

## Моніторинг процесів тріщиноутворення в робочих деталях технічних систем ковальсько-штампувального виробництва

У статті наведені результати дослідження і оцінки методики прогнозування тріщиноустійкості елементів конструкції технологічного оснащення під час виконання штампувальних операцій. Представлені основні математичні залежності, що визначають поведінку тріщини. Запропоновано практичне застосування зазначеної методики під час процедур фахового супроводження і проектування технічних систем ковальсько-штампувального виробництва

**тріщина, в'язкість руйнування, штампування, енергія, шлях тертя, зусилля**

Конкурентоспроможність сільськогосподарської техніки на галузевому ринку прямим чином пов'язана з їх якістю. Між тим досягненню стабільності технічних показників сільгоспмашин до рівня стандартів ISO перешкоджає недостатність технологічної підготовки виробництва, зокрема, і штампувального. Так, на ВАТ «Червона Зірка» фактично згорнуто інструментальне виробництво, відчувається гострий дефіцит кваліфікованих робітників по виготовленню штампів тощо. В таких умовах особлива увага має бути приділена питанням якісного супроводження діючого штампового оснащення, зокрема стійкості штампів від появи тріщин.

Сучасні методи нелінійної механіки руйнування дозволяють прогнозувати момент тріщиноутворення, однак переважно з теоретичної точки зору. В даній статті розглянуто моніторинг тріщиноустійкості елементів технічних систем (ТС) ковальсько-штампувального виробництва у виробничих умовах, коли обладнання зайняте виконанням конкретної програми випуску продукції. Тоді головним завданням є моніторинг подальшої поведінки тріщини, що розкрилася, у певному місці супроводжуваної ТС. Адже не виключено, що запас накопичуваної в ТС після кожного робочого циклу деформування енергії буде *менше* значень, критичних для даних умов роботи обладнання. Відповідно, тріщина у подальшому не буде розповсюджуватись. При цьому поле напружень, що виникає навколо тріщини в процесі її зародження та розвитку може ініціювати роботу найближчих джерел дислокацій  $D_1$   $D_2$   $D_3$  (рис.1), з одночасним гальмуванням швидкості розвитку тріщини та провокуванням пластичного плину металу на інших ділянках (наприклад, в площинах  $A'B''$ ,  $A''B''$ , див. рис.1).

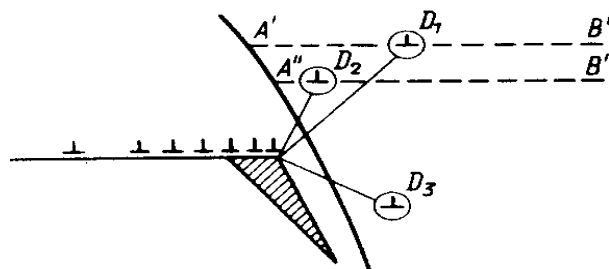


Рисунок 1 – Схема виникнення скупчення дислокацій із подальшим утворенням тріщини

Одиничні випадки прогнозування процесів тріщиноутворення ( а також перелік застережних заходів) описані в [1], проте вони стосуються головним чином виробничих дефектів, допущених під час виготовлення ТС, а не власне систем, які експлуатуються у виробничих умовах впродовж тривалого проміжку часу.

Розглянемо складові контактних тисків на поверхнях, схильних до тріщиноутворення під час роботи ТС. Очевидно, що у випадку, коли сума значень контактного тиску мікронерівностей  $p_a$  та тиску мастильної плівки (або іншого проміжного шару)  $p_f$  перевищить значення критичного тиску пошкодження  $p$  (див. рис.2) , то розвиток поверхневої тріщини піде прогресуючим шляхом.

