

УДК 621.787

Колот Л. П.

ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНА ОБРОБКА В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ФОРМИ НЕЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Технологічне забезпечення якості і продуктивності виконання високоточних нежорстких деталей машинобудування особливо актуальне на сучасному етапі розвитку виробництва в умовах ринкової конкуренції.

Надійність і ефективність їх функціонування в значній мірі визначається стабільністю форми і точністю геометричних параметрів деталей.

Особливою перешкодою до шляху підвищення якості і продуктивності виготовлення таких деталей є деформації, що виникають під впливом залишкових напружень при різних видах технологічних операцій, як правило при термічній обробці, обробці зі зняттям припусків і поверхневим пластичним деформуванням.

Для підвищення якості таких деталей застосовують технологічні операції і прийоми, що служать свого роду «бар'єрами» на шляху втрати точності особливо на фінішних операціях [1, 2].

Ці напрямки включають стабілізацію розмірів і форми деталей, запобігання і компенсацію жолоблення засобами і методами, що не потребують додаткових капіталовкладень [3, 4, 5].

Складність і багатогранність цієї проблеми, її недостатня теоретична і експериментальна вивченість роблять доцільним пошук таких шляхів її рішення, що дозволили б на основі вивчення природи залишкових напружень і механізмів явищ, що спостерігаються при обробці, поширити технологічні можливості існуючих методів обробки нежорстких деталей.

Метою роботи є розробка і дослідження процесу компенсації залишкових деформацій нежорстких деталей методом поверхнево-пластичного деформування.

Ефект виправлення відхилення форми досягається за рахунок зрівноважування (компенсації) залишкових напружень, утворених деформуючим інструментом у поверхневому шарі деталі, що супроводжується його загальною пружною деформацією, напрямком якої протилежний дії прикладеного зусилля від інструмента.

Необхідною і достатньою умовою компенсації залишкових деформацій є:

$$\vec{\sigma}_o^y = \vec{\sigma}_{om} \rightarrow \vec{\sigma}_o^R = \vec{\sigma}_o = const, \quad (1)$$

де σ_o^y – залишкові напруження, «вилучені» разом із припуском;

σ_{om} – залишкові напруження в поверхневому шарі, наведені методами поверхневого зміцнення;

σ_o^R – результуючі залишкові напруження в деталі;

σ_o – залишкові напруження у вихідному до обробки рівноважному стані.

При створенні розрахункової моделі процесу компенсації залишкових деформацій відповідно до умови (1) враховувалося, що напруження, викликані поверхнево-пластичним деформуванням (σ_{om}), і напруження в заготовці (σ_o^R) мають не тільки різні закони розподілу, але і неоднакову величину. На підставі цього при рішенні задачі був уведений коефіцієнт $C_o = \frac{\sigma_{om}}{\sigma_o^R}$,

який враховує невідповідність залишкових напружень у деталі до поверхневого пластичного деформування й у поверхневому шарі після поверхнево-пластичного деформування.

Нехай залишкові напруження будуть представлені формулою І. А. Биргера у виді:

$$\sigma_{(\phi)}^R = \frac{4E}{3L^2} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 3(h-a)f(a) \right], \quad (2)$$

де E – модуль пружності першого роду;

L – довжина деталі;

h – товщина деталі;

a – величина шару, що видаляється;

f – стріла прогину від жолоблення.

Тоді напруження у шару, що дорівнює товщині h (при $a = 0$), з урахуванням (2):

$$\frac{df}{da} = \frac{3h(h-a)}{(h-a)^3} f_H,$$

де f_H – початковий прогин, що обумовлений σ_0^R , дорівнюватиме:

$$\sigma_0^R = f_H \frac{4Eh}{L^2}. \quad (3)$$

Для тіл, що деформуються накаткою роликком справедлива теоретична залежність Езерського:

$$\sigma_{ом} = \frac{8E(h - \delta_H)^3 f_H^P}{3(1 - \nu)L^2 \delta_H}, \quad (4)$$

де δ_H – глибина наклепу;

ν – коефіцієнт Пуассона;

f_H^P – стріла прогину після накатки.

