

термостойкий эпоксидный композит, который окончательно выгорает при 920 °С. Максимальная рабочая температура композита – 250 °С.

### Литература

1. Шило А.Е., Шейкин С.Е., Гаврилова В.С. и др. Антифрикционное покрытие из полимерного композита для холодного пластического деформирования деталей из титановых сплавов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 12 – С. 467–470.
2. Розенберг О. О., Шило А. Ю., Гаврилова В. С. та ін. До питання розробки технологічних змашень для обробки деталей з титанових сплавів деформуючим протягуванням // Вісн. Житомирськ. інж.-технол. ін-ту. – 2009. – № 2(49). – С. 3–7.
3. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. – М.: Госхимиздат, 1963. – 528 с.
4. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. – К.: Наук. думка, 1981. – 288 с.
5. Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М., Браун Э. Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. – М.: Наука, 1986. – 238 с.
6. Фрейдин А. С. Прочность и долговечность клеевых соединений. – М.: Химия, 1971. – 256 с.
7. Дроздов Ю.Н., Павлов В. Г., Кучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

Поступила 25.06.10

УДК 621.9.06:679.8.051

**П. А. Чемоданов<sup>1</sup>, В. І. Сідорко<sup>2</sup>**, д-р. техн. наук

<sup>1</sup>Житомирський державний технологічний університет, Україна

<sup>2</sup>Науково-технологічний алмазний концерн «Алкон» НАН України

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВПІД ТА РОБОЧИХ РЕЖИМІВ П'ЯТИПОЗИЦІЙНОГО КАМЕНЕОБРОБНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ З ЧПК

*The coefficients of inflexibility of machine-tool are certain in three directions of the three-dimensional system of co-ordinates (x,y,z) depending on the chart of loading and dependences of the productivity of process of the diamond polishing (milling at treatment of marble and granit flag) are experimentally certain on the parameters of process of treatment.*

Більшість областей України мають значні запаси природного декоративного та облицювального каменю, для оброблення якого застосовують різні за конструкцією каменеобробні верстати як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва. Зарубіжні фірми-виробники верстатів (особливо Італії) постачають в Україну сучасні каменеобробні верстати з ЧПК, а саме: фрезерні з ЧПК для оброблення складнопрофільних поверхонь виробів з мармуру та граніту. Ці верстати коштують щонайменше 50 тис. дол., а тому більшість каменеобробних підприємств України не мають можливості їх придбати. Також вітчизняні каменеобробні підприємства недостатньо забезпечені сучасним алмазним інструментом. З оглядом на викладене основний експорт виробів з природного каменю з України становлять сировинні блоки та бруківка. В одночас зауважимо, що, наприклад Китай імпортує в Україну великий обсяг скульптур з каменю та інші вироби зі складнопрофільними поверхнями.

Вітчизняне верстатобудування не виготовляє каменеобробних фрезерних верстатів з ЧПК, тому на каменеобробні підприємства України мають на озброєнні фрезерні металообробні верстати з ЧПК, самотужки пристосовані для оброблення складнопрофільних поверхонь виробів з каменю.

Як бачимо, на сучасному етапі (надто в умовах світової фінансової кризи) постала проблема виготовлення вітчизняними підприємствами галузі машино- та верстатобудування сучасних високопродуктивних (із застосуванням високопродуктивних алмазно-абразивних інструментів) каменеобробних верстатів з ЧПК, значно нижчих за ціною від імпортних, але з високою якістю оброблення каменю, що відповідає вимогам якості виробів з каменю за світовими стандартами. У сучасних умовах розвитку верстатобудування в Україні можливо виготовляти верстати за новими технологічними схемами, а саме: каменеобробне обладнання з паралельними кінематичними зв'язками – триподи, гексаподи.

Проте недостатньо відомостей про дослідно визначені параметри технологічної системи ВПД та робочі режими сучасного багатопозиційного фрезерного верстата з ЧПК для оброблення складнопрофільних поверхонь кам'яних виробів, що потрібні для проектування (а потім виготовлення) вітчизняних каменеобробних фрезерних верстатів з ЧПК за вимогами світових стандартів.

