

УДК 621.785: 621.789.004

В.О.Маковей, к.т.н., доц.
НТУ України «Київський політехнічний інститут, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ШТАМПІВ, ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ

В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на стойкость штампов. Их эксплуатация сопровождается совместным действием двух разрушающих процессов – износа и усталости. Предложен комплексный подход повышения стойкости рабочих элементов штампов, который включает увеличение трещиностойкости штамповой стали термомеханической обработкой и износостойкости нанесением комбинированных твердых покрытий.

Basic factors, influencing on firmness of stamps, are considered in the article. Their exploitation is accompanied the united action of two destroying processes – wear and fatigue. Complex approach of increase of firmness of workings elements of stamps is offered, which includes the increase of fracture toughness of stamp steel thermo mechanical treatment and to wearproofness causing of the combined hard coverages.

Вступ

Складність оцінки стійкості високо навантажених елементів штампного інструменту полягає в тому, що їх експлуатація практично завжди супроводжується сумісною дією двох руйнівних процесів - зношування та втомою, що приводить до виникнення тріщин, їх розвитку та катастрофічного руйнування з великою швидкістю. Вказані процеси взаємодіють і на різних етапах експлуатації штампа вони можуть як прискорювати, так і суттєво гальмувати дію одне одного. Часто використання заходів, які могли зменшити вплив одного процесу, приводить до прискорення іншого процесу. Важливо керувати цими процесами за допомогою зносостійких покриттів. Штампний інструмент працює в умовах пульсуючих циклів навантаження. Після зародження тріщини відбувається її ріст до критичного розміру, який можливо розрахувати по критеріям механіки руйнування. При цьому необхідно враховувати динамічний характер навантаження робочих елементів штампів. Особливо це проявляється при експлуатації карбувальних штемпелів та вирубних штампів, які працюють при швидкостях навантаження до 2 м/с, та молотового оснащення, яке працює при швидкостях навантаження до 10 м/с.

В зв'язку з цим на кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів виконувалось ряд дослідницьких робіт, які були присвячені дослідженню природи руйнування та тріщиностійкості сталей в широкому діапазоні швидкостей навантаження [1, 2], моделюванню росту тріщини [3], створенню комплексу та методики контролю пуансонів та матриць штампного оснащення за допомогою вихоротокової дефектоскопії [4, 5], підвищенню стійкості карбувальних штемпелів [6, 7], впливу поверхневого зміцнення на зношування ріжучих кромки [8, 9]. Роботи з тріщиностійкості сталей та вихоротокової дефектоскопії ушкоджень проводилися разом з філіалом кафедри в Інституті проблем міцності НАН України, з стійкості карбувальних штемпелів - з Банкнотномонетним двором Національного банку України.

Тріщиностійкість сталей в широкому діапазоні швидкостей навантаження

Разом із співробітниками Інституту проблем міцності НАН України був проведений цикл науково-дослідних робіт з динамічного руйнування матеріалів, які дають нові уявлення про природу міцності матеріалів.

Дослідження динамічного руйнування твердих тіл показують ряд ефектів, що суперечать класичним моделям міцності і тріщиностійкості. Природа швидкісної залежності тріщиностійкості в даний час є не до кінця вивченою [1, 2].

При феноменологічному підході опис міцностних властивостей зводиться до введення понять про межу міцності, граничний стан матеріалу, тріщиностійкості. Межі міцності або характеристики тріщиностійкості надається зміст константи матеріалу. У той же час існує кінетичний підхід до опису розвитку руйнування матеріалів [10]. Найважливішою характеристикою кінетичної теорії міцності є час від моменту прикладання навантаження до руйнування конструкції (так названа довговічність), що дозволяє об'єднати і проаналізувати руйнування при різних швидкостях прикладання динамічного навантаження [11].

При експериментальних дослідженнях тріщиностійкості сталей встановлений ефект зростання критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) при зростанні швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень [1]. Значення тріщиностійкості (критичний КІН) збільшується багаторазово в порівнянні із статичним, як для сталей так і для полімерних матеріалів. Якщо в статистиці критичну величину коефіцієнта інтенсивності напружень можна вважати за константу при виконанні умов лінійної механіки руйнування, то в динаміці певні критичні значення тріщиностійкості залежать від швидкості навантаження, способу прикладання навантаження і не є константами.

