

**Євген Валентинович Корбут<sup>1</sup>, Валерія Сергіївна Парненко<sup>2</sup>,  
Тетяна Петрівна Ніколаєнко<sup>3</sup>, Олександр Васильович Даниленко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [korbut113@gmail.com](mailto:korbut113@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1221-4052>. Scopus Author ID: [56736964700](https://orcid.org/0000-0002-1221-4052)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [v.parmenko@kpi.ua](mailto:v.parmenko@kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>. Scopus Author ID: [57217101654](https://orcid.org/0000-0002-1450-2744)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [tatyana.rodina@gmail.com](mailto:tatyana.rodina@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0960-1251>

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [alednlnk@gmail.com](mailto:alednlnk@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1587-9225>

## АРХІТЕКТУРА ДИСКРЕТНОГО ПОКРИТТЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ РІЗНИХ СХЕМ РІЗАННЯ

Для вирішення питання ефективності використання інструмента з нанесеними на його робочі поверхні дискретних покриттів глобулярної структури необхідно розглянути фактори, що впливають на звантаженість різальних кромки. Звантаженість різальних кромки таких інструментів із нанесеним дискретним покриттям глобулярної структури залежить не лише від їхніх матеріалів та покриття, а й від схеми різання, яка відповідає мікрорізанню елементами покриття. У статті розглянуто вплив схеми різання на розташування цих ділянок. Розглянуто однолезовий інструмент дискретні ділянки покриття якого розташовані у шаховому порядку вздовж різального леза для отримання ефекту суцільного покриття. Також розглянуто багатолезовий інструмент де зміщення ділянок відбувається групами залежно від глибини різання. У роботі розраховано кількість глобул на кожній дискретній ділянці відрізної фрези, та силове навантаження інструменту, при якому в межах досліджуваних умов обробки не виникає руйнування покриття.

**Ключові слова:** процес різання; різальний інструмент; волокнистий полімерний композиційний матеріал; дискретне покриття глобулярного типу; схеми різання; дискові відрізи фрези.

Рис.: 4. Табл.: 7. Бібл.: 21.

**Актуальність теми дослідження:** Питання визначення працездатності інструменту шляхом створення захисних зміцнювальних покриттів на різальному інструменті є однією з задач підвищення ефективності їх використання. Основною вимогою до інструменту з покриття є запобігання руйнування покриття в процесі його експлуатації. На основі теоретичних досліджень когезійної, адгезійної та контактної міцності будь-якого покриття його руйнування залежить від фізико-механічних характеристик покриття підложки, на яке наноситься покриття [1; 2; 3; 4] та силового навантаження.

Звантаженість різальних кромки будь-якого інструмента залежать не тільки від його матеріалу з нанесеним покриттям і оброблюваної поверхні, але й від схеми різання, яка збігається зі схемою мікрорізання елементами покриття. За схемою мікрорізання визначається розташування глобул вздовж різальних кромки та розташування дискретних ділянок перпендикулярно різальній кромці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищення зносостійкості робочих поверхонь РІ є основним резервом збільшення їхньої працездатності [5]. Зносостійкі покриття дозволяють підвищити довговічність РІ в декілька разів [6, 7, 8, 9]. Згідно з літературними джерелами [10; 11; 12; 13] сила різання при обробці ПКМ істотно впливає на якість обробки. Так, при збільшенні сили різання зростає температура в зоні різання, що призводить до деструкції матеріалу деталі. Також збільшення значення сили різання впливає на виникнення

магістральної тріщини в ПКМ, що впливає на експлуатаційні характеристики виробу – знижують цілісність композиту і як наслідок зменшують міцність деталі з ПКМ. Для вирішення доцільності використання інструменту з дискретно модифікованими робочими поверхнями необхідно дослідити вплив дискретизації робочої поверхні на силу різання. У статті розглядається покриття дискретного типу глобулярної структури [14; 15]. Дискретизація покриття призводить до зменшення величин залишкових напружень, що має підтвердження в роботах інших дослідників [16; 17; 18]. При цьому рівень залишкових напружень залежить від геометричних параметрів дискретних ділянок.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Визначення архітектури покриття на найбільш завантажених поверхнях інструменту гарантує визначення допустимих напружень на цих поверхнях, при яких у межах досліджуваних умов обробки не виникає руйнування покриття і які в процесі різання пов'язані з кінематичною схемою обробки.

**Метою статті є** визначення архітектури дискретних ділянок покриття глобулярної структури, нанесеного на робочі поверхні інструменту при різних схемах різання та силі завантаження різальних кромки інструменту при свердлінні та відрізанні.

**Виклад основного матеріалу.** Дискретні покриття глобулярної структури залежно від його товщини характеризується ділянками розмірами з кроком розташування та розміром ділянки на різальних елементах інструмента. Усередині цих ділянок нанесене глобулярне покриття, глобули якого розташовуються паралельно сторонам ділянок. При такій конструкції покриття процес мікрорізання здійснюється кожною глобулою в межах дискретної ділянки, тобто групою глобул, утворюючи на поверхні інструмента рельєф подібний суцільному (рис. 1). У цьому випадку завантаження поверхні інструменту (з урахуванням процесу мікрорізання) залежно від розташування дискретних ділянок.

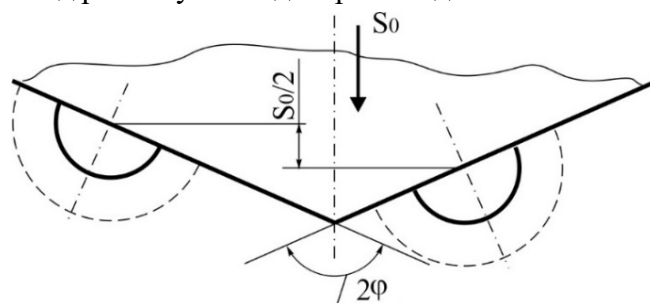


Рис. 1. Спрощена схема мікрорізання при свердлінні

Джерело: розроблено авторами.

