

УДК 621.791: 620.178

О. А. ДЕМИДЕНКО, А. М. СТЕПАНЧУК

Національний технічний університет України, «КПІ ім. І. Сікорського»

## СТІЙКІСТЬ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙ ЗАЛІЗО – САМОФЛЮСІВНИЙ СПЛАВ ПРИ ГАЗОАБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ

*Досліджена зносостійкість при газоабразивному зношуванні композиційних матеріалів за участю заліза та самофлюсівних сплавів. Вивчено вплив на стійкість складу композицій та умов зношування. Показано, що зношування композицій при кутах дії газоабразивного струменя на матеріал менших за 45-60° в основному відбувається за рахунок різальної дії абразивних частинок. При кутах більших за 60° зношування матеріалу відбувається за рахунок втомного та крихкого руйнування. Найбільшу стійкість мають композиції з вмістом самофлюсівного сплаву більше ніж 30 %.*

**Ключові слова:** композиція, залізо, самофлюсівний сплав, газоабразивне зношування, різання, руйнування

**Актуальність досліджень.** Тепер досить широке розповсюдження знаходять порошкові матеріали конструкційного та триботехнічного призначення [1–2], які мають ряд суттєвих переваг перед традиційними. Одним з їх різновидів можуть бути порошкові матеріали на основі заліза. Однак такі матеріали мають відносно малу зносостійкість при роботі в умовах дії абразивів, як закріплених так і вільних. Одним із шляхів підвищення довговічності деталей з таких матеріалів, що працюють в умовах абразивного або газоабразивного зносу, є створення їх з неоднорідною структурою [3–5]. Висока зносостійкість таких композиційних матеріалів визначається наявністю в їх структурі твердих фазових складових поряд з відносно пластичною матрицею.

Як показано в роботах [6, 7], до таких матеріалів можуть бути віднесені композиційні порошкові матеріали на основі заліза легованого самофлюсівними сплавами (СФЗ) [8, 9], які грають роль твердої складової. При цьому перевагами таких матеріалів також є те, що використання СФЗ мають відносно малу температуру плавлення і при отриманні виробів при їх спіканні утворюють рідку фазу. Останнє сприяє досягненню їх стовідсоткової щільності, що підвищує механічні властивості виробів і покращує триботехнічні властивості та стійкість при зношуванні при дії абразивів. Враховуючи викладене, дослідження умов отримання таких матеріалів та вивчення їх стійкості при дії абразивів є досить актуальним питанням.

**Задачі досліджень.** У зв'язку з викладеним вище, метою роботи було дослідження впливу складу композиційних матеріалів на основі заліза легованого самофлюсівним сплавом на їх стійкість за різних умов газоабразивного зношування.

**Результати експерименту та їх обговорення.** Дослідження зносостійкості матеріалів при газоабразивному зношуванні проводили з використанням установки, схема якої показана на рис. 1.

Принцип її дії наступний. Зразок з плоскою поверхнею закріплюється в спеціальному тримачі (2) і розміщується в камері випробування (4) на підставці. Потім на зразок (13) за допомогою пістолету (5), який працює за інжекційним принципом, спрямовується газоабразивний струмінь. Струмінь створюється під-

веденням до пістолету повітря тиском 0,6 МПа, який створюється за допомогою компресора (14) та ресивера (12). З бункера (8) до пістолету також підводиться кварцовий пісок з середнім розміром частинок біля 400 мкм. Конструкцією передбачується за допомогою пристрою (3) зміна напрямку струменя відносно поверхні зразка у межах від 0 до 90°.