Внеском у вирішення даної проблеми стала концепція інкубаційного часу [12]. Запропоновано відмовитися від традиційного критерію та вважати, що руйнування настає тоді, коли поточний динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_1(t)$ перевершує в'язкість руйнування K_{1c} протягом деякого мінімального (інкубаційного) часу, який вважають за константу матеріалу. Проте достатня експериментальна перевірка запропонованої концепції відсутня.

Розробка нової методики дослідження руйнування відривом при випробуванні кільцевих зразків при динамічному навантаженні з швидкостями ударника 5...600 м/с (рис.1) дозволила розширити уявлення про природу руйнування [1, 2]. Випробування проводили на пневмопороховому та вертикальному копрах Інституту проблем

міцності НАН України. При випробуваннях на пневмопороховому копрі кільцевий зразок 3 навантажувався внутрішнім імпульсним тиском при стискуванні алюмінієвого циліндра 4 між сталевим ударником 6, який рухається із швидкістю 50...600 м/с, і нерухомих сталевим диском 2 (рис. 2). Вимірювальним комплексом, який включає два електронні осцилографи і секундоміри, реєстрували сигнали від датчиків пружної деформації 1 і атичка розриву 2, який контролює початок руху тріщини (див. рис. 2б).

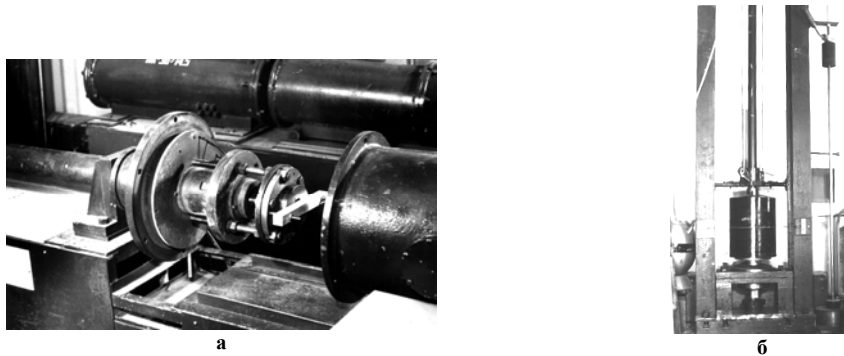


Рис.1.Фотографії стендів для випробувань на тріщиностійкість: а- на пневмопороховому копрі, б- на вертикальному копрі

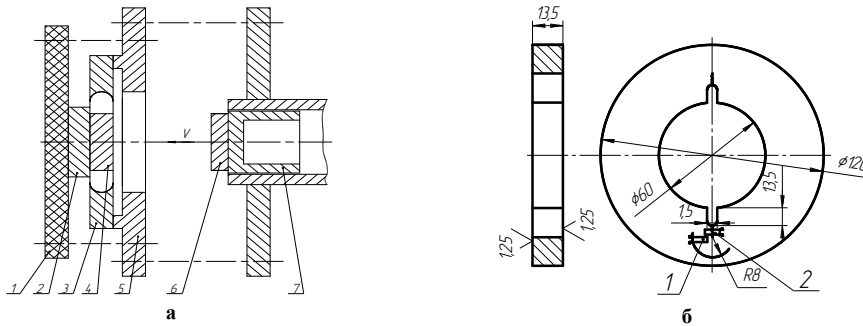


Рис.2. Схеми випробувань кільцевих зразків (а) та наклейки на них датчиків (б)

У експериментах по руйнуванню кільцевих зразків з двома радіальними тріщинами з використанням схем випробувань (див. рис. 2) [1,2] досліджували вплив швидкості навантаження і низької температури на динамічну довговічність, було визначено час до настання критичного стану t_c (довговічність) і інкубаційний час динамічного руйнування t_{inc} (затримка руйнування). Час до зрушення тріщини оцінювався реєстрацією сигналів від тензорезисторів, наклеєних перед тріщиною (див. рис.2), за допомогою вимірювального комплексу, що включає електронні осцилографи. Результати випробувань показують існування для різних сталей свого характерного інкубаційного часу (затримки руйнування), який визначається по формулі

$$t_{inc} = \frac{K_{1d} - K_{1c}}{K_1'} \quad (1)$$

Підтверджується гіпотеза Кальтхофа [13], відповідно до якої вершина тріщини при імпульсному навантаженні повинна випробувати дію надкритичного КІН, яке значно більше статичного $K_{1d} > K_{1c}$, починаючи з певного мінімального часу до початку швидкого розповсюдження тріщини.

