

## ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 669.004.8:621.73.073:621.974.813:621.785

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240676

© Іващенко В.Ю.<sup>1</sup>, Кухар В.В.<sup>2</sup>

### ПОДОВЖЕННЯ УТИЛІЗАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ШТАМПІВ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-КУВАЛЬНИХ МАШИН

Проаналізовані тенденції впровадження у різних країнах світу принципів «зеленої» або циркулярної економіки стосовно до ковальсько-штампувального виробництва та шляхи підвищення робочої стійкості інструменту та вибору доцільного процесу утилізації як комплексного утилізаційного ресурсу штампного інструменту. Для порівняння наведено опис ситуації в Україні. Показано, що малогабаритні штампи у порівнянні з крупно- та середньогабаритними мають значно меншу ресурсоефективність, бо не підлягають відновленню та відпрацьовують лише один робочий термін. До того ж стійкість штампів однієї конструкції дуже варіюється залежно від типу руйнування, який обумовлений стохастичним комплексом чинників: хімічною неоднорідністю сталі, технологічними переробками заготовки під штамп, якістю обслуговування, станом обладнання та ін. Уповільнення процесу відходоутворення можна досягти використанням якіснішого інструменту, який витримуватиме більшу кількість кувальних циклів. Встановлено причини виходу з ладу штампів із сталі 5ХНМ для горизонтально-кувальних машин, виявлено взаємозв'язок між стійкістю та особливостями руйнування робочих поверхонь. Виявлена залежність терміну виходу з ладу штампів із сталі 5ХНМ від характеру руйнування гравіюри штампів, який в свою чергу обумовлений особливостями структури та рівнем твердості сталі у термічно обробленому стані. Показано, що заходи, спрямовані на подолання основних причин розтріскування, в тому рахунку використання режимів термічної обробки, які підвищують хімічну, структурну однорідність та ударну в'язкість сталі, запобігають передчасному руйнуванню робочих поверхонь і сприяють подовженню утилізаційного ресурсу штампного інструменту. Наведено результати тестування стійкості штампів, для яких був врахований напрямок осі прокатки заготовки під штамп та застосована нова термічна обробка – термоциклічна обробка з подальшим гартуванням та відпуском на твердість 44-48 HRC. Робоча стійкість таких штампів зросла на 68%.

**Ключові слова:** штампний інструмент, сталь, структура, твердість, термічна обробка, робоча стійкість, ресурсозбереження, утилізаційний ресурс.

**V.Yu. Ivashchenko, V.V. Kukhar. Utilization resource extension for the dies of horizontal forging machine.** The tendencies of introduction of «green» or circular economy principles in relation to forging and stamping production in different countries of the world have been analyzed, and the ways to increase the durability of the tool as well as the choice of an expedient process of utilization as a complex utilization resource of the stamping tool have been analyzed. The description of the situation in Ukraine has been given for comparison. It has been shown that small-sized dies have much lower resource efficiency as compared to large and medium-sized dies, because they are not renewable

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [gazetaxronos@gmail.com](mailto:gazetaxronos@gmail.com)

<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4863-7233, [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)

*and work only one service time. Besides the durability of the dies of the same design varies greatly, depending on the fracture's type, which is due to a stochastic set of factors: chemical inhomogeneity of steel, technological processing of the workpiece to receive the die, service quality, state of the equipment and others. Slowing down the waste generation process can be achieved by using a better tool that can withstand more forging cycles. The causes of the failure of the dies for horizontal forging machines from 5CrNiMo steel have been established, the interrelation between durability and features of destruction of working surfaces has been revealed. The dependence of the failure time of the dies on the nature of the destruction of the die engraving, which in its turn results from the peculiarities of the structure and the level of steel hardness in the heat-treated state has been found out. It has been shown that the measures aimed at overcoming the main causes of cracking, including the use of heat treatment modes that increase the chemical, structural homogeneity and toughness of steel, prevent premature destruction of working surfaces and extend the life of the stamping tool. The results of testing the stability of the dies have been presented. These were the dies for which the direction of the axis of rolling the workpiece to receive the die was taken into account and a new heat treatment - thermocycling with subsequent hardening and tempering to hardness of 44-48 HRC was applied. The working stability of such dies has increased by 68%.*

**Keywords:** stamping tool, steel, structure, hardness, heat treatment, working durability, resource saving, utilization resource.

**Постановка проблеми.** Розвиток прогресивних виробничих технологій тісно пов'язаний з впровадженням сучасних принципів «зеленої» або циркулярної (кругової) економіки на всіх стадіях виробництва продукції [1, 2]. Умови сталого розвитку інтегровані у вказані принципи, згідно з якими як до продукції, так і до устаткування з інструментом, висувуються серйозні вимоги енергозбереження та ресурсоефективності протягом всього життєвого циклу [1, 2]. Комплексний розгляд виробничих процесів, серед яких гаряче та холодне об'ємне штампування, повинен передбачати подовження терміну експлуатації всіх розхідних матеріалів (в тому числі штампів) та можливості вторинного використання (утилізації) відпрацьованих вузлів та інструменту. З врахуванням високої вартості та витратності штампового інструменту тривалість його роботи до виходу з експлуатації та кількість штампів, які обслуговуються, ремонтуються і утилізуються, є факторами, що впливають на споживання ресурсів. Тому додатково слід вказати на те, що процедури технічного обслуговування, ремонту і відновлення штампів повинні вимагати малих витрат сировини, енергії та робочої сили [1].