Розглянемо розташування дискретних ділянок та утворення рельєфу глобулярного покриття на прикладі свердління ВПКМ.

Аналізуючи схему мікрорізання дискретним глобулярним покриттям при свердлінні можна зазначити, що в процесі обертання свердла глобули та дискретних ділянках, розташовані на двох різальних кромках за один оберт перекривають відстань між глобулами та дискретними ділянками [19]. Перекриття між глобулами відповідає кроку між глобулами та дискретними ділянками і дорівнює 0,5 діаметра глобули та розміру ділянки [20].

При свердлінні завдяки двом різальним лезам інструмента за один оберт свердла, кожна дискретна ділянка разом з глобулами під дією подачі зміщується як показано на рис. 1. Зміщуючись одна відносно другої утворюють на дискретній ділянці покриття подібне суцільному з певним рельєфом (рис. 2) [20].

Схема різання свердла характеризується кінематичною схемою, основою на сполученні двох рівномірних рухів – обертального і поступального. До цієї кінематичної схеми так само відноситься фрезерування і точіння. Проте слід відзначити, що точіння належить до однолезового інструменту в порівнянні зі свердлінням та фрезеруванням.

В основу розрахунку міцності глобули покладено розмір глобули, яка розглядається як полусфера, радіус якої відповідає товщині покриття.

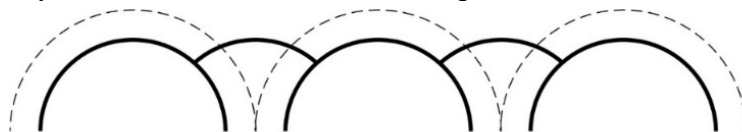


Рис. 2. Рельєф глобулярного покриття [11]

Джерело: розроблено авторами.

Нормальні залишкові напруження в покритті можна визначити за формулою:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{(\alpha_n - \alpha_o) \Delta T}{\frac{1 - \nu_n}{E_n} + \frac{1 - \nu_o}{E_o} \cdot \frac{h_n}{2H_o}},$$

де  $\alpha_n, \alpha_o$  – середні лінійні коефіцієнти розширення матеріалів покриття і основи в інтервалі  $\Delta T$ ;  $\Delta T$  – різниця між температурою нанесення покриття і основою;  $\nu_n, \nu_o$  – коефіцієнти Пуассона матеріалів покриття і основи відповідно.

Максимальний допустимий розмір ділянки  $D$ , виходячи з умови недопущення вспучування при дії залишкових напружень стиску визначається за формулою:

$$D = l \leq \frac{\pi}{h_n} \sqrt{\frac{E_n}{3\sigma_{кр}^{зал}}}$$

де  $h_n$  – товщина покриття,  $l$  – лінійний розмір ділянки покриття,  $E_n$  – модуль пружності матеріалу покриття.

Для різних товщин міцність однієї глобули, при якій покриття не руйнується становить:  $h = 3 \text{ мкм} = 0,0065 \text{ Па}$ ;  $h = 5 \text{ мкм} = 0,009 \text{ Па}$ ;  $h = 7 \text{ мкм} = 0,013 \text{ Па}$ .

Покриття глобулярної структури розташоване на дискретних ділянках, розмір яких там уже залежить від товщини покриття, а дискретність становить також 50 % від розміру ділянки.

Розрахункові розміри дискретної ділянки та кількість глобул на ній наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахункові розміри дискретної ділянки та кількість на ній глобул

№ п/п	Товщина покриття, мкм	Розмір дискретної ділянки, мм	Розмір ділянки з врахуванням дискретності, мм	Кількість глобул на ділянці
1	3	0,6x0,6	0,72x0,72	880
2	5	0,52x0,52	0,78x0,78	1225
3	7	0,48x0,48	0,9x0,9	2509

Джерело: розроблено авторами.

Знаючи міцність однієї глобули покриття, кількість глобул на одній декретній мій ділянці та кількість дискретних ділянок свердла 8 вздовж різальних кромок можна визначити для різних товщин покриття силове навантаження одного ряду покриття вздовж різальних кромок свердла (табл. 2).

Таблиця 2 – Допустиме силове навантаження однієї ділянки покриття

№ з/п	Товщина покриття, мкм	Міцність глобули покриття, Па	Міцність ряду покриття, Па	Кількість дискретних ділянок вздовж різальної кромки	Силове навантаження одного ряду покриття вздовж різальної кромки
1	3	0,005	18,26	33	602,58
2	5	0,009	11,025	31	341,775
3	7	0,013	10,634	27	287,12

Джерело: розроблено авторами.

Наведені розрахунки за даними теоретичних досліджень показують що зі збільшенням товщини покриття силове навантаження на різальних кромках свердла зменшується.

Розглянемо навантаження різальних кромки свердла в процесі свердління за допомогою моделювання процесу різання.

Визначення значень осьової сили при свердлінні (табл. 3) проводилось за моделлю у вигляді функції  $P_0 = f(h, n, S_0)$ :

$$\ln P_0 = 7,87 + 1,17 \cdot 10^{-1} \cdot \ln S \cdot \ln n + 8,68 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 8,63 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot h^3 + 1,2 \cdot 10^{-1} \cdot S \cdot \ln S \cdot \ln n \quad (\delta = 3,8\%).$$

Границі вибору зміни режимів різання обирались відповідно до рекомендацій довідника та даних нормативів швидкість різання  $V$  м/сек ( $X_2$ ), подача  $S$  мм/об ( $X_3$ ) і обмежень, пов'язаних із параметрами верстата глобулярного покриття  $h$  (мкм) та швидкістю  $V$  (м/сек).