Мета роботи полягає в одержанні вихідних даних для формування технічного завдання на проектування макета багатокординатного верстата зі складним просторовим рухом інструмента, а також в експериментальному дослідженні жорсткості пружної системи, силових характеристик та робочих режимів п'ятикоординатного каменеобробного верстата з ЧПК.

Дослідження виконували у виробничих умовах каменеобробного цеху на каменеобробному п'ятикоординатному фрезерному верстаті з ЧПК «Energia» італійської фірми «Prussia-ni Engineering» (рис. 1), що експлуатується протягом п'яти років.

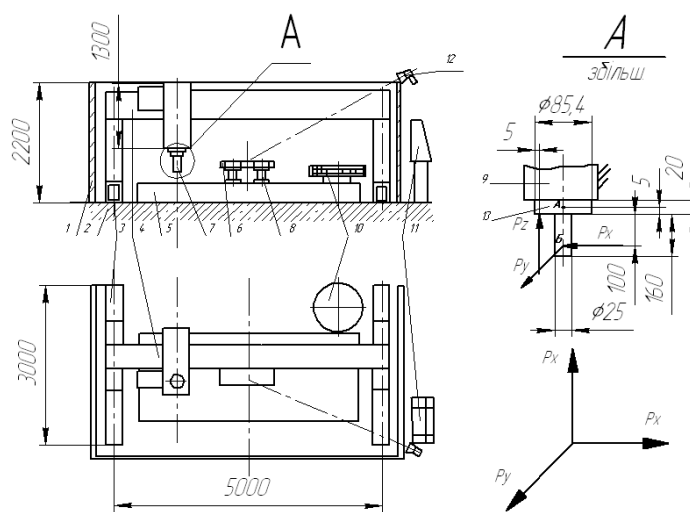


Рис. 1. . Технологічна схема верстата «Energia» (Італія): 1 – огорожа; 2 – фундамент; 3 – напрямна; 4 – міст верстата; 5 – стіл; 6 – виріб; 7 – робочий інструмент; 8 – вакуумне фіксує пристосування; 9 – шпindelний вузол; 10 – інструментальний барабан; 11 – пульт керування; 12 – стробоскопічний тахометр.

При дослідженні процесу оброблення торцевої поверхні кам'яних плит (гранітної і мармурової) застосовували алмазний інструмент – каменеобробну пальцеву фрезу Д9 ( $\text{D}25 \times 140$  мм), а також допоміжні та контрольно-вимірювальні прилади: динамометр натискного типу моделі ДОСМ-3-1 ТУ 2506590-73 0–1000 Н (ціна поділки – 0,143 Н); штангенциркуль КЛ-2 (ціна поділки – 0,1 мм); тахометр стробоскопічний 2ТСт 32-456 0–16000  $\text{хв}^{-1}$  (ціна поділки – 20  $\text{хв}^{-1}$ ); індикатор годинникового типу ИЧ-10 ГОСТ 577-82, межа вимірювання 0–10 мм (ціна поділки – 0,01 мм); магнітний стояк індикатора; навантажувальний пристрій.

Методикою проведення дослідів передбачалось вимірювання сумарної деформації пружної системи верстата за величиною віджимання шпинделя верстата в напрямі дії сил  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , розрахунок коефіцієнтів статичної жорсткості (Н/мм)

$$j_x = P_x / X; j_y = P_y / Y; j_z = P_z / Z,$$

та піддатливості (мкм/Н)

$$W_i = (1 / j_i) 1000$$

Коефіцієнти статичної жорсткості визначали у трьох напрямках тривимірної системи координат (X, Y, Z) при дії в напрямках цих осей сил  $P_x = P_y = P_z = 200$  та  $400$  Н за двома варіантами дії сил на шпиндельний вузол при ( $P_x \perp P_y \perp P_z$ ):– безпосередньо на шпиндель (без встановленого інструмента) та– на інструмент, встановлений у шпиндель.

Зауважимо, що сили  $P_x$ ,  $P_y$  та  $P_z$  статичного навантаження пружної системи верстата вибрали зі значним запасом, що у 3–5 разів перевищували силу різання при фрезеруванні кам'яних виробів. Розрахункова горизонтальна складова сили при обробленні торцевої поверхні гранітної плити не перевищувала 70 Н, вертикальна складова сили  $P_z$  була практично відсутня.

