

С.І. Радкевич, магістр  
Л.Є. Глембоцька, к.т.н., доц.  
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Оброблюваність чавунів при фінішному торцевому фрезеруванні плоских поверхонь надтвердими матеріалами

*У статті викладено результат аналізу оброблюваності чавунів з різними фізико-механічними властивостями. Розглянуто теплові процеси, що відбуваються в зоні різання, та вплив на них режимів різання й геометричних параметрів різальних елементів торцевих фрез. Проведено оцінку можливостей обробки чавунів різними інструментальними матеріалами, зокрема надтвердими матеріалами на основі кубічного нітриду бору (CBN), з врахуванням їх фізико-механічних характеристик, силових і температурних навантажень. Здійснено аналіз впливу режимів різання та геометричних параметрів різальних частин інструментів з CBN на їх стійкість, надійність та на якість оброблених поверхонь деталей з чавунів. На основі вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій виконано аналіз переваг використання як інструментальних матеріалів надтвердих матеріалів на основі CBN для обробки чавунів багатолезовим інструментом, за якої має місце переривчасте різання. Досліджено новинки на ринку металорізальних інструментів, здійснено оцінку можливості підвищення ефективності обробки плоских чавунних поверхонь деталей за рахунок їх використання. Передбачено розробку конструкції фрези, оснащеної НТМ (надтвердими матеріалами) на основі CBN, з традиційними та новими схемами різання з можливим нанесенням захисних покриттів на інструментальні вставки, яка б завдяки своїм геометричним параметрам, новим схемам та режимам різання могла б зменшувати вплив на процес обробки, недосконалості технологічної оброблювальної систем (ТОС) та підвищувала б його ефективність.*

**Ключові слова:** торцева фреза; торцеве фрезерування; схеми різання; різальні елементи.

**Постановка проблеми.** Для обробки чавунів, що мають високу міцність, твердість та інші фізико-механічні характеристики, раціональним є вибір інструменту з НТМ на основі CBN. Однак недостатньо повні рекомендації для обробки чавунів інструментами з НТМ ставлять перед дослідниками науково-технічну задачу: більш точно оцінити процеси, які відбуваються в зоні різання, та створити всеохоплюючу довідкову базу даних для вибору марок НТМ, режимів різання, геометричних параметрів та схем різання під час обробки різних чавунів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій** показав, що проблемі підвищення ефективності обробки плоских поверхонь чавунних деталей багатолезовими інструментами присвячено багато наукових робіт та досліджень вітчизняних і зарубіжних науковців [1–15], які пропонують багато способів для її вирішення. В цих роботах проводилися дослідження впливу геометричних параметрів різальних елементів інструментів на режими різання [6], на механізми зношування різальних інструментів та інше. Серед розглянутих опублікованих робіт найбільше уваги приділялося дослідженням стійкості інструменту [2]. Авторами було встановлено, що для обробки чавунів найбільше переваг мають НТМ на основі CBN. Однак всі ці дослідження мають несистематичний характер і потребують розширення та впорядкування.

**Метою** статті є аналітичне дослідження способів підвищення ефективності обробки чавунів при фінішному торцевому фрезеруванні плоских поверхонь надтвердими матеріалами на основі CBN, шляхом впорядкування інформації, для полегшення в подальшому проведення на її основі теоретико-практичних досліджень у розширеному вигляді.

**Викладення основного матеріалу.** В розвитку будь-якої країни основною галуззю є машинобудівна. Вона забезпечує своїми виробами інші галузі економіки і тим самим сприяє економічному розвитку країни. Виробництво якісної продукції – це запорука успіху усіх виробничих підприємств. До того ж в умовах екологічної кризи, в якій перебуває наша планета, це виробництво має бути ефективним у використанні енергетичних, сировинних ресурсів та виробничих площ. Якість і надійність в експлуатації виробничого обладнання, яке застосовується на підприємствах, – це підґрунтя для створення конкурентоспроможної продукції в цілому, що залежить, в свою чергу, від високих фізико-механічних характеристик комплектуючих деталей. Найбільша складність полягає у виготовленні деталей, що мають плоскі протяжні поверхні, оскільки на їх виробництво витрачається велика кількість матеріалу, який би забезпечував тривалий та надійний їх термін експлуатації за місцем призначення. А також великі затрати основного технологічного часу, інструменту та виробничих площ. Все це негативно впливає на економічну ефективність та екологічність виробництва. Пошук ефективного технологічного процесу з використанням

зносостійких інструментів – це є те питання, яке здатне покращити згадані проблеми у виробництві, і якому сьогодні присвячено багато наукових праць та досліджень [1–15]. Найефективнішим методом обробки великогабаритних деталей є обробка різанням лезовими інструментами, оскільки їх заготовки отримують зазвичай литтям і вони близькі за формою та розмірами до вихідних деталей. А враховуючи можливості сучасних ливарних технологій, вони не потребують зняття великих припусків і дозволяють вибирати матеріали для деталей з великої номенклатури ливарних матеріалів, з необхідними фізико-механічними характеристиками. Матеріалами, які найчастіше використовують для виготовлення деталей з плоскими поверхнями великих розмірів (станин, направляючих, корпусів), є чавуни, завдяки їх хорошим ливарним властивостям, високим фізико-механічним властивостям, здатності гасити вібрації та резонансі коливання, що виникають у процесі експлуатації, та відносної дешевизні. Крім того, наявність графіту в них сприяє утворенню в процесі різання стружки надлому, що позитивно впливає на оброблюваність цих сплавів, а також підвищує їхні антифрикційні властивості [16]. Чавуни до того ж мають гарні показники теплопровідності [17], що в свою чергу позитивно впливає на процес різання та оброблювальний інструмент в цілому.

