

УДК 621.74:669.14.017

**Ю. Г. Квасницька, С. Я. Шипицин, В. Г. Новицький, Н. В. Кир'якова,  
І. В. Олексенко**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ  
*[nat.vas.kir@gmail.com](mailto:nat.vas.kir@gmail.com)*

### **ПОВЕДІНКА ВУГЛЕЦЮ ТА МІДІ В ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ЗНОСОСТІЙКОЇ СТАЛІ СФОРМОВАНОМУ ПІД ЧАС ТЕРТЯ**

Для підвищення надійності і довговічності вузлів тертя застосовують досконалі композиції мастильних матеріалів з додаванням графіту та міді, які в зоні контакту розподіляються тонкою плівкою. Замість таких композицій мастильних матеріалів перспективним є використання графіту та міді, які містяться безпосередньо в матриці сплавів у вигляді м'яких вкраплень. [1-4]. Розроблено заевтектоїдну зносостійку сталь з вмістом (мас. %): вуглецю - 1,5, мікролеговану ванадієм - 0,15 і азотом – 0,02 та додатково леговану 13,0 мас. % міді

Зносостійкість дослідженої сталі визначали на машині тертя моделі M22M за швидкості 1 м/с, питомого навантаження 50 кг/см<sup>2</sup> і використання контртіла виготовленого зі сталі 20X13. Результати випробувань показали, що інтенсивність зношування (lg) для дослідженої сталі дорівнює – 0,20 г/км (для контртіла значно менша), цей показник на третину нижчий в порівнянні з базовою нелегованою сталлю. Отримані результати пояснюються тим, що мікродобавки ванадію та азоту, за рахунок дисперсійного нітридованадієвого зміцнення підвищують зносостійкість сталі [5], а також підвищений вміст вуглецю в поверхневому шарі зразка сталі відіграє роль твердого мастильного матеріалу. Додаткове легування міддю, сприятливо впливає на пару тертя, в якій інтенсивність зношування контртіла в п'ять разів менша за рахунок змащувального ефекту мідистою фазою.

Тонкий поверхневий шар зразків сталі після тертя досліджено на Оже рентгено-спектральному мікроаналізаторі на приладі Jamp-9500F Jeol Field Emission Auger Microprobe, в режимі SEI у вторинних електронах після глибокого іонного травлення іонами аргону. Травлення здійснено 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 спектрограм з експериментальних зразків після тертя та після травлення іонами аргону, за їхніми даними сформовано профіль до глибини 200 нм, який представлено на рисунку.

