогічного складу природних каменів, можна представити у вигляді

$$X_{11} = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \cdot c \cdot H_M}{h}$$

з урахуванням виявленого впливу факторів (рис. 2, 3). У цьому випадку з боку хімічного складу враховано тільки ті фактори, які призводять до зростання коефіцієнта відносної оброблюваності (вміст SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), а під час розгляду мінералогічних особливостей враховано всі (H_M , h , c). Фактори, збільшення яких призводить до зростання величини (B), розташовані в чисельнику.

Комплексний чинник X_1 , що охоплює фізико-механічні властивості каменів, представимо у вигляді:

$$X_1 = T_M \cdot H \cdot R_C \cdot \rho_0$$

У цьому випадку всі фактори записано у вигляді добутку, тому що зростання перших трьох із них (T_M , H , R_C) зумовлює зростання відносного коефіцієнта оброблюваності (рис. 1), а вплив середньої щільності (ρ_0) достовірно не з'ясований.

Враховуючи це та спираючись на дані таблиці 1, модель досліджуваного

процесу, який характеризує оброблюваність каменів, можна представити у вигляді системи 30 нелінійних алгебраїчних рівнянь (СНАР), два перших і два останніх члени якої в загальному вигляді можна записати так, як показано в таблиці 3, де A_{110} – A_{129} , A_{10} – A_{29} – коефіцієнти, які враховують вплив кожного з розглянутих комплексних факторів (X_{11} , X_1); A_{20} – A_{29} – коефіцієнти, які враховують взаємний вплив факторів.

Розв'язати цю перевизначену систему (кількість рівнянь більша, ніж кількість невідомих) можна за допомогою методу найменших квадратів (МНК) або методу Гауса (МГ) з використанням відповідного програмного забезпечення (MathCAD 2013) [1].

Якщо вирішити цю систему, задавши вхідні дані (табл. 1) у відносних одиницях і прийнявши за відносні одиниці показники та особливості, які відповідають мармуровому оніксу (рядок 1, табл. 1), то розв'язок матиме такий вигляд:

$$1.156 \cdot X_{11} + 9.819 \cdot X_1 + 0.00714 \cdot X_{11} \cdot X_1 - 8.819 = B \quad (1)$$

Графічна інтерпретація цієї рівності, а саме – залежності коефіцієнта відносної оброблюваності (B) від особли-

Таблиця 3. СНАР в загальному вигляді

1, 2, 29 та 30 рівняння СНАР
$A_{110} \cdot X_{11} + A_{10} \cdot X_1 + A_{20} \cdot X_{11} \cdot X_1 = B_0$
$A_{111} \cdot X_{11} + A_{11} \cdot X_1 + A_{21} \cdot X_{11} \cdot X_1 = B_1$
$A_{1128} \cdot X_{11} + A_{128} \cdot X_1 + A_{228} \cdot X_{11} \cdot X_1 = B_{28}$
$A_{1129} \cdot X_{11} + A_{129} \cdot X_1 + A_{229} \cdot X_{11} \cdot X_1 = B_{29}$

востей хімічного і мінералогічного складу (X_{11}) та фізико-механічних властивостей каменів (X_1) у відносних одиницях, показана на рисунку 4.

У таблиці 4 подано порівняльні дані фактичних значень коефіцієнта відносної оброблюваності (B – вектор вхідних даних), отримані на основі проведених досліджень відносних трудомісткості та енергоємності (табл. 1), та розрахункові (B_p – вектор розрахункових даних), отримані шляхом використання виразу (1), а також відносні похибки розрахунків. Середня похибка розрахунків складає 73 %. Ця похибка хоча й перевищує прийняту в інженерних розрахунках, але для ПК є прийнятною, якщо зважати на розбіжності в хімічному, мінералогічному складі, а також різниці в фізико-механічних властивостях каменю одного виду. Ця похибка буде зменшуватися за умови зростання кількості каменів, обраних для розробки моделі (наприклад, 50), або при окремому опрацюванні впливу кож-