Принципи «зеленого» проектування виробництва та розробки життєвих циклів продуктів впроваджені у постіндустріальних країнах, розвинених країнах Південно-Східної Азії та Європейському союзу [3, 4], і в теперішній час освоюються Україною [5]. Прийняті у Швеції [1], Японії [6], Китаї [7] та Таїланді [8] програми ресурсозбереження та сталого розвитку наголошують на необхідності як подовження утилізаційного ресурсу (тобто терміну служби до утилізації) устаткування й інструменту при виготовленні будь-якого продукту, так і пропонують перспективні напрями їх утилізації. Наприклад, одним з таких напрямів є використання подрібненої штампової сталі в якості сировини для порошкової металургії (Powder metallurgy) та технологій Metal injection molding (MIM), якими отримують металовироби широкого вжитку прецизійної точності із прогнозованим комплексом властивостей [8]. Слід відзначити, що у сучасних реєстрах професій – «інженер з утилізації» занесений до топ-10 найбільш затребуваних професій майбутнього [9, 10].

Штампи горизонтально-кувальних машин (ГКМ) є досить складним та дорогавартісним інструментом, тому подовження їх утилізаційного ресурсу є актуальним напрямом досліджень, що поєднує у собі наукові проблеми декількох галузей: промислової екології, охорони довкілля, матеріалознавства і термічної обробки та обробки матеріалів тиском. Від темпів утворення і процесів утилізації відходів промислових підприємств, зокрема, зношених або таких, що вийшли з ладу, штампів, залежить ресурсозберігаючий і економічний ефект за рахунок формування більш низької собівартості та більш високої конкурентоспроможності продукції, мінімізації поточних витрат підприємства на процеси переробки відходів і закупівлю (або виготовлення) нових партій штампів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Штампи ГKM – відповідальний інструмент, що виготовляють зі спеціальних інструментальних сталей із вмістом хрому, молібдену або вольфраму, які характеризуються добрим прогартовуванням, високою стійкістю до зношування, хорошим опором пластичній деформації при високих температурах, термічній та механічній втомі. У Північній Америці розповсюджені штампові сталі за стандартами American Iron and Steel Institute (AISI). R. Shivpuri у роботі [11] розглянув не лише технології виготовлення штампів з таких сталей (у тому числі штампів ГKM, що відковують із спеціальних штампових кубиків або виготовляють спеціальними методами литва) і варіантів їх термічної обробки, але і виконав оцінку факторів, які впливають на термін служби штампів, та описав міри безпеки, яких треба дотримуватись при виготовленні, ремонті та відновленні штампів. Важливість вибору штампової сталі із вмістом вольфраму та хрому була висвітлена авторами статті [12] з прив'язкою до типу задіяної у виробництві ковальсько-пресової машини, у тому числі і ГKM. Це пов'язане із особливостями кінематичної взаємодії між інструментом та заготовкою, термо-механічними умовами деформації, властивостями заготовки, яку деформують. В. Buchmaug в роботі [13] показав, що стійкість штампів є значним економічним чинником при визначенні ефективності виробництва, при цьому прогнозування стійкості штампів є вельми ускладненим та пов'язаним із визначенням домінуючого механізму пошкодження, який визначає подальші напрями протидії виходу з ладу, ремонту або утилізації відпрацьованого інструменту. В даній роботі [13] також вказано на переваги азотування перед іншими технологіями поверхневої обробки робочих частин штампів. Z. Gronostajski із співавторами [14] описав характерні явища, які відбуваються на поверхні штампів для гарячого штампування (на прикладі штампування шестерні). При цьому було виявлено, що найбільш несприятливим чинником, якій впливає на зниження стійкості штампів, є термомеханічна втома, в результаті якої дрібні тріщини швидко переростають у тріщини сітки розпалу, що розповсюджуються по контактній поверхні. Крім того, інтенсивний плин матеріалу заготовки, яка пластично деформується, по поверхні штампу викликає абразивне зношування штампів [14]. Подовження терміну роботи штампів для гарячого штампування є центральною проблемою роботи [15], в якій розроблені моделі тертя та зношування робочої поверхні штампів гарячого штампування, що враховують особливості напружено-деформованого стану інструменту. Проведене дослідження містить результати, які описують причини виходу інструменту з ладу, в тому числі через неточності у системі «ковальська машина-інструмент-заготовка», та рекомендації із зменшення зносу і термічних навантажень [15]. Подібний аналіз, що виявив вплив точності системи «прес-штамп» на стійкість штампового інструменту, був проведений у роботі [16].

