

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

Державний університет «Житомирська політехніка»

Підвищення ефективності обробки високоміцних чавунів з вермикулярним графітом

У статті на підставі аналізу літературних джерел викладено існуючі уявлення про структурні особливості високоміцних чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ), при порівнянні його з сірими чавунами (СЧ) та високоміцними чавунами з кулястим графітом. Розглянуто вплив хімічного складу і структури на їх оброблюваність різанням, експлуатаційні властивості і стан поверхневого шару заготовки та можливості його покращення. Було виявлено, що інструменти з надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (КНБ) та інструменти з металокераміки не забезпечують такої високої ефективності при обробці чавунів з вермикулярним графітом, як при обробці сірих чавунів. Найкращі показники оброблюваності в парі ЧВГ – КНБ були досягнені при переривчастому фрезуванні зі швидкістю 800 м/хв. Відсутність MnS у складі ЧВГ та вермикулярна форма графітових включень є основними чинниками, які ускладнюють їх обробку. До того ж вермикулярна морфологія чавунів сприяє швидкому дифузійному зносу інструментів з надтвердих матеріалів. Тут представлено результати стійкості інструментів з надтвердих і твердосплавних матеріалів при обробці торцевими фрезами поверхонь деталей з чавунів з вермикулярним графітом та з сірих чавунів. А також характер зношування, який при цьому наявний.

Ключові слова: чавун з вермикулярним графітом; структура; хімічний склад; оброблюваність; стійкість.

Постановка проблеми. Багато зарубіжних та вітчизняних науковців зауважили, що велике значення для стійкості інструментів та якості оброблених поверхонь мають не лише матеріал інструмента, параметри різання та геометрія інструмента, а й те, як вони взаємодіють зі структурою та хімічним складом ЧВГ. Глибокі знання залежностей структури, морфології графітових включень та хімічного складу чавунів з вермикулярним графітом, з параметрами та геометрією різання дозволить підвищити ефективність їх обробки. А тому постає питання знаходження цих зв'язків і використання їх для конструювання високоефективного лезового інструмента для обробки ЧВГ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Огляд літературних джерел показав, що структура, морфологія графіту та хімічний склад високоміцних чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) мають велике значення як для надійної експлуатації виробів з них, так і для ефективної їх обробки. В дослідженнях цих зв'язків є багато напрацювань, зроблених зарубіжними та вітчизняними науковцями [1–11]. Відомо, що при обробці різанням велику роль відіграє механізм утворення стружки. В ряді робіт [1–5] зазначається, що головним фактором, який визначає механізм утворення стружки при обробці ЧВГ, є морфологія графітових включень в них і їх міцний зв'язок з металевою основою. Однак він (так само, як механізм зношування та причини руйнування інструментів, та механізми контактної взаємодії інструмента та заготовок з чавуну з вермикулярним графітом) залишається малодослідженим і потребує додаткового вивчення. Більш глибокі знання в цьому дозволять підвищити ефективність обробки чавунів з вермикулярним графітом та покращити якість отриманих з них деталей. Інтерес до ЧВГ в останні роки зростає (особливо на перспективному ринку двигунів внутрішнього згорання), і автори багатьох робіт наголошують, що завдяки своїм особливостям чавуни з вермикулярним графітом повністю замінять сірі чавуни. Єдина перепона на шляху до цього – їх погана оброблюваність, і низька ефективність використання інструментів з надтвердих матеріалів (в той час як для сірих чавунів ефективність використання їх досить висока). Більш глибоке вивчення залежностей оброблюваності різанням ЧВГ від їх структури та хімічного складу і інструментального матеріалу дозволить знайти способи підвищення її. Цьому питанню присвячено багато робіт зарубіжних та вітчизняних науковців, але воно досі залишається актуальним [1–6, 8, 10].

Метою статті є дослідження літературних джерел для пошуку та впорядкування інформації щодо оброблюваності чавунів з вермикулярним графітом залежно від їх структури, морфології графітових включень і хімічного складу та подальше використання її для проектування лезового інструменту, з пластинами з надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору, для ефективної обробки поверхонь деталей з ЧВГ.

