

Квасницька Ю. Г.¹, Григоренко С. Г.², Ясинська О. О.¹, Кир'якова Н. В.¹
(¹ФТІМС НАН України, Київ; ²ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Київ)
ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА СТРУКТУРНИЙ СТАН ЗАЕВТЕКТОЇДНИХ
СТАЛЕЙ ЛЕГОВАНИХ МІДДЮ
E-mail: nat.vas.kir@gmail.com

Підвищення зносостійкості матеріалів пари тертя можна досягти застосуванням більш досконалих композицій мастильних матеріалів, таких, як тверді мастила, вони надзвичайно стабільні у важких умовах експлуатації. Поєднання декількох компонентів з фізико-механічними властивостями, що різко розрізняються, дозволяє створювати композиції з необхідними властивостями. В таких матеріалах на ділянках твердої складової формуються плівки з пластичного матеріалу, що утворені або за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення антифрикційної і твердої складових при нагріванні пари тертя, або в результаті механічного намазування. До таких сплавів відносяться заевтектоїдні сталі, які містять в матриці мідисті включення [1-5]. В даному дослідженні визначено механізми впливу легування заевтектоїдних сталей міддю на ефективність підвищення їх зносостійкості в умовах зношування внаслідок «твердого змащування» мідистою фазою. Досліджено заевтектоїдні сталі з вмістом вуглецю 1,5 мас. %, леговані міддю від 1 до 28 мас. %. Зносостійкість досліджених сталей в умовах сухого тертя ковзанням визначали на машині тертя моделі M22M за швидкості ковзання 1 м/с, питомого навантаження 50 кг/см² і використання контртіла виготовленого зі сталі 20X13. Результати випробувань показали, що інтенсивність зношування (I_g) для досліджених сталей значно знижується зі збільшенням мідистої складової (рис. 1), причому від 1 до 10 % спостерігається різкий темп зниження, далі уповільнюється і стабілізується. За вмісту міді від 10 до 28 % маємо найнижчу інтенсивність зношування на рівні 0,1 г/км, цей результат в 10 разів кращий, ніж для аналогічних сталей не легованих міддю. Отримані результати пояснюються тим, що легування міддю збільшує присутність мідистої фази в поверхневому шарі зразків і відіграє роль твердого мастильного матеріалу, спостерігається змащувальний ефект мідистою фазою.

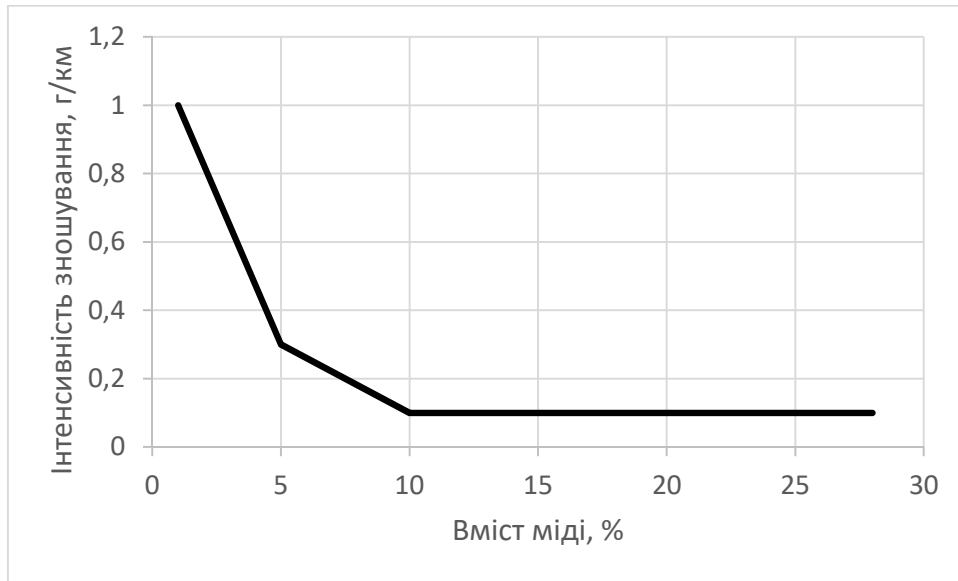


Рис. 1. Вплив легування міддю на інтенсивність зношування сталей у литому стані в умовах сухого тертя ковзання