При проведенні вимірювання вісь X вибрали паралельною поверхні столу верстата та поздовжній осі симетрії балки мосту верстата і спрямованою до лівої опори мосту верстата; вісь Y так само розмістили в горизонтальній площині столу верстата перпендикулярно до осі X і спрямували до оператора, вісь Z – перпендикулярно до осей X та Y вертикально вгору. За таких умов значення коефіцієнтів жорсткості додатні.

Для визначення коефіцієнтів жорсткості системи вздовж осей X, Y, Z застосовували одну схему визначення сумарної деформації пружної системи верстата за величиною віджимання шпинделя верстата в напрямі дії зазначених сил [1].

Вертикально-фрезерні металообробні верстати, забезпечують лише взаємно перпендикулярні переміщення осями X, Y, Z, та характеризуються жорсткістю пружної системи в зазначених напрямках, що визнається відношенням прикладених сил до переміщення системи в напрямі дії цих сил. На відміну від таких верстатів пружну систему досліджуваного верстата, для оброблення складнопрофільних поверхонь кам'яних виробів за рахунок одночасного складання руху каретки зі шпинделем вздовж мосту, руху мосту напрямними та руху шпинделя напрямними каретки з одночасним обертанням шпинделя навколо осей X, Y можна охарактеризувати лише коефіцієнтами жорсткості  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$ ,  $\gamma_z$ , що так само характерно для багатокоординатного обладнання зі складним просторовим рухом інструмента.

За статичного навантаження шпинделя каменеобробного верстата силою  $P_x$  визначали сумарні віджимання  $x$  ланки шпиндельний вузол – каретка шпинделя – балка мосту з опорами в напрямі вісі X. При визначенні сумарних віджимань у вимірювали сумарні пружні переміщення цієї самої кінематичної ланки верстата, але в напрямі осі Y, а при визначенні сумарних віджимань  $z$  – сумарне переміщення шпиндельного вузла, каретки та мосту верстата в напрямі осі Z.

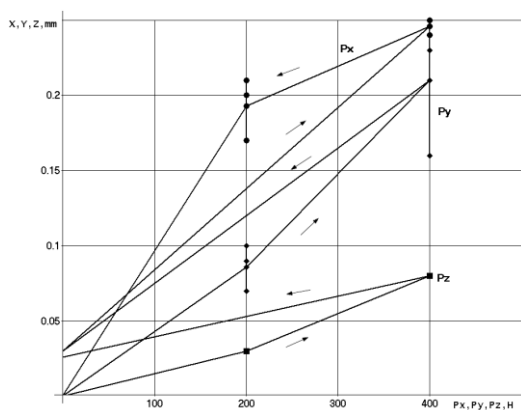
Результати дослідних вимірювань і розрахунку коефіцієнтів жорсткості та піддатливості пружної системи верстата наведені в табл. 1 та показані на рис. 2.

Сумарні віджимання  $x$  (стовпчик 4) перевищують сумарні віджимання  $y$  та  $z$ , причому вони збільшуються за збільшення плеча дії сили  $P_x$ .

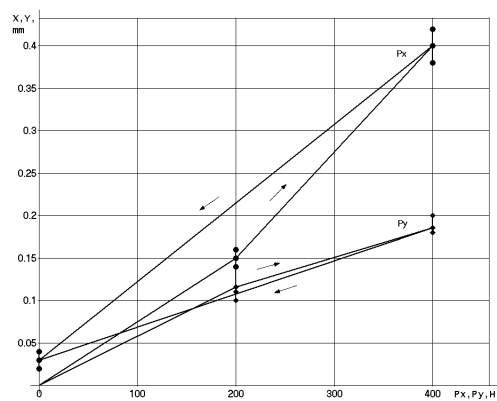
Порівняно з металорізальним фрезерним верстатом відповідні коефіцієнти жорсткості каменеобробного верстата з ЧПК у 9–16 разів менші, але досліджуваний верстат при обробленні кам'яних виробів забезпечує точність та якість поверхні згідно вимогам креслень і стандартів.

