

УДК 621.9:621.7:658.52

Л.М.Акулович, д.т.н.

*Конструкторсько-технологічний інститут засобів механізації та автоматизації
(м. Мінськ, Білорусь)*

М.Л.Хейфець, д.т.н., проф.

Полоцький державний університет (м. Новополоцьк Вітебської обл., Білорусь)

ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

Розроблено технологічні основи комбінованої термомеханічної обробки поверхонь деталей в електромагнітному полі, що базуються на адаптивних принципах керування характеристиками поверхневого шару. Запропоновано раціональний технологічний маршрут термомеханічного зміцнення в електромагнітному полі.

Підвищення потужності і продуктивності машин у ряді випадків обмежується недостатньою міцністю і зносостійкістю деталей. Невідповідність надійності і довговічності деталей зростим вимогам веде до збільшення витрати запасних частин. З урахуванням рівного ресурсу роботи нових і відновлених деталей при зниженні вартості останніх у порівнянні з новими зміцнення і відновлення деталей машин є актуальними для машинобудівного виробництва [1].

Накопичений до теперішнього часу досвід показує, що не існує універсальних способів, ефективних для зміцнення різноманітних деталей, тому що кожен спосіб має свою раціональну область застосування. У зв'язку з цим перед технологом часто виникає задача вибору способу зміцнення і відновлення деталей або їхнього сполучення з числа відомих, і на підприємствах усе ширше застосовується зміцнення з використанням різальних і деформуючих інструментів, а також електродугових, плазменних, променевих та інших джерел енергії [2].

Процеси формування поверхонь деталей, включаючи фінішні операції, носять в основному термомеханічний характер, у той же час електромагнітні потоки енергії найбільш технологічні і зручні в керуванні. Отже, ресурсо- і енергозберігаючі процеси термомеханічної обробки в електромагнітному полі є перспективними при зміцненні і відновленні деталей машин у гнучкому автоматизованому багатомоноклатурному виробництві [3].

Системний аналіз процесів зміцнення і відновлення деталей. Розмаїтість умов роботи машин і видів зношування деталей обумовило появу безлічі способів їхнього зміцнення і відновлення, кожний з яких має свою раціональну область застосування.

Для різних способів зміцнення і відновлення деталей розглядалися забезпечувані ними геометричні і фізико-механічні показники якості формованої поверхні (рис. 1). Розподіл способів за точністю формованих поверхонь і за мікротвердістю досліджувався в залежності від рівня концентрації енергії в технологічному діапазоні щільностей потужності від 10^2 до 10^9 Вт/див² [4].

У результаті системного аналізу встановлено, що для зміцнення і відновлення циліндричних поверхонь зі зносом від 0,1 до 0,6 мм, який є найчастішою причиною виходу деталей з ладу, доцільно застосовувати способи, що використовують термомеханічні й електромагнітні потоки енергії. Процеси зміцнення поверхонь носять в основному термомеханічний характер, у той же час електромагнітні потоки енергії прості в створенні і зручні в керуванні. Для забезпечення високої твердості і міцності зчеплення покриття, а також задовільної точності і шорсткості поверхні застосовують способи, що використовують електричні розряди і дугу з щільністю потужності $5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$ Вт/див² [2].

Серед них рекомендований один з найбільш перспективних – електромагнітне наплавлення порошків, сполучене з поверхневим пластичним деформуванням, що використовує технологічне тепло, і доповнене шліфуванням і магнітно-абразивною обробкою, реалізованою на тім же технологічному устаткуванні (рис. 2). При цьому не потрібна попередня підготовка поверхні деталі, покриття утворюється з розплаву феромагнітних порошків при малих витратах наплавленних матеріалів та енергоносіїв [3].

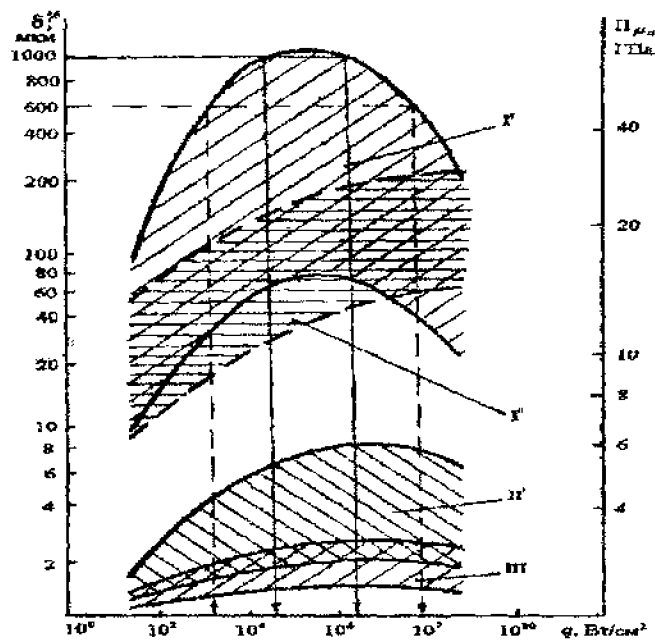


Рис. 1. Розподіл методів зміцнення, відновлення й обробки (I' – III') за точністю формування δ^* поверхонь і за мікротвердістю H_m (IV') у залежності від щільності потужності джерел енергії