Таблиця 1

## Теплопровідність чавунів

Чавун	Склад, %									λ, Вт/(м °С), при температурі, °С				
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	S+P	0	100	200	300	400
Звичайний	2,61	2,46	0,45	-	-	-	-	-	-	48,5	46,1	44,4	42,8	41,9
	3,11	2,26	0,39	-	-	-	-	-	-	49,0	46,5	44,5	43,2	42,4
	3,20	1,56	0,72	-	-	-	-	-	-	53,2	50,6	48,6	46,5	45,1
Молібдено-хромистий	3,12	2,31	0,39	-	0,54	0,77	-	-	-	50,3	49,7	47,7	46,5	45,6
Молібденовий	2,56	2,20	0,63	-	-	0,58	-	-	-	50,5	49,4	47,7	46,5	45,4
Хромо-нікелевий	2,80	2,51	0,68	4,71	0,54	-	-	-	-	44,0	42,3	41,3	40,5	39,0
	3,41	1,03	0,65	1,49	0,54	-	-	-	-	49,2	48,6	47,0	45,8	44,3
Марганцево-нікелевий	3,10	2,51	3,11	1,00	-	-	-	-	-	42,9	42,0	41,4	40,7	40,6
Нікельрезист	2,41	1,80	0,62	13,70	3,37	-	6,41	-	-	35,9	33,8	32,4	31,5	31,3
Нікросілал	1,91	6,42	-	18,65	2,02	-	-	-	-	30,4	29,3	27,9	26,7	26,3
Хромо-алюмінієвий	2,70	0,96	0,58	-	0,95	-	-	7,30	-	34,4	33,0	32,4	31,4	30,1
Мідний	3,18	1,58	0,69	-	-	-	1,58	-	-	48,7	47,1	44,4	43,8	41,1
	3,18	1,59	-	-	-	-	0,99	-	-	45,8	44,4	43,1	41,9	41,0
	3,18	1,49	-	-	-	-	1,98	-	-	48,1	46,0	43,5	41,4	38,8
	2,20	1,50	-	-	-	-	0,53	-	-	44,5	43,1	41,8	41,0	39,6
	3,16	1,44	-	-	-	-	3,10	-	-	47,6	46,0	44,0	42,6	41,1
	3,15	1,58	-	-	-	-	1,43	-	-	45,7	44,4	43,1	41,4	40,2
Звичайний чистий	3,16	1,54	-	-	-	-	-	-	-	47,6	45,9	44,1	43,1	41,6
	3,00	-	-	-	-	-	-	-	-	58,7	-	-	-	46,3
Сірий чавун	3,08	1,24	0,94	-	0,08	-	0,36	-	+	54,5	53,3	51,0	48,6	45,8
	3,25	1,91	0,97	-	0,07	-	0,81	-	+	49,7	46,5	46,4	43,9	41,9
	3,32	1,52	2,43	-	0,01	-	0,71	-	+	51,3	49,0	47,0	44,4	42,3
	3,19	1,42	0,96	-	0,20	-	-	-	-	55,0	53,2	51,0	48,6	42,4
Відпалений ковкий				-		-		-						
Чавун	2,80	0,39	0,10	-	0,09	-	0,06	-	+	-	42,7	42,7	45,3	45,4
Рідкий чавун	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,7*	-	-	-

Примітки: плюсом позначено наявність S+P, мінусом – відсутність

Процес різання – це складний фізичний процес, який супроводжується утворенням стружки, сильним тертя між поверхнями деталі та інструменту, внаслідок якого виділяється велика кількість тепла з деформацією металу, зношуванням різального інструменту та утворенням наросту на різці. Знання закономірностей, які відбуваються в процесі різання, і явищ, які його супроводжують, дозволяють раціонально керувати цим процесом та зробити його більш продуктивним й отримувати поверхні вищої якості.

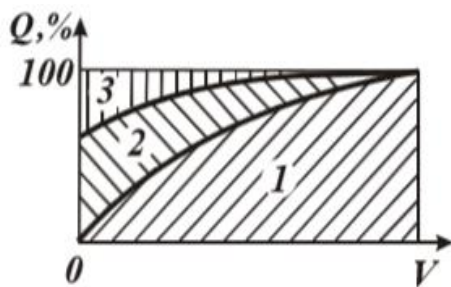


Рис. 1. Розподіл кількості тепла  $Q$ , яке йде в: стружку (1), заготовку (2), інструмент (3), при зміні швидкості різання

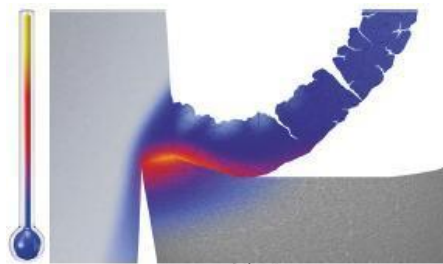


Рис. 2. Розподіл тепла в зоні різання при обробці чавунів [15]

Теплота від тертя, яка утворюється в процесі різання, розподіляється між стружкою, деталлю та різцем [18]. Невелика частина її поглинається навколишнім середовищем. Розподіл цієї теплоти залежить від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  оброблюваного матеріалу. Авторами [17] встановлено, що чим нижча теплопровідність деталі, тим більше теплоти переходить в інструмент. В роботі [22] показано, що при швидкостях різання  $v = 400 \dots 500$  м/хв, розподіл тепла відбувається таким чином:

$$Q_c \approx 97\text{--}98\%, \text{ а } Q_i \approx 1\%.$$

Відповідно зростання швидкості різання призводить до того, що зростає кількість тепла, яке переходить у стружку, і зменшується частка тепла, яка переходить в деталь та інструмент, внаслідок того, що клин інструменту швидше перетинає тепловий потік.