Враховуючи, що залежності повинні відповідати умовам сумісності, тобто залишкові напруження в деталі до і після накатки повинні викликати рівні по величині і протилежно спрямовані прогини, з обліком (1) одержимо:

$$2\delta_H^3 - 6h\delta_H^2 + 3h[2 + (1 - \nu)c_0] \delta_H - 2h^3 = 0. \quad (5)$$

Розв'язок даного рівняння відносно δ_H має наступний вид:

$$\delta_H = K_{HT} h, \quad (6)$$

де K_{HT} – теоретичний коефіцієнт компенсації залишкових деформацій, при $\nu = 0,25$ та $c_0 = 1$, $K_{HT} = 0,302$.

Коефіцієнт компенсації залишкових деформацій при лезовій обробці дорівнює коефіцієнту спадкоємності жолоблення $K_\Delta = 0,2087$.

Відміна коефіцієнтів K_Δ та K_{HT} $\left(\frac{K_\Delta}{K_{HT}} = 0,69 \right)$ обумовлена здатністю поверхнево-пластичного деформування формувати в наклепаному шарі залишкові напруження стиску та розтягання.

Таким чином:

$$\delta_H = 0,69\delta_H + 0,31\delta_H, \quad (7)$$

де $0,69\delta_H$ – глибина залягання залишкових напружень стиску;

$0,31\delta_H$ – глибина залягання залишкових напружень розтягу.

На основі формули (6) і уточненої І. В. Кудрявцевим формули С. Г. Хейфеця:

$$\delta_H = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \tag{8}$$

де P – зусилля накатки;

σ_T – границя текучості при розтяганні матеріалу, що обкатується;

m – коефіцієнт, який враховує розміри контактної площадки.

Параметр компенсації залишкових деформацій дорівнює:

$$P_k = \beta \sigma_T m^2 h^2, \tag{9}$$

де β – коефіцієнт компенсації залишкових деформацій, що залежить від характеру і величини залишкових напружень до накатки (визначається з обліком $c_o = \sigma_{om} / \sigma_o^R$).

Для маловуглецевих і середневуглецевих сталей, що пройшли відпалювання, $c_o^{відп} = 22 \dots 53$; що пройшли нормалізацію, $c_o^{норм} = 11 \dots 18$.

Дослідження показали, що застосування вищенаведеного методу розрахунку компенсації залишкових деформацій забезпечує найбільший ефект і точність в умовах обробки однотипних деталей (типу рейок, планок, лінійок і т. і.) методом автоматичного одержання розмірів на попередньо налагоджених верстатах, коли на розподіл залишкових напружень впливають мінімальна кількість факторів.

У тому випадку, коли деталі мають не визначені фізико-механічні властивості, компенсаційне зусилля визначається за формулою (рис. 1):

$$P_{2K} = P_1 \frac{f_H - f_1}{f_H - f_1}, \tag{10}$$

де P_1 – зусилля накатки на першому переході;

f_H – вихідний прогин деталі, який необхідно усунути;

f_1 – обмірюваний прогин деталі після накатки поверхні з зусиллям P_1 .

