

К. В. Борак, к. т. н.

УПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ФОРМИ АБРАЗИВНИХ ЧАСТИНОК ҐРУНТУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

Абразивне зношування один з найпоширеніших видів зношування, на його долю припадає до 50% всіх відмов деталей машин. Дослідження закономірностей процесу абразивного зношування та пошук методів для запобігання його негативних наслідків є безумовно актуальною проблемою. В сільському господарстві найбільшому абразивному зношуванню піддаються робочі органи, які безпосередньо взаємодіють з середовищем ґрунту. Під час експлуатації робочих органів ґрунтообробних і посівних машин зношування поверхні відбувається в результаті взаємодії з мінералами, твердість яких вища за твердість металу. Великий вплив на механізм та інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних та посівних машин має форма абразивних частинок.

Метою цієї роботи є визначення коефіцієнта форми та зношувальної здатності абразивних частинок ґрунтів України, а також зміни коефіцієнта форми абразивних частинок у результаті взаємодії з робочими органами ґрунтообробних і посівних машин.

Дослідження форми абразивних частинок проводили на ґрунтах, які найбільш поширені на території України.

У результаті проведених досліджень встановлено, що коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України коливається в межах 78,9...487,65. Коефіцієнт форми абразивних частинок для крупних фракцій абразиву значно менший, ніж для дрібних фракцій. Значення коефіцієнта форми абразивних частинок в орному шарі менше на 11,43...47,71% порівняно з абразивними частинками в необроблювальному шарі. Спостерігається також закономірність значного зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок крупних фракцій порівняно з дрібним абразивом у результаті взаємодії з робочими органами ґрунтообробних і посівних машин. Зношувальна здатність абразивних частинок зростає із збільшенням коефіцієнта форми. Прямої залежності між зменшенням зношувальної здатності ґрунтів і зменшенням коефіцієнта форми абразивних частинок не спостерігаємо через складність будови й самоорганізації ґрунтового середовища.

Ключові слова: абразивна частинка, розмір, коефіцієнт форми, зношування, ґрунт, поверхня.

Вступ

У розвинутих країнах витрати, зумовлені тільки наслідками абразивного зношування, складають від 1 до 4% ВВП [1]. Дослідженню механізму абразивного зношування присвячена велика кількість робіт, що вивчали вплив багатьох чинників на механізм абразивного зношування, але багато явищ в цьому процесі залишається нез'ясованим. В агропромисловому комплексі найбільше абразивному зношуванню піддаються робочі органи ґрунтообробних і посівних машин, які взаємодіють з ґрунтом.

Ґрунтообробні та посівні машини займають одне з провідних місць у структурі машинно-тракторного парку сільськогосподарських підприємств. Утрата працездатного стану під час проведення польових робіт може істотно вплинути на врожайність сільськогосподарських культур. Відповідно пошук шляхів підвищення довговічності ґрунтообробних машин має велике значення для агропромислового комплексу розвинених країн.

Як відомо з багатьох робіт [2, 3, 4], підвищити довговічність і зносостійкість деталей та робочих органів машин можна завдяки використанню трьох груп методів: технологічних, конструктивних та експлуатаційних. Дослідження показують [5], що отримані за 50 років знання в галузі трибології реалізуються в промисловості в співвідношенні: 80% конструювання і 20% експлуатація. Автори посилаються на доповідь П. Джост на конференції у Лондоні у 2016 році, в якому під конструюванням розуміють використання Наукові праці ВНТУ, 2020, № 1

конструкційних і технологічних методів підвищення зносостійкості [5]. Щодо такого розподілу для робочих органів посівних і ґрунтообробних машин частка, що припадає на експлуатаційні методи, буде ще нижчою. Для впровадження експлуатаційних методів підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних і посівних машин необхідно досконало знати властивості й характеристики ґрунтового середовища.

Ґрунт як елемент трибосистеми досліджено не в повній мірі, тому важко вказати точний вплив усіх властивостей і характеристик цієї абразивної маси на інтенсивність зношування робочих органів. Найбільший внесок у вивчення ґрунтового середовища як елемента трибосистеми зробили: М. М. Северньов [6], В. М. Ткачов [2], Д. Б. Берштейн [7], М. М. Тененбаум [8, 9], Б. І. Костецький [4] та інші.

У процесі взаємодії робочих органів ґрунтообробних і посівних машин із ґрунтом зношування поверхні відбувається переважно в результаті взаємодії з мінералами, твердість яких вища за твердість металу (HV 7...11 ГПа, за даними В. М. Ткачова [2], HV 8...12, за даними Н. А. Качинського [10], дані інших авторів також відрізняється несуттєво).