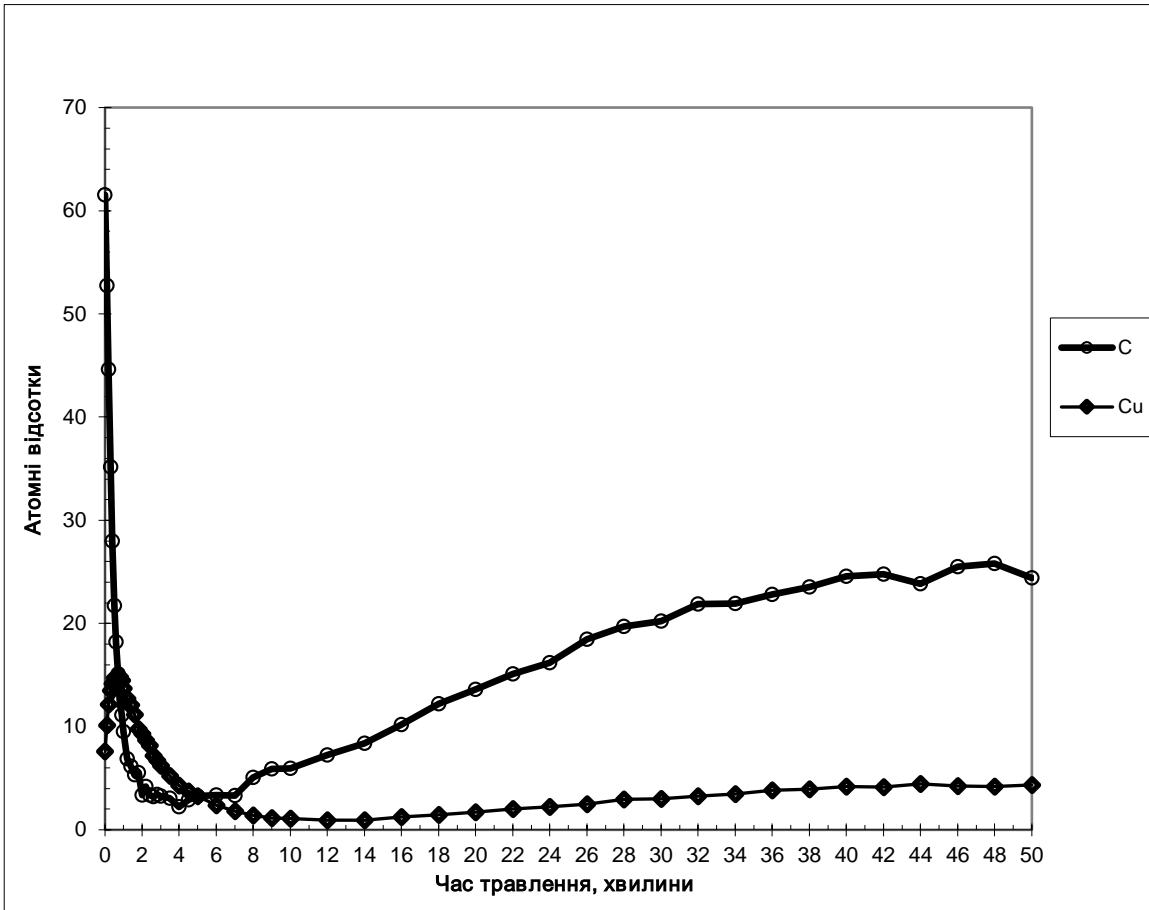


Рисунок Профіль по глибині травлення зразків сталі після тертя

Аналізуючи профіль по глибині травлення 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 і через це окремих мідистих виокремлень не спостерігається. Також на поверхні зразка після тертя підвищений вміст вуглецю 30-60 ат.%, що в 2,5 рази вище, ніж до тертя, за рахунок дифузійної рухливості вуглецю по шару тертя, механізму виокремлення вуглецю в формі графіту, а також дифузійному переміщенню вуглецю з матриці за сприяння локальних надвисоких температур в зоні тертя. Підвищений вміст вуглецю

в поверхневому шарі зразка сталі відіграє роль твердого мастильного матеріалу, зменшуючи інтенсивність зношування. Далі спостерігається ділянка з меншим вмістом вуглецю на рівні 10 ат.% протяжністю 50 нм. Поступово вміст вуглецю підвищується і на відстані від краю зразка 150 нм досягає значень близьких до 25 ат.%, тобто вміст вуглецю на поверхні зразка сталі після тертя значно вищий ніж до тертя.

Проведені експерименти дозволили дослідити структуру тонкого поверхневого шару на мікрорівні сформованого в процесі тертя на глибину 200 нм. Встановлено, вміст вуглецю в поверхневому шарі зразків сталі після тертя в 2,5 рази перевищує цей показник в зразках до тертя, за рахунок дифузійної рухливості вуглецю по шару тертя, механізму виокремлення вуглецю в формі графіту, а також дифузійному переміщенню вуглецю з матриці за сприяння локальних надвисоких температур в зоні тертя. Підвищений вміст вуглецю в поверхневому шарі зразка сталі відіграє роль твердого мастильного матеріалу, покращуючи показники зношування. 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, теж відіграє роль твердого мастильного матеріалу, разом з вуглецем на третину зменшує зношування пари тертя, збільшуючи довговічність і надійність пари тертя.

### Список літератури

1. 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 th European Stainless Steel Science and Market Congress. France. 2002, P. 380-385.

2. 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.

Новицький 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.

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

4. Шипицин С. Я., Степанова Т. В., Лиховій Д. И., Кучеренко П. М. Вплив дисперсійного нитрідного зміцнення на параметри  $\gamma \rightarrow \alpha$  переетворення у високовуглецевих сталях // Процеси лиття. 2017, №6, С. 38-44.

УДК 621.74-419

**С. В. Кирилах**

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

### **МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЯКІСТЬ МАТЕРІАЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ ЛИВАРНИХ ФОРМ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ**

Ливарне виробництво є основою для багатьох галузей, забезпечуючи виготовлення відливок із чорних і кольорових металів різних розмірів та конфігурацій. Традиційний процес передбачає ущільнення формувального матеріалу навколо моделі, що обмежує можливості оптимізації конструкції під час розробки нових виробів. Адитивні технології (АТ), зокрема 3D-друк піщаних форм, дозволяють усунути ці обмеження, спрощуючи створення прототипів і знижуючи виробничі витрати [1].

Лиття в піщані форми є основним методом виробництва металевих відливок, забезпечуючи близько 80% обсягу ринку. Цей процес широко використовується для виготовлення деталей з високими структурними вимогами, які потребують мінімальної механічної обробки після лиття.

Традиційно для цього методу потрібне спеціалізоване обладнання, що є дорогим. Впровадження 3D-друку в виробництво нових типів продукції дозволяє значно знизити витрати на підготовку виробництва порівняно з класичними методами формування [2, 3].

Згідно з [4] авторами проведено дослідження по оптимізації параметрів процесу друку ливарної форми робочих коліс шламових насосів на 3D-принтері моделі РСМ2200АJ. Принтер виробляє компанія ProMetal, яка спеціалізується на адитивних технологіях для виготовлення металевих відливок та ливарних форм. Витрата суміші у принтері цієї моделі складає 85 л/год, товщина шару — 280–500 мкм, роздільна здатність X/Y/Z – 100 мкм. При моделюванні відливок у САПР враховано допуск на усадку 2%.