

**Автухов А. К.,
Карпенко В. С.,
Ковалевський Є. В.,
Корнев О. С.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ
ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ШТАМПІВ, ЩО
ПІДДАЮТЬСЯ АБРАЗИВНОМУ ЗНОСУ ЧЕРЕЗ
АНАЛІЗ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МЕТАЛУ,
НАПЛАВЛЕНОГО СТАНДАРТНИМИ
ЕЛЕКТРОДНИМИ МАТЕРІАЛАМИ УКРАЇНСЬКИХ
ВИРОБНИКІВ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-93>

УДК 621.791.75:620.178.16:669.017:621.9.01

Автухов А. К., Карпенко В. С., Ковалевський Є. В., Корнев О. С. Визначення оптимальних матеріалів для відновлення інструментальних штамів, що піддаються абразивному зносу через аналіз зносостійкості металу, наплавленого стандартними електродними матеріалами українських виробників

Анотація. Проведено аналіз типової конструкції, схеми роботи, умов зношування штамів для виготовлення деталей з неметалевих матеріалів з абразивним покриттям. Показано, що крім досить високої зносостійкості кромок штамів, їхня робоча поверхня повинна чинити опір шаржуванню абразивною масою, а рівень пластичності і в'язкості металу кромок повинен виключати сколювання їх фрагментів у процесі експлуатації.

Структура металу, наплавленого попередньо обраними електродними матеріалами, змінювалася від феритної до заевтектичної з великою кількістю зміцнювальних фаз, мікротвердість яких досягає 20 ГПа. Випробування на опір абразивному зношуванню показали, що зносостійкість в межах дослідженого ряду матеріалів відрізняється до 5 разів.

Ключові слова: штамп, абразивне зношування, умови зношування, наплавлений метал, зносостійкість.

Вступ

Штапування є одним з найпоширеніших технологічних процесів на сучасному виробництві. Штапуванням оброблюються широкий спектр листових матеріалів – металів, пластиків та гумових техпластин. Найбільшою проблемою при використанні цього процесу є знос штампу чи його окремих частин – ріжучих кромок та притискних площин, що контактують з матеріалом, який оброблюється. Це поступово призводить до суттєвого зменшення точності деталей, що виготовляються.

При штапуванні металевих виробів, знос робочих кромок штамів залежно від матеріалів, способів їх зміцнення і структурного стану досягає гранично допустимого значення через 10 - 30 змін роботи штампу, а іноді і швидше. Це спричинює необхідність заточки пуансонів та матриць штампу, тобто проведення ремонту, що призводить до зниження техніко-економічних показників виробництва, обумовленого можливими простоями обладнання та додатковими витратами на виготовлення нових та заміну зношених деталей.

Тому проблема терміну служби штамів, способів їх відновлення, як і раніше, залишається актуальною. Деталі штамів для обробки металів, зазвичай, відновлюються

на спеціалізованих підприємствах, шляхом заточки чи заміни пуансонів чи матриць. Проте, на багатьох підприємствах, шляхом штамповки обробляються неметалеві матеріали, штампи використовуються одноразово, або, коли дозволені певні технологічні допуски, деталі штампів відновлюються дуговим наплавленням електродами, що забезпечують перенос металу з феритною або низьковуглецевою аустенітною структурою, що мають необхідний рівень зносостійкості. Не завжди враховуються характер і механізм зношування, особливості експлуатації деталей та вимоги до них. Крім того, наплавлення проводиться без застосування спеціального оснащення, яке забезпечує формування оптимальних геометричних параметрів наплавленого валика та однорідності його структури по всьому периметру зношеної деталі штамп. У процесі наплавлення відбувається надмірне нагрівання робочої поверхні штамп, що призводить до зниження опірності шаржуванню зони відновлення. Але ці недоліки можуть перекриватися низькою вартістю такого відновлення.