Високу абразивну здатність ґрунтового середовища пояснюють наявністю в ній частинок (кварц, слюда тощо), у яких не тільки висока міцність, але й висока енергія руйнування. Так, енергія розриву для ковалентних зав'язків, властивих абразивним часткам кварцу й слюди, становить $E_{nom\ min}=9...7,5$ эВ, тоді як для металевих зав'язків цей показник становить $E_{nom\ min}=3...2$ эВ. Великий вплив на механізм та інтенсивність абразивного зношування здійснює форма абразивних частинок. Раніше було встановлено, що чим гостріші абразивні частинки в ґрунті, тим інтенсивніше абразивне зношування металу.

Аналіз попередніх досліджень

Для оцінки форми абразивних частинок приблизно однієї фракції М.М. Тененбаум запропонував критерій, названий коефіцієнтом форми абразивних частинок [8]:

$$K_{\phi} = \frac{M(n_i)M(D_i - d_i)}{M(R_i)}, \quad (1)$$

де $M(n_i)$, $M(R_i)$ и $M(D_i - d_i)$ – математичне очікування відповідно для числа вершин, їхніх радіусів і різниці діаметрів кіл, описаних навколо контуру й вписаних у контур зерна.

Дослідження коефіцієнта форми абразивних частинок різних матеріалів показало, що найпоширеніший у ґрунті абразив (кварц) має невисокий коефіцієнт форми: за розміру фракцій 0,2...0,315 мм – K_{ϕ} складає 14,4; за 0,315...0,4 мм – $K_{\phi} = 9,9$; за 0,4...0,63 мм – $K_{\phi} = 8,4$; за 0,63...0,8 мм – $K_{\phi} = 6,85$; за 1,0...2,0 мм – $K_{\phi} = 1,97$ (результати представлені для кварцового піску з Люберецького кар'єру). Дослідним шляхом встановлено [8], що за $K_{\phi} = 11,25$ пряме руйнування матеріалу не відбувається, незалежно від інших характеристик абразивної маси.

Д. Б. Берштейн [7] для ґрунту запропонував іншу формулу визначення коефіцієнта форми абразивних частинок:

$$K_{\phi} = \frac{M(N)}{M(r) \times M(B/L)}, \quad (2)$$

де N – кількість виступів; r – радіуси виступів; L – найбільше значення поздовжнього розміру; B – найбільше значення поперечного розміру [7].

Дослідження показали, що з ростом коефіцієнта форми абразивних частинок інтенсивність зношування (I_a) зростає (рис. 1).

Аналіз проведених раніше досліджень продемонстрував, що зі збільшенням коефіцієнта форми абразивних частинок зношувальна здатність ґрунту збільшується. До цього часу залишаються не визначеними:

– коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України;

- зміна коефіцієнта форми абразивних частинок за їхніми фракціями і за глибиною залягання в ґрунті;
- закономірність зміни коефіцієнта форми абразивних частинок у результаті їх взаємодії з металевою поверхнею робочих органів;
- зношувальна здатність абразивних частинок із різними коефіцієнтами форми для сталей, з яких виготовляють дискові робочі органи ґрунтообробних і посівних машин (сталь 65Г і 28MnB5).