Викладення основного матеріалу. Механічна обробка є одним із найпоширеніших виробничих процесів у машинобудівній промисловості. Вона має відповідати високим вимогам безпеки процесу та забезпечувати отримання необхідної якості виробів. До того ж витрати на обробку, час обробки та на інструмент мають бути мінімальними. Вирішення цих проблем можливе при застосуванні нових і вдосконалення існуючих технологій. Велике значення має раціональний вибір оброблюваного та обробляючих матеріалів. Як конструкційний матеріал широкого застосування мають чавуни. Поряд з низькою вартістю вони володіють високими фізико-механічними показниками. Особлива увага приділяється нині чавунам з вермикулярним графітом. ЧВГ займають проміжне положення між сірими чавунами та високоміцними чавунами з кулястим графітом (ВЧКГ) за складністю обробки та своїми фізико-механічними характеристиками. Їх розрізняють за формою частинок графіту.

На рисунку 1 зображено мікроструктуру цих чавунів. Сірий чавун характеризується хаотично орієнтованими пластівцями графіту, в той час як частинки графіту в ВЧКГ наявні у вигляді окремих сфер. На відміну від цього, частинки графіту в ЧВГ мають вигляд черв'яків. Частинки витягнуті та хаотично орієнтовані, як і в СЧ, проте вони коротші і товстіші та мають закруглені краї. На тривимірному зображенні структури чавунів видно, що окремі «черв'яки» з'єднані зі своїми найближчими сусідами складною коралоподібною морфологією графіту, що призводить до сильної адгезії між графітом та залізною матрицею. У той час як графітові пластівці з гладкою поверхнею в сірому залізі сприяють зародженню та росту тріщин і, таким чином, роблять матеріал відносно слабким, крихким і легкооброблюваним. Заплутана морфологія ущільненого графіту усуває природні шляхи розщеплення, забезпечуючи тим самим міцність і жорсткість, але разом з тим робить обробку різанням набагато складнішою [1].

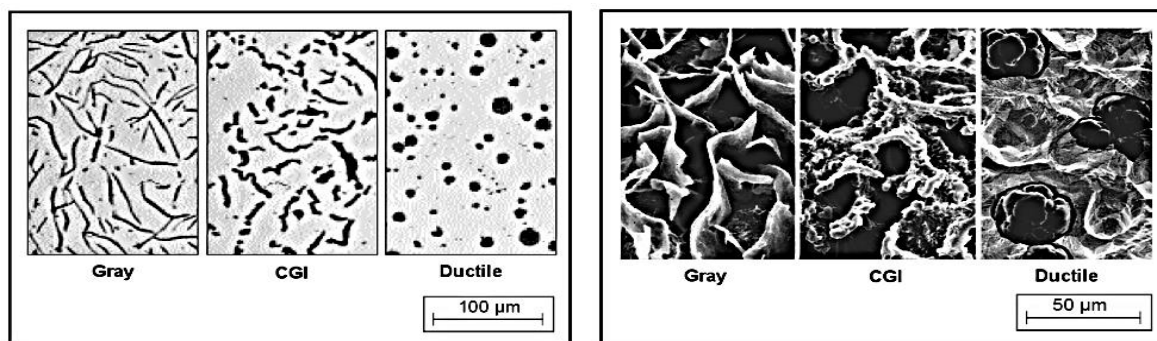


Рис. 1. Структура чавунів з різною формою графітових включень [1]

Виробництво сірих чавунів з пластинчастим графітом відбувається при повільному охолодженні виливків. Вони модифікуються з рідкого чавуну феросиліциєм або силікокальцієм. Мають підвищений вміст кремнію та знижений марганцю. Для отримання вермикулярної та кулястої форми графітових включень використовують такі модифікатори, як магній, кальцій, церій. Вони суттєво впливають на структуру, змінюючи форму графітових включень, їх розташування та розмір зерен. Однак практично не змінюють хімічний склад. Магній як модифікатор для виготовлення чавуну з кулястим графітом використовується найчастіше, оскільки він найбільш дешевий і ефективний елемент [5].

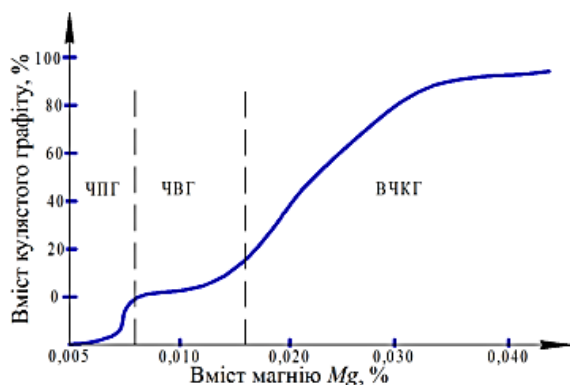


Рис. 2. Діапазон стабільного формування вермикулярного графіту у магнієвому чавуні [5]