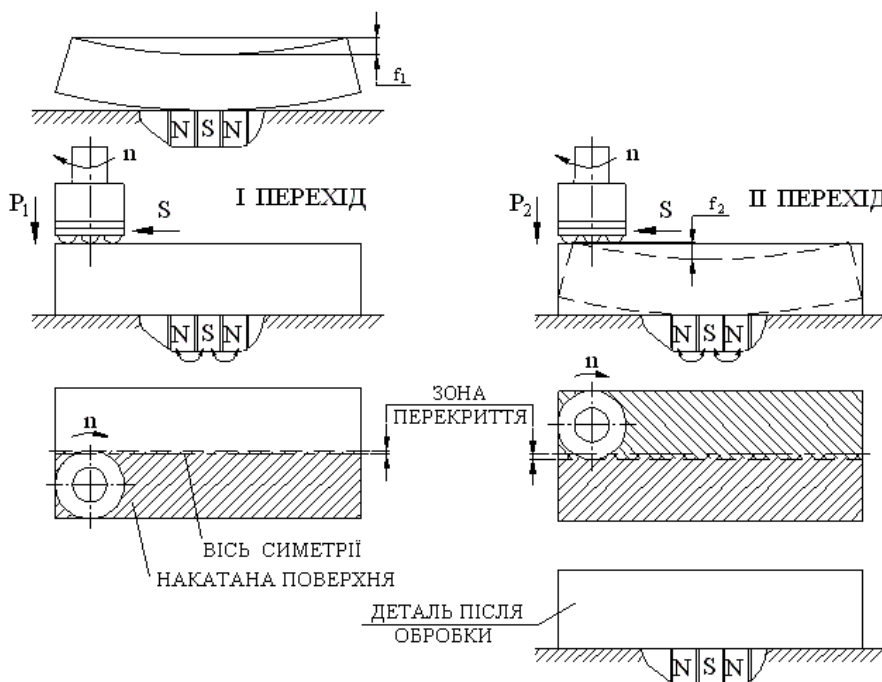


Рис. 1. Схема реалізації способу компенсації при односторонній обробці поверхнево-пластичним деформуванням

При двосторонній обробці поверхнево-пластичним деформуванням регулювання залишкових деформацій можна здійснити, використовуючи залежність (рис. 2):

$$P_{2K} = P_1 \left(1 - \frac{2}{hm} \sqrt{\frac{P_1}{2\sigma_T}} + \frac{P_1}{2h^2 m^2 \sigma_T} \right), \quad (11)$$

де P_1 – зусилля накатки на першому переході;

P_{2K} – зусилля накатки на другому переході при обробці протилежної поверхні.

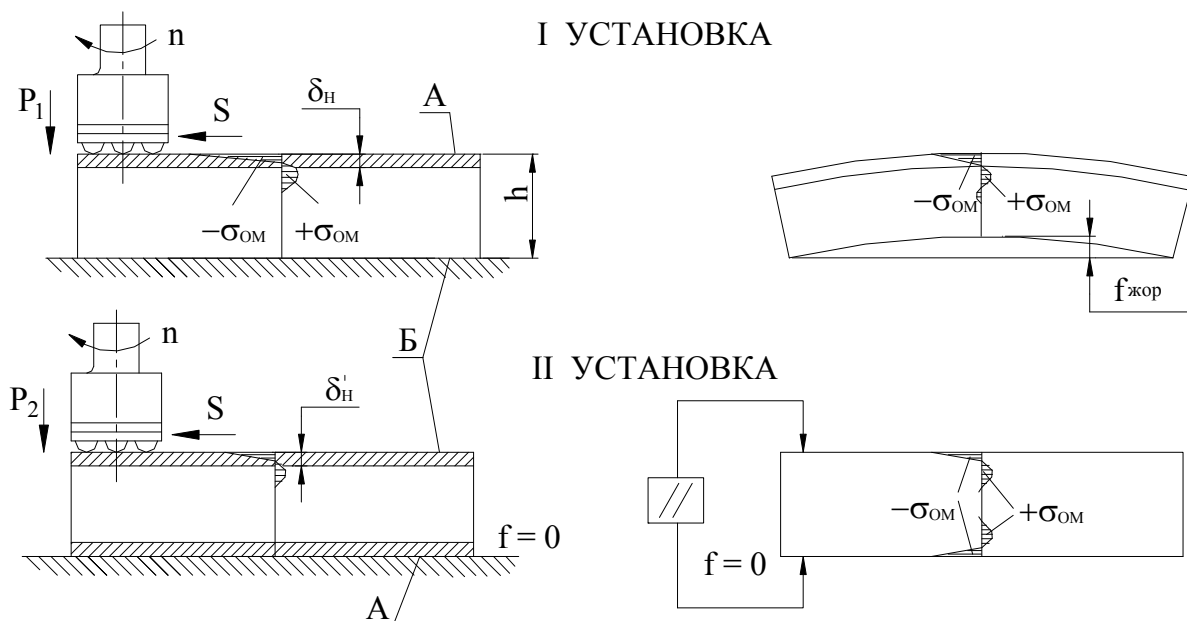


Рис. 2. Схема реалізації способу компенсації при двосторонній обробці поверхнево-пластичним деформуванням

Для оцінки відхилення форми і факторів, що впливають на стабільність залишкових напружень, проведені теоретичні й експериментальні дослідження.