Збільшення швидкості різання є одним із основних факторів, який може підвищувати продуктивність обробки деталей, особливо в умовах обробки великих площ. Однак в результаті цього прискорюється спрацювання оброблювального інструменту і це, в свою чергу, призводить до подорожчання процесу обробки. Крім того, в умовах високошвидкісної чистової обробки (300–600 м/хв) температура в зоні різання може перевищувати 1000 °C [18]. А це призводить до швидкого дифузійного зносу різальних елементів та зміни геометрії ріжучої частини інструмента та погіршення якості обробленої поверхні деталей. Таким чином, підвищення продуктивності обробки в умовах високих швидкостей може бути досягнене за рахунок вибору термостійкого інструментального матеріалу та оптимальних значень швидкостей різання, допустимих для обраних інструментів. Цьому питанню присвячено багато наукових праць [3–5, 18]. Встановлено, що на швидкість різання впливає багато факторів, таких як: матеріал різальної частини інструменту, фізико-механічні властивості оброблюваних матеріалів, геометрія різальної частини інструменту, вид обробки та схеми різання, а також подача і глибина різання. «Для підвищення довговічності інструменту велике значення має правильний вибір інструментального матеріалу. Його проводять на підставі знання закономірностей контактування пари – матеріал інструменту та оброблюваний матеріал, а також контактних напружень» [3].

Складність цього вибору для чавунів полягає в тому, що залежно від того, в якому стані перебуває вуглець у сплавах, та від вмісту легуючих компонентів вони набувають різних фізико-механічних властивостей та оброблюваності. Згідно зі стандартами ISO усі оброблювані матеріали об'єднані певним чином у групи застосування для полегшення вибору необхідного інструментального матеріалу, геометричних параметрів різальних інструментів та режимів різання. У таблиці 2 наведено усереднені показники оброблюваності для різних типів чавуну [13]. Перлітний сірий чавун, для якого вказана 100 % оброблюваність, є основою для порівняння.

Таблиця 2

Показники оброблюваності для різних типів чавуну

Матеріал	Умови	ISCAR мат. група*	Оброблюваність, %
Сірий чавун (GCI)	Феритний	15	130
	Перлітний	16	100
Чавун з вузликівим графітом (NCI)	Ферит-перлітний	17	75
	Перлітний	18	70
Ковкий чавун (MCI)	Феритний	19	115
	Перлітний	20	93
Чавун з вермикулярним графітом (CGI)		~17	80
Відпущений ковкий чавун (ADI)	М'який	~10	80
	Загартований	41	35
Ni-resist аустенітний CI			90
Охолоджений чавун	HB 400...440	40	50
Загартований чавун	HB 550...600	41	25

Примітка: \*група матеріалів ISCAR відповідно до стандарту VDI 3323

Чавуни, які входять до групи К, згідно з ISO:

- сірі чавуни (GCI) та ковкі чавуни (MCI) мають найкращі показники оброблюваності, а тому досить легко піддаються обробці;
- чавуни з вузликковим графітом (NCI), чавуни з вермикулярним графітом (CGI) та відпущений ковкий чавун (ADI) мають менші показники оброблюваності [15].

Обробка чавунів ускладнюється ще й наявністю в їх складі карбиду кремнію та піску в поверхневому шарі відлитих заготовок, що призводить до абразивного зношування різального інструменту.

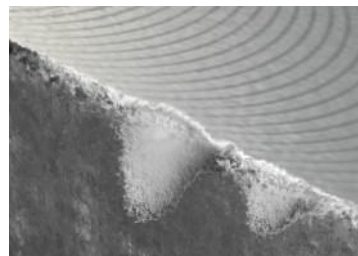
До групи Н, згідно з ISO, належать:

- білі чавуни та загартовані чавуни, твердість яких знаходиться в межах 400–600 НВ. Ця група матеріалів через їх високе значення твердості має найменші показники оброблюваності. Складність їх обробки також полягає в значному виділенні тепла в зоні різання та швидкому абразивному зношуванні різального інструменту.

Отже, як бачимо, вимоги до інструментів, що використовуються для обробки чавунів, досить високі. Під час обробки чавунів різальний інструмент має високі механічні і термічні навантаження [19]. Під час різання виникають високі сили навантаження та температури, які під час обробки весь час змінюються, а це призводить до: адгезії, абразивного зношування, дифузії, структурних змін, корозії та інших механізмів зношування. Для реалізації процесу різання різальний інструмент має бути з високою твердістю, а також мати високу термостійкість і міцність, щоб зменшити механізми зношування різальних частин оброблюваних інструментів та запобігти викришуванню деталі в зоні виходу інструмента (зокрема ножів фрези) [15].



Типове зношування пластини



Викришування на деталі

Рис. 3. Характер зношування при обробці чавунів [15]

Не всі існуючі інструментальні матеріали можуть відповідати цим умовам повною мірою. В таблиці 3 показано загальні характеристики інструментальних матеріалів [20], з неї видно, що швидко-різальні сталі мають високу міцність, але порівняно з іншими інструментальними матеріалами їх твердість та термостійкість невисокі. Інструменти з кераміки навпаки мають високу термостійкість і твердість, але міцність їх порівняно невисока. Завдяки застосуванню різних методів зміцнення поверхонь різальних інструментів можна значно покращити їх фізико-механічні властивості, але це потребує додаткового часу та коштів.

Таблиця 3

Характеристики інструментальних матеріалів [20]

Матеріал	Густина, г/см <sup>3</sup>	Твердість HRA	Мікро-твердість HV, МПа	Межа міцності при вигині σ <sub>0.2</sub> , ГПа	Межа міцності при стисканні σ <sub>c</sub> , ГПа	Ударна в'язкість, Дж/м <sup>2</sup>	Термо-стійкість, °C	Коеф. Теплопровідності λ, Вт/(м·°C)	Коеф. лінійного розширення, мм/°C	Модуль пружності, МПа
Швидко-різальна сталь	7,9–8,75	до 80	-	до 4000	до 4000	до 588	до 700	16,75–25,12	9,0–12,0	210 000
Тверді сплави	11,1–14,8	87–92	17 000–24 000	» 1800	» 5900	24,51–58,8	800–1000	16,75–87,92	3,0–7,5	500 000
Мінерало-кераміка: оксидна	3,5–4,0	до 94	30 000	» 950	» 3000	4,9–11,76	2000	4,2–21,0	6,3–9,0	400 000
змішана (кермети)	4,4–4,7	» 95,3	19 000	» 980	» 5600	до 19,6	1400	25,12–83,70	7,2–7,5	350 000
Кубічний нітрид бору	3,45	-	60 000–80 000	» 1000	» 6500	-	1500	-	-	720 000
Алмази штучні	3,48–3,56	-	100 000	» 300	» 2000	-	800	138,2–146,5	0,9–1,9	900 000

У сучасному машинобудуванні під час обробки чавунів активно використовують надтверді матеріали на основі КНБ завдяки їх унікальним фізико-механічним властивостям, які наведені в таблиці 4. Стійкість інструментів з КНБ (70–150 хв), під час обробки матеріалів високої твердості до 70 HRC, в декілька разів вища за стійкість інструментів з твердих сплавів. За показником твердості він поступається лише алмазу, але завдяки хімічній інертності його до заліза та здатності зберігати свої фізико-механічні властивості при високих температурах (до 1300 °С) є більш привабливим у роботі з чорними металами, зокрема з висококомірними чавунами [21].