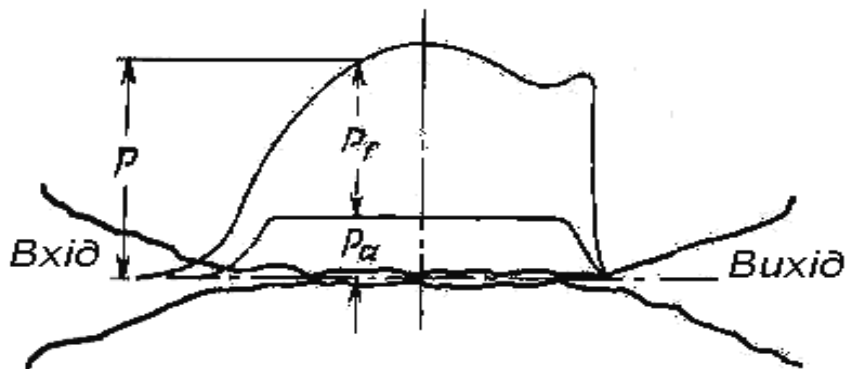


Рисунок 2 – Схема виникнення умов для поверхневого пошкодження робочих поверхонь

В якості прикладу фахового супроводження технологічного оснащення було обрано пару “пуансон-матриця” III переходу холодного висаджування деталі «Болт спеціальний» (див. рис. 3 ).

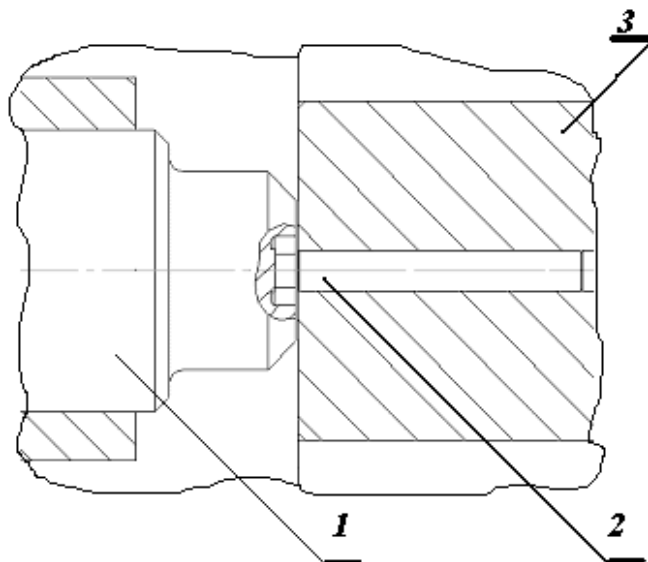


Рисунок 3 – Схема переходу : 1 – пуансон; 2 – деталь; 3 – матриця

Вихідні дані:

- пуансон – суцільний, із сталі X12M;
- матриця – бандажована (вставка із твердого сплаву ВК15, корпус – із сталі 30ХГСА).

Визначаємо величину напруження біля ведучого кінця тріщини критичної довжини. Цей параметр визначається критерієм Ірвіна

$$k_1^c = 276 - 1,774\sigma_T - 3,99\psi + 0,062\sigma_T\psi \text{ (кг/мм}^{1,5}\text{)},$$

де  $\sigma_T$  – межа міцності матеріалу інструменту;  $\psi$  – відносне стоншення.

Зазначені дані для прийнятих матеріалів матриці та пуансона наведені в табл.1:

Таблиця 1 – Механічні характеристики інструментальних матеріалів

Матеріал	HRC(A)	$\sigma_T$ , МПа	$\psi$ ,%	E, ГПа	$\mu$
X12M	60-64	3100	38	225	0,26
BK15	84-88	1600	8	395	0,34

Тоді для сталі X12M

$$k_1^c = 276 - 1,774 \times 310 - 3,99 \times 0,38 + 0,062 \times 310 \times 0,38 = 304,8.$$

Для твердого сплаву BK15

$$k_1^c = 276 - 1,774 \times 160 - 3,99 \times 0,08 + 0,062 \times 160 \times 0,08 = 39,6.$$

Визначаємо кількість циклів опору розповсюдженню тріщини

$$N_p = -10530 + 103,1\sigma_T + 16,4\psi + 4,2T,$$

де  $T = 80^0$  – температура інструменту під час холодного висаджування.