З теореми про розвантаження випливає, що залишкові напруження досягнуть стабільності в тому випадку коли:

$$d\vec{\sigma} = d\vec{\sigma}_B - d\vec{\sigma}_P, \quad (12)$$

де $d\vec{\sigma}$ – залишкові напруження, створені зміцненням від прикладення вектора одиничного навантаження;

$d\vec{\sigma}_B$ – напруження, створені зміцненням від навантаження одиничним зусиллям у напрямку дії його вектора;

$d\vec{\sigma}_P$ – напруження, що релаксовані після прикладення вектора одиничного навантаження.

З огляду на те, що $d\vec{\sigma}_B$ пропорційно залишковим напруженням і відносній деформації вигину, одержимо:

$$d\sigma_B = \alpha \cdot \beta_T \cdot m_c \cdot \sigma_P \cdot \frac{df}{f}, \quad (13)$$

де α – коефіцієнт, що враховує вплив кількості проходів на зниження залишкових напружень;

β_T – коефіцієнт, що враховує вплив температури на зниження залишкових напружень;
 m_c – коефіцієнт, що враховує вплив стану матеріалу на зниження залишкових напружень.
 Напруження, що релаксовані за час обробки, рівні dt , представимо у виді:

$$d\sigma_P = \sigma \cdot dt. \quad (14)$$

Стосовно до накатки роликком на стругальному верстаті час dt визначимо з:

$$dt = \frac{dL \cdot k \cdot b}{v_{px} \cdot S}, \quad (15)$$

де L – відстань, пройдена інструментом за час dt ;

k – коефіцієнт, що враховує невідповідність швидкостей робочого і холостого ходу, приймається $k = 1,75$;

b – ширина поверхні;

v_{px} – швидкість робочого ходу інструмента;

S – подача.

Приймаючи довжину ходу столу, рівній довжині оброблюваної поверхні із врахуванням:

$$dL = \frac{4h}{L} \cdot df, \quad (16)$$

рівняння (12) представимо у виді:

$$d\sigma = \alpha \cdot \beta_T \cdot m_c \cdot \sigma \frac{df}{f} - \sigma \frac{4 \cdot h \cdot k \cdot b}{L \cdot v_{px} \cdot S} \cdot df \quad (17)$$

або

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \alpha \cdot \beta_T \cdot m_c \cdot \frac{df}{f} - \frac{4 \cdot h \cdot k \cdot b}{L \cdot v_{px} \cdot S} \cdot df. \quad (18)$$

Інтегруємо отримане диференціальне рівняння по межах, що відповідають початку зміни форми f_0 , напруженням σ_0 при поверхнево-пластичному деформуванні і досягненню цими параметрами стабільного значення f , σ :

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} = \alpha \cdot \beta_T \cdot m_c \cdot \int_{f_0}^f \frac{df}{f} - \frac{4 \cdot h \cdot k \cdot b}{L \cdot v_{px} \cdot S} \cdot \int_{f_0}^f df, \quad (19)$$

або

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\alpha \cdot \beta_T \cdot m_c} \cdot e^{-\frac{4 \cdot h \cdot k \cdot b}{L \cdot v_{px} \cdot S} (f - f_0)}. \quad (20)$$

Проаналізуємо отриману залежність:

при $v_{px} \rightarrow \infty$, $e^{-\frac{4 \cdot h \cdot k \cdot b}{L \cdot v_{px} \cdot S} (f - f_0)} = 1$; при $S \rightarrow \infty$, $e^{-\frac{4 \cdot h \cdot k \cdot b}{L \cdot v_{px} \cdot S} (f - f_0)} = 1$.

В реальних умовах обробки на стругальних верстатах $4hkb(f - f_0) \ll L \cdot v_{px} \cdot S$.