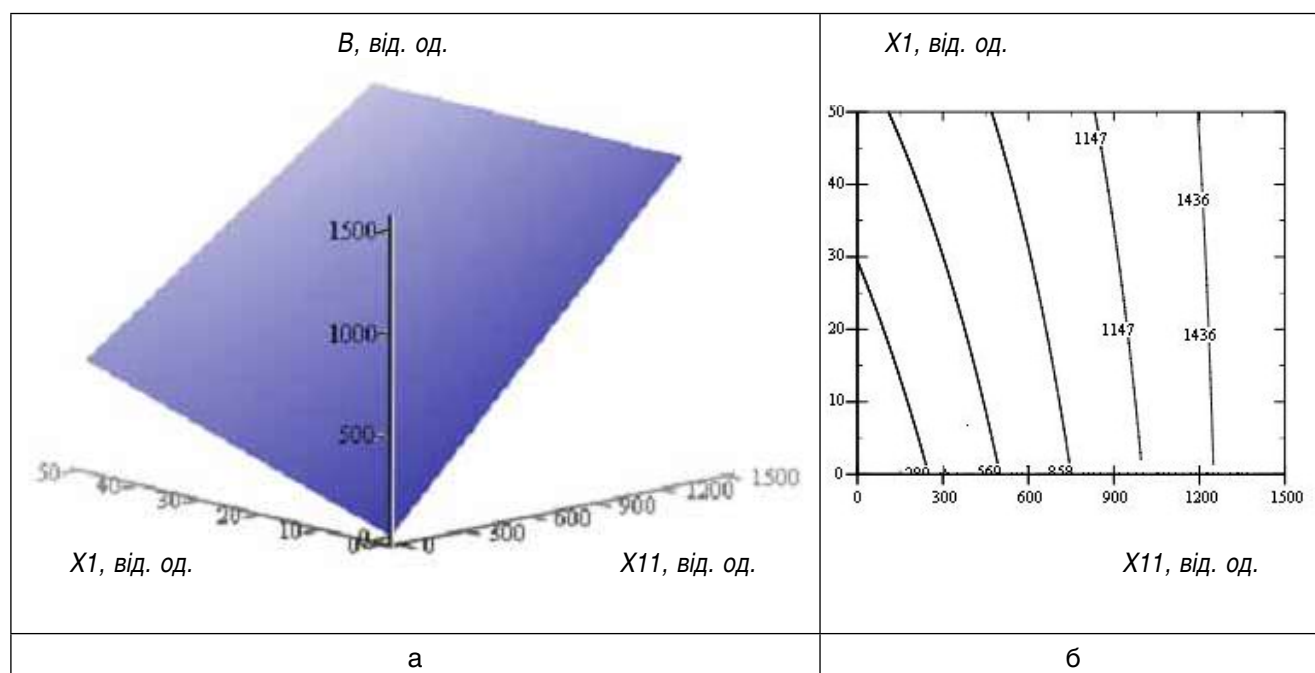


Рисунок 4. Залежність коефіцієнта оброблюваності (B) від особливостей хімічного та мінералогічного складу, з одного боку, а також фізико-механічних властивостей каменів, з іншого: а – тривимірна поверхня; б – лінії рівня

ного з факторів та обчисленні всіх можливих взаємовпливів факторів. Як уже було наголошено, в цьому випадку розглядається тривимірна модель.

Таким чином, за допомогою отриманої моделі, маючи дані про фізико-механічні властивості, особливості хімічного та мінералогічного складу будь-якого виду природного каменю, який потребує обробки або з якого потрібно виготовляти вироби, можна розрахунковим шляхом отримати орієнтовні відносні значення його оброблюваності (коефіцієнта відносно оброблюваності – B), зіставити їх з відповідними значеннями для інших каменів та зробити висновки про те, до якої групи оброблюваності цей вид можна віднести, що дозволить обґрунтовано призначати технологічні параметри обробки певного виду каменю в усіх технологічних операціях або операціях з виготовлення виробів з нього.

