

УДК 621.002.5-19

М.Л. Кукляк

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра технології машинобудування

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ЗМІЦНЕННЯ ВАЛІВ

© Кукляк М.Л., 2001

Досліджуються загальні закономірності формування експлуатаційних властивостей деталей машин з позицій системного підходу. "Технологічна система", де формуються функційні параметри та якість поверхневих шарів із застосуванням термомеханічного зміцнення й наступних операцій холодного пластичного деформування, деформаційного старіння тощо, розглядається з термодинамічних позицій.

The general laws of machine details operational properties formation from the system approach positions are investigated. "The Technological system", where the functional parameters and quality of superficial layers with application of thermomechanical hardening and subsequent operations cold plastic deformation, aging deforming and others, is considered from thermodynamic positions.

Формування якості поверхневого шару та експлуатаційних властивостей деталей підлягає загальним закономірностям, незважаючи на розмаїття деталей машин, методів оброблювання та умов, в яких вони працюють. З цього огляду доцільно виявити та систематизувати основні фактори впливу технологічного процесу на функціональні параметри якості та експлуатаційні показники деталей з позиції системного підходу, в основі якого лежить створення методів дослідження та проектування складних організованих об'єктів – систем різних типів [1–4]. У цьому розумінні не є винятком і система "технологічні операції", де формуються функційні параметри та якість поверхневих шарів із застосуванням термомеханічного зміцнення й наступних операцій холодного пластичного деформування, деформаційного старіння тощо, які переважно визначають експлуатаційні властивості деталей.

З огляду створення бажаної структури найважливішими технологічними параметрами є температурні. До них належать: температура аустенізації під гартування, температура відпуску, деформаційного старіння, випробувань. Іншим важливим технологічним фактором є величина та напрям деформування, текстуроутворення, який, очевидно, як і перший, залежить від хімічного складу, зокрема від кількості вуглецю в оброблюваній сталі, характеру легування. Очевидно, треба враховувати вид деформування деталі під час високотемпературного термомеханічного оброблення (ВТМО) і його відповідність зовнішнім експлуатаційним навантаженням.

Система охоплює певну множину елементів, $\{E, P, R\}$, пов'язаних структурно та функційно [1]. Головними характеристики системи є: 1. структура $S = \{E, P, R\}$; 2. входи $\{X\}$, виходи $\{Y\}$; 3. функція $X \rightarrow Y$ (рис. 1).



Рис. 1. Фізичний канал як механізм обміну між елементами та довкіллям

Структура системи характеризує її внутрішню організацію і визначається її елементами E , відповідними властивостями елементів P та зв'язками елементів як відношенням між ними R . Зв'язок між елементами розглядаємо як фізичний канал, яким здійснюється обмін між елементами речовиною, енергією чи інформацією.

Кожна система може бути відокремлена від довкілля гіпотетичною оболонкою (рис. 2).

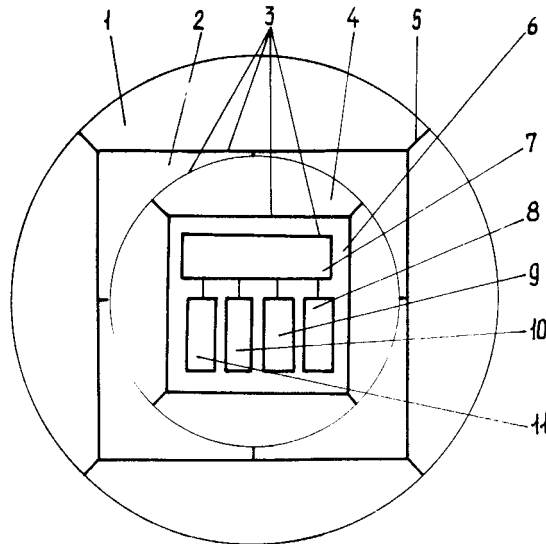


Рис. 2. Системна організація об'єктів:

- 1 – довкілля; 2 – система; 3 – гіпотетичні оболонки; 4 – виріб; 5 – зв'язки; 6 – елемент;
7 – ВТМО; 8 – обкатування; 9 – заневолювання; 10 – деформаційне старіння;
11 – викінчувальні операції

“Технологічна система” як інструмент для зміцнення пружних елементів за допомогою ВТМО в умовах кручення перетворює входні параметри $\{X\}$ у вихідні $\{Y\}$ (рис. 3).