Таблиця 1. Результати експериментального дослідження параметрів пружної системи каменеобробного фрезерного верстата з ЧПК

Сила напружув дії	Значення, Н	Сумарне віджимання	Значення, мм	Коефіцієнт жорсткості $j_i$ , Н/мм	Коефіцієнт піддатливості $W_i$ , мкм/Н
Результати вимірювання			Розрахункові параметри		
Навантаження системи за першою схемою (без інструмента)					
$P_x$	200	X	0,17	1176	0,850
$P_x$	400	X	0,25	1600	0,625
$P_x$	200	X	0,20	1000	1,000
$P_x$	400	X	0,24	1667	0,600
$P_x$	200	X	0,21	952	1,050
$P_x$	400	X	0,25	1600	0,625
$P_y$	200	Y	0,07	2857	0,350
$P_y$	400	Y	0,16	2500	0,400
$P_y$	200	Y	0,09	2222	0,450
$P_y$	400	Y	0,23	1739	0,575
$P_y$	200	Y	0,10	2000	0,500
$P_y$	400	Y	0,24	1667	0,600
$P_z$	200	Z	0,03	6667	0,150
$P_z$	400	Z	0,08	5000	0,200
Навантаження системи за схемою 2, (інструмент встановлено в шпинделі)					
$P_x$	200	X	0,14	1429	0,700
$P_x$	400	X	0,38	1053	0,950
$P_x$	200	X	0,16	1250	0,800
$P_x$	400	X	0,40	1000	1,000
$P_x$	200	X	0,15	1333	0,750
$P_x$	400	X	0,42	952	1,050
$P_y$	200	Y	0,10	2000	0,500
$P_y$	400	Y	0,18	2222	0,450
$P_y$	200	Y	0,11	1818	0,550
$P_y$	400	Y	0,20	2000	0,500
$P_y$	200	Y	0,14	1429	0,700
$P_y$	400	Y	0,18	2222	0,450



а



б

Рис. 2. Графіки жорсткості пружної системи верстата в напрямках основних ортогональних осей при навантаженнях за схемою: а – першою; б – другою

Експериментальні значення коефіцієнтів жорсткості системи верстата та їх зміни при переміщенні в напрямі дії сил  $P_x$  та  $P_y$  пружних елементів системи осями  $X$  та  $Y$  при навантаженні за двома зазначеними схемами (рис. 3) дають змогу оцінити рівень необхідних параметрів жорсткості пружної системи проектованого верстата.

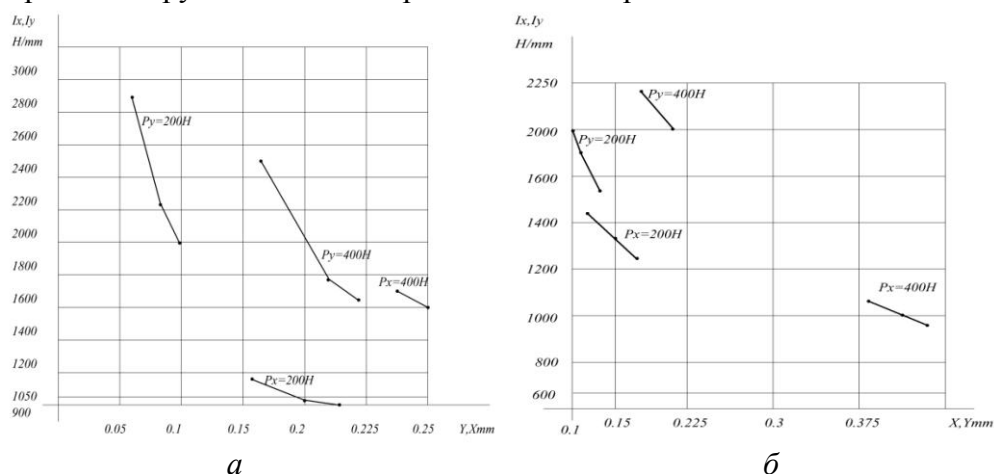


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів жорсткості  $j_x$ ,  $j_y$  від сумарних віджимань  $x$ ,  $y$  при дії сил  $P_x$ ,  $P_y$  на шпindelь верстата за схемами: а – першою; б – другою

