

І.А. Небожак^{1*}, пров. інж.,
Р.А. Сергієнко¹, к.т.н., с.н.с.,
А.М. Верховлюк¹, д.т.н., проф.,
О.А. Щерецький¹, д.т.н., п.н.с.,
Є.Г. Биба², к.т.н., доц.,
Д.С. Каніболоцький¹, к.х.н., с.н.с.,
В.Д. Бабюк¹, н.с.,
Є.А. Жидков¹, н.с.,

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

²Національний технічний університет України
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»

СПЕЦІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ СТАЛЕЙ ТА ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ

У багатьох галузях народного господарства, зокрема у машинобудуванні, для реалізації сучасних технологічних процесів часто потрібні вироби із металу з високими фізико-механічними та спеціальними властивостями. Це зумовлено, перш за все, умовами експлуатації деталі, її собівартістю та іншими чинниками. Такий комплекс характеристик, на сьогоднішній день, можуть забезпечити лише складнолеговані сталі і сплави, серед яких центральне місце посідають високоентропійні сплави (ВЕС).

Експериментально доведено [1], що ВЕС мають високі твердість і жаростійкість. Таке поєднання є привабливим для застосування ВЕС при виготовленні інструменту для обробки металу різанням спеціальними методами лиття. Найперспективнішим методом ливарного виробництва металоріжучого інструменту із ВЕС, який поєднав у собі високу розмірну точність з низькою собівартістю придатного литва, є процес лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). Оскільки, інструмент для металообробки працює на зношування, то крім зазначених характеристик необхідно дослідити триботехнічні властивості ВЕС.

Досліджувані виливки отримали за ЛГМ-процесом. Технологічні й металургійні параметри ЛГМ-процесу тезисно описані у науковій праці [2]. Зразки для випробування ливарних сталей та ВЕС на зносостійкість були виготовлені шляхом обробки металу різанням [3] із досліджуваних виливків. Режим термічної обробки зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ було відпрацьовано в умовах центральної заводської лабораторії ПрАТ «МК «Азовсталь» (м. Маріуполь, Україна). Дослідження жаростійкості проводили за методикою, яка була описана в роботах [1, 4]. Для цього використовувався метод синхронного термічного аналізу (СТА) в поєднанні термогравіметрії (ТГ) з диференційною скануючою калориметрією (ДСК).

Дослідження литих зразків на зношування в умовах сухого тертя проводили за оригінальною методикою, запропонованою фахівцями ФТМС НАН України. Для цього було сконструйовано та виготовлено лабораторну установку (рис. 1) для випробування ливарних сплавів на зносостійкість. Випробування виливків на зношування в умовах сухого тертя проводили за схемою «зразок (вкладиш) – контртіло (вал)». Зміну маси контртіла й литих зразків контролювали зважуванням на аналітичних терезах моделі «Radwag XAS 100/C». Математичну обробку результатів проведених досліджень здійснювали за методикою, представленою у роботі [5].



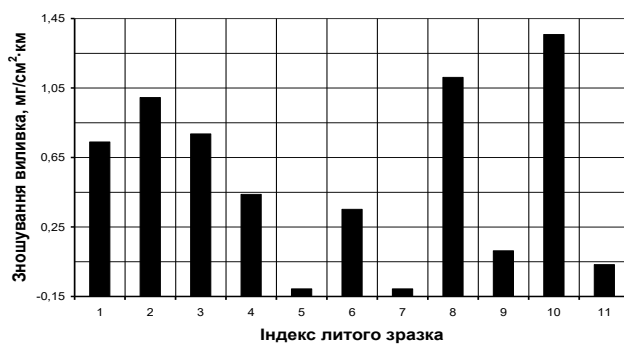
Рис. 1. Зовнішній вигляд установки для випробування ливарних сплавів на зношування в умовах сухого тертя

Як матеріал контртіла у роботі було використано інструментальну леговану сталь марки ХВГ ДСТУ 3953:2000 [6], твердість якої після термічної обробки становила порядку 66 HRC. Габаритні розміри контртіла, мм: діаметр – 40, товщина – 12; габаритні розміри литих зразків, мм: діаметр – 8, висота – 24 ± 1 . Параметри процесу тертя: тривалість випробування – 6000 с; площа контакту пари «зразок (вкладиш) – контртіло (вал)» – $5,024 \times 10^{-1} \text{ см}^2$; частота обертання контртіла – 1000 об./хв.; лінійна швидкість обертання контртіла – 2,1 м/с; сила нормальної реакції опори (навантаження) – 0,25 кгс (крім легованого зносостійкого чавуну марки ЧХ22Н2, для якого цей показник становить 0,5 кгс); шлях тертя (дистанція) – 10 км.