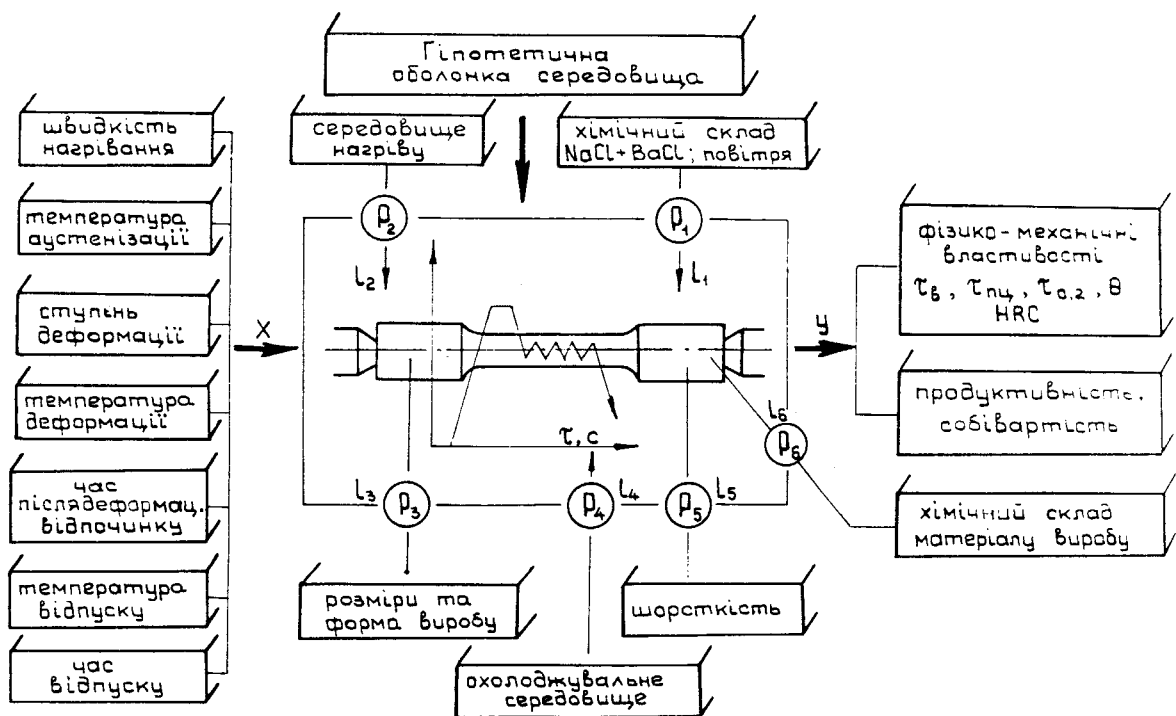


Рис. 3. Система "Технологічна операція ВТМО"

Таке перетворення можна описати математичними рівняннями, фізичним аналогом або словом. Будь-яка система є одночасно частиною іншої, більш ширшої системи; в свою чергу, окремі її частини і підсистеми можна розглядати як самостійні системи (рис. 2).

Систему розглядаємо на макро- та мікроскопічному рівнях. На макроскопічному рівні оцінюємо загальну поведінку системи як сукупності, без врахування її детальної структури. Мета такого вивчення – створення моделі системи в її взаємодії з довкіллям, виявлення її інтегральних властивостей. На мікроскопічному рівні детально досліджується структура системи, властивості елемента та взаємозв'язки з іншими тощо.