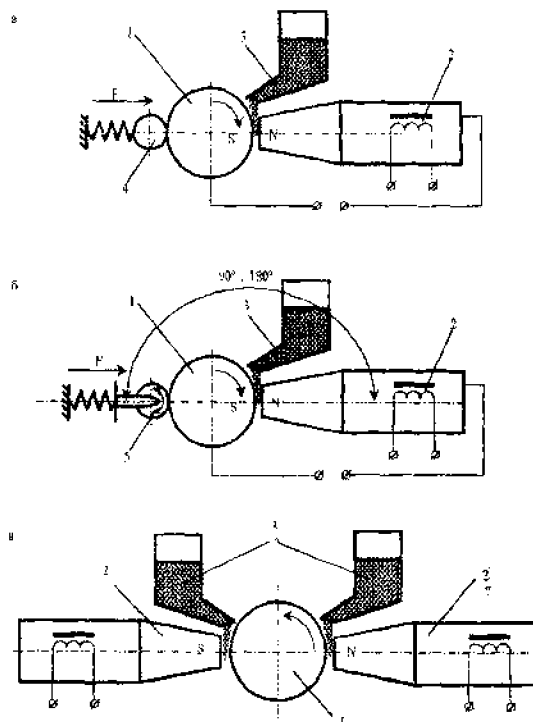


Рис. 2. Принципові схеми комбінованих методів обробки деталей в електромагнітному полі: електромагнітне наплавлення з поверхневим пластичним деформуванням (а), з обробкою абразивним колом (б), магнітно-абразивна обробка (в): 1 – заготовка; 2 – електромагніти; 3 – буфер дозатор; 4 – накатник; 5 – абразивне коло

Методологія досліджень термомеханічної обробки в електромагнітному полі. Способи обробки деталей із системних позицій у даній час розглядаються як послідовності перетворень речовини й енергії в матеріальних та інформаційних підсистемах, спрямованих на зміну фізико-механічних властивостей матеріалу і геометричних параметрів поверхні [5, 6].

Взаємозалежні процеси руху й обміну матеріальними й інформаційними потоками в технологічній системі описуються ентропією [7]:

$$\varepsilon = -\chi \int_0^{\infty} \rho \ln \rho d\rho,$$

де χ – коефіцієнт пропорційності; ρ – щільність розподілу ймовірних станів підсистем.

Рівняння балансу локальної щільності ентропії $\rho\varepsilon$ за часом τ [8]:

$$\partial(\rho\varepsilon) / \partial\tau + \text{grad}(\rho\varepsilon \cdot \vec{V}_n) + \text{grad}\vec{F}_\varepsilon = \sigma_n,$$

де \vec{V}_n і \vec{F}_ε – швидкість і щільність потоку ентропії відповідно; $\sigma_n = d\varepsilon / d\tau$ – виробництво ентропії.

Рівняння дозволяє разом з рівнянням безперервності потоку, законами збереження імпульсу енергії і речовини при заданих крайових умовах визначити критерії тепломасоперепоусу, що описують послідовність перетворень у робочій зоні [2].

Для зміцнення в електромагнітному полі встановлена послідовність Re (Re (Mr , у якій критерій Пеклі (Pe) визначає відношення енергії, що відводиться провідністю і конвекцією; критерій Рейнольдса (Re) – перехід ламінарного руху порошкового середовища в турбулентне; критерій Марангоні (Mr) характеризує адгезію розплаву порошку до матеріалу деталі і визначає поверхневі впливи внаслідок термокапілярних явищ [2, 3].

Відповідно до цього формування поверхневого шару, по-перше, описується орієнтацією часток порошку в робочому зазорі й утворенням з них струмопровідних електродів-ланцюжків; по-друге, характеризується переміщенням сукупності електродів-ланцюжків щодо поверхні деталі і рухом часток порошку; по-третє, визначається адгезією розплаву порошку до основи, утримуваного на поверхні деталі, що впливає на товщину нанопшуваного покриття [4].