Тому розуміючи, що обробка поверхнево-пластичним деформуванням нежорстких деталей типу брус з відношенням $L/h \gg 10$ і $b/L \ll 1/10$ здійснюється на стругальних верстатах зі швидкістю $v_{px} = 15-80$ м/хв і подачах $S = 1-25$ мм/дв. хід, а абсолютне значення деформації

$f - f_0$ у порівнянні з будь-яким співмножником знаменника ступеня при « e » є величиною третього і більше порядку малості, можна без здійснення значної похибки прийняти показник ступеня при натуральному логарифмі рівним нулю.

З врахуванням викладеного залежність (19) перетвориться до виду:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\alpha \cdot \beta_T \cdot m_c} \quad (21)$$

Таким чином, на стабільність залишкових напружень, створюваних у поверхневому шарі накаткою, а отже, і форми деталей, основний вплив робить кількість проходів, температура і стан оброблюваного матеріалу.

Проведенні серії однофакторних експериментів зі зразками розмірами $L \times b \times h = 400 \times 50 \times 40$ (мм), виготовленими зі сталі 30, дозволили установити області істотного впливу при постійному зусиллі накатки $P = 2,45$ кН, кількості проходів, температури, стану оброблюваного матеріалу (вихідна шорсткість поверхні R_a , вихідна твердість матеріалу – НВ) на ступінь зміни форми зразків після витримки протягом 30 діб (рис. 3).

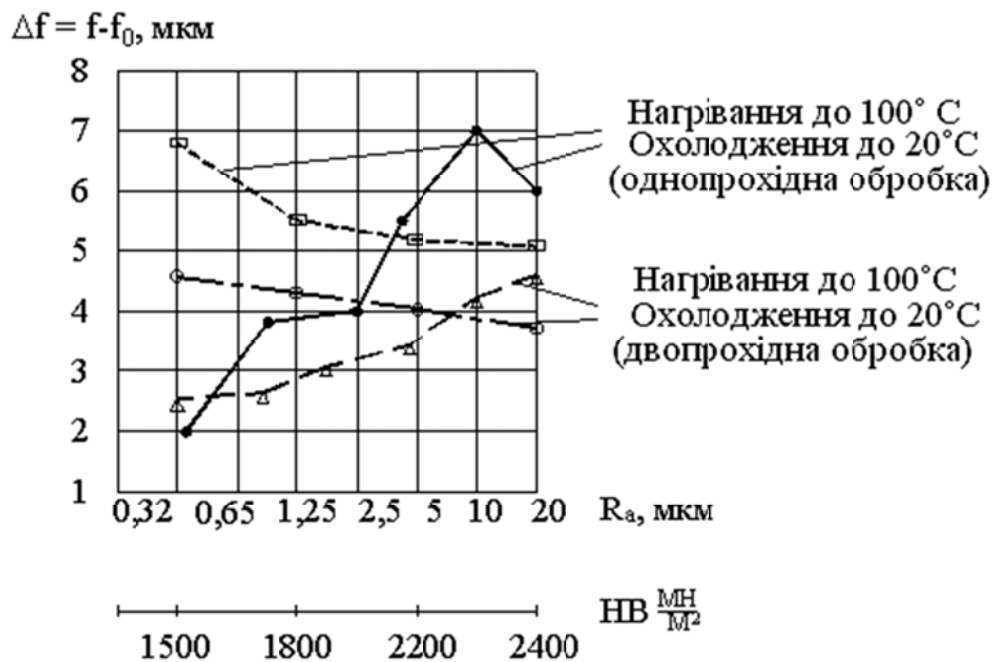


Рис. 3. Вплив кількості проходів накатаних зразків залежності від початкової шорсткості (\bullet , Δ) і твердості матеріалу (\diamond , \square)

При цьому дотримувалася умова вибору подачі $S < (1/3)r$. При $r = 5$ мм подача складала 1,4 мм/дв. хід. (де r – радіус профілю ролика).