Відповідно до стандартів ISO 1832-2012 усі надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору CBN об'єднанні у три групи [14]:

- композити групи ВЛ з вмістом CBN 40–65 %, які мають складний хімічний склад з керамічною в'язучою складовою, яка збільшує зносостійкість CBN;
- композити групи ВН з високим вмістом CBN від 70 до 90 %;
- композити групи ВС – це композити на основі CBN із захисними покриттями.

Таблиця 4

## Фізико-механічні властивості матеріалів на основі КНБ

Властивості КНБ	Марка КНБ											
	Композит			Кіборит	КТП	Amorite	BZN	Sumiboron		Wurzin		ДВС 50
	01	02	10									
Твердість по Кнуппу, ГПа	32-38	38	30-38	32-36	25...33	30,0	35-45	40-45	30-35	28-34	40	28
Густина, г/см <sup>3</sup>	3,31-3,45	3,42-3,50	3,34-3,50	3,20-3,34	-	3,37	3,48	-	4,20	-	-	-
Міцність, ГПа	на стиск	2,25-3,15	4,00-6,50	2,00-4,00	2,60-3,20	-	-	-	-	-	-	-
	на розтяг	0,43-0,49	-	0,26-0,39	0,32-0,37	-	0,45	-	-	0,45	-	-
	на згин	0,70-0,98	0,68-0,70	1,20-1,50	0,55-0,65	-	0,57	-	-	0,47	-	-
Коефіцієнт тріщинистості K <sub>I</sub> МПа·м	3,7-4,2	10,8 б*	7,1 а*	13,5 б*	14,5-16,1 в*	13,1 а**	8,6 в*	7,0 в***	6,6 б**	-	-	-
Модуль Юнга, ГПа	680-720	720	650-780	850-910	-	680-720	-	-	814	-	-	-
Коефіцієнт Пуассона	0,16	-	0,15	0,16	-	0,22	-	-	-	-	-	-
Теплопровідність, Вт/(м·К)	60-80	85	30-60	100	80	110-135	-	34-8	24-36	-	-	-
Термостійкість на повітрі, К	1343-1473	1273-1423	1273-1373	1573	-	1273-1473	-	-	-	-	-	-
Розмір зерен, мкм	5,20	0,2-5	0,1-0,3	3-14	-	0,12	1,0	0,3-2,0	-	-	-	-

Примітка. а – піраміда Віккерса, б – піраміда Берковича; в – піраміда Кнуппа; навантаження: \* - 20 Н; \*\* - 10 Н; \*\*\* - 5 Н

Великою перевагою таких інструментів є те, що вони мають хорошу міцність і стійкість до термічних ударів та низький коефіцієнт тертя. Разом з тим, вони можуть використовуватися для високошвидкісної обробки чавунів як при точінні, так і при фрезеруванні. Наприклад, під час фрезерування висококомірного чавуну (НВ 160–330) твердосплавними інструментами швидкість різання невисока: 0,83–1,66 м/с, а при використанні кубічного нітриду бору (CBN) може бути збільшена до 5,00–13,33 м/с [21]. В таблиці 5 вказано режими різання при торцевому фрезеруванні чавунів інструментами з НТМ [23].

Таблиця 5

## Режими різання, що рекомендуються при фрезеруванні інструментом з композита

Оброблювальний матеріал	Марки композита	Режими торцевого фрезерування		
		Швидкість різання, м/хв	Подача на мм/зуб	Глибина різання, мм
Чавуни сірі та висококомірні НВ 150–300 (в тому числі по ливарній кірці)	05; 10; 10Д; 01	300...3000	0,01...0,10	0,05...6,0
Чавуни відбілені, загартовані, НВ 400–600	10; 01; 10Д; 05	200...800	0,01...0,1	0,05...4,0

Чим вища твердість оброблюваної сталі або чавуну, а також швидкість різання, тим більші переваги інструментів з композита порівняно з інструментами з твердого сплаву і мінералокераміки.

При обробці сірого чавуну інструментами з КНБ з допустимими режимами різання ( $v = 6,66\text{--}8,33$  м/с,  $S = 0,02\text{--}0,2$  мм/об та  $t = 0,2\text{--}1,5$  мм) можна досягнути шорсткості обробленої поверхні  $Ra = 0,32 \div 2,5$  мкм. Стійкість інструменту при цьому 150–360 хв [21].

Однак, незважаючи на усі переваги у використанні цієї групи інструментальних матеріалів, є декілька недоліків. Для досягнення максимальної продуктивності обробки інструментами з КНБ необхідне забезпечення жорсткості технологічної оброблюючої системи, її температурної стабільності та геометричної точності [10]. До того ж потрібно дуже чітко підбирати марку матеріалу та геометричні параметри різальної частини. Оскільки найменші похибки в них призводять до стрімкого зниження стійкості інструменту, до погіршення якості обробленої поверхні, а то й навіть до його відмови [26]. Крім того, вони мають велику вартість, і нераціональне використання таких інструментів буде збільшувати собівартість оброблених деталей.