“Технологічну систему” доцільно розглядати з термодинамічних позицій. Над системою, об'єктом зміцнення якої є циліндричні деталі, виконується процес термомеханічного зміцнення, в результаті чого її енергія підвищується. Вона може й зменшуватись, якщо від неї відводиться певна кількість теплоти, наприклад під час гартування, що приводить до зміни фізико-механічних властивостей об'єкта.

Ефективне керування тепловими явищами під час зміцнення базується на знанні законів теплопередачі. Для системи з постійною масою перший закон термодинаміки запишемо як

$$\Delta E = Q - W, \quad (1)$$

де ΔE – зміна енергії системи в даному процесі, Q – кількість тепла, яку отримує система, W – робота, виконана системою.

Фізико-механічні властивості деталей машин за умов постійних інших факторів диктуються температурними режимами. Дослідження теплопровідності полягає у виявленні просторово-часової зміни температури, розкритті залежності

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

Рівняння (2) є записом найзагальнішого вигляду температурного поля. Відповідно до гіпотези Фур'є кількість теплоти dQ_T , що проходить через елемент ізотермічної поверхні dF за проміжок часу $d\tau$, пропорційна температурному градієнту $\partial t / \partial n$:

$$\partial Q_T = \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau. \quad (3)$$

Коефіцієнт пропорційності λ в рівнянні (3) є фізичним параметром речовини – теплопровідністю. Якщо градієнт температури для різних точок ізотермічної поверхні різний, то кількість теплоти, яка проходить через всю ізотермічну поверхню за одиницю часу, знайдемо як

$$Q_T = - \int_0^\tau \int_F \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau. \quad (4)$$

Розглядаємо поширення теплоти в прямому стрижні з постійним перерізом вздовж осі; площа поперечного перерізу f , його периметр u . Стрижень знаходиться в середовищі з постійною температурою t_{Π} , коефіцієнт тепловіддачі від поверхні стрижня в довкілля будемо вважати постійним для всієї поверхні. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу стрижня λ достатньо великий, а площа перерізу мала, порівняно з його довжиною. Це дає підставу нехтувати зміною температури в перерізі і вважати, що вона змінюється тільки вздовж осі стрижня. Для зручності будемо вести відлік температури від $t_{\Pi} = \text{const}$. Відраховану надлишкову температуру стрижня позначимо як υ .

Якщо задана температура стрижня в початку координат t_1 , то надлишкова температура стрижня (рис. 4) буде $\upsilon_1 = t_1 - t_{\Pi}$.

Якщо розташувати координатну вісь X вздовж осі стрижня, а початок координат в центрі циліндра (зразка, рис. 4), то на відстані x від початку координат, виділивши елемент завдовжки dx , рівняння теплового балансу для розглянутого елемента запишемо як

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \quad (5)$$

де dQ – теплота, яка віддана поверхнею елемента навколишньому середовищу за одиницю часу. На підставі закону Фур'є

$$Q_x = -\lambda \frac{d\beta v}{dx} \cdot f, \quad (6)$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda \frac{d}{dx} \left(v + \frac{dv}{dx} \cdot dx \right) \cdot f.$$

$$Q_x - Q_{x+dx} = \lambda \cdot f \frac{d^2 v}{dx^2} \cdot dx. \quad (7)$$

Відповідно до закону Ньютона-Ріхмана

$$dQ = \alpha_p \cdot v \cdot u \cdot dx. \quad (8)$$

Прирівнявши (7) і (8), отримуємо диференціальне рівняння, яке описує зміну температури стрижня:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{\alpha_p \cdot u}{\lambda \cdot f} \cdot v - m^2 \cdot v, \quad (9)$$