Метою роботи був аналіз способу експлуатації, умов зношування штампів, що використовуються для обробки неметалевих абразивних матеріалів, попередній вибір матеріалів для наплавлення кромки штампів і випробування наплавленого металу на зносостійкість на промисловому обладнанні, у простому штампі, що імітує умови зношування деталей пресої оснастки для штампування деталей.

Аналіз схеми роботи, умов зношування деталей штампів для виготовлення неметалевих деталей з абразивним покриттям і вимог до них

Розглядається робота штамп для виготовлення невідновлюваного зачисного інструменту на базі полімерного матеріалу товщиною 5мм з нанесеними з двох боків шарами наждачного паперу різної зернистості.

Відомо, що зносостійкість, на відміну багатьох інших параметрів, не є виключною властивістю матеріалів, а характеризує систему "матеріал – деталь - умови зношування". Найважливішою характеристикою такої системи є відношення твердості абразиву до твердості матеріалу H_a/H_m [1]. При цьому важлива не вихідна мікротвердість матеріалів H_m , а твердість поверхні тертя, набута в процесі зношування $H_{пгтм}$ [2]. Відомо [3], що один з найефективніших механізмів самозміцнення робочої поверхні деталей – утворення мартенситу деформації, та інші явища, що супроводжують цей процес (виділення дрібнодисперсних карбідів по площинах ковзань, релаксація напружень та інше). У той самий час одні й самі матеріали, під впливом неоднакових за складом і властивостями абразивних мас, що працюють за різних температур, тиску та інших факторів, виявляють різну здатність до самозміцнення поверхні тертя і опірності зношуванню. Крім того, на вибір матеріалів, структурного стану, способів управління структурою можуть впливати характер і допустима величина зношування, вимоги до рівня в'язкості і пластичності та інше. Залежно від умов роботи можливі зміни рівнів зносостійкості в межах певного ряду матеріалів, аж до повної інверсії (перестановки). У зв'язку з цим, очевидно, що визначення основних параметрів експлуатації деталей штампів, характеру зношування та вимог, що висуваються до них, є однією з основних умов обґрунтованого вибору матеріалів та їх структурного стану.

Типова конструкція штамп (рис. 1) включає деталі, що не зношуються абразивним впливом: верхня та нижня плита 11, 3, колонки 8 та напрямні втулки 9, матрице- та пуансонотримач 4 і 10, та деталі що піддаються впливу оброблювальних абразивів: пуансон 1 з зовнішньою робочою кромкою, матрицю 2 з внутрішньою робочою кромкою, напрямні пластини 5, знімач 7, упор 13.

У випадку дослідження проводиться штампування неметалевих деталей на полімерній основі з абразивними поверхнями. Виготовлення виробу здійснюється в наступний спосіб. Коли пуансон 2 штамп знаходиться у верхньому положенні, на

матрицю, до упору 13, покровою подається по направляючим 5 стрічка матеріалу що обробляється 6. Пуансон 1 пробиває матеріал і просуває готову деталь у отвір матриці 2. Щойно виштампувана деталь, з допомогою знімача 7 провалюється вниз, заміщуючи попередньо виготовлену деталь, що видаляється із робочої зони штампу. Після цього пуансон повертаються у вихідне положення, а робочий матеріал просувається на наступний крок. Процес повторюється багаторазово до тих пір, поки зношування матриці, пуансона або деталей подачі матеріалу у зону штампування не досягне гранично допустимої величини, що викликає необхідність заміни зношеної деталі. Значний вплив на знос деталей штампу здійснює темп штампування. Чим вище темп – тим вище температура у робочій зоні штампу.