Різні компанії (ISCAR, BECKER, Sandvik Coromant та ін.), що займаються виробництвом інструментів з надтвердих матеріалів, надають свої рекомендації щодо вибору інструментів, матеріалів їх різальної частини, геометричних параметрів та режимів різання відповідно до міжнародних стандартів ISO. Однак вони не завжди враховують всіх тонкощів в обробці чавунів матеріалами з НТМ, оскільки ще не є вивченими на достатньому рівні. Саме тому в цьому напрямі проводиться велика кількість досліджень вітчизняними та зарубіжними науковцями й підприємствами з виготовлення різальних інструментів [12–15].

Так в Україні дослідженнями надтвердих матеріалів на основі CBN займається Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. Зокрема в роботі [2], в якій досліджувалися технологічні можливості інструментів, оснащених полікристалічними надтвердими матеріалами на основі кубічного нітриду бору, було встановлено, що різальні інструменти, оздоблені композитами групи ВН, дозволяють ефективно оброблювати вироби з різних чавунів. В той же час зазначено, що продуктивність обробки білих чавунів інструментами з НТМ системи «сBN-Si3N4», порівняно з інструментами з кераміки, більша в 4–5 разів, до того ж стійкість інструмента більша в 3–3,5 рази. Особлива увага приділяється обробці різанням інструментами з композитів групи ВС з покриттями. В результаті досліджень, наведених в [2], було встановлено, що їх надійність та стійкість підвищилась, порівняно з застосуванням інструментів з композитів групи ВН без покриття. До того ж механізм зношування інструментів з композитів групи ВС є більш контрольованим.

У роботі [8] було встановлено, що обробка різанням деталей високої твердості інструментами з НТМ на основі нітриду бору типу ельбор-Р та гексаніт-Р забезпечує підвищення продуктивності праці в 2–3 рази, при цьому стійкість інструмента в 2–3 рази перевищує стійкість інструментів з твердих сплавів та мінералокераміки. Також зазначено, що для переривчастого різання можна використовувати лише інструмент з гексаніту-Р, який допускає ударні навантаження. Однак, як вже зазначалося вище, для інструментів з НТМ необхідно дотримуватися чітких рекомендацій з вибору оптимальних режимів різання та геометрії різальної частини, ці ж правила діють і для інструментів, оснащених гексанітом-Р.

Багато досліджень проводиться на визначення характеру зношування різальних частин інструментів, оснащених CBN. Зокрема, науковцями Сумського державного університету [4] досліджувався механізм зношування різальних інструментів із CBN при механічній обробці зносостійкого чавуну марки ІЧ210Х30Г3, в результаті чого було виявлено пошкодження різальної пластини, вже починаючи з швидкості різання 39 м/хв. Механізми зношування при цьому були адгезія та стирання. А при швидкості різання в діапазоні 69–78 м/хв стійкість різальної пластини була максимальною, і з її подальшим збільшенням починається інтенсивний механізм зношування.

Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» проводилися теоретичні дослідження [5] впливу геометричних параметрів різальних частин ножів торцевих фрез та режимів різання на якість обробки й стійкість інструменту, в результаті яких було розраховано, що для покращення якості обробленої поверхні під час фрезерування сірого чавуну слід використовувати ножі з безвершинною радіусною різальною кромкою та здійснювати обробку з такими режимами різання:  $S_z$  до 0,15 мм/зуб,  $V > 12$  м/с. А для покращення стійкості інструменту слід обирати такі параметри його різальної частини:  $\gamma = -10\text{--}15^\circ$ ,  $\alpha = 10\text{--}12^\circ$ ,  $\phi = 30\text{--}45^\circ$ ,  $\lambda = -20\text{--}0^\circ$ .

У роботі [6] здійснювалися дослідження впливу режимів різання на зносостійкість різальної частини торцевих фрез, оснащених ПНТМ при високошвидкісному різанні сірого чавуну, в результаті яких були отримані дані, що можуть бути використані як рекомендації для вибору режимів різання за геометричних параметрів різальних пластин: величинами припуску на один ніж  $t_1 = 1\text{--}1,5$  мм, подача на зуб з діапазоні  $S_z = 0,15\text{--}0,2$  мм/зуб, та швидкість різання в межах  $V = 19\text{--}23,5$  м/с. Також для підвищення продуктивності рекомендується застосовувати спіральну-ступінчасту схему різання, за якої сумарна глибина різання буде становити  $t\Sigma = 8\text{--}10$  мм. В ході експериментів було встановлено, що на стійкість інструменту подача на зуб впливає більше, ніж швидкість різання.

В роботі [7] проводиться аналіз оптимізації процесів механічної обробки деталей різальними інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами. Автор статті наголошує, що для забезпечення найкращої продуктивності в роботі з інструментами з НТМ обробку потрібно здійснювати на високоякісному обладнанні, зі зведенням таких погіршень, як биття осі шпинделя і непрямолінійності переміщення стола, до мінімуму. Разом з тим, демонструються переваги такого методу фінішної механічної обробки, як торцеве фрезерування чавуну (220–250 НВ) порівняно зі шліфуванням, яке здійснювалося торцевою фрезою діаметром 160 мм при швидкості різання 800 м/хв, подачі 0,05 мм/зуб та глибині різання 0,3 мм, при якому досягається шорсткість Ra 1–0,3 мкм та підвищення продуктивності обробки у 8–12 разів.

З огляду на розглянуті роботи приходимо до висновку, що використання надтвердих матеріалів є досить ефективним для виготовлення різальних частин торцевих фрез та має великі перспективи в обробці плоских протяжних поверхонь, матеріалами яких є чавуни. Разом з тим, при забезпеченні рекомендацій щодо роботи з такими видами інструментів можна значно підвищити продуктивність обробки деталей і їх якість та виключити з технологічного процесу такий метод фінішної механічної обробки, як шліфування, і цим самим покращити не лише економічну ефективність обробки, але і її екологічність. Але при торцевому фрезеруванні багатолезовим інструментом, оснащеним пластиною з КНБ, дуже важливо, щоб на всі пластини діяло однакове навантаження, оскільки при недотриманні цієї умови відбувається нерівномірне зношування різальних частин інструменту, внаслідок чого стійкість інструменту відразу ж знижується і погіршується якість обробки. До того ж при обробці чавунів має місце переривчасте різання і нерівномірність розподілу навантаження в умовах недостатньої жорсткості та точності технологічної оброблюючої системи [1], що може призводити навіть до поломки зубів фрези. Щоб усунути цей недолік, останнім часом почали застосовувати ступінчасті багатолезові інструменти з різними ефективними схемами різання, одна з яких зазначена у роботі [11], що зображена на рисунку 4, у яких кожне лезо зміщене відносно іншого в осьовому та радіальному напрямках, що дозволяє раціонально здійснювати розподіл припуску на кожен зуб багатолезового інструменту з м'яким його врізанням.