де

$$m = +\sqrt{\frac{\alpha_p \cdot u}{\lambda \cdot f}}. \quad (10)$$

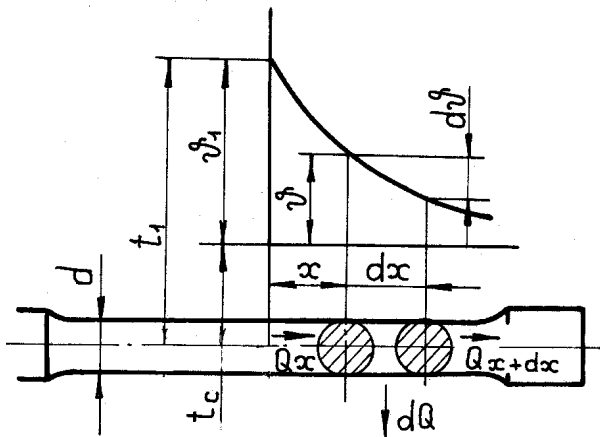


Рис. 4. Перенесення теплоти стрижнем

Із виразу (10) видно, що для стрижня, форма і розміри якого задані, за умови постійного коефіцієнту тепловіддачі α_p по всій поверхні та постійного λ в розглядуваному інтервалі температур, $m = \text{const}$. Тоді загальний інтеграл для рівняння (9) буде:

$$v = C_1 \cdot e^{mx} + C_2 \cdot e^{-mx}. \quad (11)$$

Значення C_1 і C_2 визначаємо із граничних умов, які задаються залежно від довжини стрижня та інших факторів.

Розв'язок рівняння (11) має вигляд:

$$v = v_1 \left[\frac{m \left[e^{mx} \left(m - \frac{\alpha_1}{\lambda} \right) \right]}{e^{2ml} \left(m + \frac{\alpha_1}{\lambda} + m - \frac{\alpha_1}{\lambda} \right)} + \frac{e^{-mx} \cdot e^{2ml} \left(m + \frac{\alpha_1}{\lambda} \right)}{e^{2ml} \left(m + \frac{\alpha_1}{\lambda} \right) + m - \frac{\alpha_1}{\lambda}} \right].$$

Перемноживши праву та ліву частини останнього рівняння на e^{-ml} та виконавши нескладні алгебричні перетворення, отримуємо:

$$v = v_1 \left[\frac{m[e^{m(1-x)} + e^{-m(1-x)}] + \frac{\alpha_1}{\lambda} [e^{m(1-x)} e^{-m(1-x)}]}{m[e^{ml} + e^{-ml}] + \frac{\alpha_1}{\lambda} [e^{ml} + e^{-ml}]} \right] = \vartheta_1 \frac{\operatorname{ch}[m(1-x)] + \frac{\alpha_1}{\lambda} \operatorname{sh}[m(1-x)]}{\operatorname{ch}(ml) - \frac{\alpha_1}{m\lambda} \operatorname{sh}(ml)}.$$

Якщо теплопередачу з кінців стрижня знехтувати, то граничні умови

при $x = 0$ $\vartheta_1 = C_1 + C_2,$

при $x=1$ $\left[\frac{d\vartheta}{dx} \right]_{x=1} = C_1 \cdot e^{ml} - C_2 \cdot e^{-ml} = -\frac{\alpha_1}{\lambda} \vartheta_1$

$$\vartheta_1 = C_1 \cdot e^{ml} + C_2 \cdot e^{-ml}$$

можна записати як:

при $x = 0$ $\vartheta = \vartheta_1,$

і при $x = 1$ $\left[\frac{d\vartheta}{dx} \right]_{x=1} = 0.$

Функція системи залежить тільки від стану системи, в даному випадку від виконаної над нею роботи і температури. Отже, для визначення енергії системи треба знати температуру системи та виконану механічну роботу (деформування).

У кожному конкретному випадку мінімальну кількість параметрів, необхідних для досягнення повного визначення стану системи, може бути різним.

Зміна виду навантаження, що супроводиться зміною співвідношення нормальних і дотичних напружень, тобто перехід від руйнування сколом до руйнування зрізом, досягається за різних режимів відпуску. Якщо “операція ВТМО” визначально впливає на опір руйнуванню сколом, зміна впливу навантаження буде змінювати діапазон відпусків, в межах якого забезпечується перевага ВТМО. Підтвердженням цього є результати (рис. 5), що показують несучу здатність сталі в умовах стискання, кручення, згинання залежно від температурних режимів зміцнення та випробування чи експлуатації.