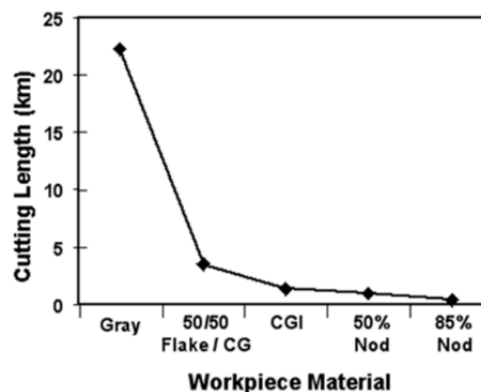


Рис. 3. Залежність стійкості інструмента з PCBN при швидкості 800 м/хв від форми графіту в чавунах [1]

Хімічний склад чавунів [1]

Матеріал	Форма графіта, %			Перліт, %	ВН	Хімічний склад, %							
	Пластинчастий	Вермикулярний	кулястий			C	Si	Mg	Cu	Sn	Mn	S	Cr
СЧ	100	0	0	100	193	3,18	2,18	–	0,19	0,06	0,74	0,086	0,14
ЧВГ	0	> 95	< 5	70–80	220	3,73	2,25	0,011	0,47	0,033	0,41	0,015	0,03
50-ВЧКГ	0	45–55	45–55	> 90	235	3,74	2,35	0,026	0,90	0,026	0,41	0,012	0,03
85-ВЧКГ	0	< 20	> 80	> 90	245	3,68	2,20	0,040	0,94	0,10	0,40	0,010	0,03

У таблиці 2 наведено порівняльні властивості сірих чавунів, чавунів з вермикулярним графітом та високоміцних чавунів з кулястим графітом. Міцність на розрив чавунів з вермикулярним графітом ЧВГ знаходиться між показниками сірих чавунів СЧ та високоміцних чавунів з кулястим графітом. Щодо ливарних властивостей, поглинання вібрацій та теплопровідності, то вони є вищими, порівняно з цими показниками для високоміцних чавунів з кулястим графітом [5].

Таблиця 2

Порівняльна характеристика фізико механічних характеристик сірих чавунів (СЧ), чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) та високоміцних чавунів з кулястим графітом [5]

Показник	Одиниці виміру	СЧ	Феритний ЧВГ	Перлітний ЧВГ	ВЧКГ	Показник	Одиниці виміру
Тимчасовий опір під час розтягування	МПа	100...400	мін. 300	400...500	350...1000	Тимчасовий опір під час розтягування	МПа
Умовна границя плинності, 0,2 %	МПа	-	мін. 240	340...440	250...700	Умовна границя плинності, 0,2 %	МПа
Відносне видовження	%	макс. 0,5	мін. 2	мін. 1	2...22	Відносне видовження	%
Міцність та згин	МПа	300...600	600	700	800...1200	Міцність та згин	МПа
Міцність та стиск	МПа	500...1400	мін. 500	мін. 600	600...1200	Міцність та стиск	МПа
Твердість по Брінеллю	НВ	140...300	130...190	200...280	120...350	Твердість по Брінеллю	НВ
Ударна в'язкість	кДж/м ²	6...19	макс. 10	-	6...25	Ударна в'язкість	кДж/м ²
Модуль пружності	ГПа	75...155	130...160	130...170	165...185	Модуль пружності	ГПа
Щільність	кг/м ³	7000...7500	7000	7100	7100...7300	Щільність	кг/м ³
Питомий електричний опір (при 20 °С)	μΩ·м	0,5...1,0	0,7	0,8	0,5...0,7	Питомий електричний опір (при 20 °С)	μΩ·м
Коефіцієнт термічного розширення	1/°С·10 ⁶	10–12	12–14	12–14	9...12	Коефіцієнт термічного розширення	1/°С·10 ⁶

Однак оброблюваність ЧВГ значно гірша ніж у СЧ, хоча й краща порівняно з ВЧКГ. Це пояснюється наявністю включень сульфиду марганцю в сірих чавунах та утворенням на різальній кромці оброблюючих інструментів захисного шару MnS. В ряді робіт [1–5] зазначається, що цей шар стає більшим і щільнішим зі збільшенням швидкості різання. А це в свою чергу призводить до збільшення терміну служби інструментів при обробці сірих чавунів при високошвидкісному різанні. Що ж стосується ЧВГ, то для отримання в їх структурі графітових включень вермикулярної форми застосовують магній у вигляді