P. Widomski та співавтори у роботі [17] ставили за мету підвищення довговічності роботи штампів із сталі Unimax для гарячого штампування за рахунок термохімічної обробки азотуванням, поєднаною із нанесенням PVD-покриттів та покриттів на основі нітриду хрому. Ефект підвищення стійкості був підтверджений при розвитку таких комплексних методів дослідження, як експлуатаційні випробування, визначення ступеню зносу за допомогою 3D-сканування, аналіз змін поверхневого шару інструментів за допомогою скануючого електронного мікроскопу, оцінка мікроструктури та вимірювання мікротвердості [17]. Як інструмент для дослідження напружено-деформованого стану поверхневих шарів робочих поверхонь штампів, за яким непрямо оцінюють їх стійкість, широко використовують метод скінчених елементів (МСЕ) [14, 15, 18]. У роботі [18] було розроблено метод оцінки стійкості штампів за критеріями зносу і пластичної деформації, яку визначали МСЕ, та визначено, що термін експлуатації штампу значно скорочується через термічне розміщення поверхневого шару, яке викликане високим тепловим навантаженням та подовженим часом контакту штампу з матеріалом, що деформують. Тому, як найбільш значні фактори, що впливають на термін експлуатації штампів ГKM, можна вказати швидкість деформування та температуру розігріву штампу. В роботі [19] вказано на перспективність топографічної оцінки поверхні деформуючого інструменту при дослідженні його зношування та виходу з ладу, в тому числі за критеріями поломок.

**Мета роботи** – аналіз причин руйнування та стійкості штампів із сталі 5XHM для ГKM з метою знаходження технологічних шляхів запобігання розтріскування робочих поверхонь та подовження утилізаційного ресурсу інструменту.

**Виклад основного матеріалу.** Особливість утворення відходів із швидкозношуваного інструменту для гарячої деформації залежить від багатьох чинників: гарний стан ковальсько-

пресового обладнання; правильне та надійне кріплення інструменту; габаритні розміри та маса; силове навантаження; своєчасне очищення від окалини та ремонт поверхні; тип та властивості матеріалу, що оброблюється деформацією, та ін. При цьому виникає необхідність структуризації та кількісної оцінки різних видів штампного інструменту з урахуванням витрат на його відновлення або вибір типу переробки.

В Україні штампний інструмент випускається в досить широкому асортименті як за розмірами і конструкцією, так і за складністю геометрії. Молотові штампи та штампи для гарячої штамповки є швидкозношуваним оснащенням. Економія витрат штампів зазвичай досягається поліпшенням їх конструкції, використанням зносостійких та ударостійких сталей, застосуванням більш досконалих методів виготовлення, підвищенням стійкості, своєчасністю і високою якістю ремонту [20, 21].

Питання про відновлення робочої поверхні розглядається зазвичай в тому випадку, коли вартість нового штампу в кілька разів вище витрат на відновлення. Таке співвідношення витрат характерно для високовартісних середньо- та великогабаритних штампів, процес відновлення яких включає: відпал для зниження твердості, механічну обробку або абразивну зачистку з метою видалення наслідків зносу, наплавлення шару з наступною механічною обробкою для доведення до потрібних розмірів і остаточну термічну обробку для досягнення необхідних механічних і експлуатаційних характеристик. Кількість капітальних поновлень поверхні штампу в середньому складає 3-4 та обумовлено мінімально допустимою висотою штампа [22]. Нажаль ситуація з малими штампами зовсім інша: їх висота не дозволяє якісно виконати відновлення гравюри, а кількість і обсяги використання досить великі, тож і витрати часу на їх відновлення також великі, тому єдиним виходом подовження утилізаційного ресурсу цих штампів є уповільнення процесу відходу утворення, чого можна досягти, використовуючи якісніший та довговічніший інструмент, який витримує більше робочих циклів.

З метою детальнішого вивчення проблеми були оцінені результати дослідження причин виходу з ладу штампів з сталі 5ХНМ, які були виконані із гарячекатаних заготовок, перекованих до форми куба зі стороною 63 мм. Хімічний склад відібраних проб відповідав ГОСТ 5950. Твердість після кування заготовки штампу становила HRC 22-26. Перед обробкою різанням для зняття напружень заготовки піддавалися відпалу на твердість HRC 18-22. Після остаточної термообробки твердість виробу знаходилась у межах HRC 45-49, що відповідає технічним вимогам.

Штампи використовувались для кування машиною ВА1132 (зусилля 1600 кН) деталей простої форми – головок скоб і поручнів діаметром 40 мм. Перед початком експлуатації за прийнятою в цеху технологією штамп прогрівали до 80-100°C. Після кожного вилучення заготовки гравюра штампа автоматично обдувалась стисненим повітрям для запобігання розвитку процесів термічного відпуску і втрати твердості.

Типові руйнування з утворенням тріщин різного походження наведено на схемі (рис. 1).

За типами руйнувань у попередніх дослідженнях [23] було отримано такий статистичний розподіл у виборці з 73 штампів: тріщини термомеханічного походження (сітка розжару) – 44% випадків, тріщина механічної втоми (тріщина кільцевої форми) – 9%, наявність сітки розжару та кільцевої тріщини разом – 43%, пластична деформація чи опливання елементів (кромки) гравюри – 4%. Схожий перелік видів руйнування наведено також в роботі [24]. Статистично розраховано, що стійкість найбільшої частки штампів (46%) після типового режиму термообробки (модальна стійкість) становить 6100 кованок (рис. 2).

Крім основної групи штампів з середньою стійкістю є досить маленька група штампів (2,5%), яка продемонструвала стійкість 9,5-10,2 тис. кованок (рис. 2), що вказує на можливий потенціал робочої стійкості. Отже встановлення причин такої стійкості допоможе виявити шляхи підвищення якості та довговічності інструменту.

Вибіркові металографічні дослідження штампів дозволили встановити, що типи руйнування робочої поверхні пов'язані з дією різних факторів або комплексів декількох факторів.