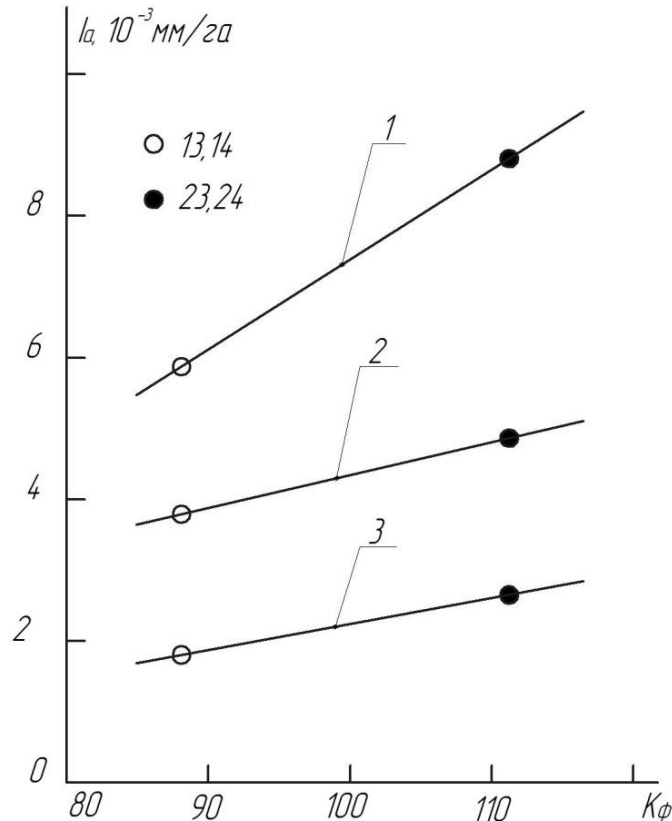


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування I_a лемішів плугів від коефіцієнта форми ґрунтових абразивних частинок K_ϕ . Матеріал леміша – сталь Л-53: 1 – твердість 35-40 HRC, 2 – 45-50 HRC, 3 – лезо леміша зміцнено твердим сплавом ПГ-УС 25

Мета роботи – визначити коефіцієнт форми та зношувальну здатність абразивних частинок ґрунтів України, а також зміну коефіцієнта форми абразивних частинок у результаті взаємодії з робочими органами ґрунтообробних і посівних машин.

Методи дослідження

Для визначення коефіцієнта форми абразивних частинок на різних типах ґрунтів проаналізовано карту ґрунтів України та встановлено райони для відбору зразків (відбирали проби з шести районів).

Проби ґрунту відбирали на кожній із ділянок у трьох точках по діагоналі. Для визначення коефіцієнта форми абразивних частинок і впливу на форму регулярної взаємодії з поверхнею робочих органів сільськогосподарських машин були взяті проби на таких глибинах: поверхня ґрунту, 200 мм, 400 мм, 600 мм і 800 мм.

Абразивні частинки були виділені з попередніх дослідних зразків за методикою [10]. Коефіцієнт форми абразивних частинок визначали за формулою, запропонованою Д. Б. Бернштейном (фор. 2.) [7]. Вимірювання геометричних параметрів проводили відповідно до схеми, представленої на рис. 2.

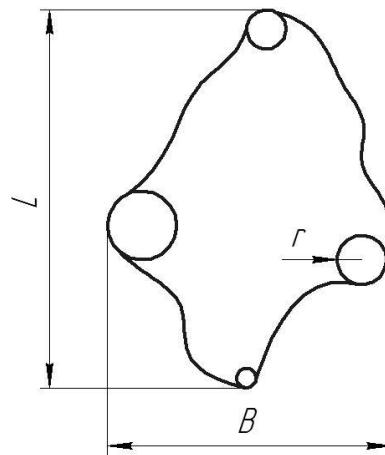


Рис. 2. Геометричні параметри абразивної частинки: L – найбільше значення поздовжнього розміру; B – найбільше значення поперечного розміру; r – радіуси виступів

Для отримання геометричних параметрів абразивної частинки її фотографували за допомогою мікроскопа SIGETA CAM-03 та визначали ці параметри за допомогою програми КОМПАС-3D V16.

Коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунту визначали для різних фракцій: фракція 1 – до 0,10 мм; фракція 2 – 0,10...0,25 мм; фракція 3 – 0,25...0,50 мм; фракція 4 – 0,50...0,75 мм; фракція 5 – 0,75...1,00 мм. Для кожного зразка визначали коефіцієнт форми по 20 абразивним частинкам кожної фракції.

Для дослідження зміни коефіцієнта форми в результаті взаємодії абразивних частинок зі сталеву поверхнею були проведені лабораторні дослідження. Під час проведення такого експерименту необхідно, щоб механізм взаємодії абразивної частинки з поверхнею сталеву зразка був таким же, як і під час взаємодії абразивів ґрунту з робочими органами ґрунтообробних машин. Для цієї мети пропонуємо вдосконалити метод крильчатки рис. 3.

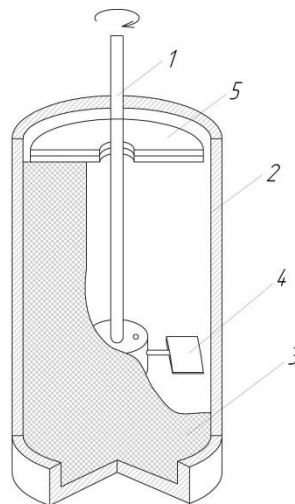


Рис. 3. Схема випробування за вдосконалим способом крильчатки: 1 – вал-тримач зразків, 2 – циліндр, 3 – абразивна маса, 4 – зразки, 5 – багатосекційний диск, який створює необхідну щільність абразивної маси

У традиційному способі зразки обертаються у вільно насипаній у циліндричний стакан абразивній масі за постійної швидкості. Під час роботи абразивна маса розпушується, і відповідно, змінюється її щільність, що тягне за собою зміну механізму й характеру абразивного зношування, тому пропонуємо встановити багатосекційний диск над

абразивним матеріалом, який буде створювати необхідну щільність абразивної маси й питомий тиск на зразок за допомогою зміни його ваги.