Внаслідок цього розробка аналітичних моделей забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик деталі термомеханічною обробкою в електромагнітному полі носило багатоступінчастий характер [3].

На першому етапі розглядалася робоча зона технологічної системи. Аналізувалося формування поверхневого шару деталі при керуванні електромагнітними впливами. Комбінований механізм формування шару описувався взаємозалежними механічним і тепловим процесами.

На другому етапі вивчалися області контакту елементів технологічної системи. Досліджувалася кінематика і сили, що діють на частки в робочій зоні з позицій механіки й електродинаміки порошкового середовища. Потім розглядався розподіл температур у ланцюжку часток під впливом діючих на них сил, що проходить через ланцюжки струму й у залежності від теплофізичних характеристик контактуючих матеріалів. Формування температурного поля деталі визначалося розподілом температур у ланцюжку часток. Температурне поле разом з механікою трибоконтакту визначає кінематику деформуючого елемента, що, у свою чергу, впливає на контактні тиски.

На заключному етапі досліджувався поверхневий шар. Контактні тиски на формованій поверхні деталі разом з температурним полем задають поле напруг. Залишкові напруги в покритті й основі визначалися після електромагнітного наплавлення і поверхневого деформування. Експлуатаційні характеристики деталі, що формується при технологічному спадкуванні, розглядалися в залежності від поля напруг, температур і контактних тисків.

Формування поверхні деталі в процесі термомеханічної обробки в електромагнітному полі. Формування поверхневого шару розглядалося відповідно до запропонованої послідовності етапів побудови аналітичних моделей [3].

За допомогою кінозйомки зі швидкістю 3000 кадрів у секунду визначена зона утворення виходу з робочого зазору участка з найбільшою електричною провідністю у вигляді електродів-ланцюжків з часток порошку, що обумовлює концентрацію в ньому електродугових розрядів, і етапи формування та розвитку електричного розряду [3, 9].

Установлено, що електрод-ланцюжок з часток порошку притискається до зміцнюваної поверхні під дією сили

$$f_u = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{k_u \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i},$$

де k_p – магнітна проникність матеріалу порошку; n – число часток у ланцюжку; R_i – відстань від границі i -ї частки до осі зміцнюваної поверхні; H_i – напруженість магнітного поля на границі i -ї частки; Δ_i, b_i – розміри великої і малої осей еліпсоїда, що описує i -ю частку; K – магнітна сприйнятливість, що характеризує зв'язок між намагніченістю матеріалу порошку і напруженістю магнітного поля; ланцюжок переміщається разом із зміцнюваною поверхнею до виходу з робочого зазору, де утримується тангенціальною силою, обумовленою градієнтом магнітної індукції. При цьому найбільш стабільні ланцюжки, що складаються з 3...4 часток.

Теплова потужність q_e , що витрачається на нагрівання і плавлення електрода-ланцюжка, визначається потужністю q_δ , що виділяється за його довжиною від струму, та ефективною потужністю $q_{ек}$ електричної дуги [1, 3]:

$$q_e = q_\delta + q_{ек} = J^2 R_{ек} + \eta_e JU,$$

де J – сила струму; $R_{ек}$ – опір електрода-ланцюжка; η_e – ефективний к.к.д. нагрівання дугою; U – напруга дуги.

Запалювання і розвиток електричної дуги пояснюється тим, що висока щільність струму призводить до різкого зростання температури в місцях контактів часток порошку, в результаті чого метал часток розплавляється і починає випаровуватися. У проміжку, заповненому парами металу, потенціал іонізації знижується і розвивається дуговий розряд, а місце виникнення розряду визначається розташуванням температурного максимуму [1, 9].

При наплавленні електрод-ланцюжок складається з $i = 1...n$ часток феро-порошку з опорами R_1, \dots, R_n , між якими існують додаткові контактні опори $R_{(2)}, \dots, R_{(n-1)}$, залежні від величини сил f_n . Зміна температури θ з часом τ за довжиною x електрода-ланцюжка описується рівняннями [3, 10]:

$$c_i p_i \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{J^2 R_i}{\Delta S}; \quad c_u p_u \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda_u}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_u \partial^2 \theta}{\partial x^2},$$

з граничними умовами

$$\theta(-\Delta; \tau) = \theta((n+1)\Delta; \tau) = \theta_c; \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=-\Delta, 0} = \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\Delta, 0} = \frac{k J^2 R_{(i-1)}}{\lambda_u \Delta S},$$

де c_i – питома теплоємність матеріалу i -ї частки; c_u – питома теплоємність, рівна c_u (для полюсного наконечника електромагніта) і c_δ (для зміцнюваної деталі); p_i – питомий електричний опір i -ї частки; p_u – питомий електричний опір, рівний p_u (для полюсного наконечника електромагніта) і p_δ (для зміцнюваної деталі); λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ї частки; λ_u – коефіцієнт теплопровідності, рівний λ_u (для полюсного наконечника електромагніта) і λ_δ (для зміцнюваної деталі); θ_c – температура навколишнього середовища; Δ – велика вісь еліпсоїда, що описує частку; ΔS – площа контакту часток; k – коефіцієнт розподілу енергії, рівний 1 у контакті часток при $i = 1, \dots, n$ і $0 < k_u < 1$ – у контакті частки з полюсним наконечником електромагніта і з поверхнею деталі при $i = 0$.