Наприклад, одночасний вплив внутрішніх напружень, обумовлених високою твердістю, та зовнішніх, пов'язаних з концентратором напружень у гравюрі, підвищують під час деформації ймовірність появи швидко зростаючих глибоких тріщин, що веде до передчасного зняття штампу з експлуатації. Металографічне дослідження кільцевої тріщини у перетині штампу (рис. 3) показало, що за усіма ознаками це руйнування втомного типу: тріщина має форму сходинок, горизонтальні ділянки яких розташовані у ліквіційних смугах фосфору, де зазвичай бі-

льша крихкість металу і злам менш енергомісткий. Аналогічні спостереження було зроблено у мікроструктурі штампів декількох плавкових складів, вміст фосфору в яких не перевищував стандартні вимоги до хімічного складу сталі.

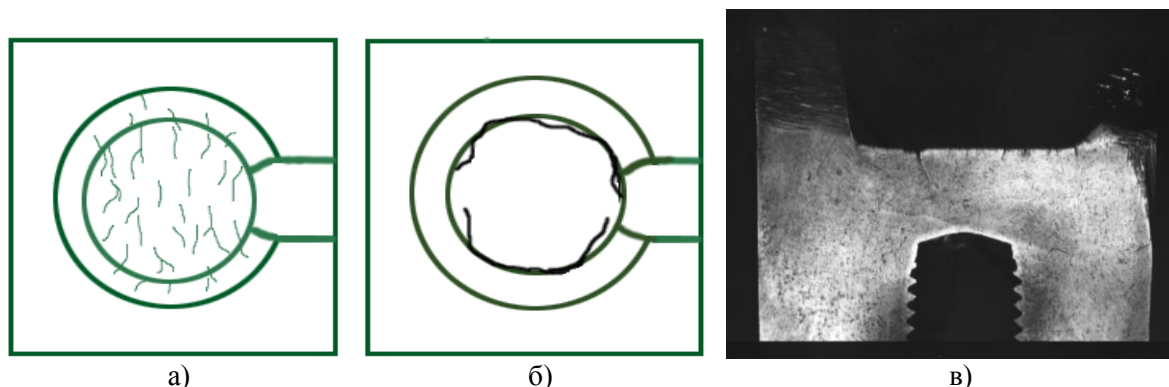


Рис. 1 – Типові схеми руйнування робочих поверхонь у штампах зі сталі 5XHM: а) – (вид зверху) шляхом утворення сітки тріщин розжару; б) – шляхом утворення тріщин втоми поряд з концентратором напружень; в) – (вид збоку) макротемплет штампів у вертикальному перетині з помітними тріщинами робочої поверхні (зменшено)

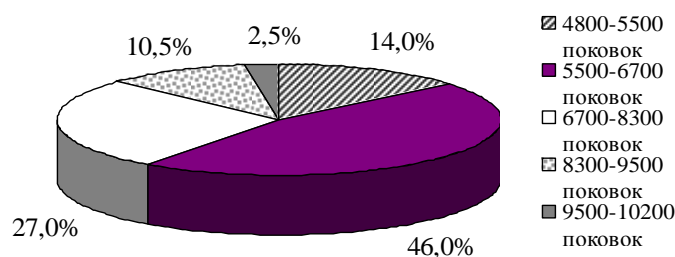


Рис. 2 – Оцінка стійкості штампів зі сталі 5XHM, оброблених за типовим режимом термообробки

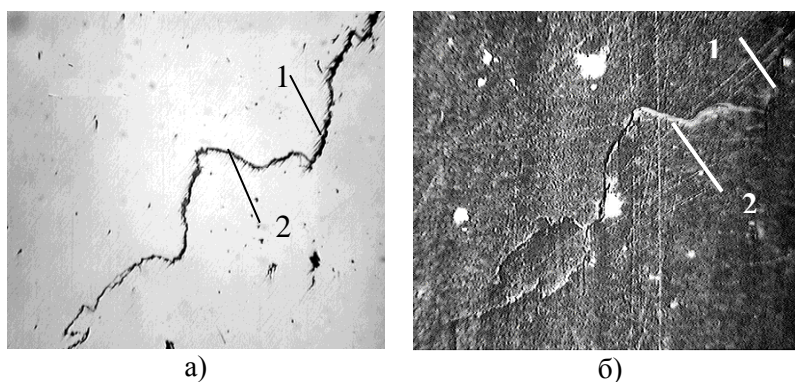


Рис. 3 – Мікроструктура кільцевої тріщини у вертикальному перетині штампів ( $\times 100$ ): а) – структура у нетравленому стані та помітними поруч з тріщиною неметалевими частинками; б) – після обробки реактивом Обергофера, що виявляє ліквідацію фосфору у вигляді світлих смужок; 1 – вертикальна ділянка тріщини, що бере початок з концентратора напружень; 2 – горизонтальна ділянка у світлій ліквідаційній смужці фосфору

Наявність двох структурних факторів – ліквідаційних смужок із фосфором та частинок неметалевих включень оксидного та оксисульфідного типу – підвищують вірогідність зародження тріщин розжару. До того ж в цій групі середню експлуатаційну стійкість мають штампи з ви-

раженою орієнтацією тріщин розжару в гравюрі (див. рис. 1, а), а максимальну стійкість (близько до 10 тис. поковок) мають окремі штампи з тріщинами розжару, яким притаманне більш хаотичне розташування. Металографічний аналіз підтвердив висунуте раніше припущення, що в них вертикальна ось симетрії гравюри є співвісною з віссю прокатки заготовки.