відносно твердих і абразивних включень сульфїду магнію (MgS), а не м'яких і податливих включень MnS [10]. Як наслідок захисний шар MnS під час обробки ЧВГ не утворюється. Це є одним із пояснень швидкого спрацювання інструментів при обробці чавунів з вермикулярним графітом. До того ж зміцнюючий вплив має збільшення вмісту титану в ЧВГ. Збільшення титану від 0,01 до 0,02 % веде до зменшення терміну служби інструментів при обробці ЧВГ приблизно на 50 %. В роботі [1] зазначено, що при безперервному високошвидкісному різанні цей процес має прискорений характер. Можливість зробити обробку переривчастою може значно зменшити швидкість спрацювання інструменту для ЧВГ. Неможливість підвищити рівень сірки в чавунах з вермикулярним графітом, або стабілізувати включення MnS в ЧВГ змушує сфокусуватися на розробці нових металургійних параметрів на нових технологіях різання. Аналіз впливу цих факторів на стійкість різального інструменту виконаний в роботах [1–11], однак потребує подальшого вивчення.

В таблиці 3 представлено переваги чавунів з вермикулярним графітом по відношенню до сірих чавунів та високоміцних чавунів з кулястим графітом [5].

Таблиця 3

Порівняльна характеристика чавунів з вермикулярним графітом та сірих чавунів і високоміцних чавунів з кулястим графітом [5]

Переваги чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) по відношенню до:	
сірого чавуну (СЧ)	сірого чавуну (СЧ)
Зменшення товщини стінок деталей при діючих робочих навантаженнях	Зменшення товщини стінок деталей при діючих робочих навантаженнях
Збільшення експлуатаційних навантажень при розробці нових деталей	Збільшення експлуатаційних навантажень при розробці нових деталей
Підвищення міцності без застосування легування	Підвищення міцності без застосування легування
Знижена ймовірність крихкого руйнування при роботі, монтажі та обслуговуванні завдяки підвищеній пластичності цього матеріалу	Знижена ймовірність крихкого руйнування при роботі, монтажі та обслуговуванні завдяки підвищеній пластичності цього матеріалу
Зниження схильності до утворення гарячих тріщин під час термоцикловання	Зниження схильності до утворення гарячих тріщин під час термоцикловання
В умовах тертя змащених поверхонь на 40...70 % менший рівень зношування порівняно з сірими чавунами з аналогічною структурою металевої основи	В умовах тертя змащених поверхонь, на 40...70 % менший рівень зношування у порівнянні з сірими чавунами з аналогічною структурою металевої основи

Стандарт ISO 16112 для чавуна з вермикулярним графітом включає п'ять марок на основі мінімальних значень тимчасової межі міцності (МПа): ISO 16112/JV/300 (феритний); ISO 16112/JV/350; ISO 16112/JV/400; ISO 16112/JV/450 (перлітний); ISO 16112/JV/500 (легований) [6]. Дані чавуни використовуються для виробництва деталей будь-яких мас, перетинів та і розмірів. Здатність цих чавунів поглинати вібрації, значно покращує якість експлуатації деталей та роботи усього механізму.

Таблиця 4

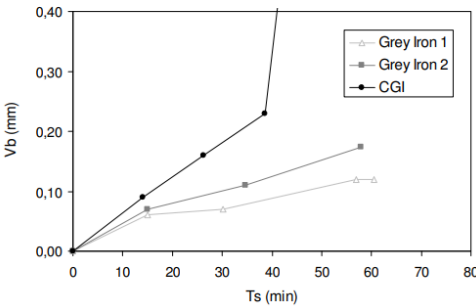
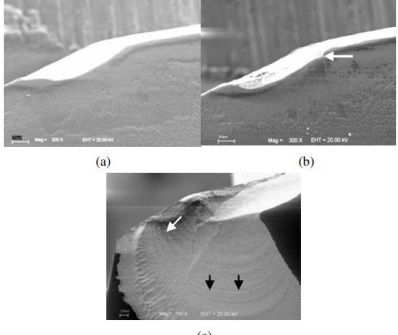
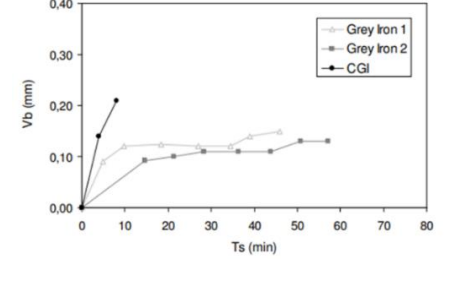
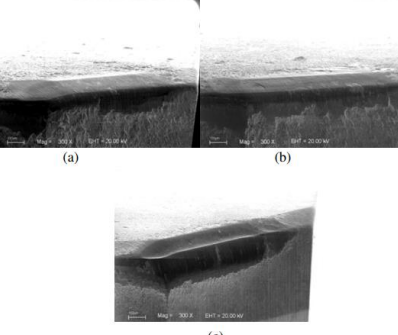
Рекомендації міжнародного стандарту ISO 16112:2006 щодо типового застосування чавуну з вермикулярним графітом [7]