Аналіз характеру зміни температури за довжиною електрода-ланцюжка показав, що при коефіцієнті розподілу енергії $0,7 < k_u < 1$ температурний максимум знаходиться в поверхні полюсного наконечника електромагніта, де і розвивається електричний розряд, а наплавлення порошку на поверхню деталі не відбувається. При $k_u = 0,7$ місце виникнення електричного розряду визначається значеннями контактних опорів $R_{(i-1)}$. При значеннях $0 < k_u < 0,7$ температурний максимум розташовується на поверхні деталі, процес формування покриття стабілізується, а його стійкість підвищується зі збільшенням магнітної індукції та магнітної сприйнятливості металу порошку [1, 10].

Формування наплавленого шару здійснюється в результаті стохастичного розподілу по поверхні деталі розплаву часток порошку, а товщина покриття визначається адгезією розплаву до зміцнюваної поверхні і досягає 0,6 мм. Зміцнення поверхні супроводжується процесами нанесення покриття й ерозією його окремих у частків, раціональною є питома тривалість

зміцнення близько $2,7 \text{ с/см}^2$, при якій маса перенесеного на поверхню деталі металу порошку максимальна [3, 4].

Розрахунок температурних полів зміцнюваної деталі за рівняннями теплопровідності для нестационарної двовимірної задачі з граничними умовами першого роду показав доцільність визначення температур суперпозицією: нагрівання на $400\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ від рівномірно розподіленого по поверхні джерела, що швидко рухається, і нагромадження тепла циліндричною деталлю кінцевих розмірів [3, 11].

Установлено, що вирівнювання температур за глибиною зміцнюваного шару відбувається після перших оборотів деталі, а температурна стабілізація по всьому обсязі на рівні $200\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ – через $20\text{--}40 \text{ с}$. Температурні поля деталі дозволяють розрахувати термічні напруги при наплавленні і визначити раціональне розміщення деформуючого інструмента.

Для вигладжування і деформаційного зміцнення поверхні при наплавленні застосовувалися кулькові і роликіві накатники [10, 12]. Напружений стан зміцненого шару вивчається з використанням рішень контактної задачі Герца при навантаженні двошарового півпростору [2, 3].

Для визначення еквівалентних напруг користувалися критерієм Мізеса:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T \text{ або } \sigma_{\text{екв}}^* = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_{T, \text{к}}$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруги; σ_T – границя текучості.

Найбільші еквівалентні напруги при поверхневому деформуванні виникають на глибині, рівній $0,5\text{--}0,8$ напівширини контактної площадки [11]. Тому що наплавлена поверхня має макронерівності, пластичне деформування виступів починається при навантаженнях менших, ніж для гладкої поверхні. При цьому помітні залишкові напруги виникають тільки тоді, коли на поверхні наплавленого шару еквівалентні напруги досягнуть межі текучості, і пластична деформація пошириться на визначену глибину [3].

Аналіз контактної взаємодії кульки з оброблюваною поверхлею показав, що рух кульки визначається макроступами і температурою наплавленого шару. Моменти тертя, що збільшуються з ростом температури, зменшують швидкість обертання кульки і шлях тертя, змінюючи траєкторію руху і забезпечуючи мінімум потенційної та кінетичної енергії. Тому для самоорганізації процесів при деформуванні поверхні необхідно надати деформуючому інструменту максимально можливе число ступенів волі [1, 3].

У результаті проведених досліджень та аналізу розроблених моделей визначені принципи керування термодформаційними впливами на поверхню при термомеханічному зміцненні і відновленні деталей в електромагнітному полі. Згідно з цими принципами, напружений стан поверхневого шару визначається раціональними значеннями коефіцієнтів магнітної проникності (k_n), розподілу енергії (k_n) і тертя ковзання (k_m), шляхом зміни магнітної індукції (B), сили розрядного струму (J) і зусилля деформування (F) [3, 4].