Порівняльний аналіз стійкості штампів показав, що саме підвищення твердості до 48-49 HRC стимулює утворення кільцевої тріщини втомного типу та максимально знижує стійкість штампів до 3,5-5,5 тис. поковок (рис. 4). З іншого боку падіння твердості до 42-44 HRC також дає не найвищі показники стійкості – від 5,6 до 8,5 тис. поковок (рис. 4). Отже оптимальним діапазоном твердості для штампів з 5ХНМ буде 44-48 HRC.

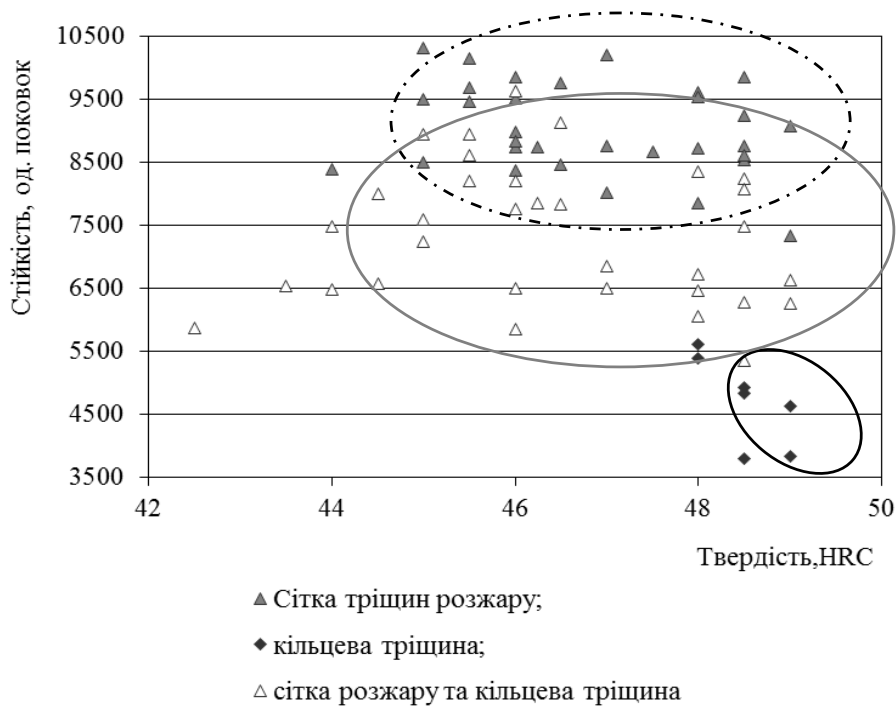


Рис. 4 – Вплив твердості та типу руйнування на експлуатаційну стійкість штампів [23]

Відомо, що запобігти розтріскуванню будь-якої природи можна підвищуючи ударну в'язкість сталі, що можливо або застосуванням більш в'язких сталей, або оброблюючи сталь за новим режимом термообробки. Оскільки зазвичай сталі з підвищеною в'язкістю леговані дефіцитними й дорогавартісними легувальними елементами, то доцільніше розглянути варіант заміни технології термообробки.

Обираючи технологію термообробки, слід віддати перевагу режимам, які підвищують хімічну та структурно однорідність сталі, подрібнюють зерно і, за рахунок цього, підвищують комплекс механічних властивостей в цілому. Однією з таких технологій є термоциклічна обробка (ТЦО), під дією котрої більш інтенсивно протікають процеси дифузії, відбувається сфероїдизація розчинних неметалевих включень та завдяки багаторазовим фазовим переходам подрібнюється зерно [25].

Досвід використання режимів ТЦО для обробки штампових сталей показав, що ТЦО із заключним гартуванням у масло та подальшим відпуском утворює в сталі дрібнозернисту, однорідну троостито-сорбітну структуру з підвищеними показниками ударної в'язкості [26].

Для випробувань на стійкість були використані 8 штампів зі сталі 5ХНМ, напрямок прокату заготовки під час кування та вирізання гравюри в яких було враховано. У лабораторних умовах їх термічно обробили за розробленим двоцикловим режимом ТЦО з нагрівом до 840°C, охолодженням між циклами на повітрі до 450°C, загартуванням з другого нагріву, подальшим відпуском на твердість 44-48 HRC. Випробування стійкості штампів відбувалися в заводських умовах на ГKM BA1132 та показали, що виникнення кільцевої тріщини на інструмен-

ті після ТЦО відповідає більш пізнім часовим термінам. Якщо у штампах після типового гартування з відпусткою ця тріщина ставала помітною через 45...65% відпрацьованого часового ресурсу штампа, то у штампах після описаного режиму з термоциклічним нагрівом – через 80...85% ресурсу. Стійкість експериментальних штампів в середньому склала 10260 поковок, що не перевищує найбільшу стійкість поодиноких штампів, оброблених за типовим режимом (приблизно 10400 поковок), але на 68% ( $10260/6100 = 1,68$ ) перевищує модальну (середню) стійкість. До переваг застосованого технологічного підходу потрібно віднести й меншу кількість утворених тріщин розжару та можливість формування більшої кількості поковок в цілому штампі (до початку процесу його розтріскування), що безсумнівно підвищує якість поковок: точніші розміри та кращій стан поверхні самої поковки.