Матеріал	Властивості	Приклади типових застосувань
ISO 16112 / JV / 300	Низька міцність та висока пластичність. Висока теплопровідність та низька пружність, мінімальні термічні напруження. Переважно феритова матриця мінімізує рїст протягом тривалого впливу підвищених температур	Вихлопні колектори, головки циліндрів для великих морських і стаціонарних двигунів
ISO 16112 / JV / 350	Вища міцність, ніж у легованого сірого чавуну, гарна пластичність. Вищий вихід придатного та краща оброблюваність ніж у ВЧКГ	Станини, кронштейни та муфти, блоки циліндрів та головки для великих морських і стаціонарних дизельних двигунів, виливниці
ISO 16112 / JV / 400	Послдання міцності, жорсткості та теплопровідності. Гарна зносостійкість	Автомобільні блоки та головки циліндрів, гальмівні барабани. Станини, кронштейни та муфти. Виливниці. Корпуси насосів та гідравлічні компоненти
ISO 16112 / JV / 450	Вища міцність, жорсткість та зносостійкість ніж ISO16112 / JV / 400, нижча оброблюваність	Автомобільні блоки та головки циліндрів. Подушки, кронштейни та муфти. Гальмівні диски. Корпуси насосів та гідравлічні компоненти
ISO 16112 / JV / 500	Найвища міцність і зносостійкість, та найнижча оброблюваність і пластичність	Високонапружені автомобільні блоки циліндрів. Гільзи циліндрів

Однак, не дивлячись на велику кількість позитивних характеристик, які притаманні ЧВГ, найбільшим їх недоліком є низька ефективність їх обробки. Залежно від марки чавунів та якості виготовлення, їх оброблюваність дуже різниться. Навіть у межах однієї марки чавунів, але виготовлених у різних партіях, витрати на різальний інструмент можуть бути різними, у зв'язку з можливою неоднорідністю їх структури. Велике значення для оцінки критеріїв оброблюваності, крім стійкості інструменту, мають також сили різання, геометрія стружки та чистота поверхні обробленої деталі. При обробці ЧВГ сили різання вищі, ніж при обробці сірого чавуну, оскільки вермикулярну форму графіту в них не так легко ініціюють тріщини. На відміну від того сірого чавуну, в якому гострі країки пластівчастого графіту спряють утворенню тріщин вздовж них. До того ж при цьому утворюється зливна стружка, що також ускладнює обробку. Разом з тим більша міцність матеріалу ЧВГ призводить до більших зусиль. Отож, на оброблюваність матеріалів впливає їхня мікроструктура, морфологія графітових включень та механічні властивості. А в свою чергу найбільш важливими факторами, що впливають на мікроструктуру і відповідно механічні властивості, є вміст вуглецю, легуючих елементів та термічна обробка. В таблиці 5 представлено результати стійкості інструментів для пластин з твёрдосплавного інструменту та з надтвердих матеріалів при обробці сірих чавунів та високоміцних чавунів з вермикулярним графітом і характер їх зносу.

Таблиця 5

Результати стійкості та характер зносу інструментів при обробці сірих та чавунів з вермикулярним графітом [2]