Оптимізація термомеханічної обробки в електромагнітному полі. Дослідження процесів зміцнення, відновлення й обробки деталей в електромагнітному полі проводилося шляхом їхнього статистичного моделювання з використанням критеріїв подоби.

Характеристики електромагнітних потоків описувалися критеріями магнітної взаємодії Sm , напруженості електричного поля Se та їхнім співвідношенням, пропорційним енергетичному критерію Si [3, 4]:

$$Sm = \frac{J}{l} \cdot \frac{B}{\rho v_n^2} = \frac{J}{l} \cdot \frac{B}{\tau F v_n}; \quad Se = \frac{l}{J} \cdot \frac{E}{R/l}; \quad \frac{Sm}{Se} = Si \cdot \frac{B}{E} \cdot \frac{h}{v_n},$$

де J – сила струму; l – лінійний розмір робочої зони; ρ – щільність потоку; v_n – швидкість потоку; τ – поточний час; F – сила; E – напруженість електричного поля; R – електроопір; h – ентальпія, тобто теплоємність потоку.

Термомеханічні процеси формування поверхневого шару описувалися критеріями переносу Пеклі (Pe), Рейнольдса (Re), Прандтля ($Pr = Pe/Re$), модифікованими з урахуванням змін провідності і в'язкості технологічного середовища в електромагнітному полі [2, 4]:

$$Re^* = \frac{Pe^*}{Pr^*} = \frac{v_n l}{\omega^* Pr^*} = \frac{v_n l}{\nu^*},$$

де ω^* і ν^* – узагальнені провідність і в'язкість технологічного середовища.

Модифікована в'язкість ν^* характеризується на мікрорівні співвідношенням трансляційних і ротаційних складових напруженого стану феропорошкового середовища (σ_f / σ_m), а на макрорівні – співвідношенням швидкостей головного і додаткового рухів (V / S). Співвідношення складового напруженого стану (σ_f / σ_m), що визначають поступальне й обертальне переміщення часток порошку в електромагнітному полі, відповідно до критеріїв Sm , Se і Si , представлялося відношеннями: (B/τ) – для магнітодинамічних, (I/J) – для термодинамічних, (F/J) – для термодформаційних, (B/E) – для електромагнітних впливів [3, 4].

Відповідно до критерію Рейнольдса Re^* , рельєф, що утвориться, R_a поверхні розглядався в залежності від технологічних факторів, що визначають продуктивність Q обробки, змінення HRC поверхневого шару, зміни провідності ω^* і ν^* в'язкості порошкового середовища.

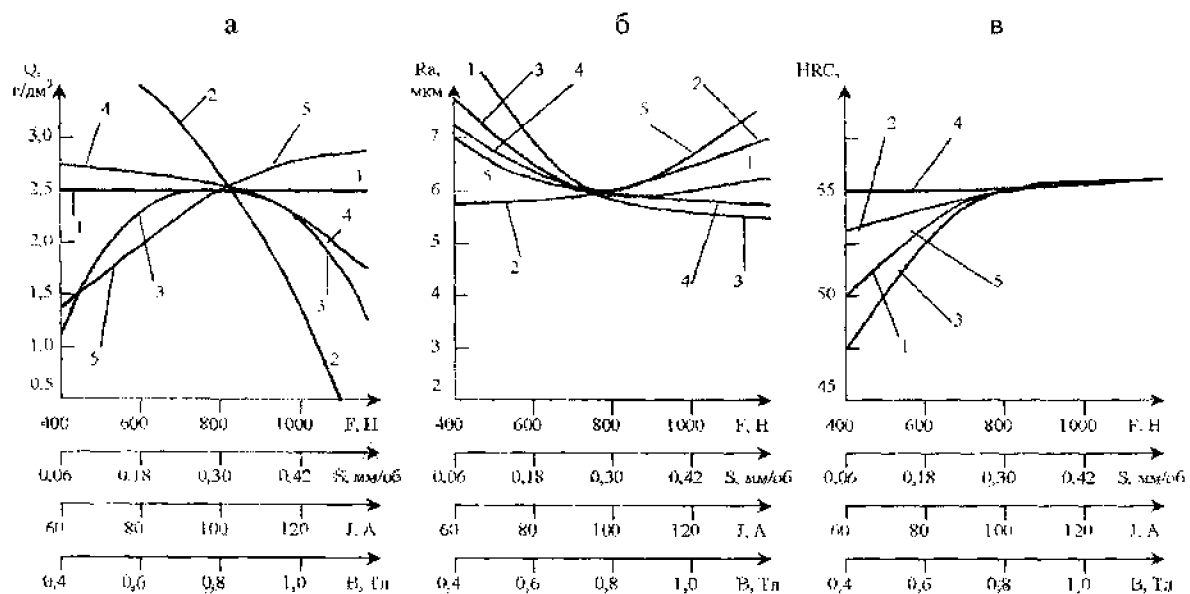


Рис. 3. Залежності продуктивності Q (а), шорсткості R_a (б), твердості HRC_s (в) при електромагнітному наплавленні з поверхневим пластичним деформуванням від: 1 – зусилля деформування F ; 2 – подачі S ; 3 – сили струму J ; 4 – швидкості V ; 5 – магнітної індукції B