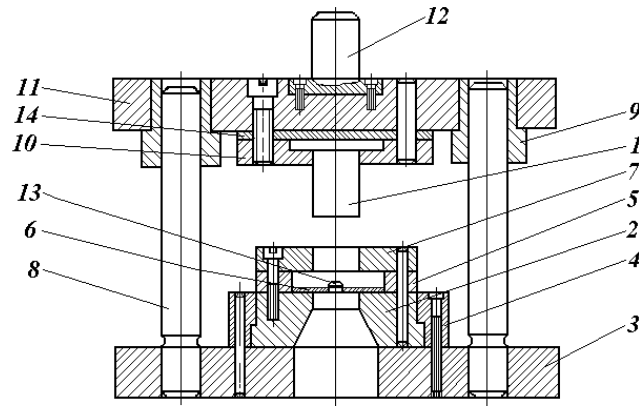


Рис. 1 – Штампу для виготовлення неметалевого одноразового абразивного інструменту

Умови експлуатації штампу в прес-формі висувають різні вимоги до різних його частин. Торцеві поверхні, що формують деталь, відчують в основному нормальні тиски, що викликаються матеріалом, що призводить до вдавлювання абразивних частинок, шаржування і налипання, але, при цьому, практично виключається зношування цієї частини деталей. А ріжучі поверхні пуансона та матриці зазнають ударних навантажень, що можуть викликати мікротріщини та викришування кромки. Також відбувається їх абразивний знос, адгезивний знос і відбувається термічний вплив.

У найбільш жорстких умовах експлуатується робоча кромка пуансона, яка, зазнаючи тангенціальної напруги, викликаними абразивними зернами, що потрапляють у зазор між пуансоном і матрицею інтенсивно зношується. Для тестових деталей, допустиме зношування не повинно перевищувати 0,1 – 0,2 мм на ребрі кромки. В іншому випадку на кромці виробу виникають "задири", що є бракувальною ознакою.

Опірність зношування та шаржування залежить в основному від трьох параметрів експлуатації деталей: мікротвердості зерен абразиву, її тиску та температури поверхні штампу.

Виміри мікротвердості зерен абразиву показали, що вона змінюється в широких межах згідно із законом розподілу, близьким до нормального. Вибірка становила понад 100 штук зерен.

Середній тиск абразивного матеріалу на робочу поверхню штампів змінюється в межах 20 - 50 МПа залежно від виду виробів, що штампуються. Тиск, що виникає при дії абразиву на робочу кромку у зазорі між пуансоном та матрицею штампа, визначити складно. Однак, судячи з характеру зношування поверхні робочої кромки (ризки, подряпини), можна припустити, що тиск достатній для створення напружень у місці контакту одиничного зерна з поверхнею, що перевищують межу плинності і в деяких випадках межа міцності металу насичених вуглецем шарів цементованої сталі 20Х з якої виготовляються нові деталі штампів. Температура робочих кромки в процесі роботи

підвищується на 10-15 °С відносно температури навколишнього середовища.

Знос та руйнування пуансону штампу по торцю та боковій поверхні показано на рис.2 .

Виходячи з умов роботи штамсів, можна сформулювати такі основні вимоги до пуансонів та матриць, які безпосередньо формують деталь у процесі:

- повинні мати високу опірність абразивному зношуванню робочих кромки і шаржування абразивною масою поверхні матеріалу;
- повинні забезпечувати достатній рівень в'язкості та пластичності кромки, що виключають їх розтріскування та сколювання в процесі експлуатації;
- процес відновлення деталей штампу способом наплавлення не повинен призводити до суттєвого зниження опірності шаржуванню робочої поверхні штамсів.

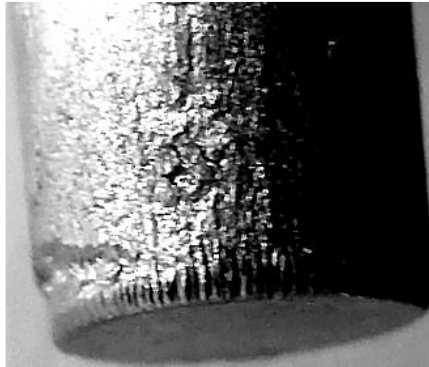


Рис. 2 – Знос пуансону штампа для виготовлення неметалевого одноразового абразивного інструменту по боковій поверхні.

Методика випробувань

Основною умовою вибору методики випробувань на зносостійкість було забезпечення ідентичності результатів виробничих та лабораторних досліджень.