<p>Результати стійкості інструменту для пластин з твёрдосплавного інструменту при швидкості 275 м/хв</p>	<p>Характер зносу по передній поверхні на пластинах НМ (твёрдосплавні матеріали) при 275 м/хв, (а) сірий чавун після 45 хв, (б) сірий чавун 2 після 45 хв і (с) CGI після 49 хв</p>																																
<p>Випробування на стійкість інструменту при меншій швидкості різання (275 м/хв) показали, що сірі чавуни мають нижчий знос твёрдосплавного інструменту порівняно зі зносом для матеріалу чавуну з вермикулярним графітом CGI</p> <p style="text-align: center;">Carbide Insert</p>  <table border="1"> <caption>Data for Carbide Insert Graph</caption> <thead> <tr> <th>Ts (min)</th> <th>Grey Iron 1 (Vb mm)</th> <th>Grey Iron 2 (Vb mm)</th> <th>CGI (Vb mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.05</td><td>0.08</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.07</td><td>0.10</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>30</td><td>0.08</td><td>0.12</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>40</td><td>0.09</td><td>0.14</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>50</td><td>0.10</td><td>0.16</td><td>-</td></tr> <tr><td>60</td><td>0.11</td><td>0.18</td><td>-</td></tr> </tbody> </table>	Ts (min)	Grey Iron 1 (Vb mm)	Grey Iron 2 (Vb mm)	CGI (Vb mm)	0	0.00	0.00	0.00	10	0.05	0.08	0.10	20	0.07	0.10	0.15	30	0.08	0.12	0.20	40	0.09	0.14	0.25	50	0.10	0.16	-	60	0.11	0.18	-	<p>Різний рівень напружень спричинив появу тріщини при фрезеруванні сірого чавуну 2 (б), а також тріщину на пластині, яка фрезерувала чавун CGI. Злам є втомним, про що свідчить наявність плямистих слідів на поверхні зламу (с)</p> 
Ts (min)	Grey Iron 1 (Vb mm)	Grey Iron 2 (Vb mm)	CGI (Vb mm)																														
0	0.00	0.00	0.00																														
10	0.05	0.08	0.10																														
20	0.07	0.10	0.15																														
30	0.08	0.12	0.20																														
40	0.09	0.14	0.25																														
50	0.10	0.16	-																														
60	0.11	0.18	-																														
<p>Результати довговічності інструменту з пластинами CBN для сірих чавунів (900 м/хв) та CGI (700 м/хв)</p>	<p>Характер зносу на пластинах з CBN, вид збоку для: сірих чавунів (900 м/хв) через 45 хв і CGI (700 м/хв) через 8 хв</p>																																
<p style="text-align: center;">CBN Insert</p>  <table border="1"> <caption>Data for CBN Insert Graph</caption> <thead> <tr> <th>Ts (min)</th> <th>Grey Iron 1 (Vb mm)</th> <th>Grey Iron 2 (Vb mm)</th> <th>CGI (Vb mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.05</td><td>0.08</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.08</td><td>0.10</td><td>0.22</td></tr> <tr><td>30</td><td>0.10</td><td>0.11</td><td>0.23</td></tr> <tr><td>40</td><td>0.12</td><td>0.12</td><td>0.24</td></tr> <tr><td>50</td><td>0.13</td><td>0.13</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>60</td><td>0.14</td><td>0.14</td><td>0.26</td></tr> </tbody> </table>	Ts (min)	Grey Iron 1 (Vb mm)	Grey Iron 2 (Vb mm)	CGI (Vb mm)	0	0.00	0.00	0.00	10	0.05	0.08	0.20	20	0.08	0.10	0.22	30	0.10	0.11	0.23	40	0.12	0.12	0.24	50	0.13	0.13	0.25	60	0.14	0.14	0.26	
Ts (min)	Grey Iron 1 (Vb mm)	Grey Iron 2 (Vb mm)	CGI (Vb mm)																														
0	0.00	0.00	0.00																														
10	0.05	0.08	0.20																														
20	0.08	0.10	0.22																														
30	0.10	0.11	0.23																														
40	0.12	0.12	0.24																														
50	0.13	0.13	0.25																														
60	0.14	0.14	0.26																														
<p>Знос бокових поверхонь був низьким для пластин CBN, порівняно з пластинами з твёрдосплавних матеріалів, при фрезеруванні сірих чавунів при швидкості 900 м/хв. При обробці матеріалу CGI навіть з меншою швидкістю (700 м/хв) пластини CBN зазнали сильного зносу, і випробування були зупинені через 8 хвилин через високий рівень дифузійного зносу</p>	<p>При обробці матеріалу CGI навіть з меншою швидкістю (700 м/хв), пластини CBN високий дифузійний знос призвів до утворення глибокого кратера, де показано вигляд пластин збоку</p>																																

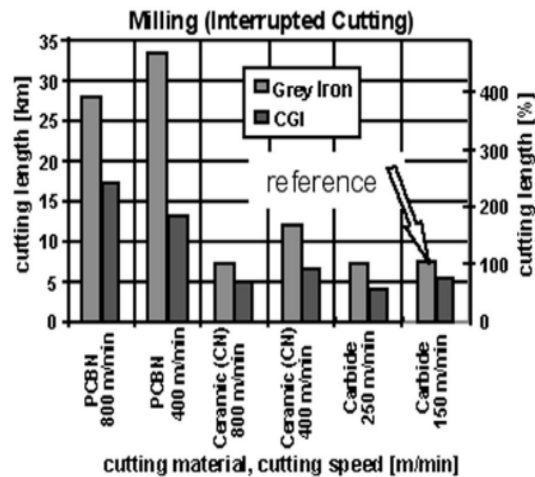


Рис. 4. Порівняльна стійкість інструменту з різних інструментальних матеріалів при переривчастому (фрезерування) різанні 70–80 % перлітного чавуну та сірого чавуну [1]

