

П.А. Чеможданов, ст. викл.  
Житомирський державний технологічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ АЛМАЗНИМ ПРОФІЛЬНИМ РОЛИКОМ СКЛАДНОПРОФІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ВИРОБУ З ГРАНІТУ

(Представлено д.т.н. Сідорком В.І.)

У статті виконано теоретичне дослідження силових параметрів процесу формоутворення складнопрофільної поверхні великогабаритного кам'яного виробу.

**Постановка проблеми.** Сучасні каменеобробні підприємства України та інших країн мають доволі велике різноманіття каменеобробних верстатів, за допомогою яких виконують операції розпилювання кам'яних блоків, фрезерування плит із слябів, шліфування плоских поверхонь за допомогою алмазного інструмента.

Для обробки складнопрофільних поверхонь кам'яних виробів висотою до 700 мм застосовують каменеобробні фрезерні верстати з ЧПК, а для – великогабаритних виробів ( $2 \times 2 \times 1,5$  і більше) застосовують застарілу малопродуктивну технологію із застосуванням сучасного ручного електроінструмента (з попередньою просторовою розміткою).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Створення нових каменеобробних верстатів для обробки складнопрофільних поверхонь великогабаритних кам'яних виробів потребує певних теоретичних дослідів процесів формоутворення складнопрофільних поверхонь алмазним профільним роликом АПР: існуюча теорія різання [2] алмазною дисковою пилкою каменю не пояснює особливості процесу фрезерування каменю за допомогою АПР. Разом із тим, недостатньо відомі аналітичні залежності силових параметрів процесу фрезерування АПР складнопрофільних поверхонь великогабаритних виробів з граніту.

**Метою даної роботи** є побудова схем силових параметрів процесу фрезерування АПР складнопрофільної поверхні каменю та створення аналітичних залежностей визначення сили різання.

**Викладення основного матеріалу.** Теоретичне дослідження силових параметрів процесу фрезерування АПР складнопрофільної поверхні великогабаритного виробу з граніту.

На рисунку 1 зображена схема етапів технологічного процесу фрезерування складнопрофільної поверхні кам'яної заготовки АПР на каменеобробному фрезерному верстаті. В цьому процесі (при фрезеруванні великогабаритної кам'яної заготовки) сам АПР при  $D \geq 400$  мм має вагу близько 100 кг і більше та є маховиком, що створює колову силу  $F_m$  (рис. 2), яка не врахована в схемі сил джерела [2].

При обробці АПР складнопрофільної поверхні великогабаритного виробу з граніту утворюється значний об'єм шламу, чим зумовлено виникнення сили дії шламу  $P_1$  (рис. 2) на тіло АПР, яка теж не врахована на схемі сил джерела [2].

Обертання шпинделя з АПР створює через пасову передачу індукційний електродвигун, який має таку характеристику крутного моменту, що навіть невелике падіння обертів вибиває його з нормальної роботи: двигун моментально втрачає потужність, також миттєво зростає напруга електроструму. Внаслідок цього АПР клинчить у камені.

Щоб уникнути таких ситуацій західні виробники обов'язково встановлюють на фрезерних каменеобробних верстатах електродвигуни з запасом потужності у 1,5–3 рази [6] і це підтверджено дослідями п'ятипозиційного каменеобробного фрезерного верстата з ЧПК [3].

Для нашого дослідження обираємо запас потужності у 1,85 (табл. 2). Такий великий запас потужності не призводить до більшого споживання електроенергії під час фрезерування. Лише під час холостого ходу, такий електродвигун забирає більше електроенергії, ніж його вдвічі або втричі слабший аналог: споживання електроенергії електродвигуном залежить виключно від опору, який утворюється від взаємодії АПР з каменем, а не від номінальної потужності двигуна [3, 6].

Схема етапів (вид у плані) технологічного процесу фрезерування (шліфування) кам'яної заготовки алмазним профільним роликом.