Моделі процесів, що характеризують залежності продуктивності обробки і показників якості поверхні від технологічних факторів (рис. 3 і 4), отримані при статистичній обробці експериментальних даних [1–4].

Для електромагнітного наплавлення технологічні фактори в порядку зменшення їхніх значень розташовуються в ряди за ступенем впливу на:

продуктивність – $\delta \rightarrow q \rightarrow B \rightarrow U \rightarrow \tau \rightarrow V$;

рельєф поверхні – $B \rightarrow \delta \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow q$,

де δ – величина робочого зазору; q – подача порошку.

При формуванні рельєфу вплив технологічного фактора q , що визначає продуктивність процесу, незначний в порівнянні з фактором τ , що характеризує тривалість впливів електромагнітних потоків. Продуктивність процесу забезпечується тривалою фіксацією часток порошку в робочому зазорі, що і здійснює зворотний зв'язок рельєфу з продуктивністю і підвищує стійкість технологічної системи. Отже, технологічний процес варто вести при великих значеннях q і відповідно менших значеннях τ . Наявність у робочому зазорі часток порошку в надлишковій кількості призводить до їхнього переміщення в напрямку V і самоорієнтації, сприяючи збільшенню електричної провідності ланцюжків. Таким чином, додаткові

переміщення часток порошку створюють умови для самоорганізації процесів утворення електродів-ланцюжків і виникнення електричних розрядів.

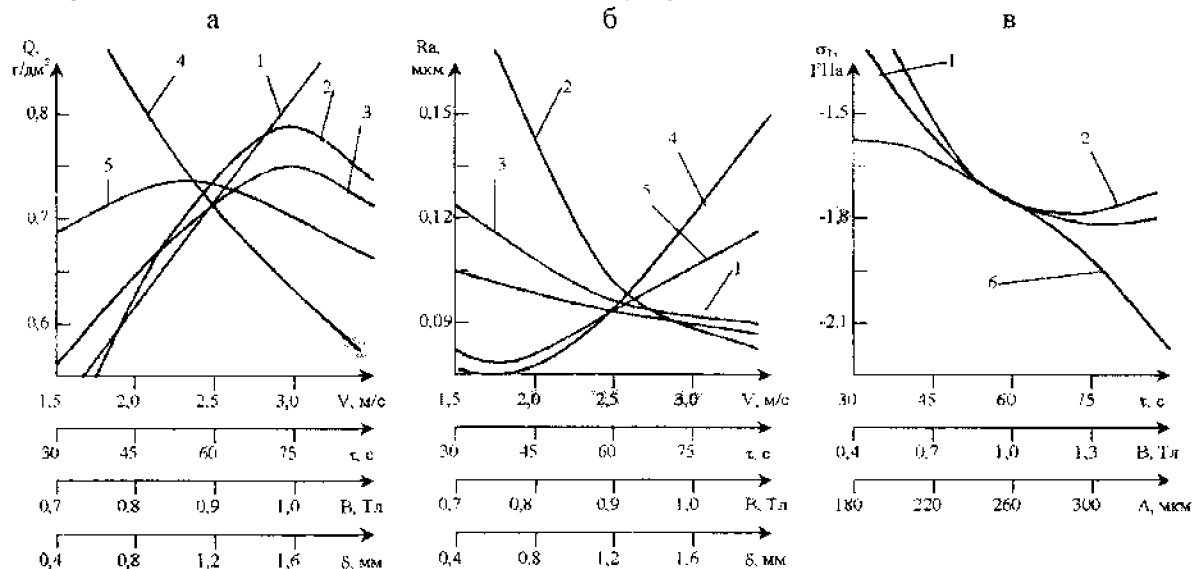


Рис. 4. Залежності продуктивності Q (а), шорсткості R_a (б), напруг I роду σ_1 (в) при магнітно-абразивній обробці:
 1 – магнітна індукція B ; 2 – тривалість обробки τ ;
 3 – швидкість головного руху V ; 4 – величина зазору δ ;
 5 – амплітуда A ; 6 – розмір зерен

Розробка статистичних моделей процесів електромагнітного наплавлення, електромагнітного наплавлення з поверхневим пластичним деформуванням (рис. 3), магнітно-абразивної обробки покрив (рис. 4) і дослідження значимості технологічних факторів дозволили оптимізувати режими і виділити зворотні зв'язки в технологічній системі. При використанні негативного зворотного зв'язку, обумовленого структуроутворенням у поверхневому шарі, термомеханічного впливу, зміцнюючи поверхню, стабілізують параметри якості її рельєфу. При використанні позитивного зворотного зв'язку додаткові переміщення часток порошку і деформуючого інструмента, формуючи рельєф, створюють зміцнюючі структури і підвищують продуктивність обробки [2, 4].