Під час експериментальних досліджень алмазного фрезерування мармурової та гранітної плит однакового розміру  $30 \times 360 \times 630$  мм високопродуктивним алмазним інструментом з комплекту верстата – алмазною фрезою типу Д9 діаметром  $d_f = 25$  мм із зернистістю алмазів 400/315 мкм обробляли торцеві поверхні обох плит, змінюючи припуск на шліфування  $t_{ш}$ . Плити закріпили на нерухомому столі верстата за допомогою вакуумного пристосування (див. рис. 1). Оброблення виконували при обертанні шпинделя верстата проти подачі інструмента [2] Показники електродвигуна шпинделя: номінальна потужність  $N_{ном} = 7,5$  кВт; швидкість обертання –  $1500$  хв $^{-1}$  (з частотним регулюванням кількості обертів); ККД  $\eta = 0,95$ . Лінійна напруга  $U_k = 380$  В.

Швидкість обертання шпинделя з інструментом вимірювали стробоскопічним тахометром, Тривалість фрезерування – секундоміром. Інші показники (табл. 2) реєстрували приладами пульта керування верстатом. При обробленні бокових поверхонь плит забезпечена шорсткість поверхонь становила  $R_z = 320\text{--}400$ .

Сила струму в обмотці збудження електродвигуна шпинделя головного приводу верстата за холостого ходу становила 6,1–9,8 А, у процесі фрезерування підвищилась до 7,3–9,7 А.

За даними вимірювань основних електричних і механічних характеристик розраховали параметри роботи верстата:  $N_x$  – потужність електродвигуна шпинделя при холостому обертанні; відповідно  $N_p$  – робочомк обертанні;  $F_p$  – силу фрезерування (різання);  $M_x$ ,  $M_p$  – крутний момент при обертанні шпинделя відповідно холостому та робочому; співвідношення  $M_p/M_x$ ;  $Q$  – продуктивність процесу видалення матеріалу за перемінної швидкості подачі  $V_n$  та припуску на фрезерування  $t_{ш}$ . Одержані результати систематизували (табл. 3).

**Таблица 2. Результаты дослідних вимірювань електричних та механічних характеристик роботи каменеобробного верстата з ЧПК у процесі фрезерування мармурової та гранітної плит**

Найменування параметра	Робота верстата на холостому ходу		Фрезерування плити, розміром 30×360×630 мм					
			мармурової			гранітної		
Сила струму холостого ходу $I_{x,x}$ , А	9,8	9,8	6,2	6,4	6,2	6,1	6,1	6,1
Швидкість обертання шпинделя $n_i$ , хв <sup>-1</sup>	2900	3020	5300	5300	5300	5300	5300	5300
Діаметр інструмента $d_i$ , м	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Сила струму робочого ходу $I_{p,x}$ , А	–	–	8,2 8,0 8,1	8,4 8,3 8,8	9,7 9,2 9,0	7,4 7,5 7,3	7,9 8,0 7,8	8,0 8,1 7,9
Товщина шару фрезерування за один прохід $t_{ш}$ , мм	–	–	24	12	12	10	10	10
Швидкість подачі інструмента (каретки) $v_n \cdot 10^{-3}$ , м/с	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
Тривалість одного проходу при фрезеруванні $t$ , с	–	–	1220	620	414	1234	628	421

**Таблица 3. Результаты розрахунків параметрів роботи каменеобробного фрезерного верстату з ЧПК при фрезеруванні мармурової та гранітної плити**