Цей інтервал часу названий інкубаційним періодом. Причому припущено, що якщо КІН поволі збільшується в часі, то затримка руйнування, яка пов'язана з цим, мала або відсутня, як в разі випробувань на вертикальному копрі.

У таблиці 1 приведені результати випробувань різних класів сталей з вимірюванням часу від початку навантаження до зрушення тріщини і оцінкою інкубаційного часу по формулі (1) з урахуванням впливу швидкості зміни КІН і температури випробувань.

Таблиця 1

Результати досліджень тріщиностійкості і часу руйнування сталі

№ п/п	Марка сталі	КІН, МПа·м ^{0,5}	Швидкість зміни КІН, МПа·м ^{0,5} /с	Температура випробування	t_c , мкс	t_{inc} , мкс
1.	Сталь 40Х	117...141	1,2...2·10 ⁻⁷	293 К	8,83	5,34
2.	Сталь 40Х	193...219	2,1...3·10 ⁻⁷	293 К	8,4	6,4
3.	Сталь Ст 3	336...380	2,3...2,8·10 ⁻⁷	293 К	14,3	11,4
4.	Сталь Ст 3	240...300	1,6...2,2·10 ⁻⁷	153 К	9,6	5,2
5.	Сталь ($\sigma_B=1100$ МПа)	630...670	1,6...2·10 ⁻⁷	293 К	35...39	
6.	Сталь ($\sigma_B=1100$ МПа)	620...690	3,2...3,5·10 ⁻⁷	213 К	19,3...19,7	
7.	Сталь ($\sigma_B=1100$ МПа)	650...700	6,5...7,3·10 ⁻⁷	153 К	10...9,6	

Ці дослідження допомогли створенню спеціальних броньових низьковуглецевих сталей з наноструктурою, міцність ($\sigma_B = 1100$ МПа) та тріщиностійкість яких в 2...3 рази перевищує міцність і тріщиностійкість відомих низьковуглецевих сталей (див. табл.1). При цьому час до зрушення тріщини в залежності від температури також збільшується в 2...3 рази.

Висока в'язкість руйнування цих сталей і обмежені товщини листових матеріалів не дозволяють проведення статичних випробувань для визначення критичних характеристик тріщиностійкості. При статичному і циклічному розтягуванні плоских зразків з в'язкої сталі з тріщиною перед настанням критичного стану (коли тріщина починає швидко розповсюджуватися) спостерігається стадія повільного стійкого її зростання [14]. Цій стадії надається велике значення, що привело при дослідженні механічних властивостей матеріалів до розвитку методів визначення діаграм руйнування $K_I - R$, $J_I - R$ [15]. Були проведені чисельне моделювання стійкого зростання тріщини з визначенням поточних значень енергетичного параметру руйнування J -інтеграла, розкриття тріщини та кута розкриття тріщини.

Дослідження розкриття тріщини при її зростанні показує, що в початковий момент (момент зрушення) вершина тріщини затупляється, а при подальшому її зростанні вона стає гострою. Подібний ефект також виявляється при аналізі залежності кута розкриття тріщини α від приросту її довжини. Запропоновано двох параметричний критерій переходу від повільного стійкого зростання тріщини в катастрофічне руйнування:

$$J_{I(n)} < J_{I(n+1)}, \quad \alpha_n = \alpha_{(n+1)}, \quad (2)$$

де - поточні розрахункові значення J -інтеграла на (n) і $(n+1)$ - кроці розрахунку, - поточні розрахункові значення кута розкриття на (n) і $(n+1)$ - кроці розрахунку.

В зв'язку з тим, що штамповий інструмент експлуатується при невисоких швидкостях до 10 м/с, а штампіві сталі руйнуються крихко, то при випробуваннях на тріщиностійкість обмежуються ударною в'язкістю, яка визначається на копрах.