Організація зворотних зв'язків у технологічній системі створює умови для керування стійкістю термомеханічних процесів в електромагнітному полі з метою забезпечення заданих показників якості поверхні і продуктивності обробки.

Технологічна спадковість поверхонь деталей при термомеханічній обробці в електромагнітному полі. Технологічна спадковість при термомеханічній обробці в електромагнітному полі обумовлена наявністю складних взаємозв'язків між електромагнітними і термомеханічними впливами при формуванні поверхневого шару.

Установлено, що при електромагнітному наплавленні феробором ФБ-1 формуються три зони структурної будівлі зміцненого шару сталі 45: наплавленого, дифузійного і термічного впливів. У наплавленій зоні основними структурними складовими є мартенсит, сорбіт і бориди на основі Fe і Fe₂B мікротвердістю до 20 ГПа. Дифузійна зона являє собою α – твердий розчин бора в залозі мікротвердістю до 11,5 ГПа. При наплавленні з поверхневим пластичним деформуванням зона термічного впливу розширена за рахунок термодформацийного зміцнення на глибину, що перевищує товщину покриття до 3 разів [1, 3, 10].

При електромагнітному наплавленні тепло, що виділяється в зоні електродугових розрядів, інтенсивно нагріває тонкий поверхневий шар деталі до високих температур, що викликає збільшення його обсягу. Тому що при нагріванні пластичність металу зростає, та в розігрітому участку не виникає значних внутрішніх напружень. Після завершення дії електричної дуги і переносу краплі розплаву починається швидке охолодження цього участка, що супроводжується його стисненням, якому перешкоджають шари металу, що знаходяться нижче. Тому в поверхневому шарі деталі розвиваються залишкові напруження розтягу (рис. 5, а).

Оскільки спочатку прохолоджується зовнішній, а потім більш глибокі шари, то стиснення останніх викликає зсув максимуму напруг розтягу усередину деталі і часткове зняття їх на поверхні.

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) у процесі електромагнітного наплавлення змінює не тільки величину, але і знак залишкових напруг. Це обумовлено збільшенням щільності матеріалу при пластичній деформації (рис. 5, б).

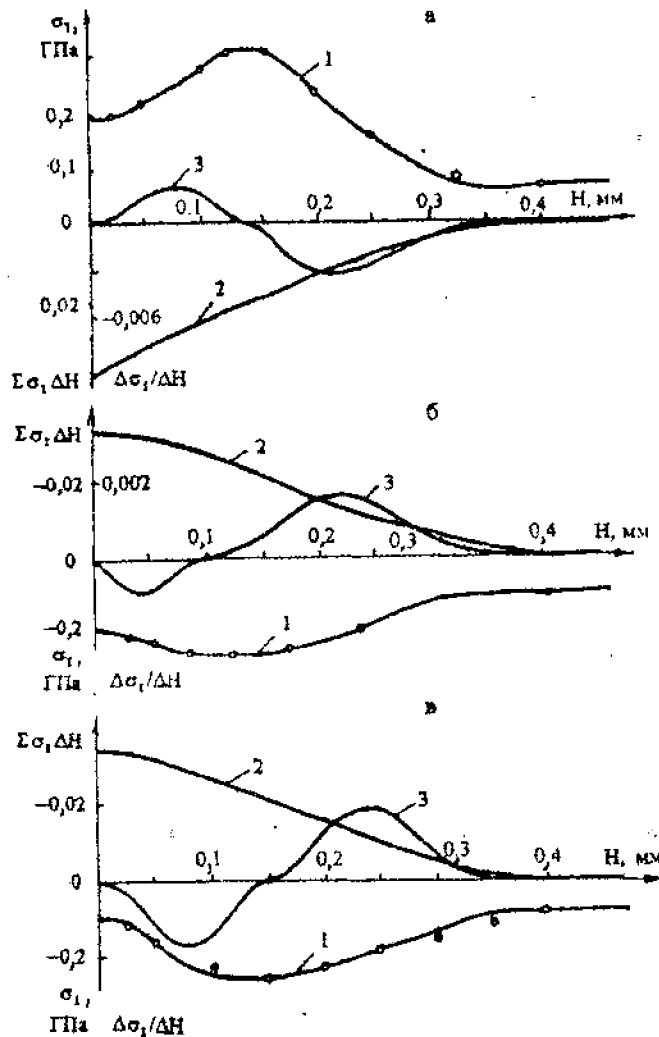


Рис. 5. Залежності розподілу за глибиною H поверхневого шару після електромагнітного наплавлення (а), наплавлення з ППД (б), наплавлення з ППД і шліфування (в):