Таблиця 3 – Осьова сила при свердлінні ВПКМ

№ досліду	h, мкм	n, об/хв	S, мм/об	P <sub>0</sub> , Н
1	3	315	0,7	198,76
2	3	630	0,7	160,93
3	3	1250	0,5	121,49
4	7	630	0,3	197,81
5	3	1250	0,1	35,04
6	3	1000	0,7	216,55
7	7	315	0,1	39,62
8	7	315	0,7	91,07
9	7	1000	0,3	170,85
10	7	1250	0,5	91,74
11	7	1000	0,5	130,73
12	5	800	0,4	169,03
13	3	800	0,4	114,96
14	7	800	0,4	164,73
15	5	315	0,4	110,99
16	5	1250	0,4	106,62
17	5	800	0,1	48,67
18	5	800	0,7	129,53

Джерело: розроблено авторами.

У багатолезового інструмента зміщення дискретних ділянок відбувається їхніми групами, які залежать від глибини різання. При зміщенні груп ділянок спостерігається той самий ефект, що і при свердлінні, тобто суцільне покриття в межах групи.

Для однолезового інструменту, щоб одержати в межах однієї дискретної ділянки покриття глобулярної структури подібне суцільному, необхідно дискретні ділянки вздовж різального леза на передній і задній поверхнях розташовувати у шаховому порядку.

Розташування дискретних ділянок відносно леза залежить не тільки від кінематичної схеми, а й від кількості зубів 4 групі. Найменшій кількості зубів (один в групі) відповідає свердлінню.

Оскільки операція відрізання ВПКМ в авіаційній промисловості є поряд зі свердлінням найбільш вживаною, то вплив схем невільного різання на розташування дискретних ділянок розглянемо на прикладі процесу різання дисковою фрезою при розрізанні заготовок.

Процес розрізання дисковими фрезами належить до обробки багатолезовим інструментом, за схемою невільного різання (рис. 3) [21].

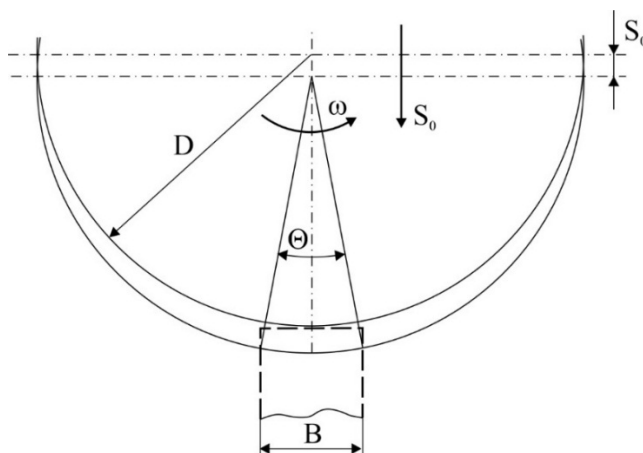


Рис. 3. Схема розрізання заготовки дисковими фрезами

Джерело: розроблено авторами.

Як зазначалось, розрізання цим інструментом здійснюється в умовах невіЛЬНОГО різання, яке насамперед сприймається торцями фрез. Тому для розрахунку силового навантаження необхідно знати параметри, якими вони визначаються як на групі головних лез, так і на торцях.

Для заданої схеми розрізання заготовок ВПКМ визначимо кількість дискретних ділянок глобулярного покриття вздовж (головного та допоміжного) леза окремого зуба та групи зубів у межах кута  $\theta$ . Кількість ділянок вздовж леза зуба залежить від товщини дискової фрези, тобто від довжини леза та розмірів дискретних ділянок, які визначені теоретичними дослідженнями для кожної товщини покриття.

У цих дослідженнях розглянуто покриття завтовшки 3, 5 та 7 мкм і фрези з довжиною леза 2, 3 і 4 (мм). Розмір дискретної ділянки з глобулярним покриттям для заданих (товщини) становить:  $h = 3$  мкм - 0,6 мм;  $h = 5$  мкм - 0,78 мм;  $h = 7$  мкм - 0,9 мм.

Кут  $\theta$  визначається зі співвідношення

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{B_3}{2R},$$

де  $B_3$  – товщина заготовки, мм;

$R$  – радіус фрези, мм.

У дослідженнях при визначенні кута  $\theta$  товщина заготовок, які відрізаються ( $B_3$ ), була прийнятною 20 мм. Для різних діаметрів фрез кут  $\theta$  за розрахунками становить:  $D = 120$  мм –  $\theta = 9^\circ 30'$ ;  $D = 160$  мм –  $\theta = 7^\circ 25'$ ;  $D = 200$  мм –  $\theta = 6^\circ$ .

За значеннями кута  $\theta$  визначається кількість зубів у групі.

Оскільки процес відрізання належить до невіЛЬНОГО різання, то силове навантаження зубів фрез розраховується для сталі, а саме, різальної частини зубів та їхніх торців.

Для визначення силового навантаження в групі зубів на різальній частині інструменту необхідно визначити кількість одного ряду ділянок вздовж одного леза та кількість їх у групі зубів.

Оскільки на дисковій фрези дискретне покриття глобулярної структури нанесення на всю робочу поверхню цього інструменту, то для визначення силового навантаження на різальній частині необхідно знати кількість дискретних ділянок, розташованих на ній. Це стосується рівною мірою і різальної частини досліджуваних фрез і їхніх торців.

Зміну кількості дискретних ділянок вздовж леза фрези в межах групи зубів (кута  $\theta$ ) для різних діаметрів фрез, кількості їхніх зубів та товщини покриття розглянуто на прикладі одного ряду ділянок (рис. 4).