### Висновки

Проаналізовано тенденції з питань використання штампового інструменту, можливості відновлення робочих поверхонь, шляхи підвищення утилізаційного ресурсу та актуальність застосування у ковальсько-пресовому виробництві принципів циркулярної («зеленої») економіки, що обумовлено необхідністю збереження ресурсної бази в умовах дефіциту якісної сировини, який загострюється темпами вичерпності рудних ресурсів і постійним зростанням цін на інструментальні сталі.

Показано, що малогабаритні штампи у порівнянні з крупно- та середньогабаритними мають значно меншу ресурсоефективність, бо не підлягають відновленню та відпрацьовують лише один робочий термін. До того ж стійкість штампів однієї конструкції дуже варіюється, залежно від типу руйнування, який обумовлений стохастичним комплексом чинників: хімічною неоднорідністю сталі, технологічними переробками заготовки під штамп, якістю обслуговування, станом обладнання та ін. Уповільнення процесу відходоутворення можна досягти використанням якіснішого інструменту, якій витримуватиме більшу кількість кувальних циклів. Встановлено причини виходу з ладу штампів із сталі 5ХНМ для ГKM BA1132, виявлено взаємозв'язок між стійкістю та особливостями структури і твердістю. Шляхом тестування в заводських умовах визначено, що врахування напрямку осі прокатки заготовки під штамп та застосування термоциклічної обробки з подальшим гартуванням та відпуском на твердість 44-48 HRC дозволяє підвищити стійкість штампів на 68%. Таким чином, розробка технологічних заходів, спрямованих на подолання причин розтріскування, а також використання видів термічної обробки, які підвищують хімічну, структурну однорідність та ударну в'язкість сталі, запобігають передчасному руйнуванню робочих поверхонь і в цілому сприяють подовженню утилізаційного ресурсу штампового інструменту.

### Перелік використаних джерел:

1. Product design for resource efficiency: Background paper / W. Ijomah, T.C. McAlone, W.R. Stahel, J.-E. Sundgren, J. Ahlqvist. – Stockholm, 2014. – 22 p. – Mode of access: <http://www.mistra.org/wp-content/uploads/2018/01/Product-design-for-resource-efficiency.pdf>.
2. Stahel W.R. The Utilization-Focused Service Economy: Resource Efficiency and Product-Life Extension / W.R. Stahel // The Greening of Industrial Ecosystems. – Washington, DC: National Academy Press, 1994. – Pp. 178-190.
3. Oosterhuis F.H. Product policy in Europe: new environmental perspectives / F.H. Oosterhuis, F. Rubik, G. Scholl. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – 313 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0277-0>.
4. A novel green design method using electrical products reliability assessment to improve resource utilization / J.-G. Zhou, L.-L. Li, M.-L. Tseng, A. Ahmed, Z.-X. Shang // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2021. – Mode of access: <https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1947402>.
5. Федорчук Я. Циркулярна економіка. Організаційно-правові аспекти / Я. Федорчук, Д. Серветник. – Режим доступу : <https://www.businesslaw.org.ua/circle-economic-t>.
6. Tanaka I. Promotion of Resource Efficiency in Japan – through 3R (Reduce, Reuse and Recycle) policies / I. Tanaka. – Östersund : ITPS, 2008. – 29 p. – Mode of access: <https://www.tillvaxtanalys.se/download/18.62dd45451715a00666f1df8f>.
7. Хоменко О.В. Циркулярна економіка – основа сталого розвитку КНР / О.В. Хоменко. – Ре-