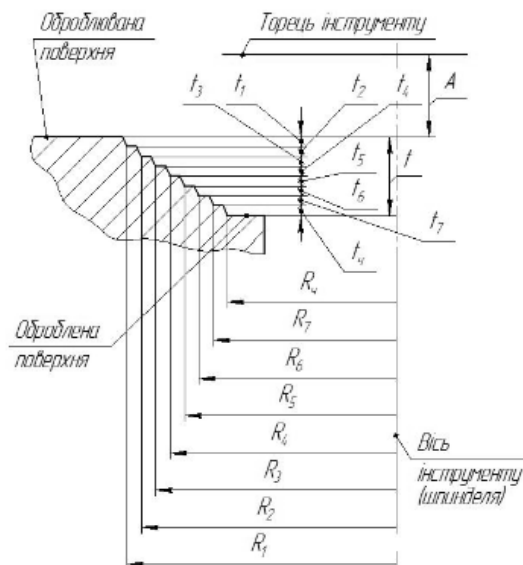


Рис. 4. Схема різання [11]

Способи підвищення продуктивності такого типу обробки є перспективними і ще недостатньо вивчені, тому викликають інтерес багатьох науковців, вчених та компаній, які займаються виробництвом різальних інструментів. Найбільш часто ножі у лезових інструментах розташовуються за логарифмічною спіраллю, за спіраллю Архімеда та Ферма [9]. Це дозволяє рівномірно розподілити навантаження на ножі лезових інструментів та забезпечити одночасну роботу всіх ножів, що є дуже важливим в умовах різання інструментами з НТМ.

У роботі [10] були проведені дослідження різних методів чистової обробки плоских чавунних поверхонь деталей, під час яких було виявлено ефективність обробки таких поверхонь торцевим фрезерним інструментом, оснащеним НТМ гексаніт-Р (композит 10). За словами авторів, цей метод дозволяє збільшити продуктивність праці в 2–5 разів та досягнути шорсткості Ra 0,4–1,25 мкм. Але, як вони з'ясували, інструмент з НТМ (гексаніт-Р) може ефективно працювати лише при великих швидкостях та при великій жорсткості технологічної оброблюючої системи, а тому були розроблені конструкції агрегатних фрезерних головок для усунення цього недоліку. Результатом обробки сірого чавуну СЧ-20 торцевою

фрезою  $\varnothing$  315 мм, закріпленою в одній з таких агрегатних фрезерних голівок, з режимами різання:  $V = 1435$  мм/хв,  $t = 0,2-0,5$  мм,  $S_{хв} = 800-1000$  мм/хв стало досягнення шорсткості  $Ra$  0,32–0,6 мкм.

Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» проводяться дослідження ефективних конструкцій багатолезових інструментів з різними схемами різання та розміщенням лез у корпусі інструмента. В одній з багатьох представлених ними робіт [11] пропонується здійснювати удосконалення фінішної обробки плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням з застосуванням ступінчастих схем різання та перетворенням колової траєкторії рухів формують елементів у трохоепітрохідну. Це дало можливість отримати параметри поверхонь ( $Ra$  0,6  $\div$  1,9), яка досягається під час шліфування.

Досить цікавою є надана автором [9] конструкція торцевої фрези, в тороїдальному корпусі якої розташовуються 12 ножів за спіраллю Ферма, яка забезпечує можливість реалізації різних ефективних ступінчастих схем різання. Для її ефективної роботи з різними значеннями глибин різання були надані рекомендації щодо вибору її конструктивних параметрів на основі аналізу створеної математичної моделі навантаженості різальних кромок у процесі різання.

Виробниками ріжучих інструментів усього світу проводяться дослідження ефективності обробки чавунів, особливо при обробці великогабаритних деталей, коли питання стійкості інструменту постає особливо гостро. Одним з таких виробників є ізраїльська компанія ISCAR Group, яка працює більше ніж в 60 країнах світу, представництво якої є в тому числі і в Україні. За останні роки вона представила на ринку безліч цікавих конструкцій інструментів, різальних пластин та інструментальних матеріалів, призначених саме для різання чавунів [12]. На рисунку 5 представлена одна з останніх їх новинок, за рахунок використання якої можливо підвищити продуктивність обробки плоских чавунних поверхонь деталей. Матеріалом пластин є нітрид кремнію ( $Si_3N_4$ ). Пластини встановлюються у корпус фрези з тангенціальним затиском з поступовим зміщенням у радіальному та осьовому напрямках.



Рис. 5. Торцева фреза TANGFIN компанії Iscar

Завдяки використанню таких фрез можна досягти збільшення швидкості різання до трьох разів і високу чистоту поверхні ( $Ra$  до 0,1 мкм) розділивши припуск на обробку між усіма зубами фрези та довгою зачисною крайкою пластини. Отримання таких результатів можливе за умов жорсткості технологічної оброблюючої системи та застосування високоточного обладнання.

У свою чергу інженерами компанії TaeguTec [13] було розроблено та випущено негативну двосторонню пластину НХКУ складної вигнутої форми. Її встановлюють у корпус фрези з позитивним переднім кутом (рис. 6), що дозволяє зменшити глибину фрезерування та ударне навантаження на неї, але в той же час це дає можливість збільшувати швидкість різання та подачу на зуб і тим самим сприяти підвищенню продуктивності обробки.