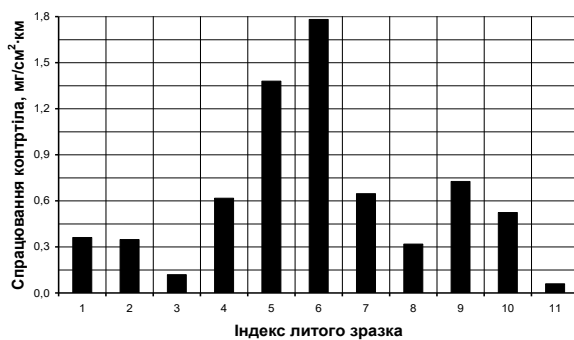
Експериментально доведено, що триботехнічні характеристики [зношування литого зразка, спрацювання матеріалу контртіла та коефіцієнт тертя ковзання пари «зразок (ВЕС) – контртіло (сталь ХВГ)»] ливарних сталей

і сплавів залежать від їх хімічного складу та макро-, мікроструктури. Результати поставленого експерименту у вигляді стовпчастих гістограм (рис 2) наведені далі за текстом.

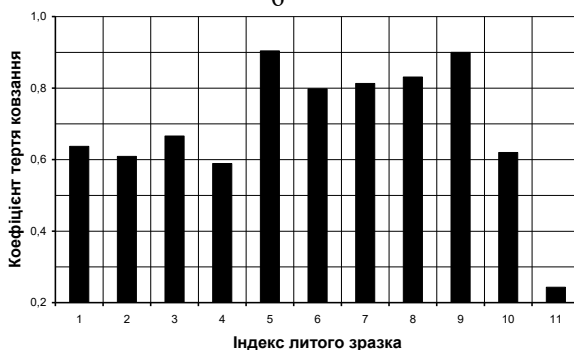
Таким чином, результати проведених досліджень дозволили дійти висновку, що найвищу зносостійкість серед перших 4-х сплавів, які є стандартними, має зносостійка складнолегована сталь марки 75ХФТЛ ТУ 4112-78269737-001-2005 [див. рис. 2 (а)]. Це дає підставу стверджувати, що усі ВЕС, зношування яких нижче 0,438 мг/см²·км, тобто зношування зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ, можна рекомендувати для використання при виготовленні інструменту для обробки металу різанням спеціальними методами лиття. Інструментальними матеріалами, які варто було б експлуатувати в умовах сухого тертя на зношування, слід вважати ВЕС наступного хімічного складу: 5 – $Fe_{24}Ni_{18}Cr_{20}Mn_{15,5}Cu_{17}C_{3,7}Si_{1,8}$, 6 – $Fe_{24}Ni_{19,5}Cr_{18}Al_{12}Cu_{21}Mn_{0,3}C_{3,2}Si_2$, 7 – $Fe_{20,5}Ni_{19,4}Cr_{16,5}Cu_{20}Mn_{19}C_{2,3}Si_{2,3}$, 9 – $Fe_{24}Ni_{19}Cr_{15,5}Cu_{20,5}Al_{15}Mn_{0,5}C_{3,5}Si_2$, 11 – $Fe_{24}Ni_{20}Cr_{15}Mn_{18}Cu_{22}Si$. Особливої уваги, серед цих матеріалів, заслуговує ВЕС з індексом 11 – $Fe_{24}Ni_{20}Cr_{15}Mn_{18}Cu_{22}Si$, оскільки, крім зносу, еквівалентного 0,033 мг/см²·км, цей сплав, що утворює з інструментальною сталлю марки ХВГ пару тертя, має найнижчий коефіцієнт тертя ковзання [див. рис. 2 (в)] – 0,243. Більше того, спрацювання матеріалу контртіла, яке працює у парі з ВЕС № 11 (раціональна формула – $Fe_{24}Ni_{20}Cr_{15}Mn_{18}Cu_{22}Si$) [рис 2 (б)], у даному випадку, набуває мінімального значення, тобто 0,060 мг/см². Отже, досліджуваний ВЕС можна рекомендувати для застосування у машинобудуванні як зносостійкий антифрикційний матеріал.