Таблиця 4. Похибки розрахунків

Вектор вхідних даних (B)	Вектор розрахункових даних (B_p)	Похибки, %
$B :=$	$B_p =$	$\Delta E I_i =$
1	0	0.031
1.89	1	68.465
1.51	2	74.464
5.2	3	40.97
7.34	4	59.299
55.6	5	78.396
13.9	6	40.383
8.81	7	55.432
8.36	8	67.108
37.8	9	61.297
14.6	10	83.614
11.16	11	81.53
15.34	12	91.303
459	13	3.275
71.4	14	61.361
56	15	76.482
142	16	10.317
65.9	17	55.997
192	18	49.049
62.1	19	56.376
181	20	6.716
197	21	0.481
237	22	764.427
370	23	96.837
253	24	16.7
1522	25	5.341
756	26	132.41
1830	27	10.701
1546	28	4.626
660	29	35.616

Використана література

1. Кирьянов Д. В. Mathcad 13. – СПб.: БВХ-Петербург, 2006. – 590 с.
2. Лазаренко Е.К. Курс минералогии: Учебник для университетов. – М.: Высшая школа, 1971. – 608 с.
3. Миловский А.В. Кононов О.В. Минералогия. – М.: Изд. МГУ, 1982. – 312 с.
4. Отчет ИСМ НАН Украины о НИР 1114 (арх. №2105) "Исследование основных закономерностей процесса алмазной обработки цветных камней с целью установления оптимальных режимов обработки". / Руководители: Александров В.А., Бобровский Е.И., Ляхов В.Н. Гос. Рег.№73055305. – Киев – ИСМ: 1974. – 74 с.
5. Пегловський В.В., Сидорко В.І., Ляхов В.Н., Поталико О.М. Оброблюваність природного камення – об'єктивна основа його класифікації. Частина 2. Фізико-механічні властивості напівдорогоцінного та декоративного камення // Коштовне та декоративне камення. – К.: Вид-во ДГЦУ. – 2009. – № 3 (57). – С. 16 – 21.
6. Пегловський В.В., Сидорко В.І., Ляхов В.Н., Поталико О.М. Оброблюваність природного камення – об'єктивна основа його класифікації. Частина 3. Основні поняття алмазної обробки каменів. Енергоємність обробки деяких видів природних каменів. Вплив властивостей каменів на енергоємність їх обробки // Коштовне та декоративне камення. – К.: Вид-во ДГЦУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 16 – 20.
7. Пегловський В.В., Сидорко В.І., Ляхов В.Н., Поталико О.М. Оброблюваність природного камення – об'єктивна основа його класифікації. Частина 4. Трудомісткість обробки деяких видів природних каменів. Вплив міцнісних властивостей каменів на трудомісткість їх обробки // Коштовне та декоративне камення. – К.: Вид-во ДГЦУ. – 2010. – № 1 (59). – С. 12 – 17.
8. Пегловський В.В., Сидорко В.І., Ляхов В.Н., Поталико О.М. Оброблюваність природного камення – об'єктивна основа його класифікації. Частина 5. Хімічний склад природних каменів. Вплив деяких його компонентів на міцнісні властивості каменів, енергоємність і трудомісткість їх обробки // Коштовне та декоративне камення. К.: Вид-во ДГЦУ. – 2010. – № 2 (60). – С. 4 – 11.
9. Пегловський В.В., Сидорко В.І., Ляхов В.Н., Поталико О.М. Оброблюваність природного камення – об'єктивна основа його класифікації. Частина 6. Мінералогічний склад природних каменів. Вплив мінералогічного складу каменів на енергоємність та трудомісткість їх обробки // Коштовне та декоративне камення. – К.: Вид-во ДГЦУ. – 2010. – № 3 (61). – С. 4 – 9.
10. Сидорко В.І., Пегловський В.В., Ляхов В.Н., Поталико О.М. Оброблюваність природного камення – об'єктивна основа його класифікації. Частина 1. Системи класифікацій природного камення // Коштовне та декоративне камення. – К.: Вид-во ДГЦУ. – 2009. – № 2 (56). – С. 8 – 11.
11. Федоровский Н.М. Курс минералогии. – М-Л-Новосибирск.: ГНТГИ, 1932. – 456 с.
12. ГОСТ 30629-99. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. – Введ. 01.01.2001.