Висновок. Застосування інструментів з надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору та кераміки чудово справляються з обробкою сірих чавунів, форма графітових включень полегшує їх оброблюваність, при великих швидкостях різання. Аналіз характеру зношування при проведенні стійкісних досліджень у роботі [9] показав, що найбільш характерним видом зношування при обробці сірих чавунів є рівномірне зношування по задній поверхні з утворенням незначної за розмірами лунки на передній поверхні. Нетиповим видом зношування є утворення сколів з подальшим руйнуванням надтвердого матеріалу, що спостерігалось в умовах максимального навантаження інструменту. Однак головним режимом зношування в системі КНБ-ЧВГ (кубічний нітрид бору – чавун з вермикулярним графітом) при високих швидкостях різання є термохімічний (дифузія та окислення). Він виникає в результаті високих температур та нормальних і зсувних напружень, які мають місце в контактній зоні інструмента та стружки. При обробці твердосплавними інструментами поверхонь деталей з ЧВГ частіше зустрічаються такі види руйнування інструменту, як адгезійний знос, викришування, тріщини та відколи. В багатьох дослідженнях під час обробки різанням ЧВГ інструментами з металокераміки характер зношування подібний до характеру зношування при обробці в системі КНБ – ЧВГ (дифузія та окислення) [1]. В той час як стійкість інструментів з надтвердих матеріалів при обробці сірих чавунів збільшується до 6 разів і вище, при обробці чавунів з вермикулярним графітом вона збільшується всього в 2–3 рази. В такому випадку вартість інструментів, які у 6 і більше разів дорожчі по відношенню до твердосплавних інструментів, буде не співвимірною з їх стійкістю. Така обробка буде не економічною. Зарубіжні та вітчизняні науковці стрверджують, що вибір раціональних режимів та геометрії різання дозволяє позитивно впливати на процеси, які відбуваються в зоні різання [8–11]. Зокрема в роботі [8] автори повідомляють, що підвищити якість та ефективність обробки фрезерування поверхонь деталей з чавунів з вермикулярним графітом інструментами надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору можна при збільшенні швидкості різання до 800 м/хв [8]. Більшість авторів прийшли до висновків, що КНБ є найкращим інструментальним матеріалом для обробки ЧВГ, але вони не притримуються односпайної думки стосовно раціональних режимів різання, тому це питання потребує уточнення.

Аналітичний огляд підтвердив гіпотезу авторів, що найбільша ефективність обробки багатолезовими різальними інструментами поверхонь деталей з чавунів з вермикулярним графітом досягається при використанні інструментів з надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (швидкість різання при цьому 800 м/хв).

Список використаної літератури:

1. The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron / *S.Dawson, I.Hollinger and other.* – SinterCast, 2014 [Electronic resource]. – Access mode : <https://sintercast.com/media/1571/sintercast-the-effect-of-metallurgical-variables-on-the-machinability-of-compacted-graphite-iron-1.pdf>.
2. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron / *B.Tasdelen, M.Escursell, G.Grenmyr, L.Nyborg* // Swedish Production Symposium. – 2007.
3. Critical assessment of compacted graphite cast iron machinability in the milling process / *L.R.R. daSilva, F.C.R. Souza, W.L. Guesser and other* // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – August. – P. 63–74.
4. Araki T. Influence of Metallurgy on Machinability / *T.Araki, S.Yamamoto* // Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability, 1975. – Vol. 7. – P. 159–173.

5. Чавун з вермикулярним графітом : навчально-методичний комплекс для студентів денної і заочної форм навчання / В.М. Кропивний, О.В. Кузик, А.В. Кропивна, Г.М. Засінець ; заг. ред. В.М. Кропивного. – Кропивницький : Видавець В.Ф. Лисенко, 2019. – 222 с.
6. ISO 16112-2017 Compacted (vermicular) graphite cast irons Classification.
7. Кропивна А.В. Аналіз та гармонізація національних до міжнародних стандартів якісних показників чавунів з вермикулярним графітом / А.В. Кропивна, О.В. Кузик // Центральноукраїнський науковий вісник. Сер. : Технічні науки : зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2020. – Вип. 3 (34). – С. 88–95.
8. Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools / Jiahui Niu, Chuanzhen Huang, Rui Su and other.
9. 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.
10. Milling Forces of Compacted Graphite Iron (CGI) and Gray Iron (GI) / Y.Guo, C.Y. Wang, H.Yuan and other. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.800-801.32.
11. Радкевич С.І. Оброблюваність чавунів при фінішному торцевому фрезеруванні плоских поверхонь надтвердими матеріалами / С.І. Радкевич, Л.С. Глембоцька, П.П. Мельничук // Технічна інженерія. – 2021. – № 1 (87). – С. 38–48.