Нахил зразків у площині обертання становив 17° , що інтенсифікує процес зношування і сприяє перемішуванню абразивного середовища.

Привід вала-тримача (рис. 4, а) здійснювали від шпинделя вертикально-розточного верстату 2Е78П (рис. 4, б), що дозволяє змінювати швидкість руху зразка від 15,5 до 715,9 м/хв (від 0,26 до 11,94 м/с).



а)



б)

Рис. 4. Установка для дослідження зносостійкості зразків за абразивного зношування за вдосконаленим способом крильчатки

У якості абразивної маси використовували кварцовий пісок, оскільки він є основним абразивом, який зношує поверхню робочих органів ґрунтообробних машин.

Обговорення результатів

Фотографія абразивних частинок, зроблена за допомогою мікроскопа SIGETA CAM-03, представлена на рис. 5.

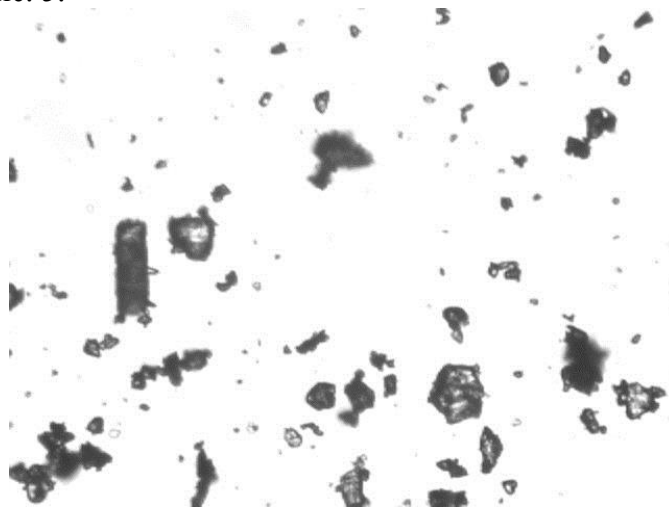


Рис. 5. Абразивні частинки ґрунту (дерново-підзолисті ґрунти, глибина забору проби 200 мм)

Результати визначення коефіцієнта форми абразивних частинок для ґрунтів України представлені в табл. 1.

Таблиця 1

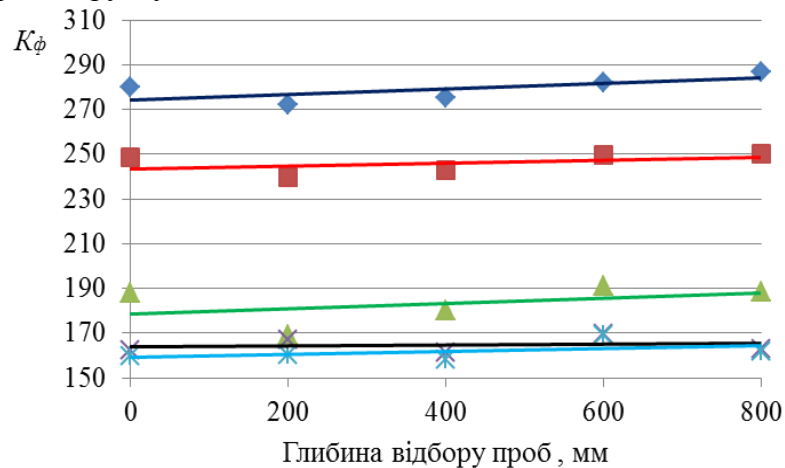
Результати досліджень коефіцієнта форми K_f абразивних частинок