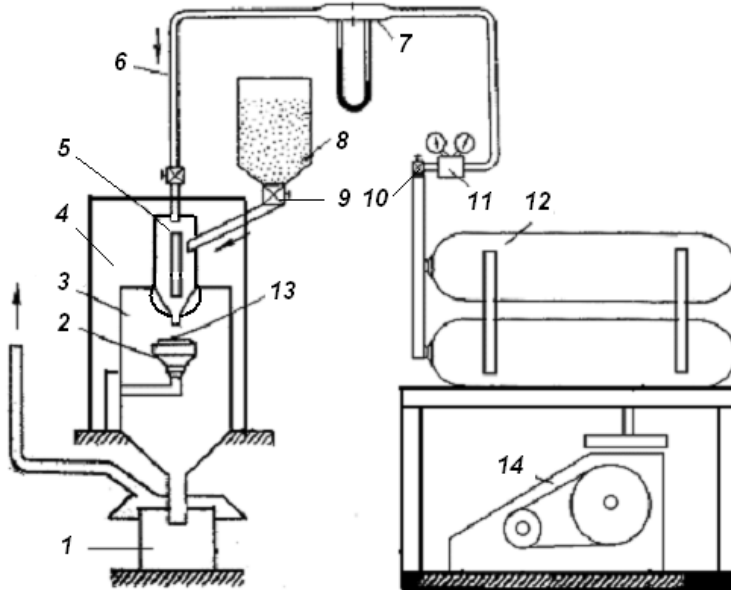


Рис. 1. Схема установки для випробування матеріалів на газоабразивне зношування: 1 – уловлювач піску; 2 – тримач зразка; 3 – регулювальний пристрій; 4 – камера; 5 – пістолет; 6 – трубопровід; 7 – реле тиску; 8 – бункер з піском; 9 – вентиль подачі піску; 10 – вентиль подачі повітря; 11 – манометр; 12 – ресивер; 13 – зразок; 14 – компресор

Для дослідження зносостійкості при газоабразивному зношуванні використовували зразки циліндричної форми з двома плоскими поверхнями. Площа зношування 2,1 см<sup>2</sup>. При інших рівних умовах зносостійкість визначали за втраченою масою зразка в г/хв.

Як абразив використовували кварцевий пісок фракції –600 +300 (середній розмір 450 мкм). Тиск газу складав 0,6 МПа. Витрати піску склали 5 кг/хв. Запиленість газового струменя складала 10%.

В роботі досліджувався вплив часу (1, 2, 3 хв.) та кута атаки газу – порошкового струменя відносно поверхні зношування (15, 45, 90 град.) на зношування композиційних матеріалів на основі заліза з різним вмістом самофлюсивного сплаву на основі заліза (0, 15, 30 та 50%). Зразки мали щільність 98,5–99,0% та гетерогенну структуру, яка складалась з двох фаз – заліза і СФЗ. При вмісті СФЗ 15% він знаходиться у вигляді дискретних включень на межі зерен заліза. При вмісті СФЗ 20% і більше його фаза утворює мереживо, яке відокремлює зерна заліза одне від одного суцільним прошарком товщина якого збільшується зі збільшенням вмісту СФЗ (рис. 2).

Результати вивчення зносостійкості сплавів наведені на рисунках 3-5. Аналіз отриманих результатів показує, що наявність в сплавах на основі заліза СФЗ збільшує їх стійкість при газоабразивному зношуванні у 6-8 разів (рис. 3). При цьому зі збільшенням вмісту в сплавах СФЗ їх стійкість змінюється неоднозначно залежно від кута дії газопорошкового струменя на поверхню зразка.

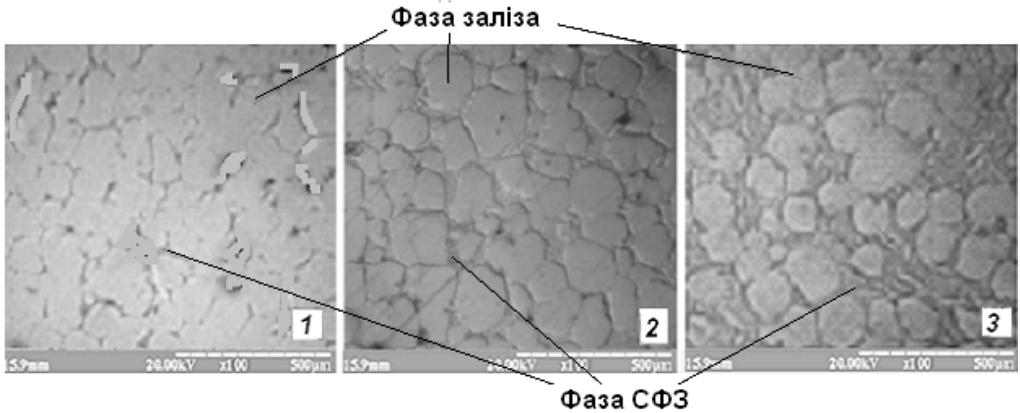


Рис. 2. Структура сплавів на основі заліза з різним вмістом СФ3 (%):  
1 – 15; 2 – 30; 3 – 50