References:

1. Dawson, S., Hollinger, I. et al. (2014), *The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron*, SinterCast, [Online], available at: <https://sintercast.com/media/1571/sintercast-the-effect-of-metallurgical-variables-on-the-machinability-of-compacted-graphite-iron-1.pdf>
2. Tasdelen, B., Escursell, M., Grenmyr, G. and Nyborg, L. (2007), «Machining of gray cast irons and compacted graphite iron», *Swedish Production Symposium*.
3. L.R.R. da Silva, F.C.R. Souza, W.L. Guesser et al. (2020), «Critical assessment of compacted graphite cast iron machinability in the milling process», *Journal of Manufacturing Processes*, August, pp. 63–74.
4. Araki, T. and Yamamoto, S. (1975), «Influence of Metallurgy on Machinability», *Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability*, Vol. 7, pp. 159–173.
5. Kropivnyi, V.M., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V. and Zasinets, H.M. (2019), *Chavun z vermykuliarnym hrafitom, navchalno-metodychnyi kompleks dlia studentiv dennoi i zaochnoi form navchannia*, Kropivnuj, V.M. (ed.), Vydavets V.F. Lysenko, Kropyvnytskyi, 222 p.
6. ISO 16112-2017 Compacted (vermicular) graphite cast irons Classification.
7. Kropivna, A.V. and Kuzyk, O.V. (2020), «Analiz ta harmonizatsiia natsionalnykh do mizhnarodnykh standartiv yakisnykh pokaznykiv chavuniv z vermykuliarnym hrafitom», *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Ser. Tekhnichni nauky, zb. nauk. pr.*, TsNTU, Kropyvnytskyi, Issue 3 (34), pp. 88–95.
8. Jiahui Niu, Chuanzhen Huang, Rui Su et al. «Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools».
9. Vyhovskiy, H.M. and Bushlia, V.M. (2012), «Vyznachennia rezhymiv obrobky tortsevymy frezamy, osnashcheny nadtverdymy materialamy, pry chornovii obrobtsi siroho chavunu», *Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni*, Issue 13, pp. 28–38.
10. Guo, Y., Wang, C.Y., Yuan, H. et al. *Milling Forces of Compacted Graphite Iron (CGI) and Gray Iron (GI)*, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.800-801.32.
11. Radkevych, S.I., Hlembotska, L.Ie. and Melnychuk, P.P. (2021), «Obrobliuvanist chavuniv pry finishnomu tortsevomu frezeruvanni ploskykh poverkhon nadtverdymy materialamy», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (87), pp. 38–48.

Радкевич Світлана Іванівна – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проєктування матеріалів різанням.

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

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

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проєктування матеріалів різанням.

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

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

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проєктування матеріалів різанням.

Radkevych S.I., Hlembotska L.Ye., Melnychuk P.P.

Improving the processing efficiency of high-strength cast irons with vermicular graphite

The article, based on the analysis of literature sources, describes the existing ideas about the structural features of high-strength cast irons with vermicular graphite (CGI), when compared with gray cast irons (GCI) and high-strength cast irons with spheroidal graphite. The influence of chemical composition and structure on their machinability, as well as the operational properties and condition of the surface layer of the workpiece, and the possibilities of its improvement, are considered. It has been found that tools made of superhard materials based on cubic boron nitride (CBN) and cermets do not provide such high efficiency when machining cast irons with vermicular graphite as when machining gray cast irons. The best machinability in the CGI-CBN pair was achieved with intermittent milling at a speed of 800 m/min. The absence of MnS in the composition of the CBN and the vermicular shape of graphite inclusions are the main factors that complicate their processing. In addition, the vermicular morphology of cast irons contributes to the rapid diffusion wear of tools made of superhard materials. This paper presents the results of the durability of tools made of superhard and carbide materials when machining the surfaces of parts made of vermicular graphite cast iron (CGI) and gray cast iron (GC) with end mills. Also, the nature of wear, which is present in this case.

Keywords: cast iron with vermicular graphite; structure; chemical composition; machinability; resistance.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2023.