Зносостійкість сталей та зносостійких покриттів

Підвищення зносостійкості деталей машин та штампового оснащення є одним з важливих завдань в машинобудуванні. З цієї метою інтенсивно проводять розробки і дослідження різноманітних методів нанесення та зносостійкості твердих покриттів.

Нові види термічної та поверхневої обробки з підвищення стійкості штампів не можливо рекомендувати без проведення прямих випробувань на зносостійкість та втому. Методи, які побічно оцінюють вплив поверхневої обробки не дають об'єктивної картини.

На кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів (МПМ та РП) розроблений комплексний підхід для оцінки впливу термічної та поверхневої обробки, який включає вимірювання мікротвердості покриття, ударної в'язкості основного матеріалу, дослідження зносостійкості та коефіцієнта тертя покриттів на машині тертя (рис.3), зношування ріжучих кромки ножів при різанні дроту на установці з автоматичною подачею дроту (рис. 4). Дослідження показують, що серед технологічних процесів, які зміцнюють ріжучі кромки вирубних та пробивних штампів, найбільш ефективними можуть бути: комбіноване зміцнення, що включає електроіскрове легування (ЕІЛ) твердим сплавом та поверхневе пластичне деформування обкочуванням (рис. 5), або ЕІЛ твердим сплавом та графітом. Для штампів для об'ємного гарячого штампування ефективним зміцненням робочих поверхонь може бути іонне азотування та ЕІЛ твердим сплавом. Дослідження та аналіз експлуатації штампів із зносостійкими покриттями робочих елементів показали обмеженість їх використання, що пов'язано, наприклад, при іонному азотуванні з відпуском пуансонів та матриць, при ЕІЛ ріжучих кромки з погіршенням чистоти поверхні, при іонно-плазмовому вакуумному нанесенні нітриду титану з малою товщиною покриття.

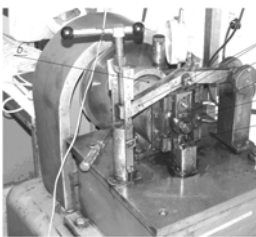
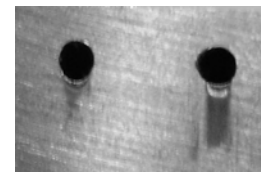


Рис.3. Фотографія машини для випробувань на тертя та зношування



Рис.4. Фотографії установки для дослідження зношування ріжучих кромки (а) та ножа без зміцнення після випробувань (б): 1 отвір - 8 тис. штампоударів; 2 отвір - 10 тис. штампоударів



б)



Рис. 5. Фотографії технологічних процесів: ЕІЛ - а) та обкочування кулькою - б)

На кафедрі МПМ та РП розроблені обладнання та технологія для створення комбінованих покриттів, яка включає установку для ЕПІ та пристрій для обточування кулькою (див. рис.5) з використанням токарно-гвинторізного верстату.

Основні напрямки зі створення та дослідження зносостійких покриттів пов'язані з наступним.

Відсутність досліджень механізмів зношування штампів після поверхневого зміцнення потребує дослідження поверхневих зміцнень за різними технологіями за одною методикою та проведення фрактографічних досліджень зношених поверхонь.

Більшість відомих зносостійких покриттів мають свої переваги та недоліки з точки зору використання, але практика показує, що нанесення одного шару покриття не забезпечує комплекс потрібних властивостей, тому потрібно створювати та досліджувати багатшарові покриття із змінними властивостями та хімічним складом.

Стійкість штампного інструменту

Ефективність технологічних процесів ковальсько-штампувального виробництва залежить від стійкості штампного інструменту.

До основних видів руйнування штампів слід віднести наступні:

- виникнення тріщин на робочих поверхнях штампів при термоциклюванні мають місце в процесах гарячого об'ємного штампування;
- виникнення тріщин на робочих поверхнях карбувальних штемпелів, які визвані розтріскуванням твердих зносостійких покриттів з нітриду титану або нітриду хрому;
- руйнування пуансонів для зворотного видавлювання, коли поверхня руйнування під кутом або перпендикулярно вісі пуансону;
- викривлення та зношування робочих кромки вирубних штампів;
- виникнення мікротріщин на гравіюрах матриць для рельєфного карбування ювелірних виробів.