1 – залишкові напруги σ_1 ; 2 – загальні зміцнення $\sum \sigma_1 \Delta H$;

3 – швидкості зміцнення $\Delta \sigma_1 / \Delta H$

Наступне шліфування зміцненої поверхні істотно не змінює величину і характер розподілу залишкових напруг (рис. 5, в).

Здійснюючи раціональну послідовність технологічних операцій і переходів з урахуванням потужності впливів потоками енергії (рис. 5, лінії 3), можна прогнозувати і формувати в поверхневому шарі необхідні фізико-механічні параметри якості.

Поверхнєве пластичне деформування в процесі електромагнітного наплавлення зменшує шорсткість поверхні до значень не більше R_a 9,5 мкм. При цьому опорна поверхня деталі збільшується в 2–3 рази. Покриття може оброблятися абразивними інструментами, що забезпечують шорсткість поверхні в межах R_a 0,5–3,5 мкм. [1, 3].

При магнітно-абразивній обробці шліфованої поверхні із шорсткістю не більше R_a 1,25 мкм вихідний геометричний профіль не копіюється і досягається шорсткість поверхні R_a 0,10...0...0,16 мкм, порівнянно з глибиною слідів вільного абразиву [3, 9].

Висновок. Вивчення спадкування фізико-механічних і геометричних параметрів якості поверхневого шару дозволило визначити раціональний маршрут відновлення, зміцнення й обробки деталей: 1) електромагнітне наплавлення з поверхневим пластичним деформуванням при $J = 110$ А, $B = 0,9$ Тл, $F = 785$ Н, $S = 0,32$ мм/об, $V = 0,08$ м/с; 2) шліфування покриття навкруги з карбіду кремнію зеленого до R_a 0,63...0,80 мкм; 3) магнітно-абразивна обробка при $V = 3$ м/с, $\tau = 65$ с, $B = 1,1$ Тл, $A = 1,5$ мм, $\delta = 0,8$ мм.

Установлено, що термомеханічне зміцнення порошком феробору ФБ-1 і обробка в електромагнітному полі за пропозованим технологічним маршрутом деталей зі сталі 45 збільшують зносостійкість їхніх поверхонь у 1,4...1...1,8 раза при зіставленні з еталіном (сталь 45 нормалізована і загартована з нагрівання ТВЧ на глибину 1,2...1...1,6 мм до 52...54...54 HRC₂).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, А.П. Ракомсин, Л.Э. Сидоренко. – Минск: ФТИ, 1997. – 416 с.
2. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
3. Акулович Л.М. Термомеханическое укрепление деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
4. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Э.Д. Эйдельман, И.А. Сенчило. – Минск: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000 – 172 с.
5. Подураев В.И. Технология физико-химических методов обработки. – Москва: Машиностроение, 1985 – 264 с.
6. Рыжов Э.В., Аверченко В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – Киев: Наукова думка, 1989 – 192 с.
7. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем). – Москва: Советское радио, 1976 – 286 с.
8. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. – Москва: Мир, 1979 – 279 с.
9. Ящерицын П.И., Забаский М.Т., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. Алмазно-абразивная обработка и укрепление изделий в магнитном поле. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.
10. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машины в магнитном поле. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.
11. Обработка износостойчивых покрытий / Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец и др. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
12. Технология размерно-чистовой и упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов, Б.П. Чемисов, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович. – Минск: Университетское, 1993. – 188 с.

АКУЛОВИЧ Леонід Михайлович – доктор технічних наук, заступник директора Конструкторсько-технологічного інституту засобів механізації та автоматизації (м. Мінськ, Білорусь).

Наукові інтереси:

– прогресивні методи обробки матеріалів.

ХЕЙФЕЦЬ Михайло Львович – доктор технічних наук, професор кафедри “Технологія машинобудування” Полоцького державного університету (м. Новополюцьк Вітебської обл., Білорусь).

Наукові інтереси:

- процеси комбінованої обробки матеріалів;
- автоматизація технологічної підготовки виробництва;
- організація та управління машинобудівними підприємствами.