Так, для кута  $15^\circ$  для всіх сплавів зносостійкість найвища і має екстремальну залежність від вмісту СФ3 в сплаві (рис. 2, 1). Найбільш низькі значення зносостійкості спостерігаються для сплаву з вмістом СФ3 30%. При збільшенні кута атаки до  $45^\circ$  зносостійкість всіх досліджених сплавів зменшується. Але, при інших рівних умовах, суттєво покращується зі збільшенням в сплавах СФ3 (рис. 2, 2). При куті атаки  $90^\circ$  для сплаву з 15% СФ3 зносостійкість вища ніж при куті атаки  $45^\circ$ , а для сплавів з вмістом СФ3 більшим ніж 25% вона менша.

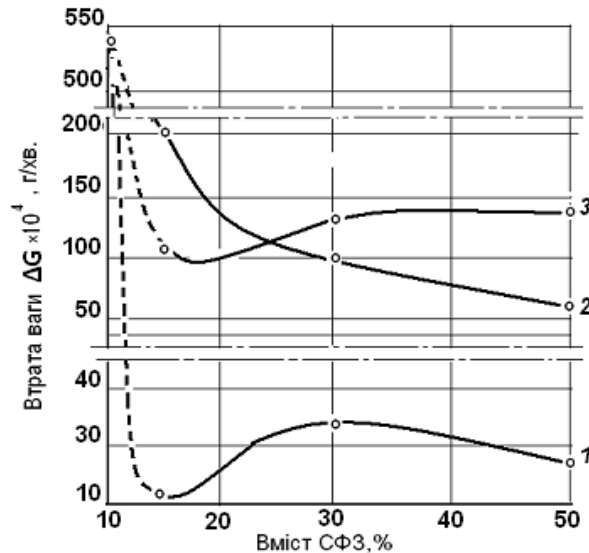


Рис. 3. Залежність втрати ваги композицій на основі заліза від місту в них СФ3 і кута атаки при газообразивному зношуванні:  
1 –  $15^\circ$ ; 2 –  $45^\circ$ ; 3 –  $90^\circ$

Дослідження структур поверхні зношування показало, що складові композиційного матеріалу зношуються по різному. При кутах атаки  $30^\circ$  та  $45^\circ$  більше зношується структурна складова матеріалів – залізо, яке має значно меншу твердість ніж СФ3. Як видно з мікроструктури поверхонь зношування на його місці утворюються лунки зношування (рис. 4, а, б, в). При цьому утворюється рельєфна поверхня на якій виступає фазова складова СФ3, що зношується у меншій

ступені за рахунок більш високої твердості. Останнє узгоджується з даними робіт [10–12]. Слід відмітити, що на поверхні не утворюється різкої межі зношування, що може бути зумовлено поступовою зміною мікротвердості на межі поділу фаз за рахунок взаємного розчинення заліза і СФЗ при отриманні композитів з них спіканням у присутності рідкої фази [6].