- жим доступу : <https://sinologist.com.ua/homenko-o-v-tsyrkulyarna-ekonomika-osnova-stalogo-rozvytku-knr>.
8. Material research for environmental sustainability in Thailand: current trends / P. Niranatlumpong, N. Ramangul, P. Dulyaprapan, S. Nivitchanyong, W. Udomkitdecha // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2015. – Vol. 16 (3). – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/034601>.
  9. ТОП-10 професій майбутнього [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу : <https://sites.google.com/site/top10profesijmajbutnog>.
  10. ТОП-10 професій майбутнього [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу : <https://roz.otg.dp.gov.ua/ua/novini-ta-podiyi/novini/top-10-profesij-majbutnogo>.
  11. Shivpuri R. Dies and Die Materials for Hot Forging / R. Shivpuri // *ASM Handbook. Metalworking: Bulk Forming*. – Vol. 14A. – ASM International, 2005. – Pp. 47-61. – Mode of access: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14a.a0003975>.
  12. Study and selection of hot forging die materials and hardness / S. Madhankumar, K.R. Hari Narayanan, V. Harini, K.V. Gokulraj, S. Selvakumar, R. Dharshini, K. Dharshini, T.R. Hari Krishnan // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 45 (7). – Pp. 6563-6566. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.472>.
  13. Buchmayr B. Damage, Lifetime, and Repair of Forging Dies / B. Buchmayr // *Berg- und Huttenmännische Monatshefte (BHM)*. – 2017. – Vol. 162. – Pp. 88-93. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0566-3>.
  14. The failure mechanisms of hot forging dies / Z. Gronostajski, M. Kaszuba, S. Polak, M. Zwierzchowski, A. Niechajowicz, M. Hawryluk // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 657. – Pp. 147-160. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.030>.
  15. Tribology in Hot Forging / B.-A. Behrens, A. Bouguecha, I. Lüken, J. Mielke, M. Bistrion // *Comprehensive Materials Processing*. – Elsevier, 2014. – Vol. 5. – Pp. 211-234. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096532-1.00538-0>.
  16. Диамантопуло К.К. Компенсация несоосности системы «пресс-штамп» изношенного штамповочного оборудования / К.К. Диамантопуло, В.В. Кухарь, А.И. Евтеев // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2005. – № 2. – С. 31-34.
  17. Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process / P. Widomski, M. Kaszuba, D. Dobras, O. Zindulka // *Wear*. – 2021. – Vol. 477. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203828>.
  18. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes / D.H. Kim, H.C. Lee, B.M. Kim, K.H. Kim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 166 (3). – Pp. 372-380. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.103>.
  19. Methodology for tool wear analysis by a simple procedure during milling of AISI H13 and its impact on surface morphology / M.T. Prado, A. Pereira, J.A. Pérez, T.G. Mathia // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 13. – Pp. 348-355. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.090>.
  20. Палей М.М. Технология производства приспособлений, пресс-форм и штампов / М.М. Палей. – М. : Машиностроение, 1979. – 293 с.
  21. Боков В.М. Конструювання та виготовлення штампів. Штмп як об'єкт проектування: навчальний посібник / В.М. Боков. – Кіровоград : Поліграфічно-видавничий ТОВ «Імекс-ЛТД», 2005. – 216 с.
  22. Мендельсон В.С. Технология изготовления штампов и пресс-форм / В.С. Мендельсон, Л.И. Рудман. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.
  23. Иващенко В.Ю. Анализ причин разрушения гравюры и повышения стойкости штампового инструмента из стали 5ХНМ с помощью ТЦО / В.Ю. Иващенко // *Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. пр. / ПДТУ*. – Маріуполь, 2006. – Вип. 9. – С. 46-49.
  24. Дудецкая Л.Р. Материалы и технологии изготовления литого штампового инструмента / Л.Р. Дудецкая, Ю.Г. Орлов. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 171 с.
  25. Лыгденов Б.Д. Термоциклирование. Структура и свойства / Б.Д. Лыгденов, Ю.П. Хараев, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 251 с.
  26. Иващенко В.Ю. Использование термоциклирования для обработки штампов / В.Ю. Ива-



щенко, А.П. Чейлях // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 108-112. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/1568>.

**References:**

1. Ijomah W., McAloone T.C., Stahel W.R., Sundgren J.-E., Ahlqvist J. Product design for resource efficiency: Background paper. Stockholm, 2014. 22 p. Available at: <http://www.mistra.org/wp-content/uploads/2018/01/Product-design-for-resource-efficiency.pdf> (accessed 15 December 2020).
2. Stahel W.R. The Utilization-Focused Service Economy: Resource Efficiency and Product-Life Extension. *The Greening of Industrial Ecosystems*, 1994, pp. 178-190.
3. Oosterhuis F.H., Rubik F., Scholl G. Product policy in Europe: new environmental perspectives. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1996. 313 p. doi: **10.1007/978-94-009-0277-0**.
4. Zhou J.-G., Li L.-L., Tseng M.-L., Ahmed A., Shang Z.-X. A novel green design method using electrical products reliability assessment to improve resource utilization. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2021. doi: **10.1080/21681015.2021.1947402**.
5. Fedorchuk Ya., Servetnyk D. *Tsyrukuliarna ekonomika. Orhanizatsiino-pravovi aspekty* (Circular economy. Organizational and legal aspects) Available at: <https://www.businesslaw.org.ua/circle-economic-t> (accessed 05 January 2020). (Rus.)
6. Tanaka I. Promotion of Resource Efficiency in Japan – through 3R (Reduce, Reuse and Recycle) policies. Östersund, ITPS Publ., 2008, 29 p. Available at: <https://www.tillvaxtanalys.se/download/18.62dd45451715a00666f1df8f> (accessed 10 February 2020).
7. Khomenko O.V. *Tsyrukuliarna ekonomika – osnova staloho rozvytku KNR* (The circular economy is the basis of China's sustainable development) Available at: <https://sinologist.com.ua/homenko-o-v-tsyrukulyarna-ekonomika-osnova-stalogo-rozvytku-knr> (accessed 10 February 2020). (Rus.)
8. Niranatumpom P., Ramangul N., Dulyaprapan P., Nivitchanyong S., Udomkitdecha W. Material research for environmental sustainability in Thailand: current trends. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, vol. 16 (3), pp. 1-6. doi: **10.1088/1468-6996/16/3/034601**.
9. *TOP-10 profesii maibutnoho* (TOP-10 professions of the future) Available at: <https://sites.google.com/site/top10profesijmajbutnog> (accessed 10 January 2020). (Rus.)
10. *TOP-10 profesii maibutnoho* (TOP-10 professions of the future) Available at: <https://roz.otg.dp.gov.ua/ua/novini-ta-podiyi/novini/top-10-profesij-majbutnogo> (accessed 10 January 2020). (Rus.)
11. Shivpuri R. Dies and Die Materials for Hot Forging. *ASM Handbook. Metal-working: Bulk Forming*, vol. 14 A, 2005, pp. 47-61. doi: **10.31399/asm.hb.v14a.a0003975**.
12. Madhankumar S., Hari Narayanan K.R., Harini V., Gokulraj K.V., Selvakumar S., Dharshini R., Dharshini K., Hari Krishnan T.R. Study and selection of hot forging die materials and hardness. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45 (7), pp. 6563-6566. doi: **10.1016/j.matpr.2020.11.472**.
13. Buchmayr B. Damage, Lifetime, and Repair of Forging Dies. *Berg- und Huttenmännische Monatshefte (BHM)*, 2017, vol. 162, pp. 88-93. doi: **10.1007/s00501-016-0566-3**.
14. Gronostajski Z., Kaszuba M., Polak S., Zwierzchowski M., Niechajowicz A., Hawryluk M. The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 657, pp. 147-160. doi: **10.1016/j.msea.2016.01.030**.
15. Behrens B.-A., Bouguecha A., Lüken I., Mielke J., Biströn M. Tribology in Hot Forging. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 5, pp. 211-234. doi: **10.1016/b978-0-08-096532-1.00538-0**.
16. Diamantopulo K.K., Kukhar V.V., Evteev A.I. Kompensaciya nesoosnosti sistemy «press-shtamp» iznoshennogo shtampovochnogo oborudovaniya [Compensation for the «press-die» system misalignment of worn-out die-forging equipment]. *Metallurgicheskie processy i oborudovanie – Metallurgical processes and equipment*, 2005, no. 2, pp. 31-34. (Rus.)
17. Widomski P., Kaszuba M., Dobras D., Zindulka O. Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process. *Wear*, 2021, vol. 477, pp. 1-9. doi: **10.1016/j.wear.2021.203828**.
18. Kim D.H., Lee H.C., Kim B.M., Kim K.H. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 166 (3), pp. 372-380. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2004.07.103**.