Досліджено структурні особливості заєвтектоїдних сталей легованих міддю на металографічному інвертованому мікроскопі «Epiqvant» та растровому електронному мікроскопі GSM-840 у режимі SEI у вторинних електронах. В досліджених зразках мікроструктура матриці складається з пластинчастого перліту, в зразках без міді з відстанню між пластинами близькою до 1 мкм, довжиною пластин перліту до 15 мкм (рис. 2, а). В зразках, легованих міддю, присутній тонкопластинчастий перліт з відстанню між пластинами значно меншою в 2-3 рази в середньому 0,1-0,3 мкм, довжиною пластин коротшою в 3-5 разів, протяжністю до 5 мкм (рис. 2 б, в, г). Таким чином, легування міддю сприяє подрібненню мікроструктури за рахунок диспергування перлітної складової, відбувається дисперсійне зміцнення сталі, що покращує триботехнічні характеристики досліджених сталей.

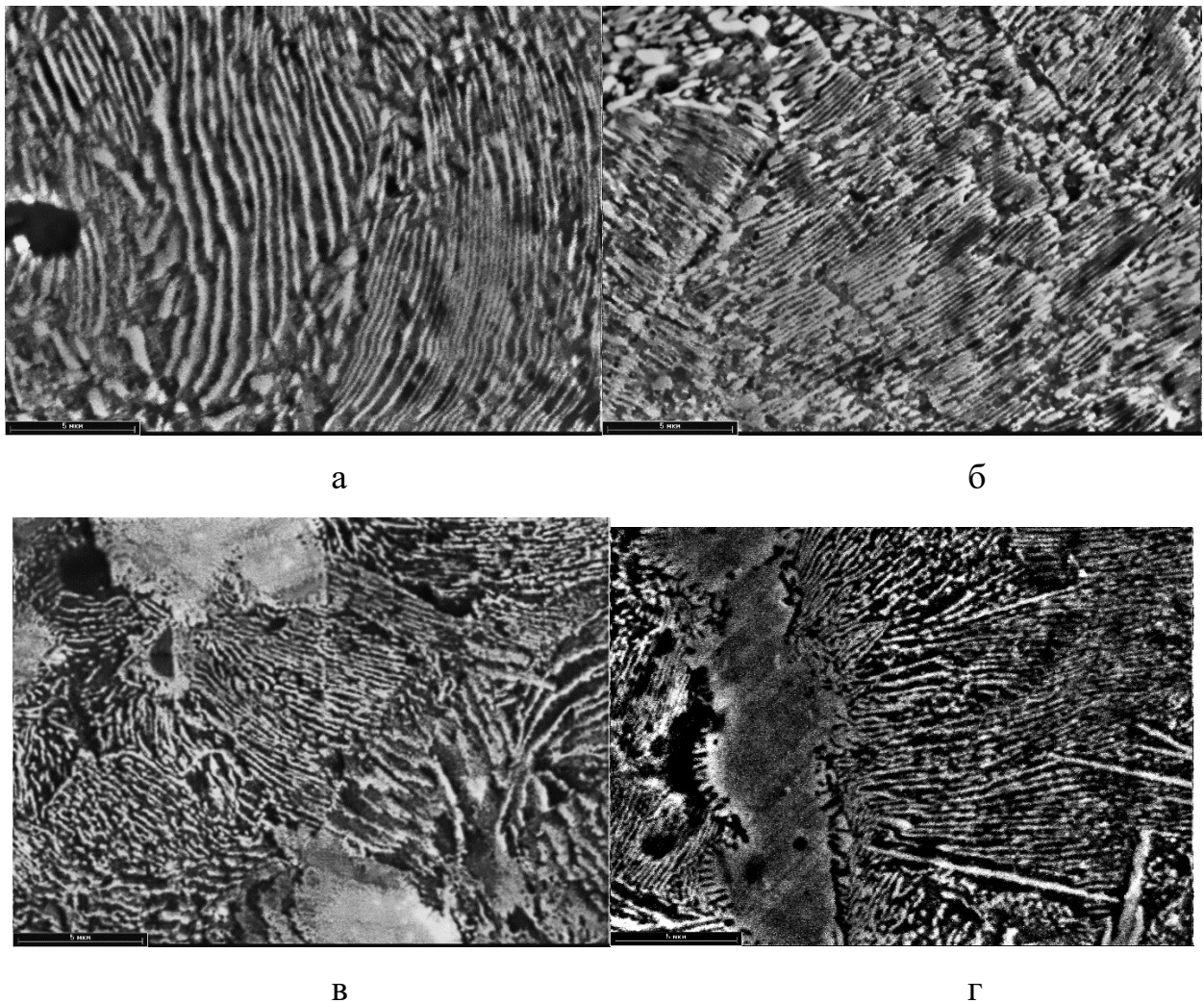


Рис. 2. Вплив легування міддю на морфологічні складові заевтектоїдної сталі з вмістом вуглецю 1,5 %; а – без легування міддю; б, в, г – леговано 8, 12 та 28 % міді, відповідно, дослідні зразки після іонного травлення, $\times 5000$

В структурі сталі, легованої 12 % міді, спостерігаються виокремлення мідистої фази у вигляді первинних кристалів розміром до 8 мкм (рис. 3, а). При збільшенні кількості міді під час легування до 28 % розміри виокремлень первинної мідистої фази збільшуються вдвічі (рис. 3, б) і разом з великими присутні дрібніші. Мікроструктура сталі, легованої 12 та 28 % міді, за невеликих збільшень представлена на рис. 4. За легування 12 % міді структура сталі складається з тонкопластинчастого перліту та вторинної цементитної фази, розташованої по границях первинних зерен (рис. 4, а). За легування 28 % міді на фоні перліту спостерігається ледебуритна евтектика, яка має скелетний вигляд (рис. 4, б).

За великих збільшень в сталі, легованій 28 % міді, на фоні тонкопластинчастого перліту спостерігаються первинні мідисті виокремлення розміром більшим за 5 мкм витягнутої форми та вторинні мідисті виокремлення розміром 0,1 мкм (рис. 5). Зі збільшенням частки міді при легуванні розмір первинних мідистих виокремлень зростає пропорційно.