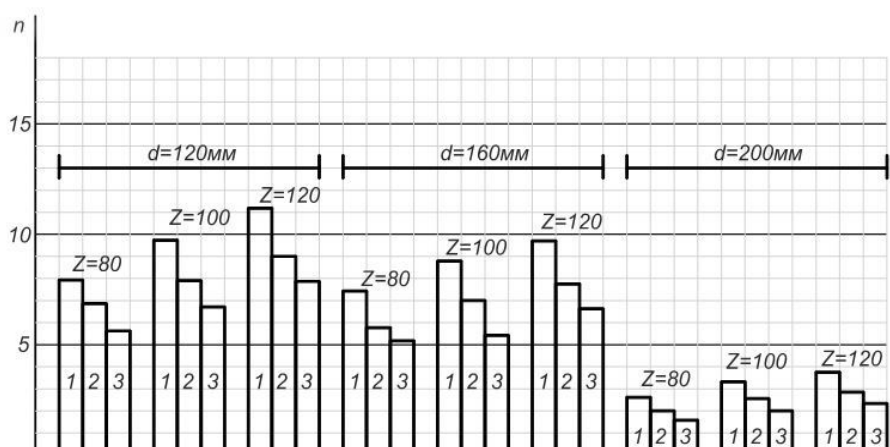


Рис. 4. Кількість дискретних ділянок ( $n$ ) у групі зубів на різальній частині вздовж лез:

$$1 - h = 3 \text{ мкм}; 2 - h = 5 \text{ мкм}; 3 - h = 7 \text{ мкм}$$

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз зміни кількості дискретних ділянок для фрез з довжиною леза 2 мм показує, що кількість одного ряду ділянок зменшується зі збільшенням діаметра фрези, тобто зі зменшенням кута  $\theta$ . Збільшення товщини покриття при одних і тих же значеннях діаметрів фрез також викликає зменшення кількості дискретних ділянок, що пов'язане зі збільшенням їхніх розмірів. Збільшення кількості зубів фрези тих самих діаметрів фрези й товщині покриття призводить до збільшення кількості ділянок вздовж леза, що пояснюється кількістю зубів у групі.

Кількість рядів дискретних ділянок глобулярного покриття групи зубів залежать від товщини покриття та режимів різання. Вважаємо відрізання здійснюється при тих же самих подачах та швидкості, що і свердління.

Визначення силового навантаження на різальній частині інструмента напружень при відрізанні потребує розрахунку кількості глобул на кожній дискретній ділянці.

За кількістю дискретних ділянок одного ряду групи зубів, кількістю глобул на одній дискретній ділянці та кількістю рядів на різальній частині фрези визначається кількість глобул на кожному зубі пили.

Кількість рядів дискретних ділянок із глобулярним покриттям групи зубів залежать від товщини покриття, розмірів відрізних фрез, кількості їхніх зубів та розмірів їхніх стружкових канавок.

Профілі стружкових канавок та їхні розміри досліджуваних фрез згідно з ГОСТ 36799-93.

Вважаємо, що кількість рядів покриття групи зубів на передній поверхні визначається прямолінійністю поверхні зуба стружкової канавки фрези.

Кількість рядів покриття на задній поверхні зуба фрези визначається з умови максимального допустимого завантаження різальної кромки зуба і приймається рівним двом рядам.

Результати наближеного розрахунку параметрів для силового навантаження розрізання ВПКМ на різальній частині наведені в табл. 4.

Згідно зі схемою відрізання заготовки із ВПКМ на торцях дискових фрез також виникають напруження, що можуть призвести до руйнування покриття. Тому виникає задача встановлення параметрів фрез для розрахунку допустимих напружень на торцях фрез.

Таблиця 4 – Силowe навантаження різальної частини фрез

№ п/п	Товщина покриття, мкм	Z	Кількість зубів у групі	Кількість дискретних ділянок на зубі	Кількість дискретних ділянок у групі	Кількість глобул		Міцність глобули, Па	Силowe навантаження P <sub>0</sub> , Н
						на одній ділянці	на ділянках групи зубів		
Діаметр фрези Ø120 мм									
1	3	80	2,01	6	12	1973,3	23680	0,0065	159,92
2		100	2,56	3	7,68		15105		98,2
3		120	3,02	2,6	7,8		15342		99,7
4	5	80	2,61	6	12	1156	13372	0,009	120,3
5		100	2,56	3	7,68		8878		79,9
6		120	3,02	2,6	7,8		9016,8		81,15
7	7	80	2,01	6	12	816	9792	0,013	127,3
8		100	3,56	3	7,68		6266		81,46
9		120	3,02	2,6	7,8		6365		82,75
Діаметр фрези Ø160 мм									
10	3	80	1,87	4	7,98	1973,3	15747	0,0065	102,35
11		100	2,34	3	7,02		13859		90,08
12		120	2,5	2,69	6,7		13221		85,44
13	5	80	1,87	4	7,98	1156	9223	0,009	83,007
14		100	2,34	3	7,02		8115		73,095
15		120	2,5	2,69	6,7				69,7
16	7	80	1,87	4	7,98	816	6511	0,013	84,6
17		100	2,34	3	7,02		5728		74,6
18		120	2,5	2,69	6,7		5467		71,07
Діаметр фрези Ø200 мм									
19	3	80	0,77	4,3	3,3	1973,3	28001	0,0065	182,0
20		100	0,95	3,3	3		19535,7		126,98
21		120	1,5	2,9	4,3		24607		159,93
22	5	80	0,77	4,3	3,3	1156	16404	0,009	147,633
23		100	0,95	3,3	3		11444		103
24		120	1,5	2,9	4,3				129,7
25	7	80	0,77	4,3	3,3	816	11579	0,013	150,52
26		100	0,95	3,3	3		8078		80,78
27		120	1,5	2,9	4,3		10175,5		132,28

Джерело: розроблено авторами.