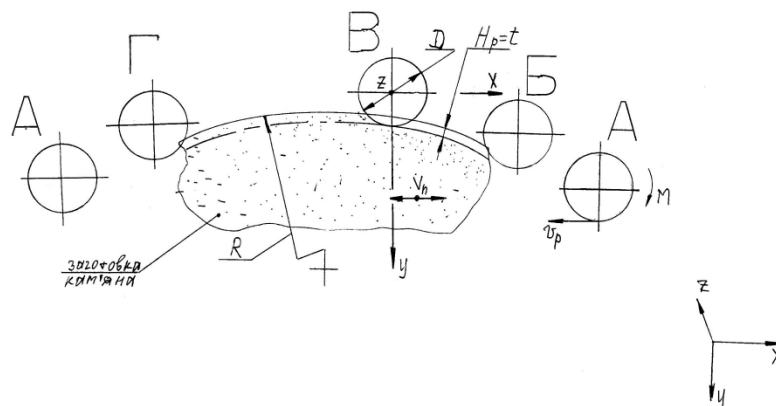


Рис. 1. Схема етапів технологічного процесу фрезерування (шліфування) кам'яної заготовки алмазним профільним роликом АПР (вид у плані):  
 $D$  – діаметр алмазного профільного ролика АПР;  $V_n$  – швидкість подачі;  
 $H_p=t$  – товщина шару фрезерування (шліфування) за один прохід ролика;  
 $R$  – радіус обробки поверхні;  $V_p$  – швидкість різання;  $M$  – крутний момент;  
 $A$  – зона накопичення енергії роликом  $D$  як маховиком;  $B$  – зона врізання ролика  $D$  у кам'яну заготовку;  $V$  – зона фрезерування (шліфування) роликом  $D$ ;  
 $\Gamma$  – зона виходу ролика  $D$  з процесу фрезерування (шліфування) та зона врізання ролика  $D$  при зворотному фрезеруванні

Саме створення запасу маховичної енергії  $T$  ролик  $D$  виконує, як маховик у зоні  $A$  і після виходу з зони  $\Gamma$  заготовки та зміни напрямку фрезерування (шліфування) на протилежний. Діаметр АПР ролика  $D$  дорівнює 400 мм.

Примітка:

1. Зони  $A$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $\Gamma$  – зображені умовно, бо рухається сама кам'яна заготовка зі швидкістю подачі  $V_n$ , а ролик  $D$  «стоїть» на місці.
2. За Р.Клерком ротор маховичного накопичувача енергії  $T$  повинен виконати не менше десяти обертів протягом циклу підводу або зйому енергії.

#### Процес різання каменю (граніту).

Процес різання – фрезерування (шліфування) алмазним профільним роликом АПР кам'яної заготовки (граніту) був розглянутий у трьох випадках:

I випадок – процес фрезерування однорідної структури каменю без твердих включень; в цьому випадку колова сила  $F_m$ , яку АПР створює як маховик незадіяна ( $F_m = 0$ );

II випадок – процес фрезерування каменю, структура якого має відносно невелику кількість твердих включень, які фрезеруються за рахунок додатку до сили  $F_t$  сили  $F_m$ ;

III випадок – процес фрезерування каменю, структура якого має значну кількість твердих включень, які фрезеруються за рахунок додатку сили  $F_m$  до сили  $F_t$  і вживання АПР усієї потужності двигуна  $N_{cp} = N$ .

На рисунку 2 розглянуто схему силових параметрів процесу різання–фрезерування (шліфування) АПР каменю–граніту (при обробці складнопрофільної поверхні). В таблиці 1 надано вихідні дані для виконання розрахунків складових сили різання, результати яких представлено у таблиці 2.

За розрахунками таблиці 2 побудовано (рис. 3) графіки залежностей:  $R_1 = f(N)$ ;  $P_{bl} = f(N)$ ;  $P_{\Gamma 1} = f(N)$ .