Ґрунти	Фракція абразивних частинок	Поверхня ґрунту	Глибина 200 мм	Глибина 400 мм	Глибина 600 мм	Глибина 800 мм
1. Лугові ґрунти, середньосуглинковий	до 0,10 мм;	436,32	427,74	487,43	488,35	487,65
	0,10...0,25 мм;	328,75	336,97	381,43	379,17	386,24
	0,25...0,50 мм;	115,76	119,76	189,70	181,48	184,56
	0,50...0,75 мм;	105,72	109,50	227,46	216,79	218,72
	0,75...1,00 мм;	78,90	77,61	210,58	214,56	214,31
2. Дерново-підзолисті ґрунти, легкосуглинковий	до 0,10 мм;	239,68	227,89	269,76	271,62	271,73
	0,10...0,25 мм;	194,32	201,34	237,65	238,23	235,48
	0,25...0,50 мм;	112,69	109,86	175,47	181,53	174,97
	0,50...0,75 мм;	92,47	91,53	159,87	160,57	156,37
	0,75...1,00 мм;	81,83	83,29	144,83	143,75	146,79
3. Чорноземи неглибокі лісостепові, глина легка	до 0,10 мм;	294,38	289,56	346,67	351,92	338,16
	0,10...0,25 мм;	276,16	281,24	330,41	326,18	339,71
	0,25...0,50 мм;	128,94	122,63	179,01	180,69	175,61
	0,50...0,75 мм;	118,93	123,89	164,92	170,34	167,90
	0,75...1,00 мм;	89,79	94,31	153,79	160,31	154,39
4. Опідзолені ґрунти, середньосуглинковий	до 0,10 мм;	346,79	336,82	418,23	429,47	428,81
	0,10...0,25 мм;	287,38	291,03	358,94	361,09	369,24
	0,25...0,50 мм;	165,34	158,45	201,76	193,21	196,34
	0,50...0,75 мм;	110,28	113,89	170,26	176,34	169,23
	0,75...1,00 мм;	100,29	96,49	156,29	164,42	158,37
5. Чорноземи звичайні на лісових породах, глина легка	до 0,10 мм;	274,56	269,23	299,57	292,31	295,34
	0,10...0,25 мм;	183,27	186,98	243,18	237,79	247,51
	0,25...0,50 мм;	164,29	160,37	220,34	218,51	222,57
	0,50...0,75 мм;	129,17	136,23	218,93	215,34	210,43
	0,75...1,00 мм;	98,18	96,59	182,54	176,21	189,35
6. Каштанові ґрунти, важкосуглинковий	до 0,10 мм;	369,56	367,89	406,57	409,87	400,29
	0,10...0,25 мм;	245,69	249,65	298,67	301,45	295,81
	0,25...0,50 мм;	145,87	142,87	201,31	210,19	205,79
	0,50...0,75 мм;	109,84	109,01	192,34	190,23	187,16
	0,75...1,00 мм;	91,75	94,51	176,79	180,45	177,10
7. Зразки взяті з лісового масиву, дерново-підзолисті ґрунти, легкосуглинковий	до 0,10 мм;	279,89	271,93	275,49	281,87	286,79
	0,10...0,25 мм;	248,63	239,58	242,65	249,67	249,95
	0,25...0,50 мм;	187,79	169,36	179,93	191,28	188,63
	0,50...0,75 мм;	162,46	166,91	161,47	169,47	162,74
	0,75...1,00 мм;	159,48	160,34	157,98	168,91	161,62

Можна стверджувати, що на глибині орного шару (проба з поверхні ґрунту і проба на глибині 200 мм) коефіцієнт форми абразивних частинок для визначених фракцій однаковий. Оскільки їхні значення відрізняються для ґрунту №1 на 1,63...3,34%, для ґрунту №2 – на 1,01...4,91%, для ґрунту №3 – на 1,64...4,89%, для ґрунту №4 – на 1,25...4,16%, для ґрунту №5 – на 1,62...5,18%, для ґрунту №6 – на 0,45...2,92%. Про це також свідчить відсутність прямої залежності величини коефіцієнта форми абразивних частинок від глибини орного шару.

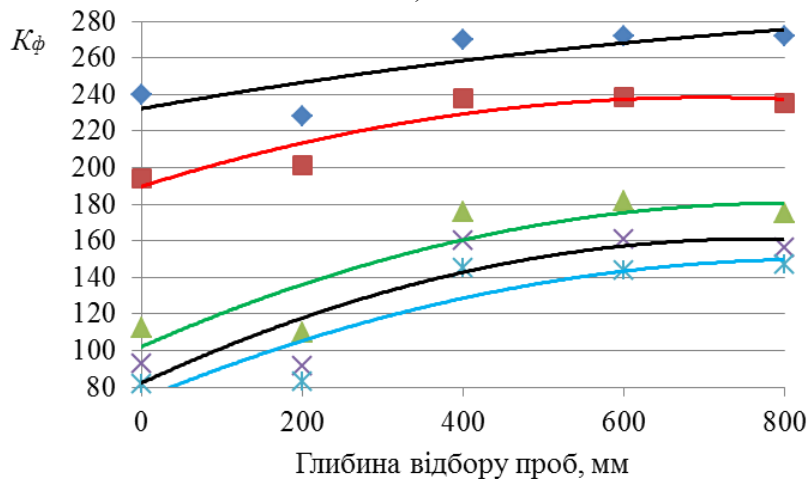
Очевидним є зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок у результаті регулярної взаємодії з робочими органами посівних і ґрунтообробних машин (табл. 2). Руйнування гострих виступів і округлення абразивних частинок відбувається не тільки за рахунок взаємодії з поверхнею робочих органів, а й в результаті взаємодії між абразивними частинками за умови зміни агрегатного стану в процесі обробітку ґрунту.