Параметр	Розрахункова формула	Робота верстата на холостому ходу		Фрезерування плити розміром 30×360×630 мм					
				мармурової			гранітної		
Потужність електродвигуна шпинделя (холостий хід) $N_x$ , кВт	$N_x = I_{x,x} U_n \eta / 1000$	3,54	3,54	2,24	2,31	2,24	2,2	2,2	2,2
Потужність електродвигуна шпинделя (у процесі оброблення) $N_p$ , кВт	$N_p = I_{p,x} U_n \eta / 1000$	–	–	2,96 2,89 2,92	3,03 3,00 3,18	3,50 3,32 3,25	2,67 2,70 2,63	2,85 2,89 2,82	2,89 2,92 2,85
Сила фрезерування (дотична сила), $F_p$ , Н	$F_p = 19480 \frac{N_p}{n d_i}$	–	–	435 425 429	445 441 468	515 488 478	392 397 387	419 425 415	425 429 419
Крутний момент шпинделя за холостого ходу, $M_x$ , Н·м	$M_x = 9740 \frac{N_x}{n_i}$	11,9	11,4	4,1	4,3	4,1	4,04	4,04	4,04
Крутний момент шпинделя (у процесі оброблення) $M_p$ , Н·м	$M_p = 9740 \frac{N_p}{n_i}$	–	–	5,43 5,31 5,37	5,57 5,51 5,84	6,43 6,10 5,97	4,91 4,96 4,83	5,24 5,31 5,18	5,31 5,37 5,23
Співвідношення $M_p/M_x$	$M_p/M_x$	–	–	1,32 1,29 1,31	1,29 1,34 1,36	1,57 1,49 1,46	1,21 1,23 1,19	1,29 1,30 1,28	1,31 1,33 1,29
Продуктивність верстату $Q \times 10^{-5}$ , м <sup>3</sup> /хв	$Q = 3600 v_n t_{ш} \delta$	–	–	2,16	2,16	3,24	0,9	1,8	2,7

Як бачимо з даних табл. 3, потужність електродвигуна шпинделя за холостого  $N_x$  та робочого  $N_p$  ходу у 2–3 рази нижча від номінальної потужності електродвигуна ( $N_{ном} = 7,5$  кВт). При роботі верстата в режимі холостого обертання шпинделя значна частина потужності електродвигуна шпинделя витрачається на додання моментів інерції шпиндельного вузла, а в режимі робочого обертання шпинделя – на додання моментів інерції шпиндельного вузла та створення необхідної сили фрезерування  $F_p$  (залежно від властивостей і показників каменю, що фрезерується). Після завершення пускового періоду роботи електродвигуна шпинделя ( $N_x = 2,2\text{--}3,54$  кВт) при обробленні у сталому режимі потужність змінювалась у діапазоні  $N_p = 2,63\text{--}3,5$  кВт.

Сила фрезерування за підвищення швидкості подачі збільшується (рис. 4), причому при обробленні мармуру вона в 1,2 раза більша.

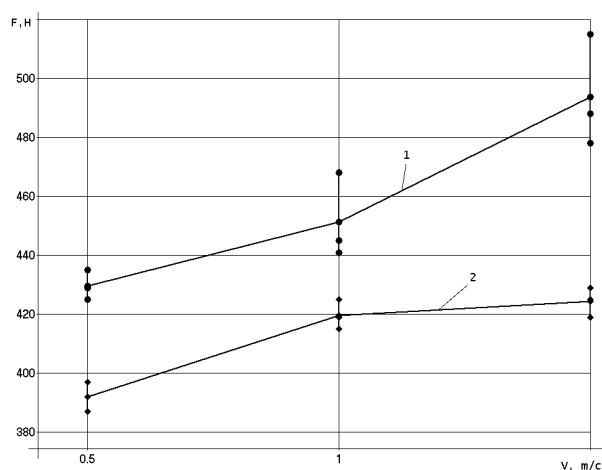


Рис. 4. Експериментальні залежності сили шліфування від швидкості подачі інструмента при обробленні: 1 – мармуру; 2 – граніту

Експериментальні залежності продуктивності алмазного фрезерування мармуру і граніту від швидкості подачі інструмента показані на рис. 5.

