

## Фахове супроводження змін у топографіях контактних поверхонь робочих деталей штампів холодного об'ємного штампування

У статті наведені результати дослідження методики прогнозування довговічності робочих деталей штампів під час виконання ними штампувальних операцій. Представлені основні математичні залежності, що визначають окислювальне зношування та руйнування інструменту. Запропоновано практичне застосування зазначеної методики під час процедур фахового супроводження і проектування оснащення для холодного об'ємного штампування

**тріщина, окислювальне зношування, штампування, тертя, хемосорбція, зусилля, ресурс пластичності**

Довговічність та надійність деталей посівних і ґрунтообробних машин у значній мірі залежить від якості технологій їх штампування. Зокрема, стабільність показників виробів після холодного висаджування інколи стає підставою для рекламацій на продукцію ВАТ «Червона Зірка» з боку експлуатаційників продукції підприємства.

Важливою частиною фахового супроводження штампів холодного висаджування є моніторинг складу поверхні робочих деталей. Його суть полягає у визначенні інтенсивності зношування пуансонів залежно від змін у хімічному складі штампової сталі. Особливо суттєвим питання окислювального зношування інструменту постає стосовно штампів, які встановлюються на швидкохідних автоматах і, отже, працюють в умовах відносно високих (до 80–120°C) температур. Механізм реакцій активації на контактних поверхнях схематично представлений на рис.1. В системі з граничним змащенням виникає хемосорбція, коли молекули мастила утримуються на поверхні хімічними зв'язками. В порівнянні з фізичною адсорбцією вона неповністю зворотна і має більш високу теплоту адсорбції (фізична адсорбція 8000–42000 Вт/моль, хімічна адсорбція 42000–420000 Вт/моль) [1]. Добре відомим прикладом хемосорбції в системі з граничним змащенням є реакція стеаринової кислоти з оксидом заліза в присутності води з виникненням плівки «металевого мила» із стеарату заліза на поверхні. Ці металеві мила мають не тільки бажані властивості щодо міцності на зріз, але і значно більш високі температури плавлення (до 120 °C), ніж початкова жирна кислота. При цьому хімічно адсорбовані плівки мають ефективну змащувальну властивість незалежно від того, виникли вони на реагуючій поверхні або нанесені тонким шаром (напиленням) на нереагуючу поверхню.

Кількість циклів деформування, після яких на поверхні пуансону ймовірно утворення оксидної плівки

$$K = \frac{z^2}{A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tau}$$

де  $A$  – константа Арреніуса;

$Q$  – енергія активації;

$\tau$  – абсолютна температура на контакт;

$R$  – універсальна газова константа;

$z$  – критична товщина оксидної плівки.