Підтвердженням зниження коефіцієнта форми абразивних частинок у результаті багаторазової взаємодії з робочими поверхнями сільськогосподарських машин є відсутність такої залежності (рис. 6) для абразивних частинок, що містяться в ґрунті з лісового масиву (зразок ґрунту №7). Зразок ґрунту №7 відбирали на відстані 500 м від дослідного поля, з якого відбирали зразки ґрунту №2.



◆ до 0,10 мм; ■ 0,10...0,25 мм; ▲ 0,25...0,50 мм;
 × 0,50...0,75 мм; ✖ 0,75...1,00 мм;

а)



◆ до 0,10 мм; ■ 0,10...0,25 мм; ▲ 0,25...0,50 мм;
 × 0,50...0,75 мм; ✖ 0,75...1,00 мм;

б)

Рис. 6. Зміна коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту (K_{ϕ}) залежно від глибини відбору проб: а – зразок ґрунту №7; б – зразок ґрунту №2

Необхідно зазначити, що для абразивних частинок крупної фракції коефіцієнт форми зменшується істотніше, ніж для абразивних частинок дрібної фракції для всіх типів ґрунтів (рис. 7). Закономірність, представлена на рис. 6, можна пояснити тим, що абразивні частинки меншого розміру не піддаються інтенсивному руйнуванню в результаті взаємодії з робочими органами сільськогосподарських машин, оскільки:

- мають більшу міцність;
- відсутні внутрішні дефекти в будові кристалів;
- мають меншу масу;
- через невеликі розміри не працюють на поверхні робочого органу, як закріплений абразив.

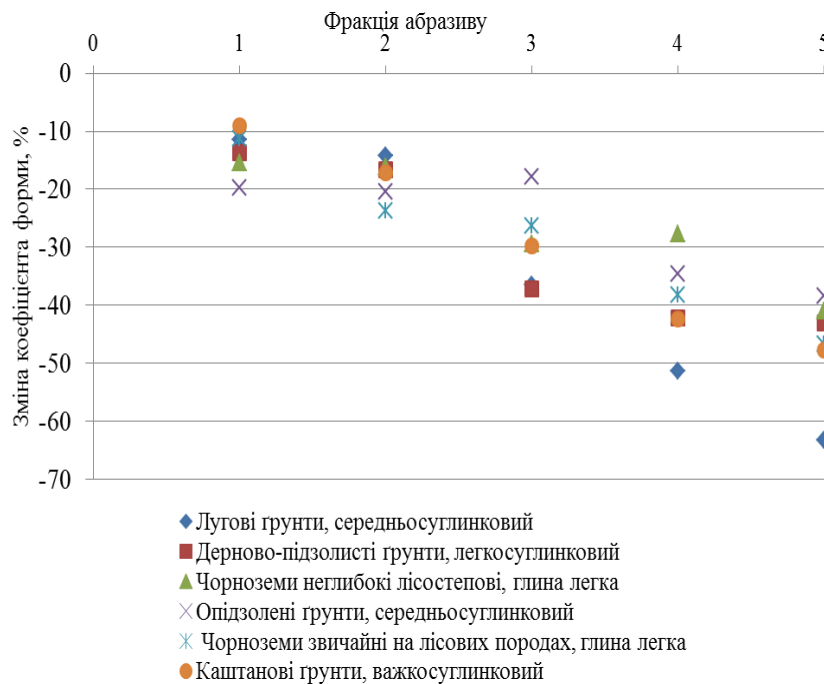


Рис. 7. Зміна коефіцієнта форми абразивних частинок (K_f) унаслідок взаємодії з робочими органами залежно від розмірів абразивних частинок: 1 – до 0,10 мм; 2 – 0,10...0,25 мм; 3 – 0,25...0,50 мм; 4 – 0,50...0,75 мм; 5 – 0,75...1,00 мм

Для визначення впливу коефіцієнта форми абразивних частинок на інтенсивність зношування поверхонь робочих органів проведено лабораторні дослідження на сталях 65Г, 45 і 28МпВ5 (рис. 8). Як абразив використовували кварцовий пісок із трьох родовищ (Тарасівського, Ігнатпільського, Іршанського), звідки були відібрані частинки фракції 0,50...1,00 мм. Коефіцієнт форми абразивних частинок становив відповідно для Іршанського родовища – 98,71, для Тарасівського – 114,18, для Ігнатпільського – 163,72.