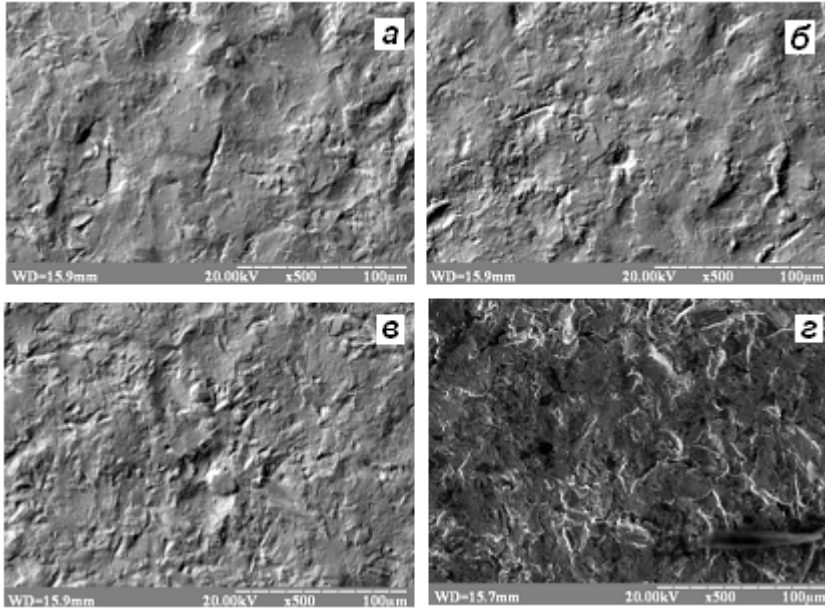


Рис. 4. Структура поверхні зносу зразків з вмістом 15 % СФЗ (а), 30 % СФЗ (б), 50 % СФЗ (в) при куті атаки  $45^\circ$  та з вмістом 30 % СФЗ за кута атаки  $90^\circ$  (г)

Отримані в роботі результати можна пояснити наступним. Як відомо [10–14], абразивне руйнування поверхні твердого тіла залежить від характеру впливу абразивних зерен на цю поверхню. У залежності від напрямку дії абразивного струменя на поверхню розрізняють наступні схеми його впливу: руйнування ударним струменем, коли кут атаки  $\alpha = 90^\circ$ ; руйнування ковзаючим струменем,  $\alpha = 0^\circ$ ; руйнування косим струменем,  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  [13]. Сила удару абразивних частинок значно залежить від кута нахилу струменя. Якщо на плоску поверхню матеріалу діє струмінь твердих абразивних частинок, що летять з певною швидкістю під кутом до поверхні, то кожна частинка, вдаряючись з певною силою, пружно деформує поверхню і ковзає по ній з тертям [14]. Прийнято, що нормальна компонента сили викликає тільки пружне деформування матеріалу, а дотична, вступаючи в фрикційний контакт з поверхнею, частково або повністю гаситься і витрачається на роботу різання. З наведеного випливає, що найбільший знос теоретично можна очікувати при куті атаки  $\alpha = 45^\circ$ , що підтверджується багатьма авторами [11; 14].

Початковий період руйнування металу характеризується впровадженням абразивних частинок в поверхневий шар на деяку глибину, другий безвідривним переміщенням частинок матеріалу вздовж поверхневого шару, при якому відбуваються зсув мікрооб'ємів металу в шарі в напрямку впровадження частинки і відрив їх від масиву [15]. При впровадженні абразивної частки в поверхневий шар металу в умовах вільного удару відбувається деформування приконтатної зони, внаслідок чого в цьому шарі виникає складне неоднорідне напружено-

деформоване поле зі змінною границею. Напруження і деформації в шарі металу, що руйнується і характер їх розподілу залежать від кута атаки при вільному ударі. Напруження і деформації, що виникають при впровадженні абразивної частинки в метал, залежать від комплексу факторів, що характеризують параметри потоку частинок і опір металу пружно-пластичній деформації. У зоні контакту будуть розвиватися пружні і пластичні деформації, що сприяють зминанню металу під частинкою в радіальному напрямку і подальшому тангенціальному зсуву в напрямку руху цієї частинки відносно поверхні. Глибина впровадження частинки і її тангенціальне зміщення при впровадженні пов'язані з механічними властивостями абразиву і матеріалу поверхні зношування, розмірами частинок, деформацією металу. При малих кутах атаки, внаслідок переважання тангенціальної компоненти швидкості удару, основним процесом руйнування поверхневого шару є тангенціальний зсув мікрооб'ємів металу в напрямку впровадження, тобто мікрорізання. При кутах атаки, близьких до  $90^\circ$ , внаслідок переважання нормальної компоненти швидкості механізм руйнування поверхневого шару металу в потоці абразивних частинок набуває полідеформаційний ударний характер. Абразивний знос відбувається при ковзанні в зоні тертя твердих абразивних частинок, які, проникаючи, руйнують поверхню тертя шляхом мікроцарапання, мікрорізання, викришування, вибивання частинок і багаторазовим місцевим пластичним деформуванням.