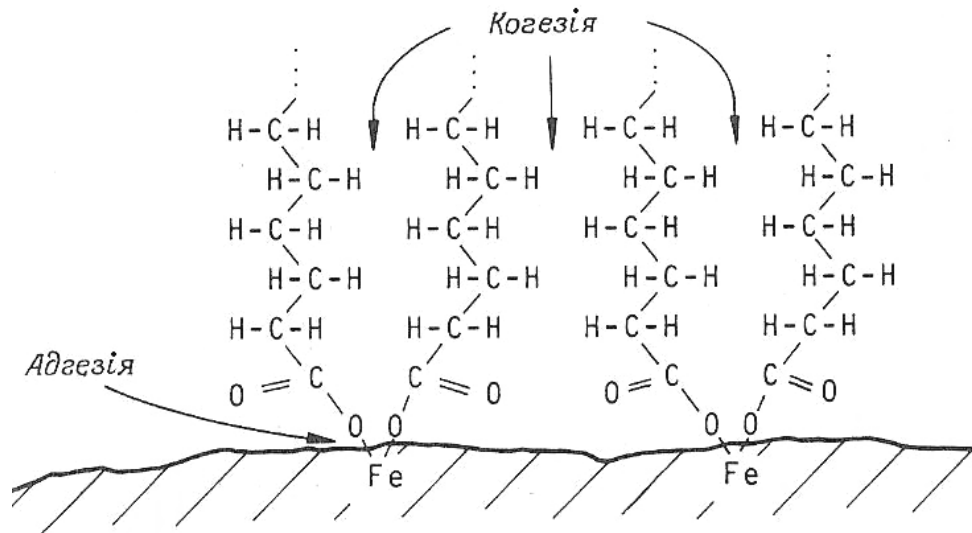


Рисунок 1 – Механізм реакцій хемосорбції на контактних поверхнях

За результатами виробничих експериментів, проведених в умовах метизного цеху ВАТ «Червона Зірка» було встановлено, що нормальна експлуатація холодновисаджувального інструменту можлива за умови, коли гранична товщина мастильної плівки  $z$ , яка зберігається на поверхні інструменту не перевищує 0,20 – 0,22 мм.

Для інструментальних сталей  $Q=33000$  Дж/моль;  $R=8,31$  Дж/моль·К;  $A=70$  мм<sup>2</sup>/с;  $T=353$  К [2].

Тоді

$$K = \frac{0,22^2}{70 \times \exp\left(-\frac{33000}{8,31 \times 353}\right)} = 93,06.$$

Таким чином, вже після перших хвилин роботи обладнання на поверхні пуансонів ймовірно утворення оксидної плівки.

Об'ємне зношування матеріалу пуансона в умовах окислювального зношування

$$V = (1 - \psi) \frac{P_T L_{mp}}{HK},$$

де  $H=1100$  кг/мм<sup>2</sup> – твердість за Віккерсом матеріалу пуансона;

$H_{mp}$  – шлях тертя (приймаємо  $L_{mp} \approx 0,2L_0$ ).

Таким чином

$$V = (1 - 0,38) \frac{104551 \times 1,8}{1100 \times 93,06} = 2,85 (\text{мм}^3).$$

Враховуючи, що об'єм робочої частини пуансона, що відслідковувався, складає

$$V_p = F_{III} h_{III} = 3,464 \times 11^2 \times 10 = 4191,44 (\text{мм}^3)$$

окислювальне зношування розпочнеться через

$$N = \frac{V_p}{V} = \frac{4191,44}{2,85} = 1470,68 (\text{циклів}).$$

Отже, для збільшення стійкості пуансонів потрібно:

- збільшити твердість робочої його частини;
- зменшити значення шляху тертя;

– зменшити технологічне зусилля.

Встановимо ефективність перших двох пропозицій. Наприклад, призначимо верхню межу твердості матеріалу пуансона (сталь Х12Ф1) на рівні 64 HRCe та мінімізуємо значення шляху тертя (наприклад, внаслідок застосування пуансонів із загостреним робочим торцем).

Тоді

$$V = (1 - 0,38) \frac{104551 \times 1,8 \times 0,33}{1300 \times 93,06} = 0,318 (\text{мм}^3).$$

Звідси розрахункове значення початку процесу окислювального зношування для даних умов становитиме

$$N = \frac{4191,44}{0,318} = 13169,32 (\text{циклів}).$$

Таким чином кваліфіковане фахове супроводження технології холодного висаджування дозволяє збільшити стадію нормального окислювального зношування з 1470 до 13169 робочих циклів, або майже в 9 разів. Остаточо прогнозуємо такий стан роботи інструменту, схильного до зазначеного виду зношування:

- I етап (припрацьовування) – до 90-100 циклів;
- II етап (“нормальне” окислювальне зношування) – до 13200 циклів;
- III етап (прогресуюче зношування) – до 22400 циклів, після чого пуансон необхідно замінювати.

Наступною стадією фахового супроводження холодновисаджувального інструменту є визначення ресурсу його пластичності під час окислювального зношування.

Ресурс пластичності металу – це величина пластичності, яку він має і яку може виявити при деформації до повного руйнування. Оскільки до руйнування деформований метал не доводять, то ресурс пластичності, витрачений до заданої деформації (або до початку тріщиноутворення) називають пластичністю, що використана,  $\Pi_n$ . Інша, невикористана частина називається залишковою пластичністю металу,  $\Pi_{оп}$ . Таким чином ресурс пластичності

$$\Pi_p = \Pi_n + \Pi_{оп}.$$

Теоретично деформація без руйнування можлива, якщо дотримані дві умови: в початковий момент деформації  $\Pi_p > \Pi_n$ , а наступному  $\Pi_{оп} > \Pi_n$ , де  $\Pi_n$  – потрібна пластичність металу, тобто мінімально необхідна пластичність для успішної деформації виробу без порушення його цілісності та суцільності. Отже, ступінь використання ресурсу пластичності