Відрізнi фрези за своєю конструкцією характеризується двома різними частинами, а саме переривчастою і суцільною. На переривчастій частині нарізані стружкової канавки. У цьому разі площа на торцях зубів визначається як різниця суцільного кільця без стружкових канавок. Суцільне покриття на торцях фрези нанесення до ступиці фрези. Тому силowe навантаження на торцях досліджуваних фрез вирішується у два етапи.

При розрізанні ВПКМ дисковими фрезами з покриттям глобулярної структури на їхніх зубцях виникають певні навантаження. Розрахунок цих навантажень дещо відрізняється від їх розрахунку на різальній частині свердел.

У роботі розглянуто дискові фрези з мілким зубом, основні розміри яких наведені в табл. 5.

Як відзначалось, відрізання дисковими фрезами здійснюється в умовах невеликого різання, що насамперед сприймається торцями фрез. Для зменшення цього негативного явища торці фрез, виконують з піднутренням, тобто з кутом  $\varphi$ .

Таблиця 5 – Основні розміри та вихідні дані для розрахунку силового навантаження

D, мм	Z	B, мм	Крок, мм	$\phi'$	d, мм	d <sub>1</sub> , мм
120	80	2	4,71	30	22	34
	100		3,71			
	120		3,14			
160	80		6,28		32	47
	100		5,02			
	120		4,19			
200	80		7,8		32	67
	100		6,25			
	120		5,2			

Джерело: розроблено авторами.

Площа покриття нанесеного на торці фрез визначається різницею діаметрів фрези D та ступиці d<sub>1</sub> (D-d<sub>1</sub>) (табл. 5), що викликано особливостями подальшої експлуатації фрез і значно спрощує процес їх відновлення після затуплення.

Для розрахунку силового навантаження на торцях дискових фрез обґрунтувати розташування глобул на торцях та визначити параметри процесу відрізання. Для цього передусім необхідно знати площу покриття, нанесеного на торці.

Для визначення площі покриття знайдемо площу кільця, на якому нарізані зубці фрези та прощу диска після внутрішнього діаметра кільця. Зовнішній діаметр цього кільця відповідає діаметру фрези, внутрішній – це зовнішній мінус глибина стружкової канавки.

Площа вибраної кількості рядів дискретних ділянок після внутрішнього діаметра кільця залежить від товщини покриття.

Таким чином площа торця кожної із фрез на кільці розраховується як різниця площі диска, обмеженого діаметром фрези (D), та диска, обмеженого глибиною стружкових канавок (внутрішній диск D<sub>вн</sub>) за вирахуванням стружкових канавок – (D - D<sub>0</sub>). Результати наближеного розрахунку площі покриття фрез на торцях зубів наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Результати наближеного розрахунку площі покриття фрез на торцях зубів

№ з/п	Z	Кількість зубів у групі	Площа стружкової канавки	Площа стружкових канавок у групі, мм <sup>2</sup>	Площа одного зуба на торці, мм <sup>2</sup>	Площа на торцях зубів у групі, мм <sup>2</sup>
Діаметр фрези – D = 120 мм						
1	80	2,01	7,08	14,16	6,7	12,8
2	100	2,56	4,7	12,2	4,56	11,67
3	120	3,02	3,584	10,75	2,79	8,37
Діаметр фрези – D = 160 мм						
4	80	1,87	14,2	26,5	15,4	28,8
5	100	2,34	9,49	22,2	7,71	18,04
6	120	2,5	6,57	11,425	4,66	11,65
Діаметр фрези – D = 200 мм						
7	80	0,77	16,75	12,89	8,07	6,214
8	100	0,95	10,36	9,812	9,85	9,36
9	120	1,5	6,54	9,81	7,58	11,37

Джерело: розроблено авторами.

Для різних діаметрів фрез і кількості зубів в межах кута  $\Theta$  розраховується площа на торцях фрези.

По напруженню (щільності), яка за розрахунками теоретичних досліджень витримує одна глобула й кількістю глобул, які контактують з поверхнею заготовки, яку відрізають, визначається максимально можливе силове навантаження на торцях фрези.



Розрахункове значення силового навантаження на торцях залежно від товщини покриття наведено в табл. 7.

Таблиця 7 – Силowe навантаження на торцях фрез

№ з/п	D, мм	Z	Площа покриття зубів на торцях, мм <sup>2</sup>	Площа покриття дисків торця фрез, мм <sup>2</sup>	Загальна площа покриття на торцях, мм <sup>2</sup>	Загальна кількість дискретних ділянок	Загальна кількість глобул	Міцність глобули, Па	Силowe навантаження P <sub>o</sub> , Н
Товщина покриття $h = 3$ мкм									
1	120	80	27,6	1,414	29,04	86	169707	0,00015	25,45
2		100	22,34	1,16	23,5	70	198110		20,7
3		120	16,74	2,106	18,9	56	110488		16,6
4	160	80	57,6	1,292	58,992	175	345275		51,8
5		100	36,08	1,714	37,794	112	222949		33,4
6		120	23,3	1,72	25,02	74	146002		21,9
7	200	80	12,428	0,59	13,28	39,5	779335		11,69
8		100	18,72	0,724	19,444	58	112114		16,8
9		120	22,74	1,14	24,88	79,8	197080		29,56
Товщина покриття $h = 5$ мкм									
10	120	80	27,6	1,352	28,952	51,5	61887,5	0,00026	16,09
11		100	22,34	1,102	23,442	41,7	50100,9		13,03
12		120	16,74	1,988	18,62	33	39650		10,31
13	160	80	57,6	1,272	58,872	104	124976,8		32,49
14		100	36,08	1,609	37,7	67	80514		20,9
15		120	23,3	1,69	24,99	44	52874,8		13,7
16	200	80	12,428	0,57	12,998	23	27662,1		7,19
17		100	18,72	0,704	19,424	34,5	41098,14		10,685
18		120	22,7	0,954	23,654	42	50471,4		13,12
Товщина покриття $h = 7$ мкм									
19	120	80	27,6	1,272	28,872	38,3	31262	0,00045	14,068
20		100	22,34	1,62	23,96	31,8	25956,6		11,68
21		120	16,74	1,908	18,648	25,8	21059		9,47
22	160	80	57,6	1,67	59,27	78,7	64238,5		28,9
23		100	36,08	2,086	39,166	53,7	43832,3		19,7
24		120	23,3	2,2	25,5	33,8	27589		12,41
25	200	80	12,428	0,604	13,032	17,3	14121		6,35
26		100	18,72	0,742	19,462	25,85	21100		9,5
27		120	22,7	1,176	23,876	31,7	25875		11,64