Підвищення стійкості штампів носить комплексний характер, який враховує значну кількість факторів. К числу основних факторів необхідно віднести наступні: тип штампної сталі, з якої виготовляють пуансони і матриці; спосіб загартування сталей, який змінює їх механічні властивості і структуру; матеріали, які обробляються; спосіб поверхневого зміцнення робочих елементів. Не існує єдиної думки відносно показника механічних властивостей, який можливо використовувати для прогнозування зносостійкості штампів. Оцінка зносостійкості матеріалів тільки по твердості не дозволяють виявити найбільш зносостійких сталей, тому що сталі різного хімічного складу при рівній твердості мають різну зносостійкість, в цьому випадку більше впливає ударна в'язкість

Різним видам ушкоджень робочих елементів штампів відповідають різні механізми. Після експлуатації пробивних та вирубних штампів, що складає приблизно 20% від загального ресурсу, поверхневий шар руйнується та формується нова топографія контактної поверхні ріжучих кромки. Об'єм зруйнованого матеріалу при цьому складає близько 80% від припустимого. В контактній зоні проходять структурні перетворення в інтервалі навантажень $2 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$ циклів. Залишковий аустеніт під дією пластичної деформації перетворюється в мартенсит. При подальшому збільшенні числа циклів навантаження змінюється механізм зношування ріжучих кромки із адгезійного та абразивного на малоцикловий втомний. Окрім цього, із збільшенням числа циклів навантаження до $7 \cdot 10^3$ збільшуються термічний вплив в зоні тертя та налипання матеріалу, який обробляється. Під дією температур твердість ріжучих кромки зменшується. Починається лавинна стадія зношування. Взаємодія торцевих частин інструменту з заготовкою відбувається по вузьким контактним поясам, в яких матеріал заготовки пластично деформується і переміщується по торцевим поверхням інструменту. Механізм зношування пробивних пуансонів в значній мірі залежить від товщини сталей, які обробляються. На рис.6 наведені фотографії пуансонів, які працюють в складних умовах, коли товщина сталюго листа дорівнює діаметру пуансона.



Рис.6. Зношування та руйнування пробивного пуансона (збільшення в 10 разів): по торцю - а) та по боковій поверхні - б)

Дослідження [8-9] показали, що для підвищення стійкості штампу необхідно створити на поверхні ріжучих кромки шар матеріалу із структурою та комплексом властивостей, які мають максимальну стійкість до різних типів впливу та гальмують негативні структурні перетворення в процесі роботи штампу. Висока ефективність використання покриттів обумовлена тим, що зона активації поверхні при терті невелика. Глибина її не перевищує 10-15 мкм. Саме тому при нанесенні покриттів всі основні взаємодії локалізуються в шарі покриття. Покриття грають роль екрану, який захищає поверхні ріжучих кромки від пошкоджень, налипання матеріалу заготовки, особливо на стадії припрацювання. Необхідно забезпечити мінімальне пошкодження ріжучих кромки і сталість термомеханічної активації поверхні до моменту адаптації. Це досягається, в першу чергу, за рахунок забезпечення високої твердості покриття. Підвищення мікротвердості і відповідно межі текучості збільшує опір напруженням, які викликають змінання ріжучих кромки.

Як показують дослідження [6] стійкість карбувальних штемпелів, внаслідок впливу випадкових чинників може відрізнятись на порядок. Це пов'язано з тим, що процес руйнації, який викликаний втому, включає дві стадії: стадію зародження тріщини, на яку впливає стан поверхні та концентрація напружень, і стадію поширення (локалізованої руйнації) (рис.7а). Для кожної з них визначальними є свої механізми. Підвищення характеристик тріщиностійкості та

зменшення смуги розсіювання кількості карбувань до руйнації штемпелів можливо шляхом холодного видавлювання заготовок штемпелів форма, яких максимально наближена до форми штемпеля [7].

Ще одним фактором, що впливає на стійкість штемпелів, є зносостійкість зображення. При застосуванні штемпелів, що мають поверхню, яка покрита нітридом титану, стійкість визначається не матеріалом штемпеля, а властивостями покриття (рис.7б). Зменшити розтріскування покриття можливо нанесенням багатшарових зносостійких комбінованих покриттів із змінними властивостями та хімічним складом.