Як видно з графіка (рис. 8.), у результаті збільшення коефіцієнта форми абразивних частинок зростає й інтенсивність зношування сталей. При чому для менш якісних сталей (сталь 45) швидкість росту інтенсивності зношування на порядок вища, ніж у сталей, які використовують для виготовлення дискових робочих органів ґрунтообробних і посівних машин. Цю залежність можна пояснити зміною механізму зношування поверхні, оскільки на поверхні сталі 45 зі збільшенням коефіцієнта форми абразивних частинок збільшується площа, на якій є ознаки процесу мікрорізання.

У результаті досліджень було встановлено зміну коефіцієнта форми абразивних частинок для кварцового піску, який використовували в якості абразивного середовища. Коефіцієнт форми абразивних частинок зменшився для всіх зразків кварцового піску: для

Іршанського родовища він склав 79,14 (-19,82%), для Тарасівського – 89,79 (-21,36%), для Ігнатпільського родовища – 113,72 (-30,54) р.

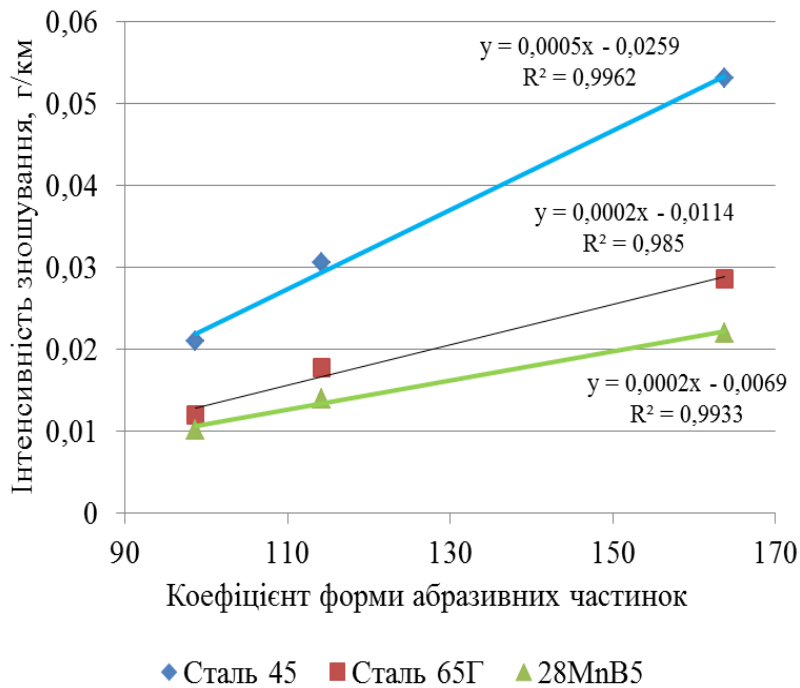


Рис. 8. Уплив коефіцієнта форми абразивних частинок на інтенсивність зношування (зразки зі сталі 45 та 65Г піддавалися об'ємному загартуванню за температури 810...830 °С і середнім відпуском із дуже точною витримкою, за температури 460...480 °С, зразки зі сталі 28MnB5 виготовляли із заготовок для дискових робочих органів, які підлягають складній термо- та дробоструминній обробці)

Як бачимо, спостерігаємо залежність істотнішого зменшення коефіцієнта форми в результаті взаємодії з робочою поверхнею й взаємодією між абразивними частинками для абразивних частинок із великим коефіцієнтом форми (рис. 9). Цей процес можна пояснити інтенсивнішою взаємодією з поверхнею дослідного зразка й виникненням граничних напружень через малу площу гострих граней абразивних частинок.