Джерело: розроблено авторами.

Загальна площа торця дискової пили складається із площі покриття торців зубів фрез (табл. 7) та диска. Для кожного типу розміру фрези вона визначається кутом  $\theta$ . Кількість ділянок на торцях вона розраховується для дослідження фрез на основі теоретичного визначення ділянки та їх відстані одна від одної, які розраховані (відстань між ними дорівнює 45 % від розміру ділянки) залежно від товщини покриття.

Покриття глобулярної структури на дискретній ділянці має щільність 50 %. З урахуванням щільності покриття розраховується кількість глобул на ділянці, а за кількістю ділянок зубів у групі, обмеженою кутом  $\theta$  визначається загальна кількість глобул при розрізанні напруження.

Напруження, яке витримує одна глобула, розраховано на основі теоретичних даних при дослідженні процесу свердління, то воно (незалежно від виду різання) буде таким же самим при розрізанні.

За результатами розгляду особливостей мікрорізання при свердлінні та відрізання, показано що архітектура покриття залежить не тільки від його залишкових напружень у результаті яких може виникати когезійне, адгезійне та контактне руйнування покриття, але й від розташування дискретних ділянок щодо різальної кромки.

На основі проведених розрахунків встановлено вплив міцності покриття на силове навантаження інструменту з дискретним покриттям глобулярної структури.

Це зумовлено конструкцією нанесеного покриття яке зумовлює особливості процесу різання.

**Висновки.** Аналізуючи вплив досліджуваних чинників на силове навантаження (табл. 3) при свердлінні за даними моделювання та їх перевіркою експериментом, встановлено, що найбільший вплив на значення осьової сили ( $P_0$ ,  $H$ ) має подача.

Порівнюючи значення сил різання при свердлінні з розрахованими при розрізанні, слід зауважити, що силове навантаження на групу зубів при розрізанні значно менше й залежить від товщини покриття та конструктивних параметрів фрез (табл. 7). Це пояснюється тим, що відрізання здійснюються групою дискретних ділянок, яка залежить від кута  $\Theta$  (рис. 3).

Таким чином, із наведеного аналізу різних схем різання дискретне покриття глобулярної структури з позицій за критерієм допустимого силового навантаження повністю забезпечує розрахункову міцність покриття, що забезпечується його конструкцією і повністю може замінити твердосплавний інструмент з алмазним суцільним покриттям. Можливість такої заміни визначається обладнанням, на якому здійснюється обробка ВПКМ таким інструментом.

На основі дослідження напружено-деформованого стану дискретних покриттів глобулярної структури розроблено архітектуру модифікованого поверхневого шару різального інструменту для обробки ВПКМ. Отримані результати дозволяють формувати дискретні ділянки покриття за умовами стійкості.

#### Список використаних джерел

1. Терещенко, Ю. М. Авіаційні матеріали та їх обробка / Ю. М. Терещенко, К. О. Животовська, М. О Животовський, О. В. Мамлюк, І. Г. Носовський. – Київ : Вища освіта, 2003. – 303 с.
2. Erian, A. Armanios. Composite materials. Fatigue and fracture / Erian, A. Armanios. – ASTM, 1997. – 573 с.
3. Кіндрачук, М. В. Визначення параметрів дискретної структури покриттів / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко [та ін.] // Проблеми тертя та зношування. – 2008. – Вип. 50. – С. 5-15.
4. Ляшенко, Б. А. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений / Б. А. Ляшенко, Е. Б. Сорока, А. В. Рутковский // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 119-125.
5. Deborah D. L. Chung. Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies/ Deborah D. L. Chung. – Printed in Great Britain, 2004. – 293p.
6. Ляшенко, Б. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине / Б. А. Ляшенко, С. А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104.
7. Гавриш, А. П. Зміцнення металевих поверхонь деталей та механізмів / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, М. П. Підберезний. – Київ: Наукова думка, 1995. – 173 с.
8. Ляшенко, Б. А. Технологические, конструктивные и эксплуатационные особенности упрочняющих покрытий дискретной структуры на деталях машин и инструменте / Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, Е. Б. Сорока [и др.] // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: тези доп. 3-ої наук.-практ. конф. – Київ : КУЕТТ, 2005. – С. 22-23.
9. Клименко, С. А. Оптимизация дискретной структуры при поверхностной электроконтактной закалке / С. А. Клименко, Е. К. Солових, Е. Б. Сорока [и др.] // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 6-й междунар. н.-техн. конф. – Киев : АТМ України, 2006. – С. 83–85.
10. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др. ; под общей ред. проф. В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2013. – 272 с.
11. Тарасюк, А. П. Технологии механической обработки полимерных композитов : монография / А. П. Тарасюк, О. Л. Кондратюк, Н. В. Верезуб. – Харьков : Точка, 2015. – 226 с.