З огляду на те, що температура в зоні накатки при рясному змащенні поверхні обробки мастилом «Індустріальне 20» і швидкості обробки $n = 26,5$ дв. хід/хв практично дорівнювала температурі навколишнього середовища, було прийняте рішення впливати на досліджувані зразки штучним температурним полем, створюваним двоокисом вуглецю CO_2 , (сухий лід) у стані кипіння ($t = -78,5$ °С) і електропіччю опору мод. СНО–3,5 \times 6 \times 2,5–15, $N = 26$ кВт, $U = 380$ В, $f = 50$ Гц, конструкція якої забезпечує автоматичну підтримку температури в діапазоні від 50 до 1200 °С. Витримка зразків у поле дії температури була в кожному випадку одна година. Вимір форми робили до обробки, після обробки і після нагрівання-охолодження (охолодження-нагрівання) зразків до кімнатної температури.

Аналіз отриманих результатів показує, що зразки, накатані в два проходи, зберігають, за інших рівних умов, форму стабільною до порівняно більшої за абсолютним значенням температури, ніж оброблені за один прохід.

Характер зміни форми зразків, нагрітих, потім охолоджених до кімнатної температури (при вищевказаних умовах експерименту), свідчить про наявну тенденцію до прийняття ними вихідної до накатки кривизни. У зразків, що піддаються після обробки впливу низьких температур, форма змінюється у бік утвореного прогину від накатки, причому за рівні інтервали температур менш інтенсивно.

Спостереження за зміною форми накатаних деталей, що піддавалися кліматичним впливам протягом одного року, показали, що стабільність настає після закінчення 7–8 місяців. При цьому максимальні значення змін у межах 4–6 %. Зміни форми деталей, оброблених у два і три проходи, за цей проміжок часу практично не спостерігалися.

Для установлення впливу розглянутих вище факторів на ступінь зміни форми деталі зазначених розмірів, а також їх взаємодії, застосовувалося планування екстремальних експериментів по методу Бокса-Уілсона. Для рішення поставленої задачі був використаний дробовий факторний експеримент ДФЕ типу 2^{4-1} .

У результаті обробки експериментальних даних отримана математична модель досліджуваного процесу у виді:

$$f_{\%} = 3,8 \cdot 10^{-9} \frac{i^{3,8} \cdot T^{3,8-1,14 \cdot \lg i}}{HB^{0,2}} \cdot Ra^{2,87-0,93 \cdot \lg T - 0,82 \cdot \lg i} \quad (22)$$

Аналіз залежності показує, що найбільший вплив на ступінь зміни форми (жолоблення) робить температура і число проходів i .

Зміну форми під дією кількості проходів можна пояснити зниженням рівня первинно створених зміцненням залишкових напружень наступними проходками. Збільшення вихідної твердості матеріалу сприяє зменшенню ступеня зміни форми деталей під дією температури і числа проходів.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження показують, що метод поверхневого пластичного деформування може служити одним із ефективних засобів підвищення якості нежорстких деталей.

Результати проведеного аналізу перспектив розвитку поверхнево-пластичного деформування дають підставу зробити висновки про те, що можливості методу у даний час далеко не вичерпані, існують шляхи для подальшого його удосконалювання і розширення областей використання при обробці нежорстких деталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Повышение качества нежестких деталей на финишных операциях / П. Н. Яцерицын, М. Я. Белкин, В. А. Колот, Л. П. Колот // Вестник машиностроения. – 1995. – № 9. – С. 60–62.
2. Кропоткина Е. Ю. Совершенствование технологии обработки нежестких деталей / Е. Ю. Кропоткина // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 21–24.
3. Нежинский А. М. Совершенствование технологии обработки поверхностей деталей машин методами поверхностно-пластического деформирования / А. М. Нежинский // Технология машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 14–17.
4. Яцерицын П. Н. Управление величиной коробления плоскостных деталей поверхностным наклепом / П. Н. Яцерицын, В. А. Колот, Л. П. Колот // Известия академии наук БССР. – 1992. – № 3. – С. 37–41. – (Серия «Физ.-техн. науки»).
5. Рыбаков Г. М. Методы поверхностно-пластического деформирования / Г. М. Рыбаков, С. И. Пудков // Технология машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 71–74.