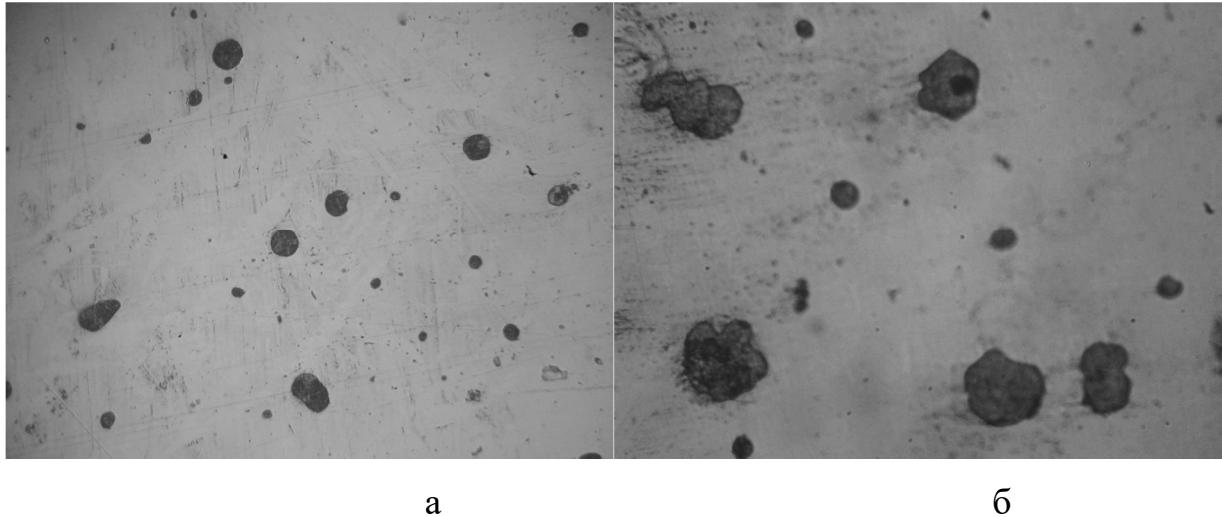


Рис. 3. Розподіл первинних виокремлень мідистої фази за легування міддю в кількості 12 % (а) та 28 % (б) (дослідні зразки без травлення), $\times 400$

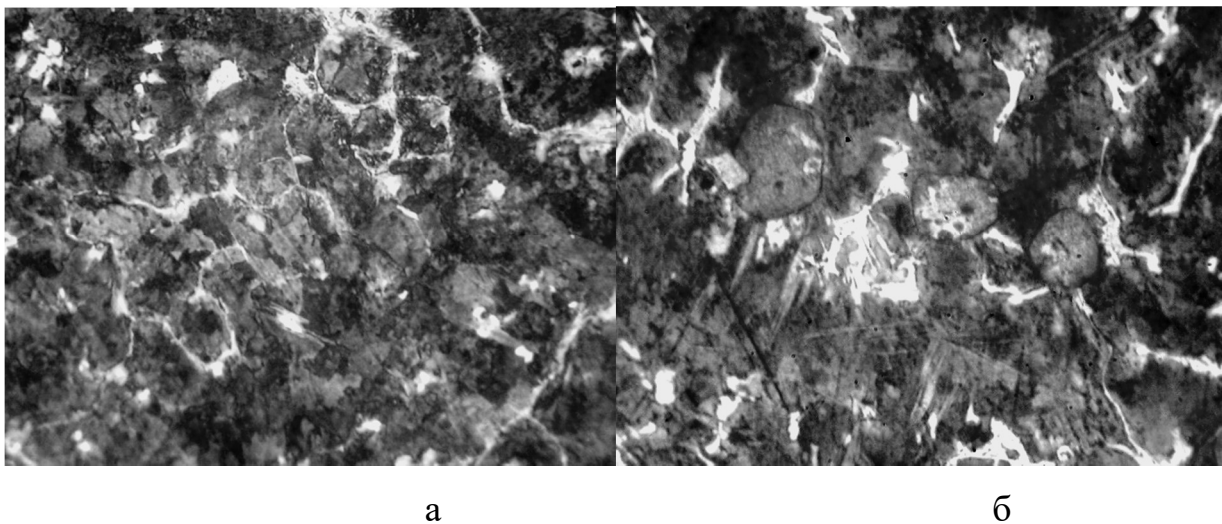
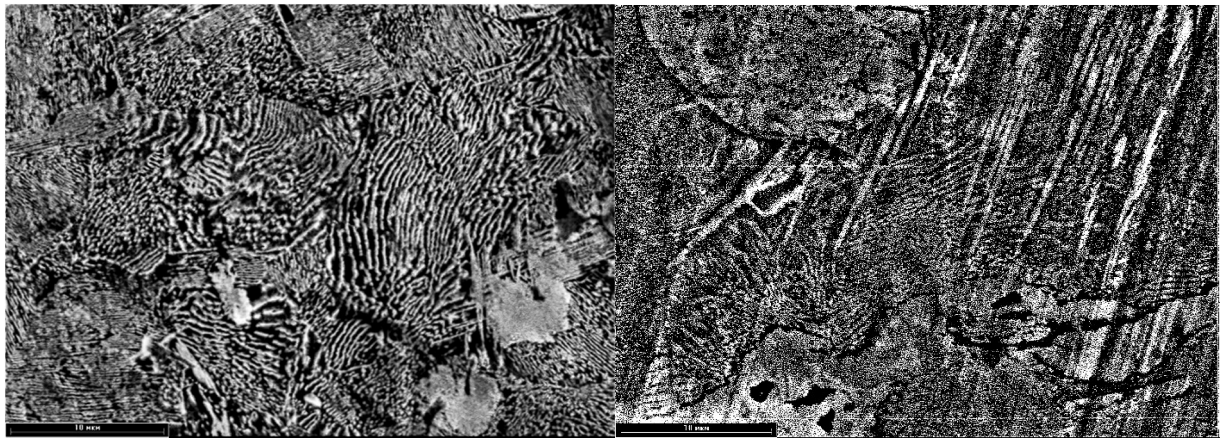