12. Самчук, В. В. Підвищення ефективності механічної обробки виробів з полімерних композиційних матеріалів / В. В. Самчук // *Машинобудування. Верстати та інструменти.* – 2014. – № 13. – С. 107-115.
13. Везуб, Н. В. Энергетические аспекты разрушения полимерных композитов при резании / Н. В. Везуб, Г. Л. Хавин, А. П. Тарасюк // *Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб.* – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Вып.59. – С. 28-34.
14. Антонюк, В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу: дис... д-ра техн. наук / В. С. Антонюк; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Київ, 2006. – 375 с.
15. Електроіскрові покриття для зміцнення різального інструменту / В. І. Калініченко, В. С. Марчук, М. І. Денисенко, В. Ф. Лабунець, В. В. Загребельний // *Проблеми тертя та зношування.* – 2016. – № 3. – С. 40-45.
16. Klocke, F. Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications / F. Klocke, T. Krig // *CIRP Annals-Manufacturing Technology.* – 1999. – Vol. 48, № 2. – Pp. 515-525.
17. Солових, Є. К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними і технологічними методами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.07 / Солових Євген Костянтинович ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – Київ, 2013. – 36 с.
18. Визначення параметрів дискретної структури покриттів / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко [та ін.] // *Проблеми тертя та зношування.* – 2008. – Вип. 50. – С. 5-15.
19. Сорока, О. Б. Методологія оптимізації зносостійких покриттів за критеріями міцності і роботоздатності : дис. ... д-ра техн. наук : 01.02.04 / О. Б. Сорока ; Ін-т пробл. міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. – Київ, 2011. – 345 с.
20. Корбут, Є. Вплив товщини дискретного глобулярного покриття, нанесеного на різальний інструмент та режимів свердління на шорсткість поверхні деталей зі склопластика. / Є. Корбут, В. Парненко, Т. Ніколаєнко // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* – 2022. – Вип. 1(132). – С. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.24>.
21. Botvinovska, S. General procedure for determining the geometric parameters of tools in the technological systems involving machining by cutting // S. Botvinovska, G. Getun, A. Zolotova, I. Korbut, T. Nikolaenko, V. Parnenko, R. Rodin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2021. – Vol. 1/1 (109). – P. 6 - 12. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224897.

### References

1. Tereshchenko, Yu.M., Zhyvotovska, K.O., Zhyvotovskiyi, M.O., Mamliuk, O.V., Nosovskyi, I.H. (2003). *Aviatsiini materialy ta yikh obrobk [Aviation materials and their processing]*. Vyshcha osvita.
2. Armanios, E.A. (1997). *Composite materials. Fatigue and fractureie*. MI.
3. Kindrachuk, M.V., Iakhia, M.S., Korniienko, A.O., et al. (2008). Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv [Determination of parameters of the discrete structure of coatings]. *Probl. tertia ta znoshuvannia – Problem friction and wear*, 50, 5–15.
4. Liashenko, B.A., Soroka, E.B., Rutkovskiyi, A.V. (2002). Opredelenye parametrov dyskretnoi struktury pokrytyi s uchetom ostatochnykh napriazheniy [Determination of parameters of discrete structure of coatings taking into account residual stresses]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 4, 119–125.
5. Chang, D.D.L. (2004). *Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies*. Printed in Great Britain.
6. Liashenko, B.A., Klymenko, S.A. (1999). Tendentsyy razvytyia uprochniaiushchei poverkhnostnoi obrabotky u polozhenye v Ukrayne [Trends in the development of hardening surface treatment and the situation in Ukraine]. *Suchasne mashynobuduvannia – Modern machine building*, 1, 94–104.
7. Havrysh, A.P., Kyrychok, P.O., Pidbereznyi, M.P. (1995). *Zmitsnennia metalevykh poverkhon detalei ta mekhanizmiv [Strengthening of metal surfaces of parts and mechanisms]*. Naukova dumka.
8. Liashenko, B.A., Solovykh, E.K., Soroka, E.B., et al. (2005). Tekhnolohycheskye, konstruktyvnye y ekspluatatsyonnye osobennosti uprochniaiushchykh pokrytyi dyskretnoi struktury na detaliakh mashyn iynstrumente [Technological, constructive and operational features of reinforcing coated discrete structures on machine parts and instruments]. *Problemy ta perspektyvy rozvytku transportnykh*

system: *tekhnika, tekhnolohiia, ekonomika i upravlinnia – Problems and prospects of development of transport systems: technique, technology, economy and management* : Proceedings of the third scientific and practical conference Series "Engineering, Technology" (pp. 22–23).

9. Klymenko, S.A., Solovykh, E.K., Soroka, E.B., et al. (2006). Optimization of discrete structure during surface electrocontact hardening [Optimization of discrete structure during surface electrocontact hardening]. *Inzheneryia poverkhnosti i renovatsiia izdeli – Surface engineering and renovation of products* : Proceedings of the 6th scientific and technical conference (pp. 83–85). Kyiv-Yalta.

10. Kryvoruchko, D.V., Zaloha, V.A., Kolesnyk, V.A. et al. (2013). *Mekhanicheskaia obrabotka kompozytsionnykh materialov pry sborke letatelnykh apparatov (analytycheskyi obzor) [Mechanical processing of composite materials during aircraft assembly (analytical review)]*. University book.

11. Tarasiuk, A.P., Kondratiuk, O.L., Verezub, N.V. (2015). *Tekhnolohiia Mekhanicheskoi obrabotky polymernykh materialov [Technology of Mechanical Processing of Polymer Materials]*. Kharkov.