Враховуючи викладені уявлення про процеси газоабразивного зношування матеріалів, високі значення зносостійкості сплавів залізо – СФЗ при малих кутах атаки можуть бути зумовлені тим, що у цьому випадку на матеріал в основному діють дотичні зусилля, які не сприяють мікрорізанню чи шаржуванню поверхні матеріалу. Це також може бути зумовлено малим коефіцієнтом тертя у парі залізо-абразив і, особливо у парі СФЗ – абразив у наслідок їх високої твердості. Зменшення стійкості проти зношування матеріалів при збільшенні в них вмісту твердого, але відносно крихкого, СФЗ до 30% може бути зумовлено вибиванням (руйнуванням) прошарків СФЗ у вигляді гребенів, які виникають за рахунок утворення лунок зношування при першочерговому зношуванні більш м'якої фази заліза (рис. 4). Збільшення зносостійкості матеріалу при збільшенні вмісту в ньому СФЗ понад 30% може бути зумовлене збільшенням товщини прошарків фазової складової СФЗ (рис. 3, 2, 3) і, як наслідок, збільшенням їх міцності у напрямі тангенціально направлених діючих сил частинок абразиву.

Зменшення зносостійкості матеріалів зі збільшенням кута дії газоабразивного струменя може бути пов'язане зі збільшенням нормальної складової діючих сил при збереженні дотичних (тангенціальних) сил. Такий характер дії абразивних частинок може сприяти різанню відносно пластичної фазової складової – заліза або втомного його руйнування а також крихкому руйнуванню твердої але відносно крихкої фазової складової – СФЗ. Останнє підтверджується результатами металографічного аналізу поверхні зношування (рис. 3), на якій відсутні сліди різання та присутні характерні ознаки крихкого руйнування (рис. 4, з). Останнє також узгоджується з результатами дослідження зносостійкості матеріалів залежно від їх складу при куті атаки  $90^\circ$ . На поверхні зношування присутні явні ознаки крихкого та втомного руйнування матеріалу.

Вивчення залежності зносу від часу випробувань показує, що спочатку інтенсивність зносу зростає, а потім зменшується (рис. 5). Такий характер зносу пояснюється інтенсивним зносом пластичної фази заліза з утворенням виступів фази СФЗ. Надалі ці виступи зерен СФЗ екранують поверхню фазової складової заліза і, тим

самим, зменшується знос композиції у цілому. Найкращу зносостійкість за інших рівних умов показують композити з вмістом СФЗ 50%, що може бути пояснено механізмами зношування досліджуваних матеріалів викладеними вище.

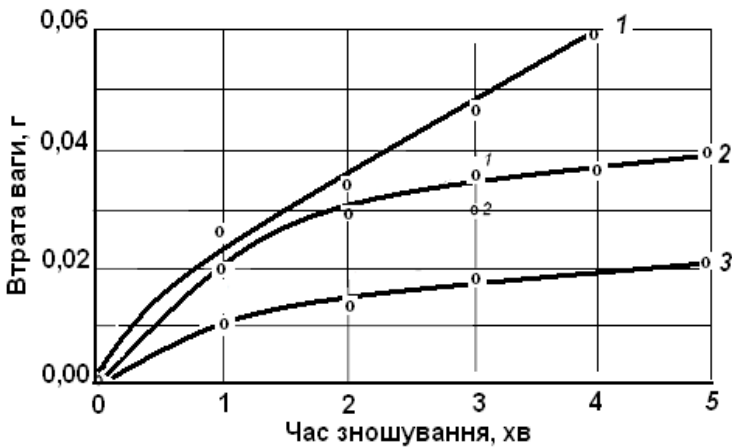


Рис. 5. Залежність зношування матеріалу з композиції Fe–СФЗ від часу та вмісту СФЗ (%) при куті атаки 45°: 1 – 15; 2 – 30; 3 – 50

**Висновок.** Проведення досліджень дозволило встановити, що стійкість досліджених матеріалів при газообразному зношуванні, при інших рівних умовах, залежить від їх складу та властивостей складових. Стійкість проти зношування збільшується зі збільшенням вмісту в композиції самофлюсивного сплаву більше 30% при кутах атаки менших за 60–90°.

Запропоновано механізми зношування, згідно якому при кутах атаки менших за 45–60° переважає зношування за рахунок різання матеріалу частинками абразиву. При більших кутах переважає зношування за рахунок крихкого руйнування.

Отримані результати дають можливість створювати матеріали з наперед заданим складом та структурою залежно від умов експлуатації виробів з них.