19. Prado M.T., Pereira A., Pérez J.A., Mathia T.G. Methodology for tool wear analysis by a simple procedure during milling of AISI H13 and its impact on surface morphology. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 348-355. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.090.
20. Palei M. M. *Tekhnolohyia proyzvodstva prysposobljeni, press-form y shtampov* [Technology of production of devices, compression molds and stamps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 293 p. (Rus.)
21. Bokov V.M. *Konstruiuvannia ta vyhotovlennia shtampiv. Shtamp yak ob'iekt proektuvannia: navchalnyi posibnyk* [Design and manufacture of dies. Stamp as an object of design: a textbook]. Kirovohrad, Polihrafichno-vydavychyi TOV «Imeks-LTD» Publ., 2005. 216 p. (Ukr.)
22. Mendelson V.S., Rudman L.Y. *Tekhnolohyia yzghotovleniia shtampov y press-form* [Technology of production of stamps and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 207 p. (Rus.)
23. Ivashchenko V.Yu. Analiz prychn razrusheniia hraviuri y povisheniia stoikosti shtampovoho ynstrumenta yz staly 5KhNM s pomoshchiu TTsO [Analysis of the engraving destruction causes and the increase in the 5CrNiMo steel die-tool life using thermocycling process (TCP)]. *Zakhyst metalurhiinykh mashyn vid polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, Mariupol, 2006, vol. 9, pp. 46-49. (Rus.)
24. Dudetskaia L.R., Orlov Yu.H. *Materyaly u tekhnolohyy yzghotovleniia lytoho shtampovoho ynstrumenta* [Materials and technologies for the manufacture of cast die tools]. Mynsk, Belarus. navuka Publ., 2010. 171 p. (Rus.)
25. Lyhdenov B.D., Kharaev Yu.P., Hreshylov A.D. *Termotsyklyrovanye. Struktura y svoistva* [Thermocycling. Structure and properties]. Barnaul, AltSTU Publ., 2014. 251 p. (Rus.)
26. Ivashchenko V.Yu., Cheiliakh A.P. Ispol'zovanie termociklirvaniya dlya obrabotki shtampov [Using the thermocycling to dies processing]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2011, vol. 22, pp. 108-112. (Rus.)

Рецензент: А.В. Кальянов  
д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 628.4.061-08:622.807.8:656.614.35

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240680

© Кухар В.В.\*

## ОЦІНКА ПИЛОУТВОРЕННЯ НА ВІДКРИТИХ ТЕРМІНАЛАХ МОРСЬКИХ ПОРТІВ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ ТА ЗБЕРІГАННІ ВУГІЛЛЯ

*Проаналізовано стан перевалки кам'яного вугілля у морських портах України у 2019-2020 рр., умови його перевантаження та зберігання з точки зору викидів в атмосферне повітря вугільного пилу та негативного впливу на працівників, навколишнє середовище, прилеглі житлові та сільськогосподарські зони, робочі машини і механізми. Визначені розрахункові параметри для оцінки викидів пилу при перевантаженні вугілля грейферним способом та зберіганні на відкритих складах терміналів морських портів України. Виконано оцінку кількості вугільного пилу, який викидається у атмосферне повітря при перевантаженні і відкритому зберіганні кам'яного вугілля, для загальних масштабів перевалки у морських портах України у вказані роки. Показані перспективи розробки та застосування методів і засобів зменшення кількості пилу при перевантаженні і зберіганні кам'яного вугілля у морських портах.*

**Ключові слова:** кам'яне вугілля, перевантаження, зберігання, викиди вугільного пилу, пилоутворення, морські порти, відкриті склади, грейферний спосіб.

\* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4863-7233, [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)