Випробування проводили на штампі за методикою, що забезпечує повноту фазових перетворень [4], ступінь зміцнення поверхні тертя, та ряд відносної зносостійкості стандартних сталей типу 20Х (цементованої) та 40Х12 у різному структурному стані, вивчених раніше у виробничих умовах.

Зношування тестового пуансона діаметром 10мм та довжиною 50 мм на штампі здійснюється з використанням спіненого матеріалу на основі пінополіпропілену товщиною 5мм з наклеєним з одного боку наждачним папером зерном Р100 та Р320 з іншого боку.

Інтенсивність зношування визначали за втратою маси зразків за один хід з точністю до 1×10^{-4} г. Кількість ходів за один цикл випробувань між зважуваннями вибирали таким чином, щоб втрата маси при цьому становила не менше 0,008 г. За показник зносостійкості приймали середнє значення результатів за 5 циклів випробувань кожного зразку. При цьому похибка щодо зносостійкості не перевищує 4,5 % при надійності 0,9.

Ступінь зміцнення внаслідок впливу абразиву оцінювали по мікротвердості робочої поверхні за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н.

Вибір матеріалів для наплавлення штамсів

Вибір матеріалів здійснювали шляхом випробувань пуансонів штампу, наплавлених обраними електродами різних типів у виробничих умовах.

Існують два основні шляхи підвищення опірності сталей і сплавів абразивному зношуванню. Перший – збільшення кількості зміцнюючої фази сплаву до необхідних меж, оптимізація її за типом, морфології, характеру розподілу в матриці. Другий – пошук найкращої, для конкретних умов зношування, металевої матриці.

На даний час існує велика кількість зносостійких матеріалів, в тому числі електроди і дріт, для наплавлення деталей. Основною вимогою до технологічного процесу відновлення деталей штампів є збільшення зносостійкості і надійності з допомогою найбільш доступних стандартних матеріалів. При необхідності, існує подальша можливість модифікації робочих поверхонь наплавлених кромок шляхом плазмової або хіміко-термічної обробки [4] або азотуванням поверхні. Але як правило, у реальних умовах, це не відбувається.

Вибір стандартних матеріалів не представляє складності, через достатню наявність технічної інформації про властивості наплавних матеріалів, яка електродів так і дротів. Разом з тим, якщо судити з хімічного складу наплавленого металу, і ґрунтуватися на результатах досліджень, проведених раніше [4], можна зробити висновок, що за рівнем зносостійкості в умовах роботи деталей прес-форм, можливі істотної відмінності цих матеріалів. В рамках даної роботи були проведені випробування доступних в Україні матеріалів, наплавлених стандартними електродами, наплавлення дротом – не досліджувалося.

В роботі використані наплавні матеріали виробництва ДП «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, та виробника ТОВ «Суми-Електрод». Слід звернути увагу, що окремі характеристики електродів одного типу різних виробників відрізняються, але не суттєво, чим можна знехтувати. У таблиці вибрані наплавні електроди, призначені переважно для відтворення деталей, що піддаються абразивним навантаженням. Інформація про наплавні матеріали зібрана у таблиці 1.

Таблиця 1

Марки електродних матеріалів, тип наплавленого металу та його властивості

Марка наплавочного матеріалу	Тип наплавленого металу	Твердість	Мікротвердість Н _{0,5} , ГПа	
			До зношування	Після зношування
АНО-4	Низьковуглецева сталь	150 НВ	2,5	4,6
ЦЛ11	08Х19Н10Г2Б	200 НВ	2,6	6,5
ОЗН-400М	17Г4С1	23-24 HRC	5,2	8,0
ОМГ-Н	65Х11Н3	27-29 HRC	6,0	10,1
ЭН-60М	70ХЗСМТ	58-60 HRC	8,2	9,7
Т-590	330Х25Г2С2Р	55-58 HRC	8,7	10,9

Найменшу опірність зношуванню має відновлений пуансон, наплавлений металом електроду АНО-4. Низький вміст вуглецю та легуючих елементів зумовлює феритну структуру наплавлення з низькою вихідною мікротвердістю – 2,5 ГПа. У процесі зношування, в результаті механічного наклепу, твердість поверхні тертя збільшується до 4,6 ГПа. Однак відношення Н_а/Н_птм зберігається високим (близько 3), що обумовлює значну частку мікрорізання в процесі зношування і, в результаті, низьку зносостійкість.