12. Samchuk, V.V. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti mekhanichnoi obrobky vyrobiv z polimernykh kompozytsiinykh materialiv [Increasing the efficiency of mechanical processing of products from polymer composite materials]. *Mashynobuduvannia. Verstaty ta instrumenty – Mechanical engineering. Machines and tools, 13*, 107–115.

13. Verezub, N.V., Khavin, H.L., Tarasiuk, A.P. (2001). Enerhetycheskye aspekty razrusheniia polymernykh kompozytov pry rezanyy [Energy aspects of destruction of polymer composites during cutting]. *Rezanye i ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh – Cutting and tools in technological systems, 59*, 28–34.

14. Antoniuk, V.S. (2006). *Osnovy pidvyshchennia pratsezdatsnosti rizalnoho instrumentu shliakhom formuvannia znosostiikykh pokryttiv dyskretnoho typu [Basics of increasing the efficiency of cutting tools by forming wear-resistant coatings of a discrete type]*. Doctor's thesis.

15. Elektroiskrove pokryttia dlia zmitsnennia rizalnoho instrument [Electrospark coating for strengthening the cutting tool]. (2016). *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems, 72*, 40–45.

16. Klocke, F., Krig, T. (1999). Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2*, 515–525.

17. Solovykh, Ye.K. (2013). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia nesuchoi zdatsnosti funktsionalnykh pokryttiv konstruktyvnymy i tekhnolohichnymy metodamy [Scientific and methodological bases of increasing the bearing capacity of functional coatings by constructive and technological methods]. Doctor's thesis.

18. Kindrachuk, M.V., Iakhia, M.S., Korniienko, A.O., et al. (2008). Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv [Determining the parameters of the discrete structure of coatings]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems, 50*, 5–15.

19. Soroka, O.B. (2011). *Metodolohiia optymizatsii znosostiikykh pokryttiv za kryteriiamy mitsnosti i robotozdatnosti [Methodology of optimization of wear-resistant coatings according to the criteria of strength and workability]*. Doctor's thesis.

20. Korbut, Ye., Parnenko, V., Nikolaienko, T. (2022). Vplyv tovshchyny dyskretnoho hlobuliarnoho pokryttia, nanesenoho na rizalni instrument ta rezhymiv sverdlinnia na shorstkist poverkhni detalei zi skloplastyka [The influence of the thickness of the discrete globular coating applied to the cutting tool and the drilling modes on the surface roughness of fiberglass parts]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 1(132)*, 180–185.

21. Botvinovska, S., Getun, G., Zolotova, A., Korbut, I., Nikolaenko, T., Parnenko, V., Rodin, R. (2021). General procedure for determining the geometric parameters of tools in the technological systems involving machining by cutting. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/1(109)*, 6–12.

Отримано 19.12.2024

**Korbut Ievgen<sup>1</sup>, Valeriia Parnenko<sup>2</sup>, Tetiana Nikolaienko<sup>3</sup>, Oleksandr Danylenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD, assistant professor, department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [korbut113@gmail.com](mailto:korbut113@gmail.com), **ORCID:** 0000-0002-1221-4052, Scopus Author ID: 56736964700

<sup>2</sup>PhD, assistant professor, department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [v.parnenko@kpi.ua](mailto:v.parnenko@kpi.ua), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>.

[https://www.researchgate.net/profile/Valeriya\\_Parnenko](https://www.researchgate.net/profile/Valeriya_Parnenko), Scopus Author ID: 57217101654

<sup>3</sup>assistant professor, department of descriptive geometry and engineering graphics, Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [tatyana.rodina@gmail.com](mailto:tatyana.rodina@gmail.com), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0960-1251>.

**ResearcherID:** [https://www.researchgate.net/profile/Tatyana\\_Nikolayenko](https://www.researchgate.net/profile/Tatyana_Nikolayenko).

<sup>4</sup>PhD, assistant professor, department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [alednlnk@gmail.com](mailto:alednlnk@gmail.com), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1587-9225>

**THE LOCATION OF DISCRETE AREAS OF COAT  
WITH GLOBULAR STRUCTURE ON THE TOOL SURFACES  
WITH DIFFERENT CUTTING SCHEMES**

*The development of the aerospace and automotive industries is linked to the use of fibre polymer composites. In order to increase the wear resistance of tools for machining these materials, discrete coatings of a globular structure are used on the working surfaces of the tools. The loading of the cutting edges of such tools with a discrete coating of globular structure depends not only on their materials and coating, but also on the cutting pattern, which corresponds to microcutting by coating elements. According to this scheme, the position of globules along the edges and discrete areas perpendicular to them are determined. This paper investigates the influence of the cutting pattern on the location of these areas. We have considered a single blade tool where the discrete areas of coating are arranged in a checkerboard pattern along the cutting blade to give the effect of a continuous coating. Also under consideration is a multi-blade tool where the displacement of the areas is in groups as a function of the depth of cut. It is shown that when changing the number of discrete sections for milling cutters with a blade length of 2 mm, the number of sections in a row decreases as the diameter of the cutter increases, i.e. as the angle  $\theta$  decreases. Increasing the coating thickness for the same values of cutter diameters also causes a decrease in the number of discrete areas, which is associated with an increase in their size. An increase in the number of cutter teeth for the same diameter and coating thickness leads to an increase in the number of areas along the blade, which is explained by the number of teeth in the group. Since the disc cutters considered in the paper have a discrete coating of globular structure applied to the entire working surface of this tool, in order to determine the force load on the cutting part, it is necessary to know the number of discrete areas located both on the cutting part of the cutters studied and on their ends. The paper calculates the number of globules on each discrete section of the cutter, which enables the calculation of the tool load at which the coating does not break under the processing conditions studied.*

**Key words:** cutting tool, fibrous polymer composite material, discrete coating of globular type, cutting schemes, disc cutters, saw.

*Fig.: 4. Table: 7. References: 21.*