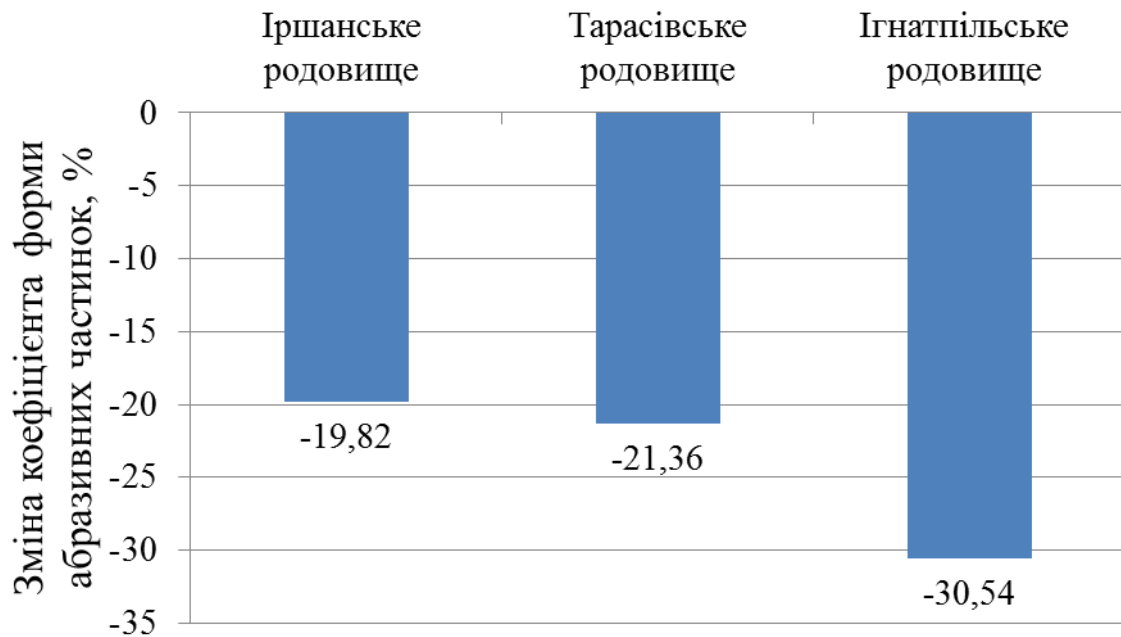


Рис. 9. Зміна коефіцієнта форми абразивних частинок за результатами лабораторних досліджень інтенсивності зношування сталей

Зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок в орному шарі в результаті тривалого використання земельних ресурсів має призводити до зменшення абразивної здатності, але абразивні частки більш округлої форми не здатні утримувати вологу в ґрунті, що призводить до швидкого випаровування води, а це, у свою чергу, призводить до збільшення твердості ґрунту, ступеня закріплення абразивних частинок і підвищення інтенсивності зношування, тому проблема вибору оптимальних агротехнічних термінів обробки ґрунту для зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних і посівних машин із кожним десятиліттям ускладнюватиметься.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України коливається в межах 78,9...487,65. Коефіцієнт форми абразивних частинок для крупних фракцій абразиву значно менший, ніж для дрібних фракцій. Значення коефіцієнта форми абразивних частинок в орному шарі менше на 11,43...47,71% порівняно з абразивними частинками в неорному шарі. Спостерігаємо також закономірність більш значного зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок крупних фракцій порівняно з дрібним абразивом у результаті взаємодії з робочими органами ґрунтообробних і посівних машин. Зношувальна здатність абразивних частинок зростає зі збільшенням коефіцієнта форми. Прямої залежності між зменшенням зношувальної здатності ґрунтів і зменшенням коефіцієнта форми абразивних частинок не спостерігаємо через складність будови й самоорганізації ґрунтового середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tylczak J. H. Abrasive wear // ASM Handbook. / J. H. Tylczak // Materials Park, OH, ASM International. – 1992. – № 18. – Р. 184 – 190.
 2. Ткачев В. Н. Работоспособность деталей в условиях абразивного изнашивания / В. Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1995. – 336 с.
 3. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1971. – 272.
 4. Костецкий Б. И. Сопrotивление изнашиванию деталей машин / Б. И. Костецкий. – М.-К.: МАШГИЗ, 1959.
- Наукові праці ВНТУ, 2020, № 1

– 478 с.

5. Мышкин Н. К. Трибология: тенденции полувекowego развития / Н. К. Мышкин, И. Г. Горячева // Трение и износ. – 2016. – Том 37, № 6. – С. 665 – 669.

6. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / [М. М. Севернев, Н. Н. Подлекарёв, В. Ш. Сохадзе, В. О. Китиков; под ред. М. М. Севернева]. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 333 с.

7. Макрогеометрия и изнашивающая способность почвенных абразивных частиц / Д. Б. Бернштейн, Н. И. Кисетова, Е. М. Соркина [та ін.] // Трение и износ. – 1992. – Том 13, № 2. – С.333 – 339.

8. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

9. Тененбаум М. М. Износостойкость и долговечность сельскохозяйственных машин / М. М. Тененбаум, С. Н. Шамшетов. – Нукус: Каракалпакстан, 1986. – 150 с.

10. Качинский Н. А. Физика почвы / Н. А. Качинский. – М.: Высшая школа, 1965. – 324 с.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 28.03.2020 р.

Борак Костянтин Вікторович – к. т. н., заступник директора Житомирського агротехнічного коледжу з навчальної роботи.

Житомирський агротехнічний коледж.