Більш високою опірністю до зношування, завдяки високому рівню легування та підвищеному вмісту вуглецю, має метал, наплавлений електродом ЦЛ-11. Завдяки твердорозчинному зміцненню, за рахунок легування та механічному наклепу, мікротвердість поверхні тертя досягає 6,5 ГПа. Це у 1,5 краще, ніж результат

використання електроду АНО-4, що забезпечує більш високу зносостійкість матеріалів цього типу в порівнянні з феритними.

Матеріал електроду ОЗН-400М зі структурою, що поєднує низьковуглецевий мартенсит і бейніт, перевищують за зносостійкістю метал наплавлений електродами ЦЛ-11 у півтора рази, і в два по відношенню до феритних нелегованих матеріалів.

Мікротвердість поверхні тертя металу, наплавленого електродом ЕН-60М з переважно мартенситною структурою, досягає близько 10 ГПа, що відповідає рівню мікротвердості металу 65Х11Н3, наплавленого електродами ОМГ-Н. Проте, попри однакову твердість, зносостійкість у першому випадку є нижчою.

Це пояснюється тим, що підвищення мікротвердості у мартенситних матеріалах відбувається переважно за рахунок механічного наклепу, тому механізми релаксації напружень та інші позитивні ефекти, які супроводжують формування мартенситу деформації, у цьому випадку не реалізуються.

Крім того, у зміцненому шарі відсутня пластична складова – аустеніт, через що робота руйнування мікрооб'ємів поверхні є меншою, ніж у металах, які містять залишковий аустеніт та певну кількість мартенситу деформації.

Помітне підвищення зносостійкості, до 2,5 разів, спостерігається при використанні електрода ОМГ-Н. Це зумовлено тим, що внаслідок наявності відносно нестабільного аустеніту на поверхні тертя в процесі експлуатаційного зношування формується до 20 % мартенситу. Хоча ця кількість є меншою за оптимальний рівень (40–50 %) [3], її достатньо для підвищення мікротвердості до 10,1 ГПа та збільшення зносостійкості приблизно удвічі порівняно з матеріалами, у яких присутній повністю стабільний аустеніт.

Крім того, у даному наплавленому металі аустеніт має переважно хромистий, а не марганцевий характер. Відомо, що хром чинить більш виражений позитивний вплив на зміцнення сталей із залишковим метастабільним аустенітом, ніж марганець. Це пояснюється тим, що міцність мартенситу деформації визначається не лише вмістом вуглецю, а й енергією зв'язку між дислокаціями та атомами вуглецю в аустеніті.

Чим більша енергія зв'язку між дислокаціями та атомами домішок упродовження (вуглецю, азоту тощо), тим вищий ступінь закріплення дислокацій у мартенситі (за сталого вмісту вуглецю), а отже, і ефективна міцність аналізованої фази. Марганець знижує енергію зв'язку дислокацій з атомами вуглецю в α -фазі, тоді як хром, навпаки, підвищує цей показник [5].

Таким чином, хромисті або хромомарганцеві метастабільні аустенітні сталі при однаковому вмісті вуглецю характеризуються вищою зносостійкістю, ніж сталі з марганцевим аустенітом.

Істотне підвищення зносостійкості спостерігається також при наплавленні матеріалами заевтектичного складу, що входять до складу електродів Т-590. У цьому випадку структура наплавленого металу характеризується наявністю значної кількості зміцнюючих фаз, частка яких може досягати 60 %. Мікротвердість окремих структурних складових, зокрема карбоборидів, сягає 20 ГПа, що істотно перевищує твердість матричного металу.