Крім того, пластини в корпус фрези встановлюються з нерівномірним кроком (рис. 6), що є також дуже позитивним моментом у боротьбі з вібраціями, особливо в умовах здійснення обробки на верстатах з низькою жорсткістю технологічної оброблюючої системи. Застосування таких фрез, з номенклатурою розмірів  $\varnothing$  40–250 мм, сприяє підвищенню продуктивності обробки, однак по відношенню до обробки плоских протяжних деталей, ширина яких перевищує 250 мм ефективність, використання таких фрез буде меншою.



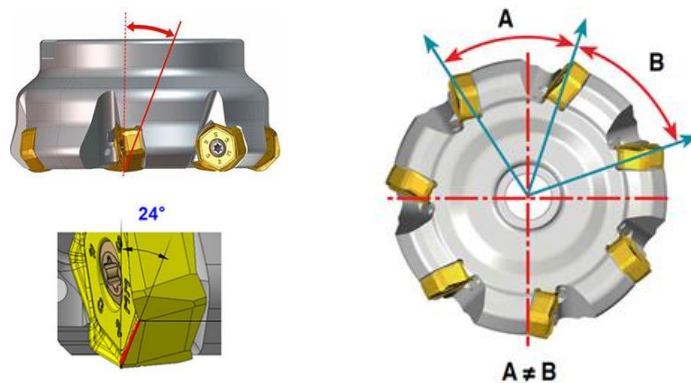


Рис. 6. Торцева фреза CHASE12MILL компанії TaeguTec

**Висновки.** На основі аналізу розглянутої інформації встановлено, що велика кількість конструкцій інструментів на основі CBN не дає можливості однозначно визначитися з конструктивним рішенням інструменту, схемами різання, режимами різання. Тому для забезпечення раціональних рішень обробки чавунів з різними фізико-механічними характеристиками передбачено:

- створити конструкції торцевих фрез з традиційним та спеціальним розміщенням різальних ножів задля підвищення ефективності фінішної обробки плоских поверхонь деталей з чавунів;
- теоретично обґрунтувати доцільність прийнятих рішень та практично їх підтвердити в виробничих умовах.

#### Список використаної літератури:

1. Підвищення ефективності обробки плоских поверхонь торцевим фрезеруванням : монографія / П.П. Мельничук, Г.М. Виговський, О.А. Громовий та ін. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – 277 с.
2. Клименко С.А. Технологические возможности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора / С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, А.О. Чумак // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2017. – Вип. 12. – С. 54–60.
3. Анастасенко С.М. Вплив режимів різання на збереження стійкості інструмента: проблеми та шляхи їх вирішення / С.М. Анастасенко, В.Л. Будуров, І.О. Григурко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2016. – Вип. 46. – С. 312–321.
4. Механізм зношення різальних інструментів на основі cBN при точінні зносостійких високохромистих чавунів / К.О. Дядюра, А.С. Юнак, А.Д. Погребняк, В.О. Охріменко // Физическая инженерия поверхности. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 225–234.
5. Виговський Г.М. Забезпечення якісної обробки плоских поверхонь деталей при глибинному торцевому фрезеруванні інструментами, оснащеними полікристалічними надтвердими матеріалами / Г.М. Виговський, О.А. Громовий, В.А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 12–26.
6. Виговський Г.М. Визначення режимів обробки торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами, при чорновій обробці сірого чавуну / Г.М. Виговський, В.М. Бушля // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2012. – Вип. 13. – С. 28–38.
7. Суйеуова Н.Б. Анализ оптимизации процессов механической обработки деталей инструментами из сверхтвердых материалов в современном машиностроении / Н.Б. Суйеуова [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rusnauka.com/pdf/247702>.
8. Оптимизация режимов резания деталей машин резцами из эльбора-Р и гексанида-Р / В.В. Коломиец, Р.В. Ридный, Р.В. Антоценков и др. // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2018. – № 11. – С. 295–300.
9. Modelling the loading of the nose-free cutting edges of face mill with a spiral-stepped arrangement of inserts / L.Hlembotska, P.Melnychuk, N.Balytska, O.Melnyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 1, № 1 (91). – P. 46–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121712.
10. Куширинов П.В. Обработка плоскостей торцевой фрезой / П.В. Куширинов // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2004. – № 4. – С. 4–5.
11. Мельничук П.П. Теоретико-технологічне обґрунтування можливостей обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, замість шліфування / П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев // Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки. – 2014. – № 3. – С. 164–172.
12. Торцевые фрезы CHASE12MILL для высокопроизводительной обработки с максимальной экономичностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://taegutec.com.ua/torcevye-frezy-chase12mill-dlya-vysokoproizvoditelnoj-obrabotki-s-maksimalnoj-ekonomichnostyu/>.
13. Инструменты LOGIQ для чавуну [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/countryid/46/newarticleid/4215>.

14. Инструменты з НТМ та ПКА Becker [Электронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.s-t-group.com/catalog/Becker/Becker%20full%20catalogue/Becker.pdf>.
15. Особенности фрезерования различных материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>.
16. Чугун : справ. изд. / под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. – М. : Metallurgiya, 1991. – 576 с.
17. Казанцев Е.И. Промышленные печи : справочное руководство для расчета и проектирования / Е.И. Казанцев. – 2-е изд., доп. и переработ. – М. : Metallurgiya, 1975. – 368 с.
18. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 томах / под общей ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. – Т. 3. «Резание материалов лезвийными инструментами». – Одесса : ОНПУ, 2003. – 546 с.
19. Петрушин С.И. Обработка чугунов и сталей сборными резами со сменными многогранными пластинами / С.И. Петрушин, С.В. Грубий. – Томск : Изд. ТПУ, 2000. – 156 с.
20. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. ; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л. : Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1987. – 846 с.
21. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова. – М. : Машиностроение, 2005. – 555 с.
22. Можжев С.С. Скоростное и силовое точение сталей повышенной прочности / С.С. Можжев, Т.Г. Саромотина. – М. : Оборонгиз, 1957. – 273 с.
23. Обработка металлов резанием : справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойко и др. ; под общ. ред. А.А. Панова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2004. – 784 с.