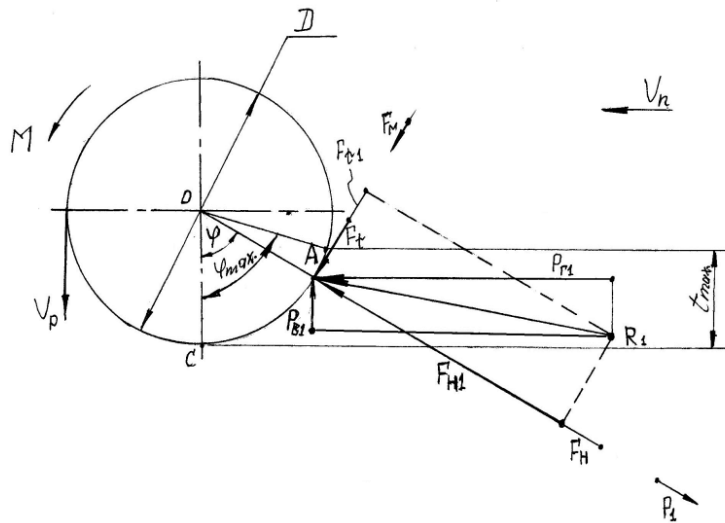


Рис. 2. Схема силових параметрів процесу різання алмазним профільним роликом:  
 $M$  – крутний момент;  $V_p$  – швидкість різання;  $V_n$  – швидкість подачі;  $D$  – діаметр алмазного профілю ролика;  $t_{max}$  – товщина шару каменю, що фрезерують;  
 $\varphi_{max}$  – максимальний кут контакту (повороту) алмазним профільним роликом (АПР),  
 $\varphi$  – кут повороту АПР (попередній);  $R_1$  – сила різання;  $F_n$  – нормальна сила;  $P_1$  – сила дії шлему на АПР;  
 $F_{n1}$  – результуюча сила сил  $F_n$  і  $P_1$ ;  $F_t$  – дотична складова;  
 $F_m$  – дотична сила, яку АПФ створює як маховик;  $F_{m1}$  – результуюча сила сил  $F_t$  і  $F_m$ ;  
 $P_{21}$  – горизонтальна складова (сила подачі) сили  $R_1$ ;  $P_{11}$  – вертикальна складова сили  $R_1$

Таблиця 1

Визначення складових сил різання-фрезкування (шліфування)  $R_1$ .  
 Вихідні дані

№ з/п	Найменування параметра										Примітка
	Величина максимально можливої товщини шару каменю, що знімається за 1 прохід АПР, $t_{max}$ , м	Діаметр АПР $D$ , м	Товщина (довжина) АПР $H_{ф}$ , м	Максимальний кут контакту (повороту) АПР, $\varphi_{max}$ , рад.	Потужність електродвигуна, $N$ , кВт (номінальна)	Кількість обертів шпинделя, $n$ , хв. <sup>-1</sup>	Характеристика відношення $F_n/F_t$ , m	Вага АПР з канатною муфтою $m_1$ , Н	Сила дії шлему на тіло АПР у зоні контакту АПР з каменем $P_1$ , Н	Колова сила, яку АПР створює як маховик $F_m$ , Н	Позначення: АПР – алмазний профільний ролик
											Розрахунок величин: $t_{max}$ , $\varphi_{max}$ , $P_1$ , $F_m$ [1]
											Характеристика $m$ [2]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,035	0,4	0,35	0,61	37	1430	3,56	2135	54	136	

## Результати розрахунків складових сили різання

№ з/п	Параметр	Формула розрахунку	Результат розрахунку			Примітка
			I випадок	II випадок	III випадок	
1.	Попередній (перед максимальним $\varphi_{\max}$ ) кут повороту АПР $\varphi$ , рад.	$\varphi = \arcsin \frac{2t_{\max}}{D \cdot \varphi_{\max}}$	0,29	0,29	0,29	$\varphi = 16^{\circ}52'$ [2]
2.	Середня потужність, що вживають на фрезерування $N_{\text{ср}}$ , кВт	$N_{\text{ср}} = N / 1,85$	20	20	37*	*Приймаємо $N_{\text{ср}} = N$ для III випадку
3.	Робота за один оберт АПР $A_{\text{об}}$ , Н·м	$A_{\text{ia}} = 60 \cdot 102 \cdot N_{\text{об}} / n_i$	856	856	1580	[2]
4.	Дотична складова сили різання $F_t$ , Н	$F_t = \frac{A_{\text{об}}}{\pi \cdot D}$	681,5	681,5	1260	[2]
5.	Нормальна складова сили різання $F_n$ , Н	$F_n = F_t \cdot m$	2420	2420	4470	[2]
6.	Результуюча сила $F_{t1}$ сил $F_t$ і $F_m$ , м	$F_{t1} = F_t + F_m$	681,5	817	1400	Сила $F_m = 0$ для I випадку (не задіяна)
7.	Результуюча сила $F_{n1}$ сил $F_n$ і $P_1$ , Н	$F_{n1} = F_n - P_1$	2366	2366	4400	
8.	Сила різання $R_1$ , Н	$R_1 = \sqrt{F_{n1}^2 + F_{t1}^2}$	2460	2500	4620	[2]
9.	Горизонтальна складова (сила подачі робочого столу) сили $R_1$ , а саме: $P_{r1}$ , Н	$P_{r1} = F_{t1} \cdot \cos \varphi \mp F_{n1} \cdot \sin \varphi$	за подачею	за подачею	за подачею	- схема різання "за подачею", + схема різання "проти подачі" [2]
			-39,5	90	10	
			проти подачі	проти подачі	проти подачі	
10.	Вертикальна складова $P_{v1}$ сили $R_1$ , Н	$P_{v1} = F_{t1} \cdot \sin \varphi \mp F_{n1} \cdot \cos \varphi$	за подачею	за подачею	за подачею	
-2060			-2020	-3790		
проти подачі			проти подачі	проти подачі		
			2460	2500	4610	

Примітка: Знак "–", для величин сил  $P_{r1}$  і  $P_{v1}$  означає, що АПР зтягує кам'яний виріб (табл. 2 рядки 4–6)

1. За графіками рисунка 3 отримали, що графік сили  $R_1$  практично співпадає з графіком сили  $P_{v1}$  (проти подачі) можна вважати, що  $R_1 = P_{v1}$  (проти подачі), остання за своєю величиною значно більша за силу  $P_{r1}$ .