Руйнування пуансонів та штемпелів супроводжується виникненням тріщин на робочих поверхнях. У більшості випадків тріщини виникають у місцях концентрації напруження. Нерідко вони утворюються і на торці пуансона вздовж твірних або мають довільний напрямок. Тріщини в поверхневому шарі приводять до руйнування пуансонів та штемпелів. Макроскопічний аналіз поверхні зламу свідчить про руйнації, що мають втомний характер (див.рис.7а). Відмінною рисою таких руйнувань є те, що матеріал руйнується під дією циклічних навантажень, менших номінальної межі витривалості матеріалу штемпеля, що пов'язано з впливом концентрації напружень, наприклад, в зоні галтельного переходу.



Рис.7. Руйнування карбувального штемпеля в поперечному напрямку зони галтельного переходу - а) та тріщини на робочій поверхні - б)

Одним з ефективних способів керування структурою і фізико-механічними властивостями матеріалів, які впливають на руйнування, є пластичне деформування в умовах високих гідростатичних тисків. Зміни в будові, які з'являються в матеріалі в результаті такої обробки, багато в чому визначають механізм і кінетику фазових структурних перетворень при термічній обробці, характер остаточної структури і фізико-механічні властивості матеріалів. Ефективність термо-механічної обробки з попередньою деформацією заготовок методом холодного гідропресування в більшій мірі виявляється при обробці високоміцних легованих інструментальних сталей [7]. Тому становить інтерес оцінити вплив підвищеного гідростатичного тиску на експлуатаційні властивості матеріалів цього класу.

Вивчення закономірностей впливу об'ємного пластичного деформування інструментальної сталі на механічні характеристики є достатньо складною проблемою. З тих заготовок, що отримані в проведених дослідженнях, не можливо виготовити зразки стандартних розмірів, які передбачені відповідними ГОСТами та ДСТУ. Тому були розроблені "нестандартні" зразки, які по можливості пропорційні за розмірами стандартним.

На різних етапах експлуатації штампів для карбування та видавлювання виникає необхідність дефектоскопічного контролю наявності тріщин. Удосконалення методів дефектоскопічного контролю направлені на розробку інформаційних підходів, що дозволяють не тільки визначати місцезнаходження тріщин, але і їх візуалізувати. З використанням розробленого раніше вихоротокового імпульсного дефектоскопа [4, 5] в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Пісаренко створений для цієї мети вимірвальний комплекс для візуалізації пошкоджень. На базі розробленого вихоротокового імпульсного дефектоскопа, з використанням середовища програмування LABVIEW, розглянута можливість реалізації віртуального дефектоскопа (рис. 8), що має ширші функціональні можливості в порівнянні з його реальним аналогом. У разі дефектоскопії пуансонів і матриць для прискорення процесу контролю можливе застосування плоского датчика з горизонтальним розташуванням стрижня з намотаною котушкою або декілька вертикальних, одночасно підключених до віртуального дефектоскопа (рис. 8б). Виявлені дефекти залежно від їх впливу на службові властивості пуансонів і допустимі розміри тріщин визначаються з використанням лінійної механіки руйнування. Після випуску 1000...10000 деталей необхідно проводити повторний контроль пуансонів і матриць з реєстрацією вимірювань за допомогою комп'ютера. У разі перевищення розмірів тріщин допустимих величин проводиться ремонт пуансонів і матриць, наприклад полірування або шліфівка робочих поверхонь.

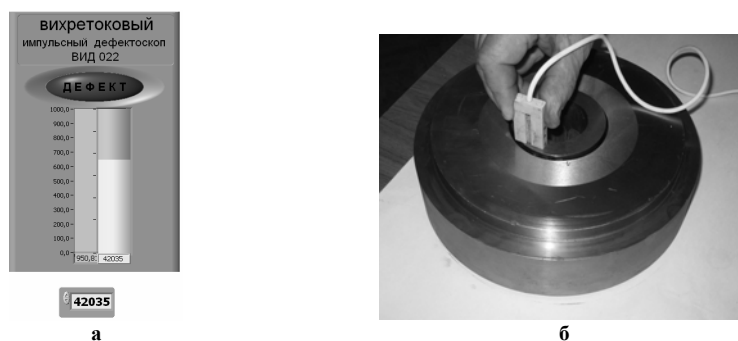


Рис.8. Лицева панель віртуального дефектоскопа на екрані монітору (а) та контроль матриці плоским датчиком (б)