Одним з відповідальних факторів, що визначає рівень циклічної міцності, є її чутливість до внутрішніх концентраторів типу пустот, надрізів, вкраплень. Специфіка руйнування від втомленості таких сталей полягає в тому, що воно починається завжди від слабких місць типу вкраплень [6, 7]. Проте, під час ВТМО пустоти та вкраплення витягуються та орієнтуються в напрямку деформації оброблення. Завдяки орієнтаційній відповідності витягнутих вкраплень і напружень стиску, створених постійним зусиллям, в умовах асиметричного циклу, роль вкраплень під час руйнування від втомленості можна значно послабити, оскільки для розвитку в мікротріщині дефектів потрібне циклічне навантаження з підвищеною амплітудою (рис. 6). Досягнення орієнтованої відповідності вкраплень і напружень, що виникають під час асиметричного циклу, треба вважати одним з головних шляхів підвищення циклічної міцності під час ВТМО.

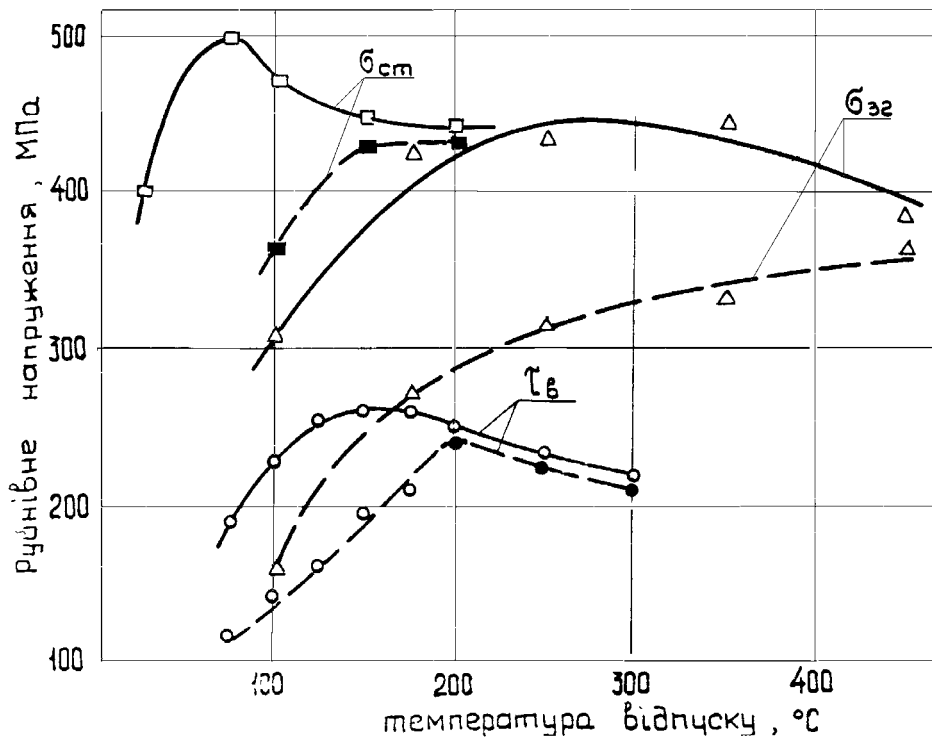


Рис. 5. Зміна міцності сталі 9ХС в умовах стиску ($\sigma_{см}$), згину ($\sigma_{зг}$) та кручення ($\tau_{кр}$) (суцільні лінії – ВТМО; пунктир – гартування – відпуск) [5]

Застосовувана при ВТМО схема деформування певною мірою визначає анізотропію зміцнення, яка за умови відповідності напруженого стану під час ВТМО схеми напруженого стану під час експлуатації чи випробування деталей, є додатковим резервом підвищення їх конструктивної міцності. Поясненням цього є специфічне текстуроутворення під час пластичного деформування. У результаті отримуємо тонку будову сплавів, в якій елементи цієї будови можуть бути орієнтованими та регулюватись, якщо “відсунути” площини легкого ковзання в орієнтованій структурі від напрямку дії дотичних напружень. І навпаки, можна підвищити пластичність зміцненого стану, якщо площини легкого зсуву орієнтувати в напрямі дотичних напружень[8].