Рис. 4. Мікроструктура сталі, легованої міддю, в кількості 12 % (а) та 28 % (б) після хімічного травлення, $\times 400$



а

б

Рис. 5. Мікроструктура сталі, легованої міддю, в кількості 12 % (а) та 28 % (б) після іонного травлення, $\times 3000$

Слід звернути увагу на наявність в структурі заевтектоїдної сталі, легованої міддю, у кількості 12 та 28 % локальних ділянок з ознаками деформації мікрооб'ємів металу поблизу первинних виокремлень мідистої фази (рис. 5). Такий стан є суттєвим бар'єром руху дислокацій, в той же час розвиток магістральних тріщин не відбудеться. Таким чином, на мікрорівні сформовано стан з підвищеною стійкістю проти навантажень, особливо динамічних.

Проведено Оже-рентгеноспектральний мікроаналіз сталі, легованої 12 % міді, на приладі Jamp-9500F Jeol Field Emission Auger Microprobe, в режимі SEI у вторинних електронах після глибокого іонного травлення іонами аргону з енергією 1000 eV за швидкості 4 нм/хв. Досліджено зразки після тертя на машині тертя і вихідні без тертя. Проведено зйомку Оже спектрів в поверхневому шарі зони тертя зразків. За даними спектрів після травлення іонами аргону сформовано профіль до глибини 200 нм (рис. 6).

Аналізуючи профіль по глибині сталі видно, що на поверхні зразка мідиста фаза досягає максимальних значень 10-15 ат. %, в 5-7 разів вищих ніж до тертя, цей прошарок має розмір 8 нм, поступово зменшується до глибини 50 нм, формується за рахунок дифузійної рухливості міді на поверхню зразка під час процесів зношування. Далі вміст міді стабілізується і на глибині 100-200 нм має показник 5 ат. %. Необхідно зазначити, що на поверхні зразка відбувається розмазування мідистої складової,

формується плівка з пластичного матеріалу, утворена за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення антифрикційної і твердої складових при нагріванні пари під час тертя і через це окремих мідистих виокремлень не спостерігається.