а



б



в

Рис. 2. Триботехнічні властивості виливків:

- 1 – чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 70ХЛ (БТО);
- 3 – сталь 75ХФТЛ (БТО); 4 – сталь 75ХФТЛ (ГМНВ);
- 5 – $Fe_{24}Ni_{18}Cr_{20}Mn_{15,5}Cu_{17}C_{3,7}Si_{1,8}$ (ВЕС);
- 6 – $Fe_{24}Ni_{19,5}Cr_{18}Al_{12}Cu_{21}Mn_{0,3}C_{3,2}Si_2$ (ВЕС);
- 7 – $Fe_{20,5}Ni_{19,4}Cr_{16,5}Cu_{20}Mn_{19}C_{2,3}Si_{2,3}$ (ВЕС);
- 8 – чавун [Fe – 73 %, Ni – 16 %, Cr – 2 %, Mn – 1 %, Cu – 3 %, C – 3 %, Si – 2 %, S – 0,025 %, P – 0,035 %];
- 9 – $Fe_{24}Ni_{19}Cr_{15,5}Cu_{20,5}Al_{15}Mn_{0,5}C_{3,5}Si_2$ (ВЕС);
- 10 – $Fe_{22}Ni_{21}Cr_{14}Cu_{23}Al_{19,5}Mn_{0,5}$ (ВЕС);
- 11 – $Fe_{24}Ni_{20}Cr_{15}Mn_{18}Cu_{22}Si$ (ВЕС); БТО – без термічної обробки;

Також було встановлено, що максимальну стійкість до окислення мають ВЕС до складу яких входить Al. Це пояснюється тим, що за рахунок утворення щільної оксидної плівки Al_2O_3 на поверхні литих зразків вони (ВЕС) не окислюються в ін-тервалі температур від 25 °С до 1450 °С, що досліджується. Експериментально доведено, що жаростійкість ВЕС перевищує жаростійкість стандартних сталей таких як 45Л та 12Х18Н9ТЛ, а також жароміцного сплаву марки СМ96. Таким чином, ВЕС проявляють надзвичайну стійкість до атмосферного окислення при високотемпературному нагріванні, що робить їх придатними для застосування при виробництві інструменту для металообробки, який працює на зношування в умовах сухого тертя.

Література:

1. Сергієнко Р.А., Щерецький О.А., Верховлюк А.М., Матковський Д.Ю. Дослідження високотемпературного окислення високоентропійних сплавів системи FeCoNiCrMnAl. *Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві*: мат. ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., 25–27 верес. 2023 р., м. Краматорськ. Краматорськ : ДДМА, 2023. С. 105–106.
2. Небожак І.А., Небожак Я.І., Пересенчук В.В., Шинський О.Й. Дослідно-експериментальна партія виливків, отриманих за допомогою дисперсно-наповнених моделей, що газифікуються. *Металаліття України*. 2021. Т. 29, № 4 (327). С. 78–84.
3. Обробка металів різанням: Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/ Обробка_матеріалів_різанням](https://uk.wikipedia.org/wiki/Обробка_матеріалів_різанням) (дата звернення: 24.10.2023).
4. Бабчук Р.В. Технологічні рекомендації для підвищення жаростійкості сталі 45 за допомогою дифузійних покриттів: магістерська дисертація: 161 / МОН України. НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”. Київ, 2022. 97 с. URL: [https://ela.kpi.ua/ bitstream/123456789/56530/1/Babchuk_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56530/1/Babchuk_magistr.pdf) (дата звернення: 04.12.2023).
5. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. / МОН України. ТНТУ ім. Івана Пулюя. Тернопіль, 2011. 322 с. URL: http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1076/1/TextBook_Zakalov_Basic.pdf (дата звернення: 30.10.2020).
6. Сталь ХВГ: склад, застосування та характеристики <https://what.com.ua/stal-hvg-sklad-zastosyvvannia/>.