2. При переході роботи верстата з I випадку в II маємо незначну зміну величин сил  $R_1$  і  $P_{v1}$  (проти подачі) у 40 Н, а сили  $P_{v1}$  (за подачею) у "– 40 Н", а сил  $P_{r1}$  (проти подачі) і (за подачею)  $\approx |130|$  Н.

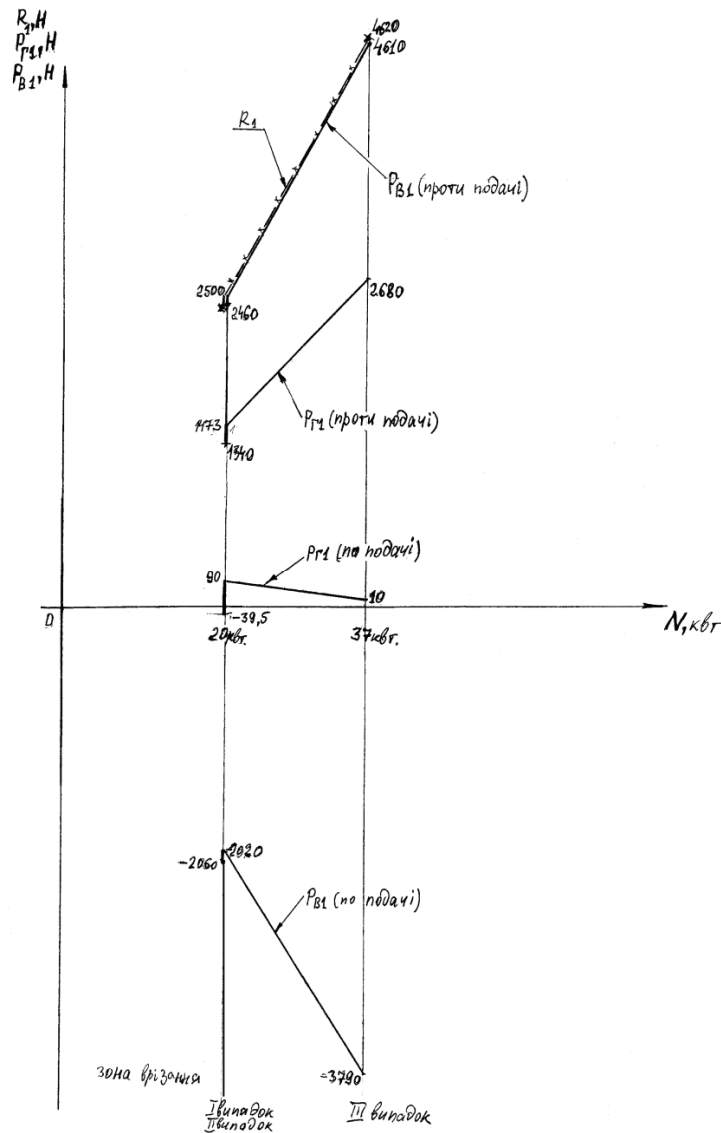


Рис. 3. Графічне зображення залежностей:  $R_1 = f(N)$ ;  $P_{B1} = f(N)$ ;  $P_{Г1} = f(N)$ .  
 Позначення:  $R_1$  – сила різання;  $P_{B1}$  – вертикальна складова сили  $R_1$ ;  
 $P_{Г1}$  – горизонтальна складова сили  $R_1$

У процесі фрезерування каменю АПР, маса  $m_1$  останнього у міру зносу алмазовмісного шару зменшується, бо зменшується діаметр  $D$  АПР, а отже зменшується сила  $F_m$ ; з розрахункових формул та даних джерел [4] і [5] отримано вираз (табл. 1):

$$F_i = \frac{1,336 \cdot m_1 \cdot D \cdot n_i}{1200}$$

Відповідно при зменшенні  $F_m$  зменшується і сила  $F_{т1}$  (формула в таблиці 2) до певної межі, при якій маємо повністю зношений алмазовмісний шар АПР, через що процес фрезерування граніту необхідно припинити і встановити новий робочий АПР.