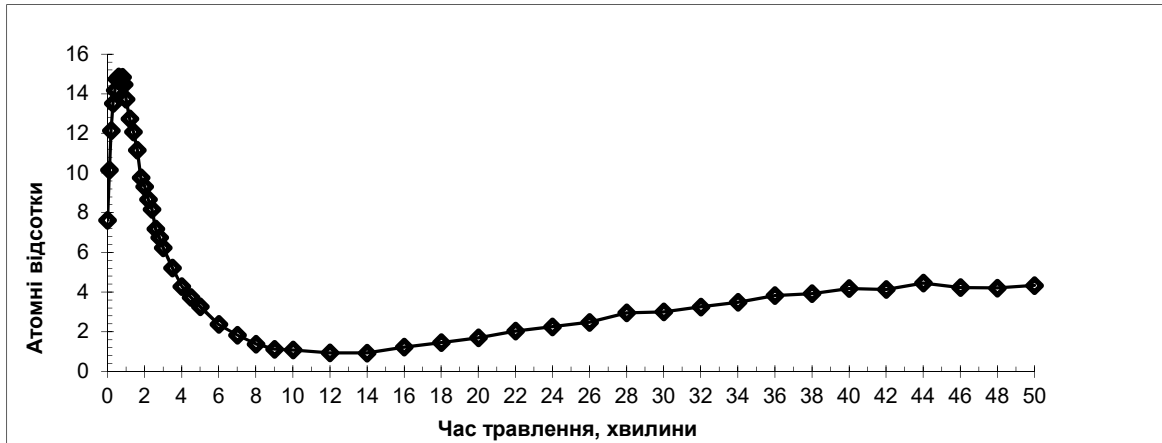


Рис. 6. Розподіл мідистої фази на поверхні зразка після тертя

Проведені експерименти дозволили дослідити структуру тонкого поверхневого шару на мікрорівні сформованого в процесі тертя ковзанням на глибину 200 нм. Легування міддю, під час тертя дозволяє мідистій фазі на поверхні зразка досягти максимальних значень, ця зона формується за рахунок дифузійної рухливості міді на поверхню зразка під час процесів зношування, сприяє механізму масоперенесення мідистої фази між контактними поверхнями пари тертя, відіграє роль твердого мастильного матеріалу, в 10 разів зменшує інтенсивність зношування пари тертя, збільшуючи її довговічність і надійність.

Література

1. Novytskyy V. Wear rate of Fe-Cr-C-Mn steels under sliding friction // Proceedings of 4 AIMETA International Tribology Conference. – 2004, Rome. – P. 45-54.
2. Novytskyy V. G., Havryliuk V. P., Tikhonovich V. I. Effect of copper on wear rate of stainless Fe-Cr-C-Cu steels for power industry under sliding friction // Proceedings of 4 European Stainless Steel Science and Market Congress. France. – 2002. – P. 380- 385.
3. Локтіонов-Ремізовський В. А., Шипицин С. Я., Новицький В. Г., Кир'якова Н. В. Ефективність впливу легування міддю на зношування

заевтектоїдних сталей // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2022. – №4. – С. 33-38.

4. Новицкий В. Г., Гаврилюк В. П., Лахненко В. Л. Влияние углерода и меди на структуру литых сплавов системы Fe-Cr-Cu-C и их трибологические характеристики в условиях трения скольжения // Трение и износ. – 2015, т. 36. – №1, – С. 70-80.

5. Квасницька Ю. Г., Тарасевич М. І., Григоренко С. Г. Особливості структуроутворення заевтектоїдних сталей, легованих міддю // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2024. – №3. – С. 50-60.

Кивгило Б. В., Лук'яненко І. В., Ямшинський М. М.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)

**ОКРЕМІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЕЙ ІЗ
ФОТОПОЛІМЕРНИХ СМОЛ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ LCD-
ДРУКУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ВИТОПЛЮЮТЬ**
E-mail: lukianenkoiv@gmail.com

Технологія лиття за моделями, що витоплюють, є одним із найбільш точних методів ливарного виробництва для отримання деталей складної геометрії. Традиційно для виготовлення моделей використовують парафіно-стеаринові суміші, які характеризуються витоплюваністю за температура 60-80 °С та низькою зольністю (0,03-0,10 %) після прожарювання форми. Однак такі матеріали та класична технологія їх використання мають обмеження щодо відтворення складних форм і дрібних елементів.

Останніми роками активно впроваджуються адитивні технології (SLA, DLP, LCD), які базуються на використанні фотополімерних смол. Їхня головна перевага – можливість отримання високоточних моделей із деталізацією до 10-50 мкм, що практично недосяжно для традиційних технологій. Разом із тим, під час випалювання фотополімерів виникають проблеми, пов'язані із зольністю та видаленням продуктів термодеструкції.