У таких сплавах визначальний внесок у загальну твердість належить саме зміцнюючим фазам, особливо у металі 80Х20Р3Т, де їх концентрація та розподіл забезпечують високий опір абразивному зношуванню. Основна функція металевої матриці полягає у надійному утриманні частинок твердих фаз, запобігаючи їх викришуванню під дією абразивних частинок.

Загалом, у межах ряду розглянутих матеріалів, зносостійкість відрізняється суттєво. Таким чином, на підставі результатів випробувань встановлено, що відновлення або зміцнення нових штампів з точки зору впливу на їхню зносостійкість, доцільно

проводити доєвтектичними або заєвтектичними матеріалами. Однак, встановити наскільки такий підхід може відповідати іншим вимогам, що висувуються до цих деталей, можна шляхом випробувань наплавлених штампів, для конкретних деталей, у виробничих умовах.

Висновки

1. Аналіз конструкції штампів, умов їх експлуатації та характеру зношування робочих кромки під дією абразивних частинок, тиску, температури й швидкості штампування показав, що під час роботи штампи повинні забезпечувати не лише високу опірність абразивному зношуванню, але й стійкість до шаржування абразивною масою. При цьому робочі кромки повинні зберігати певний рівень пластичності в процесі експлуатації, що забезпечує їхню здатність протидіяти мікроруйнуванню і викришуванню під дією циклічних навантажень. Оптимальне поєднання твердості та пластичності визначає довговічність робочих поверхонь штампів при інтенсивних умовах тертя.

2. Металографічні дослідження наплавленого металу, отриманого з використанням попередньо обраних електродних матеріалів, виявили значну зміну структури – від переважно феритної до заєвтектичної, з формуванням великої кількості зміцнювальних фаз, частка яких може досягати 50 %. Утворення цих фаз зумовлює підвищення мікротвердості наплавленого шару до рівня 20 ГПа, що свідчить про ефективність вибраних електродів для зміцнення робочих поверхонь штампів.

3. Результати лабораторних випробувань наплавленого металу на опір абразивному зношуванню показали, що зносостійкість випробуваних матеріалів може відрізнятись до п'яти разів у межах однієї серії досліджень. Встановлено, що цей показник не корелює безпосередньо з вихідною твердістю металу, проте має виражену залежність від мікротвердості поверхні тертя, сформованої в процесі зношування. Найбільше зростання мікротвердості — до 4,1 ГПа — спостерігається у шарі, наплавленому електродами типу 65X11H3, де формується 15–20 % мартенситу деформації. Разом із тим, при близьких значеннях мікротвердості вищою зносостійкістю відзначаються матеріали, у структурі яких поряд із мартенситом деформації присутня пластична аустенітна складова, що сприяє зниженню крихкості й підвищенню опору руйнуванню в умовах тертя.

Список використаних джерел

1. Хрущов М.М. Абразивне зношування / М.М. Хрущов, М.А. Бабишев: Наука, 1970. 251 с.
2. Андрущенко М.І. Прогнозування механізму та інтенсивності зношування на основі оцінки співвідношення твердості абразиву та зношеного матеріалу / М.І. Андрущенко, Р.А. Куликовський, М.Н. Бриков, Д.М. Андрущенко // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2009. – №1. – С. 6-12.
3. Андрущенко М.І. Здатність до самозміцнення поверхні тертя в процесі абразивного зношування та зносостійкість сталей в залежності від вмісту вуглецю та хрому / М.І. Андрущенко, Р.А. Куликовський, М.Ю. Осипов, А.В. Холод, А.Е. Капустян // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №1. – С. 92-100.
4. Андрущенко М.І. Вплив вуглецю та хрому на здатність до зміцнення та зносостійкість безкарбідних сталей в умовах абразивного зношування / М.І. Андрущенко, О.Е. Рузов, Р.А. Куликовський, Н.Н. Бриков // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2003. – №2. – С. 112-116.
5. Гаврилюк В.Г. Розподіл вуглецю у сталі / В.Г. Гаврилюк – Київ: Наукова думка. – 1987. – 208 с.