Для сталі X12M

$$N_p = -10530 + 103,1 \times 310 + 16,4 \times 38 + 4,2 \times 80 = 22390,2 \text{ (циклів)}.$$

Для твердого сплаву BK15

$$N_p = -10530 + 103,1 \times 160 + 16,4 \times 8 + 4,2 \times 80 = 6433,2 \text{ (циклів)}.$$

Обидва значення  $N_p$  значно менші за нормативні значення стійкості, отже вірогідність виникнення мікротріщин достатньо висока. Таким чином, фахове супроводження умов експлуатації інструменту є безумовно необхідним. Встановлюємо значення критичної амплітуди пластичної деформації деталей технологічного оснащення, яка необхідна для тріщиноутворення

$$\varepsilon_p = \frac{\psi}{2N^\gamma}, \quad (1)$$

де  $\gamma = 0,38 - 0,5$  – коефіцієнт.

Для сталі X12M

$$\varepsilon_p = \frac{38}{2 \times 22390^{0,38}} = 0,4224.$$

Для твердого сплаву BK15

$$\varepsilon_p = \frac{8}{2 \times 6433,2^{0,5}} = 0,0498.$$

Закономірно, що для твердого сплаву амплітуда критичного тріщиноутворення практично на порядок менша, оскільки пластичність сплаву дуже низька. Обчислюємо значення роботи тріщиноутворення

$$A_y = \varepsilon_p \sigma_T \sin n\tau. \quad (2)$$

Оскільки  $n_{\max} = 105$  (холодне висаджування виробу проводили на багатопозиційному холодновисаджувальному автоматі АБ1922), то цикл штампування

$$\tau = \frac{60}{105} = 0,571(c).$$

Для сталі X12M

$$A_y = 0,4224 \times 310 \times \sin 0,571 \times 105 = 553,1075 \text{ (н} \cdot \text{мм)}.$$

Для твердого сплаву BK15

$$A_y = 0,0498 \times 160 \times \sin 0,571 \times 105 = 69,003 \text{ (н} \cdot \text{мм)}.$$

Для якісного інженерного моніторингу експлуатації інструменту необхідно визначити умови щодо подальшого розповсюдження тріщини. Енергія, яка потрібна для цього процесу

$$G_{1c} = \frac{k_1^c (1 - \mu^2)}{E}. \quad (3)$$

Для сталі Х12М

$$G_{1c} = \frac{304,8^2 (1 - 0,26^2)}{22500} = 38,499 (\text{н} \cdot \text{мм}).$$

Для твердого сплаву ВК15

$$G_{1c} = \frac{39,6^2 (1 - 0,34^2)}{39500} = 0,351 (\text{н} \cdot \text{мм}).$$

Порівнюючи отримані із використанням залежностей (1)...(3) дані, встановили, що для обох деталей  $A_{II} > G_{1c}$ , отже розповсюдження тріщини в процесі роботи інструменту матиме місце. Стосовно матриці цю проблему можна зняти повторним бандажуванням вставки. Для пуансону потрібно було додатково розрахувати значення розкриття тріщини

$$[\delta] = \frac{k_{1c}^2}{\sigma_T E} = \frac{304,8^2}{22500 \times 310} = 0,0133 (\text{мм}).$$

Звідси критична довжина тріщини

$$L_{кр} = \frac{k_{1c}^2}{\pi \sigma_T} = \frac{304,8^2}{\pi \times 310^2} = 0,3077 (\text{мм}).$$

Оскільки  $[\delta] < L_{кр}$ , то тріщина розкриється, але далі розповсюджуватися не буде. За умов ретельного дотримання режимів штампування процес зношування пуансону буде йти “нормальним” шляхом.

Подальший моніторинг тріщиностійкості проводили з урахуванням змін у товщині та фізико-механічних властивостях масляної плівки, яка наноситься на заготовку. Досліджені типи технологічних мастил, що мають найбільш поширене застосування в технологіях штампування (див. табл.2).

Таблиця 2 – Фізико-механічні параметри технологічних мастильно-охолоджуючих речовин

Марка/вид технологічного мастила	Кінематична в'язкість $\eta$ , м <sup>2</sup> /с	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1. Мило господарче (50%) +H <sub>2</sub> O	0,05	700
2. Масло машинне И20А	0,8	900
3. Вазелін технічний	2	950
4. Мастило графітізоване УСсА	2,25	2250

Коефіцієнт ефективності діагностованих видів технологічних мастил

$$k = \frac{\pi d_k^2 (h_3^o - h_3^k)}{4 F_{mn}}, \quad (4)$$

де  $h_3^o$  та  $h_3^k$  – висота досліджуваних зразків відповідно до деформації та після деформації зусиллям  $P = \text{const}$ ;

$F_{mn}$  – площа контактної поверхні зразка (а, отже, і кінцева площа шару технологічного мастила) після деформації.