$$\psi = \frac{\Pi_p - \Pi_{оп}}{\Pi_p} = \frac{\Pi_n}{\Pi_p}.$$

В якості основного фактора, який обмежує значення граничної ступені деформації  $\Pi_n$  виступає величина  $\Pi_p$ . Чим менше  $\Pi_p$ , тим більші значення можуть сприймати вищезазначені параметри. З іншого боку, чим складнішою є структура інструментального матеріалу, більшою – задана деформація та інтенсивність зміцнення матеріалу, тим (при рівних інших умовах) більше  $\Pi_n$  та менше – допустимі деформації. Для встановлення  $\Pi_p$  використовували розрахункову залежність, яка запропонована В.Л.Колмогоровим:

$$\Pi_p = 1,73 \ln \left[ \frac{100}{(100 - A)} \right],$$

де  $A$  – параметр, встановлюваний за даними відповідних випробувань.

Вважається, що в якості  $A$  можна використовувати відносне зтоншення матеріалу, питому роботу тріщиноутворення тощо. При цьому, якщо  $P_p > 3$ , то деформованість металу можна визнавати доброю, якщо  $P_p > 0,9$  – задовільною, якщо  $P_p < 0,9$  – то незадовільною.

Однак практична реалізація розглянутого способу визначення степеню реалізації ресурсу пластичності представляє помітні складнощі. По-перше, необхідно проводити спеціальні випробування на розтяг, стискування та ін., причому напружено-деформований стан металу, що випробується, далеко не завжди ідентичний тому, який він відчуває в реальних процесах холодного об'ємного штампування. По-друге, для того, щоб визначити використану пластичність  $P_n$ , необхідно знати гранично допустиму деформацію, яка теж встановлюється лише за даними відповідних випробувань. Якщо ж задавати зазначений параметр попередньо, то зміст подальших процедур взагалі втрачається, оскільки так само можуть бути задані, наприклад, значення питомої роботи тріщиноутворення і т.д. Отже, спочатку необхідно ввести суттєві припущення, що позначиться на рівні можливих помилок прогнозування.

В практиці отримала певне розповсюдження залежність Колмогорова-Богатова[3]:

$$\psi = \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_i / \varepsilon_p) \alpha_i = 1,$$

де  $n$  – число стадій деформування;

$\varepsilon_p$  – граничний степінь деформації металу без руйнування;

$\alpha_i$  – коефіцієнт, що залежить від матеріалу.

Якщо залежності  $\varepsilon_p = \varepsilon_p(J)$  та  $\varepsilon = \varepsilon(J)$  представити у вигляді графіків або таблиць, то становиться можливим реалізувати графічний метод прогнозування, який засновано на гіпотезі сумування пошкоджень та припущенні, що закон накопичення пошкоджень – лінійний.

Методики визначення інтенсивності деформацій та показника жорсткості схеми напруженого стану для більшості з операцій холодного об'ємного штампування добре відомі. Однак графічний метод прогнозування, хоча і є наочним, але не має достатньої точності і потребує проведення ретельних графічних побудов, які дуже чутливі до помилок масштабування. Тому для прогнозування руйнування заготовки в процесі холодного висаджування ми рекомендуватимемо експериментально-аналітичний метод. Обробка даних можлива в інтерактивному режимі.

Сутність методики прогнозування полягає у тому, що поставлена задача зводиться до сумісного вирішення двох рівнянь, які у загальному вигляді можуть бути записані так:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_p([J], \Gamma)$$

$$\text{та } \varepsilon_p = \varepsilon_p(e, \Gamma).$$

Тут  $[J]$  – допустиме значення показника жорсткості схеми напруженого стану;  $\Gamma = h_0/d_0$  – геометричний параметр, який характеризує відношення довжини висаджуваної частини заготовки до її вихідного діаметру;  $\varepsilon_n$  – граничний ступінь деформації кожного переходу холодного висаджування, який залежить також і від відносної степені деформації на переході

$$e = \left| \frac{h_0 - h}{h} \right|.$$

Кількість пар рівнянь, таким чином, буде відповідати числу переходів штампування. Для різних співвідношень  $h_0/d_0$  (від 1,0 до 1,5; це реально відповідає переважній більшості виробів, які виготовляються методами холодного висаджування)