#### Список літератури

1. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: (Справ.) / Под ред. И. М. Федорченко, И. Н. Францевича, И. Д. Радомысльского. – К., 1985. – 624 с.
2. Степанчук А.М. Технология порошковой металлургии. /А.Н. Степанчук И.И. Билык, П.А. Бойко. – К.: Высшая школа, 1989. – 310 с.
3. Добровольский А.Г. Абразивная износостойкость материалов: Справочное пособие /А.Г. Добровольский, П.И. Кошеленко. – К.: Техника, 1989. – 128 с.
4. Aiguo L. Microstructures and wear resistance of large WC particles reinforced surface metal matrix composites produced by plasma melt injection / L. Aiguo, G. Mianhuan, Z. Minhai, W. Changbai //Surface & Coatings Technology. – 2007. – 201. – P. 7978–7982.
5. Hans B. Comparison of wear resistant MMC and white cast iron /B.Hans // Wear. – 2003. – 254 – P. 47–54.
6. Степанчук А.Н. Конструкційні порошкові матеріали на основі заліза за участю самофлюсивних сплавів / А.М. Степанчук., О.А. Демиденко, А.В. Демиденко, К.В. Шаповал //Наукові вісті НТУУ”КПІ”. – 2012. – №1. – С 51–60.
7. Демиденко А.А. Влияние метода компактирования на структуру и свойства порошковых материалов на основе железа и самофлюсующихся сплавов./ А.А. Демиденко, А.Н. Степанчук //Труды 4-й междунар. конф. “HighMatTech”. – Киев: 7–11 октября 2013. – С.162

8. Степанчук А.М., Використання самофлюсівних сплавів при створенні композиційних матеріалів та покриттів [Електор. ресурс] /А.М. Степанчук, О.А. Демиденко, Л.О. Бірюкович, М.Б. Шевчук //Матеріали міжнародної конференції “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, – Київ: НТУУ”КПІ”, 2013. – С. 454–465
9. Нечипоренко А. А. Самофлюсующиеся сплавы на основе железа /А.А. Нечипоренко, А.Н. Степанчук, П.И. Лобода //Адгезия расплавов и пайка материалов – 1992. – №. 3– С. 94–98.
10. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. /М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
11. Клейс И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания /И.Р. Клейс // Трение и износ. – 1980. – Т.1, №2. – С. 263–271.
12. Добровольский А.Г. Абразивная износостойкость материалов: Справочное пособие. / А.Г. Добровольский , П.И. Кошеленко. – К.: Техника, 1989. – 128 с.
13. Цыгановский А.Б. Определение степени влияния угла атаки струи на производительность и качество гидроабразивной обработки затопленными струями /А.Б. Цыгановский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. – С. 220–229.
14. Непомящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых частиц /Е.Ф. Непомящий // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С. 190–200.
15. Виноградов В. Н. Абразивное изнашивание. / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, – 1990. – 224 с.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2016.

*A. A. DEMYDENKO, A. N. STEPANCHUK*

#### **RESISTANCE POWDER MATERIALS OF COMPOSITION IRON - SELF-FLUXING ALLOYS AT GAS-ABRASIVE WEAR**

Studied gas-abrasive wear resistance in the wear of composite materials with iron and self-fluxing alloys. Materials with a self-fluxing alloy containing 0, 15, 0 and 50% and 98,5-99,0% density was obtained by compression followed by sintering in the presence of a liquid phase. The methodology of the study and a schematic of the test materials in gas-abrasive wear. The effect of the composition, their structure and wear conditions on the resistance. Gas-abrasive flow attack angle was varied from 15 to 90 degrees. It is shown that the wear tracks flow at angles of gas-abrasive effect on the material smaller than 45°–60° mainly occurs due to the impact of cutting the abrasive particles. At large angles of 60 ° material wear occurs due to fatigue and brittle fracture. With a decrease in the angle of attack increases the wear resistance of all compositions. The greatest resistance have the composition with the content of self-fluxing alloys for more than 30%.

**Keywords:** composition, iron, self-fluxing alloys, gas-abrasive wear, cutting, destruction

**Степанчук Анатолій Миколайович** – к.т.н., професор, професор кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Київського національного університету України «КПІ», [astepanchuk@iff.kpi.ua](mailto:astepanchuk@iff.kpi.ua).

**Демиденко Олександр Анатолієвич** – м.н.с. кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Київського національного університету України «КПІ», [kodamet.com](http://kodamet.com).