Висновки

1. Дослідження показали, що експлуатація важко навантажених елементів штамів практично завжди супроводжується сумісною дією двох руйнівних процесів - зношування та втомою, що приводить до виникнення тріщин та руйнування. Вказані процеси взаємодіють і на різних етапах експлуатації штампа вони можуть як прискорювати, так і суттєво гальмувати дію одного.

2. Підвищення стійкості штамів носить комплексний характер, що включає збільшення характеристик тріщиностійкості штампових сталей термомеханічною обробкою з попередньою деформацією заготовок методом холодного гідропресування, підвищення зносостійкості робочих елементів шляхом нанесення багатшарових зносостійких комбінованих покриттів із змінними властивостями та хімічним складом, дефектоскопічного контролю наявності мікротріщин.

3. Основними напрямками з підвищення стійкості штамів є розробка ефективних способів керування структурою та тріщиностійкістю сталей, які впливають на руйнування та зносостійкість; технологій зі створення багатшарових зносостійких аморфних та наноструктур в поверхневих шарах робочих елементів, що включають іонно-плазмову імплантацію азоту.

Список літератури

1. Степанов Г.В., Маковей В.А. Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов. – К.: Наукова думка, 1993. – 143с.
2. Маковей В.О. Природа руйнування сталей при імпульсному навантаженні// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2009. - № 4. – С. 85-91.
3. Маковей Ю.А., Маковей В.А. Численное моделирование роста радиальной трещины в стальном кольцевом образце // Вестник НТУУ «КПІ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПІ». – 2009. - №56. – С. 36-56.
- 4.Васинюк І.М., Писаренко Г.Г., Маковей В.О., Войналович О.В. Вихорструмовий дефектоскоп. Патент України на промисловий зразок. Бюлетень №1, 15.02.2001.
- 5.Маковей В.А., Васинюк І.М., Васинюк С.І. Дефектоскопія важконавантажених деталей штамів// Вестник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». - 2009. - №32. – С. 122-126.
- 6.Маковей В.О., Стародуб М.П. Стійкість карбувальних штемпелів // Удосконалення процесів та обладнання обробки металів тиском в металургії та машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. - Краматорськ, 2005.-С. 599-601.
- 7.Маковей В.О., Стародуб М.П., Калюжний В.Л., Шидловський М.С., Стафієнко В.В. Проблеми підвищення стійкості карбувальних штемпелів// Обработка материалов давлением. – 2008. - №1 (19). - С. 316-322.
- 8.Маковей В.А., Бородій Ю.П. Повышение стойкости разделительных штампов// Вестник НТУУ «КПІ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПІ». – 2004. - №45. – С. 35-38.
9. Маковей В.О., Бородій Ю.П. Вплив поверхневого зміцнення на характер зношування ріжучих кромок// Вестник НТУУ «КПІ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПІ». – 2007. - №50. – С. 111-117.
- 10.Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 239, №6. – С.1316-1319.
11. Инденбом В.Л., Орлов А.Н. Долговечность материала под нагрузкой и накопление повреждений. // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 43, №3. – С.469 - 492.
12. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. О концепции структурного времени в теории динамического разрушения хрупких материалов. // Доклады Академии наук. – 1992. – т. 324, №5. – С. 964 - 967.
13. Kalthoff J.F. Fracture behavior under high rates of loading// Engineering fracture mechanics. – 1986. –23, №1. – S. 289-298
14. Ирвин Дж., Парис П. Анализ упругопластического состояния в вершине трещины при помощи R – кривых. В сб. Механика разрушения. Разрушение материалов. Под редакцией Д. Тэплина. – М.: Мир, 1978. – С. 9-18.
15. Писаренко Г.С., Науменко В.П., Волков Г.С. Определение трещиностойкости материалов на основе энергетического контурного интеграла. - К.: Наук. думка, 1978. – 124 с.