Експерименти по діагностуванню технологічних мастил проводили на універсальній випробувальній машині УИМ-50 в діапазоні технологічних зусиль 500 кН та швидкості переміщення рухомого бойка  $v = 1,08$  мм/с. Узагальнені результати дослідів та розрахунків наведені у табл. 3.

За результатами досліджень провели моніторинг змін умов тріщиноутворення при наявності на контактних поверхнях інструменту масляної емульсії на базі машинного масла И20А. Використано методику Фогельполя [3] для оцінки екрануючої здатності мастильних плівок в умовах значних питомих тисків. Зокрема, поправочний коефіцієнт, що враховує зміну умов тертя при наявності мастильного середовища

$$k_F = 1 - \frac{\eta v_d}{\sigma_s \varphi^2 L_{mp}}, \quad (5)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість мастила;

$v_d$  – швидкість переміщення робочого інструменту;

$\varphi = z/s$  – відносний технологічний зазор.

Таблиця 3 – Експериментальні значення параметрів мастильних речовин, обчислені за (4)

Марка/ вид технологічного мастила	k	h <sub>k</sub> , мм	d <sub>k</sub> , мм	F <sub>тп</sub> , мм <sup>2</sup>
Мило господарче (50%) +H <sub>2</sub> O	4,96	13,0	24,15	457,83
Масло машинне И20А	5,20	13,1	24,35	465,40
Вазелін технічний	4,87	13,1	24,05	454,04
Мастило графітізоване УСсА	5,0	12,9	24,2	459,72

Тоді фактичне число циклів до початку стадії прогресивного зношування

$$N_\phi = \frac{N_n}{k_F}.$$

Порівнюючи отримані за допомогою залежності (5) значення  $N_\phi$  та  $N_n$ , можна зробити висновки щодо переважання конкретного механізму зношування та вжити потрібних заходів щодо підвищення стійкості. Хоча дослідження Фогельполя були виконані з метою визначення умов тертя в артилерійських системах, положення цієї теорії справедливі і для процесів штампування. Це пояснюється тим, що при дослідженні трібологічних умов роботи ТС до уваги приймають не відносну швидкість  $v$  контактуючих тіл, а параметр  $[pv]$ , де  $p$  – максимальний питомий тиск на контактні поверхні.

Таким чином, моніторинг тріщиностійкості робочих деталей та вузлів технічних систем ковальсько-штампувального виробництва доцільно проводити у такій послідовності:

– визначити умови зародження внутрішньої або зовнішньої тріщини у найбільш навантаженій технологічними зусиллями деталі штампувального оснащення, обладнання тощо;

– встановити факт стабільності тріщини та ймовірності її подальшого розповсюдження; якщо останнє є цілком вірогідним, розробити заходи щодо запобігання цьому процесу;

– проаналізувати очікуване значення тріщиностійкості матеріалу деталі, яка підлягає моніторингу; при необхідності оптимізувати склад мастильно-охолоджуючого середовища.

## Список літератури

1. Шнейберг В.М., Акаро И.Л. Кузнечно-штамповочное производство Волжского автомобильного завода. М.: Машиностроение, 1977.
2. Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюменауэра. Пер. с нем. М.: Metallургия, 1979.
3. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. Пер. с англ. М.: Мир, 1982.

В статье приведены результаты исследования и оценки методики прогнозирования трещиностойкости элементов конструкций технических систем кузнечно-штамповочного производства. Представлены основные математические зависимости, определяющие поведение трещины. Предложено практическое применение описанной методики при профильном сопровождении оборудования и штампов.

In the article is given the results of research and estimation of metal forming technical systems elements and knots failure prognosis method. The basic mathematical expressions of failure conditions are represented. Practical using of these methods during the profile monitoring of forming equipment are proposed.