виконано наближення експериментальних кривих двох параметричними залежностями за методом найменших квадратів. Для  $\varepsilon_n$  отримана степенева залежність

$$\varepsilon_n = 1,8227 e^{1,7664} \left( \frac{h_0}{d_0} \right)^{0,6670}.$$

Аналогічно була оброблена і інша функціональна залежність

$$\varepsilon_p = 0,5936 \left( 2[\mathcal{K}]^3 + \frac{h_0}{d_0} \right).$$

Таким чином, при  $\varepsilon_p > \varepsilon_n$  висаджування заготовки на даному переході можливе без руйнування матеріалу, у зворотньому випадку вірогідним є руйнування головки. Відповідно тоді необхідно переглянути геометричні параметри переходу у бік зменшення  $\varepsilon_n$ . Якщо зазначена процедура з будь-яких причин неможлива, необхідно продумати питання стосовно знецінювальної обробки матеріалу або навіть вдатися до заміни останнього.

Втім, цілісність головки висаджуваного виробу на переході ще не гарантує відповідної якості виробу. Справа у тому, що для різних варіантів висаджування інтенсивність деформації дуже незначною мірою залежить від співвідношення  $h_0/d_0$ . Це не дозволяє зробити однозначний висновок щодо необхідності використання при висаджуванні заготовок з певними значеннями  $h_0/d_0$ . Наприклад, із збільшенням  $h_0/d_0$  показник жорсткості  $\mathcal{K}$  зменшиться, але при висаджуванні головок однакового об'єму потрібні і більші деформації. Тому, задаючись граничним значенням степені використання ресурсу пластичності  $[\psi]$ , визначаємо  $\Pi_n$  для кожного з переходів за формулою Колмогорова-Богатова.

Перед використанням формули Колмогорова-Богатова треба провести наступні перетворення:

– з теорії кривих зміцнення відомо, що залежність між деформаціями та напруженнями в координатах  $\sigma_s, \varepsilon$  ( $\sigma_s$  – напруження плинну деформованого металу) має вигляд

$$\sigma_s = \frac{4}{\pi} \sigma_B \operatorname{arstg} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^n,$$

де  $\sigma_B$  – істинне напруження шийки при розтягуванні зразка;

$n$  – коефіцієнт, який залежить від здатності деформованого матеріалу до зміцнення. Оскільки при  $\varepsilon = \varepsilon_B$  ( $\varepsilon_B$  – інтенсивність деформації в момент утворення шийки) останнє рівняння після диференціювання по  $d\varepsilon$  дає значення інтенсивності зміцнення

$$\frac{d\sigma_s}{d\varepsilon_B} = \frac{1}{1-\psi} \frac{d\sigma_s}{d\varepsilon_B} = \operatorname{tg} \alpha,$$

де  $\operatorname{tg} \alpha$  – тангенс куту нахилу кривої зміцнення, то

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon_p} \right)^{\operatorname{tg} \alpha} = 1;$$

– оскільки деформація відбувається у холодному вигляді, то дотична до кривих зміцнення відсікає на осі абсцис одиничний відрізок. Але при висаджуванні деталей типу стержнів з потовщеннями зміна діаметру стержня по переходах штампування невелика – вона коливається в межах пружної деформації матеріалу заготовки, його теплового розширення та інших малозначущих факторів. Тому

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \rightarrow 0,$$

де  $F_0$  – початкова площа перерізу заготовки;

$F$  – площа перерізу готового стержня).

Таким чином, для основних видів кривих зміцнення з достатнім ступенем точності можна приймати  $\operatorname{tg}\alpha = \sigma_B$ .

Тому остаточно отримуємо

$$[\psi] = \sum_{i=1}^n (\Delta\varepsilon_i / \varepsilon_p)^{\sigma_B} = 1.$$

Відомо, що найкраще співвідношення характеристик міцності та пластичності досягається у випадку, коли  $[\psi] = 0,5-0,8$  (більші значення  $[\psi]$  відповідають низьколегованим та маловуглецевим конструкційним сталям). Якщо висаджуванню підлягають середньовуглецеві та леговані сталі типу 38ХГН, 40ХН2МА тощо, то граничне значення ступені використання ресурсу пластичності (із міркувань стійкості інструменту) не може перевищувати 0,7.