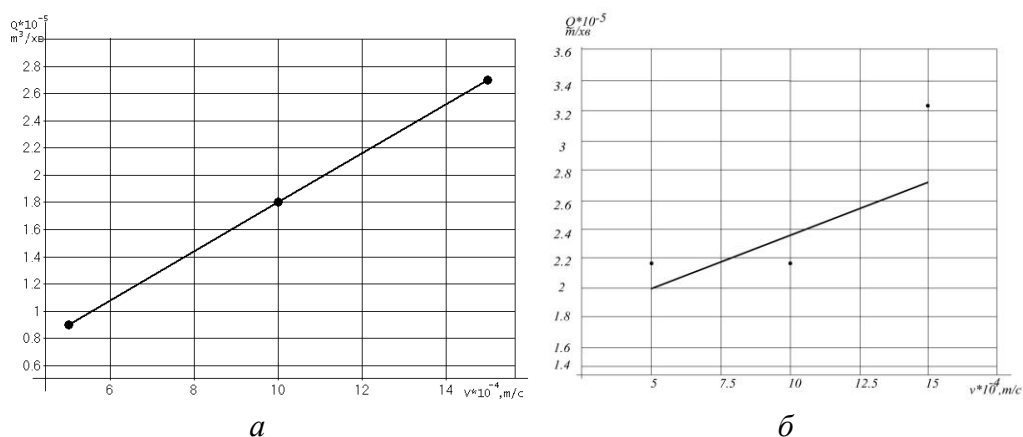


Рис. 5. Залежності продуктивності алмазного фрезерування від швидкості подачі інструмента: а – мармуру; б – граніту

## Висновки

1. Експериментально визначено статичну жорсткість технологічної системи п'ятипозиційного каменеобробного фрезерного верстата з ЧПК. Встановлено, що порівняно з металорізальним фрезерним верстатом відповідні коефіцієнти жорсткості каменеобробного верстата з ЧПК на порядок менші, але досліджуваний верстат при обробленні кам'яних виробів забезпечує точність та якість поверхні згідно з вимогами креслень та стандартів.

2. Экспериментально встановлено, що сила фрезерування з підвищенням швидкості подачі збільшується, причому при обробленні мармуру в 1,2 раза більша.

3. З метою оцінки рівня сил, що виникають при фрезеруванні кам'яних виробів за заданої продуктивності, за експериментальними даними побудовані діаграми, які можуть бути основою для формування вихідних даних при розрахунку параметрів камнеобробних верстатів.

### Литература

1. Соколовский А. П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. – М.Л.: Машгиз, 1952 г. – 288 с.
2. Сычѳв Ю. И., Берлин Ю. Я. Шлифовально-полировальные и фрезерные работы по камню. – М.: Стройиздат, 1985 г. – 312 с.

Надійшла 09.06.10

УДК 621.9

**В. И. Сидорко<sup>1</sup>**, д-р техн. наук; **В. Д. Курилович<sup>2</sup>**,  
**В. В. Пегловский<sup>1</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Научно-технологический алмазный концерн «Алкон» НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА С АЛМАЗНЫМ ВОЛОКНОМ В РАБОЧЕМ СЛОЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ГОРНЫХ ПОРОД

*In article possibility of use of the tool a working layer is considered, which is made of a diamond fibre for different kinds of a stone*

### Введение

При производстве различных, прежде всего строительных, изделий из горных пород (облицовочных и цокольных плит, ступеней и др. [1]) часто предусматривается полирование их лицевых поверхностей. Вместе с тем окончательная фактура некоторых лицевых поверхностей таких изделий иногда предусматривает также получение шлифованной (матовой, лощеной) поверхности [1; 2]. Это связано с определенными требованиями к дизайну таких изделий [3], а также эксплуатационными или функциональными требованиями к ним (например, получением «нескользящих» поверхностей ступеней или половой плитки для производственных помещений, помещений в учреждениях здравоохранения и т. д.). В этой связи разработка специализированного инструмента для получения неполированных (лощенных, матовых) поверхностей изделий из горных пород является актуальной задачей камнеобрабатывающего производства.

Украина является экспортером природного камня благодаря наличию значительных запасов декоративных камней, прежде всего гранитов, габбро и лабрадоритов, а также импортером изделий из природного камня. Структура экспорта природного камня из Украины в настоящее время носит сырьевой характер [8]. Так сырьевых блоков экспортируется 40 %, брусчатки – 24 %, изделий с полированной или обработанной другими способами поверхностью – 36 %. Импортируются в Украину преимущественно полированные слябы, плитка, мозаичные панно. В то же время импорт каменных блоков составляет около 4% общего его объема.

Наибольшую часть экспортируемого Украинского камня составляют: граниты (Капустянского, Емельяновского, Токовского и других месторождений) – 34,2 тыс. м<sup>3</sup>, габбро