При певних технологічних параметрах роботи верстата може зростати сила дії шламу  $P_1$  на тіло АПР (в зоні контакту АПР з гранітом) до величини сили  $F_{н1}$ . При значному наближенні величини сили  $P_1$  до величини сили  $F_{н1}$  (вони протилежні у напрямках) утворюється явище “налипання” шламу на оброблену поверхню граніту на тіло АПР.

(Примітка: за джерелом [1]:  $P_1 = \frac{A}{2} \int_0^{\gamma \delta} \int_{\varphi}^{D+\Delta\varphi} l \Delta \cdot c(t) / t(\varphi) \cdot \sin \alpha \varphi \cdot dH\delta \cdot$

У випадку, коли  $P_1 = F_{H1}$  процес різання-фрезерування (шліфування) припиняється, бо за таблицею 2 та аналітичним виразом джерела [2]  $\overline{F_H} = \overline{F_{H1}} + \overline{P_1} = |F_{H1}| - |P_1| = 0$ , тоді  $F_t = F_H/m = 0$ , через що  $A_{об} = F_t \cdot \Pi \cdot D = 0$ , а це означає, що відсутня робота за один оберт  $A_{об}$  АПР.

#### Висновки:

1. При фрезеруванні складнопрофільних поверхонь великогабаритних виробів з граніту алмазним профільним роликком АПР ( $\phi 400 \times 350$  мм) теоретично досліджено вплив колової сили АПР як маховика і сили дії шламу на АПР, на величини складових сили різання і виникнення явища налипання шламу на інструмент і оброблену поверхню виробу.

2. Виведено аналітичні залежності визначення сили різання (і побудовано схему сил) при обробці АПР складнопрофільної поверхні великогабаритних виробів з граніту.

3. Далі необхідно визначити дослідженням меж величини сили дії шламу на АПР, при якій система процесу різання або пружна система верстата стають нестійкими.

#### Список використаної літератури:

1. *Чемоданов П.А.* Виконання експериментального дослідження роботи моделі каменеобробного порталного фрезерного верстата з криволінійним формоутворюючим рухом робочого столу з кам'яною заготовкою по копір-колії / *П.А. Чемоданов, А.В. Лисенко, В.І. Сідорко* // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2011.– Вип. 10. – 410 с.
2. *Александров В.А.* Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом / *В.А. Александров.* – К. : Наук. думка, 1979. – 240 с.
3. *Чемоданов П.А.* Експериментальне дослідження параметрів технологічної системи ВПД та робочих режимів п'ятипозиційного фрезерного верстата в ЧПК / *П.А. Чемоданов, В.І. Сідорко* // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления : сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – Вип. 13. – 560 с.
4. *Джента Дж.* Накопление кинетической энергии. Теория и практика современных маховичных систем : пер. с англ. / *Дж.Джента.* – М. : Мир, 1988. – 430 с.
5. *Гулиа Н.В.* Маховичные двигатели / *Н.В. Гулиа.* – М. : Машиностроение, 1976.
6. *Коробійчук В.В.* Технологія розпилювання природного каменю : навч. посібник / *В.В. Коробійчук, О.А. Зубченко.* – Житомир : ЖДТУ, 2010. – 182 с.

ЧЕМОДАНОВ Петро Арисович – старший викладач кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– каменеобробні верстати.

Стаття надійшла до редакції 18.01.2012

**Чемоданов П.А.** Дослідження силових параметрів процесу фрезерування алмазним профільним роликком складно профільної поверхні великогабаритного виробу з граніту

**Чемоданов П.А.** Исследование силовых параметров процесса фрезерования алмазным профильным роликком складнопрофильной поверхности крупногабаритного изделия из гранита

**Chemodanov P.A.** Исследование силовых параметров процесса фрезерования алмазным профильным роликком складнопрофильной поверхности крупногабаритного изделия из гранита

УДК.621.9.06:679.8.051

**Исследование силовых параметров процесса фрезерования алмазным профильным роликком складнопрофильной поверхности крупногабаритного изделия из гранита / П.А. Чемоданов**

В статье выполнено теоретическое исследование силовых параметров, процесса формирования складнопрофильной поверхности крупногабаритного каменного изделия.

УДК.621.9.06:679.8.051

**Research of power parameters of milling process by the diamond profile roller figurine of the large granite products / P.A. Chemodanov**

Theoretical research of power parameters, the process of formation of the large stone figurine products is made in the article