Значення  $\varepsilon_p$  можна брати з відповідних таблиць та графіків [4].

Статистична обробка експериментально отриманих залежностей свідчить про їх незначну чутливість до схем холодного висаджування (висаджування в пуансоні, пуансоні та матриці або тільки в матриці). Отже, при наявності даних по діаграмах пластичності оброблюваного матеріалу, характері навантажень на кожному з переходів тощо вже на початковій стадії проектування технологічних процесів холодного висаджування можна аналітично розрахувати ступінь використання ресурсу пластичності деформованого металу та спрогнозувати його експлуатаційні властивості (а, отже, і довговічність готового виробу).

Схема алгоритму прогнозування:

– обчислюємо ступені деформації на всіх переходах. Попередньо повинні бути відомі: висота висаджуваної частини заготовки  $h_0$ ; діаметр заготовки  $d_0$ ; кінцева висота головки  $h$ ;

– підраховується граничний ступінь деформації матеріалу без його руйнування. Показник жорсткості схеми напруженого стану призначається в залежності від конфігурації готового виробу;

– виконується порівняння значення  $\varepsilon_n$  та  $\varepsilon_p$  по кожному з переходів. Якщо  $\varepsilon_p < \varepsilon_n$ , то встановлюється неможливість проведення холодного висаджування через ймовірність руйнування головки;

– в залежності від виду попередньої обробки матеріалу визначається значення напруження плину.

Наприклад, стосовно відпаленої вуглецевої сталі

$$\sigma_s = 74C + 20e^{0,25} \quad (C - \text{процентний вміст вуглецю в сталі}).$$

Для гарячекатаної вуглецевої сталі ( $C = 0,058-0,72\%$ )

$$\sigma_s = -25 + 80C + 36e^{0,23} \quad (\text{якщо } e=1 - 20\%),$$

$$\sigma_s = 38 + 80C + 0,45e \quad (\text{якщо } e > 20\%).$$

Якщо сталь перед холодним висаджуванням піддавали волочінню або калібруванню, то

$$\sigma_s = \sigma_T \left\{ 1,06 - 0,1e(1,52 - 3,5e)e^k - [0,02 + (2,9 - 3,2e)e^{k1}]C \right\},$$

де  $e^k$  – ступінь деформації при калібруванні або волочінні, %;

– для кожного з переходів штампування визначаємо  $\operatorname{tg}\alpha_i = \sigma_{Bi}$  і – далі – сумарний ступінь використання ресурсу пластичності. Для оцінки інтенсивності використання ресурсу пластичності по переходах штампування можна приймати  $\alpha_i = \operatorname{tg}\sigma_{si}$  – це не впливає на кінцевий результат, але дозволяє проводити оптимізацію геометричних параметрів висаджуваного виробу;

– порівнюємо значення  $\psi_{об}$  із  $[\psi]$ . Якщо  $\psi_{об} < [\psi]$ , то прогноз по деформуванню матеріалу – сприятливий, у зворотньому випадку холодне висаджування неможливе.

## Список літератури

1. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
2. Кришкін Б.Б. Інженерний моніторинг процесів штампування // Зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету/Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 16. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – С.169 – 172.
3. Пластичность и разрушение. Под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977.
4. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. Третьяков А.В., Зюзин В.И. – М.: Металлургия, 1973.

В статье приведены результаты исследования методики инженерного мониторинга изменений физико-механических свойств и химсостава контактных поверхностей инструмента для холодной высадки. Приводятся схема и алгоритм прогнозирования стойкости нагруженных рабочих деталей оснастки в зависимости от прочностных показателей деформируемых материалов. Предложено практическое применение описанной методики в производственных условиях.

In the article the results of development and research for the surface structure and properties cold upsetting tool engineering monitoring are stated. Scheme and consecutivity of cold upsetting tool longevity depending of deformed steels figures are presented. The practical applications of the described method in production conditions are proposed.