Одним з факторів орієнтованого зміцнення є переважальна орієнтація дрібнодисперсних мартенситних пластин, які формуються в межах здрібнених і витягнутих аустенітних зерен.

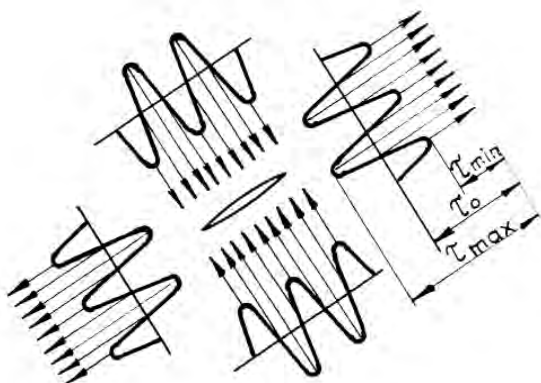


Рис. 6. Схема впливу напруженого стану в умовах асиметричного циклу з прямим підвантаженням на внутрішній концентратор після ВТМО

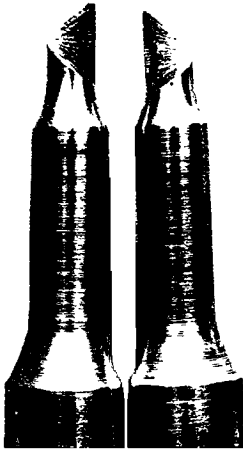


Рис. 7. Характер зламів після направленої зміцнення

Дослідження зламів від втомленості (рис. 7) підтверджує допущення про вирішальний вплив на циклічну міцність відповідності “слабких” напрямків із середніми напруженнями, що виникають під час підвантаження статичним крученням. З рис. 7 видно, що руйнування поверхневих шарів зразка із високоміцної сталі відбувається по лінії головних поперечних напружень.

Аналіз виконаних досліджень технологічної операції за параметрами зміцнення показує, що спрощений підхід до такого забезпечення інколи призводить до грубих помилок, оскільки можна знехтувати рядом важливих технологічних факторів, умов і законів механіки руйнування.

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М., 1978. 2. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. Л., 1985. 3. Хубка В. Теория технологических систем. М., 1987. 4. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. М., 1982. 5. Романів О.М., Кукляк М.Л. Про зв'язок ефективної температури відпуску після термомеханічної обробки з особливостями процесу руйнування сталі / Доп. АН УРСР. 1967. № 10. Сер. А. 6. Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М., 1971. 7. Thomson R.E. TASM, 1963. 56. 8. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка стали. Т.1. 596 с. Т.2. 1082 с. М., 1967.

УДК 621.924

М.Л. Кукляк*, В.В. Ступницький*, І.І. Брошак**

* Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування,

** Тернопільський державний технічний університет ім. І.Пулюя,
кафедра технології машинобудування

ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

©Кукляк М.Л., Ступницький В.В., Брошак І.І., 2001

Встановлений економічний критерій вибору оптимальних конструкторських рішень металорізальних інструментів. Розглянутий приклад розрахунку економічної ефективності використання адаптивних свердл ежекторного типу.

The economic criterion of a choice of optimum designer tools solutions is established. The example of economic efficiency use account of adaptive drills eject type is considered.

Вибираючи конструктивне рішення різальних інструментів, необхідно брати до уваги передусім економічні аспекти і, певною мірою, технологічні міркування. Зважаючи на економічний фактор, слід враховувати всі складові собівартості операцій, на які має вплив