#### References:

1. Mel'nichuk, P.P., Vygovs'kyj, G.M. and Gromovyj, O.A. et al. (2017), *Pidvyshhennja efektyvnosti obrobky ploskyh poverhon' torcevim frezeruvannjam*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 277 p.
2. Klimenko, S.A., Kopeikina, M.Yu. and Chumak, A.O. (2017), «Tekhnologicheskie vozmozhnosti instrumentov, osnashchennykh kompozitami na osnove kubicheskogo nitrída bora», *Suchasni tehnologii' v mashynobuduvanni*, Issue 12, pp. 54–60.
3. Anastasenko, S.M., Budurov, V.L. and Grygurko, I.O. (2016), «Vplyv rezhymiv rizannja na zberezhennja stijkosti instrumenta: problemy ta shljahy i'h vyrishennja», *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kogospodars'kyh mashyn*, Issue 46, pp. 312–321.
4. Djadjura, K.O., Junak, A.S., Pogrebnjak, A.D. and Ohrimenko, V.O. (2015), «Mehanizm znoshennja rizal'nyh instrumentiv na osnovi cBN pry tochnini znosostijkyh vysokohromystyh chavuniv», *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*, Vol. 13, No. 2, pp. 225–234.
5. Vygovs'kyj, G.M., Gromovyj, O.A. and Kyrilovych, V.A. (2015), «Zabezpechennja jakisnoi' obrobky ploskyh poverhon' detalej pry glybynnomu torcevomu frezeruvanni instrumentamy, osnashhenymy polikrystalichnymy nadtverdymy materialamy», *Visnyk Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu. Serija Tehnichni nauky*, No. 2, pp. 12–26.
6. Vygovs'kyj, G.M. and Bushlja, V.M. (2012), «Vyznachennja rezhymiv obrobky torcevimy frezamy, osnashhenymy nadtverdymy materialamy, pry chornovij obrobci sirogo chavunu», *Procesy mehanichnoi' obrobky v mashynobuduvanni*, Issue 13, pp. 28–38.
7. Suiueova, N.B., *Analiz optimizatsii protsessov mekhanicheskoi obrabotki detalei instrumentami iz sverkh'tverdykh materialov v sovremennom mashinostroenii*, [Online], available at: <http://www.rusnauka.com/pdf/247702>
8. Kolomiets, V.V., Ridnyi, R.V. and Antoshchenkov, R.V. et al. (2018), «Optimizatsiya rezhimov rezaniya detalei mashin reztsami iz el'bora-R i geksanita-R», *Tehnichnyj servis agropromyslovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv*, No. 11, pp. 295–300.
9. Hlembotska, L., Mel'nichuk, P., Balytska, N. and Melnyk, O. (2018), «Modelling the loading of the nose-free cutting edges of face mill with a spiral-stepped arrangement of inserts», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1., No. 1 (91), pp. 46–54, doi: 10.15587/1729-4061.2018.121712.
10. Kushnirov, P.V. (2004), «Obrabotka ploskosti tortsovoi frezoi», *Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, No. 4, pp. 4–5.
11. Mel'nichuk, P.P. and Lojev, V.Ju. (2014), «Teoretyko-tehnologichne obg'runtuvannja mozhyvostej obrobky ploskyh poverhon' detalej torcevim lezovym instrumentom, osnashhenym nadtverdymy materialamy, zamist' shlifuvannja», *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu, Serija Tehnichni nauky*, No. 3, pp. 164–172.
12. *Tortsevye frezy CHASE12MILL dlya vysokoproizvoditel'noi obrabotki s maksimal'noi ekonomichnost'yu*, [Online], available at: <https://taegutec.com.ua/torcevye-frezy-chase12mill-dlya-vysokoproizvoditel'noj-obrabotki-s-maksimal'noj-ekonomichnostyu/>
13. *Instrumenty LOGIQ dlja chavunu*, [Online], available at: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/countryid/46/newarticleid/4215>
14. *Instrumenty z NTM ta PKA Becker*, [Online], available at: <https://www.s-t-group.com/catalog/Becker/Becker%20full%20catalogue/Becker.pdf>
15. *Osobennosti frezerovaniya razlichnykh materialov*, [Online], available at: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>
16. Sherman, A.D. and Zhukov, A.A. (ed.) (1991), *Chugun*, sprav. izd., Metallurgiya, M., 576 p.
17. Kazantsev, E.I. (1975), *Promyshlennye pechi*, spravochnoe rukovodstvo dlya rascheta i proektirovaniya, 2-e izd., dop. i pererabot., Metallurgiya, M., 368 p.

18. Novikov, F.V. and Yakimov, A.V. (ed.) (2003), *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. V 10 tomakh*, Vol. 3. «Rezanie materialov lezviinymi instrumentami», ONPU, Odessa, 546 p.
19. Petrushin, S.I. and Grubiy, S.V. (2000), *Obrabotka chugunov i staley sbornymi reztsami so smennymi mnogogorannymi plastinami*, Izd. TPU, Tomsk, 156 p.
20. Ordinartsev, I.A., Filippov, G.V., and Shevchenko, A.N. et al. (1987), *Spravochnik instrumental'shchika*, in Ordinartsev, I.A. (ed.), Mashinostroenie. Leningrad. otd-nie, L., 846 p.
21. Novikov, N.V. (ed.) (2005), *Instrumenty iz sverkhтвердых материалов*, Mashinostroenie, M., 555 p.
22. Mozhaev, S.S. and Saromotina, T.G. (1957), *Skorostnoe i silovoe tochenie staley povyshennoi prochnosti*, Oborongiz, M., 273 p.
23. Panov, A.A., Anikin, V.V. and Boiko, N.G. et al. (2004), *Obrabotka metallov rezaniem*, spravochnik tekhnologa, in Panov, A.A. (ed.), 2-e izd., pererab. i dop., Mashinostroenie, M., 784 p.

**Радкевич** Світлана Іванівна – магістр Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

**Глембоцька** Лариса Євгенівна – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-7234-4246>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

**Мельничук** Петро Петрович – доктор технічних наук, професор, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0361-756X>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2021.