

Г. Шинкаренко

Професор, докт. фіз.-мат. наук,
Львівський національний університет
імені Івана Франка,
м. Львів

І. Луців

Професор, докт. техн. наук

В. Гурей

Аспірант,
Тернопільський національний
технічний університет
імені Івана Пулюя,
м. Тернопіль

УДК 621.787

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ В ЗОНІ КОНТАКТУ ІНСТРУМЕНТ-ДЕТАЛЬ ПІД ЧАС ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Наведено результати дослідження зміни температури у поверхневому шарі при фрикційному зміцненні деталей машин інструментом з первною робочою частиною. Показано, що на величину розподілу температур по глибині шару істотно впливає ширина паза, а кількість пазів – неістотно.

поверхнєве зміцнення, температура, метод скінченних елементів, зміцнений шар

Для підвищення довговічності деталей машин використовують різні методи поверхневого зміцнення. Одним з сучасних, ефективних методів поверхневого зміцнення є фрикційне зміцнення. За виконанням фрикційне зміцнення деталей машин аналогічне до процесу шліфування, тільки замість абразивного круга встановлюється металевий диск. Процес фрикційного зміцнення виконується на шліфувальних верстатах (плоско- або круглошліфувальних) з певною їх модернізацією або на спеціально розробленому обладнанні.

Фрикційне зміцнення деталей машин належить до технологічних методів поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Такий потік енергії утворюється у зоні контакту інструмент-деталь при високошвидкісному терті металевого інструмента-диска по оброблюваній поверхні. У зоні контакту проходить високошвидкісне нагрівання поверхневого шару металу деталей до температур вище точки фазових перетворень, високошвидкісне зсувне деформування з наступним його високошвидкісним охолодженням. Сформований поверхневий нанокристалічний шар має специфічні фізико-механічні, електрохімічні, корозійні власти-

вості, що дозволяє значно підвищувати експлуатаційні характеристики зміцнених деталей машин. На товщину формування суцільних, нанокристалічних поверхневих шарів істотно впливає температура нагрівання та деформування поверхні деталей машин [1].

Процеси, які проходять у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційної обробки є швидкоплинними. Для визначення параметрів фрикційного зміцнення та керування процесом обробки необхідно знати розподіл температури у поверхневому шарі металу оброблюваної деталі під зоною контакту інструмент-деталь. Розрахунок розподілу температур під зоною контакту інструмент-деталь проводили теоретичними методами [2, 3], але отримані результати не завжди дають результати, необхідні для інженерних розрахунків.

Для визначення нерівномірного теплового поля під зоною контакту зараз найбільш ефективним є метод скінченних елементів. Розподіл температур по глибині металу оброблюваної деталі залежить від властивостей оброблюваного металу, геометрії і форми робочої поверхні інструмента, умов контакту, інтенсивності джерела теплової енергії і інших параметрів. Тому метою нашої роботи є

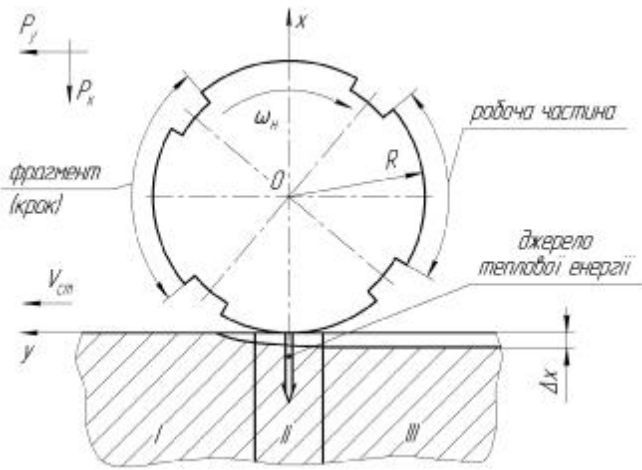


Рис. 1. Схема фрикційного зміцнення деталей машин інструментом з перервною робочою частиною

визначення розподілу температур по глибині оброблюваної деталі під час фрикційного зміцнення з використанням методу скінченних елементів.

У зоні контакту інструмент-деталь при фрикційному зміцненні виникають високі температури, які перевищують критичні точки структурних перетворень. Незважаючи на короткочасність нагрівання, у поверхневих шарах деталей проходять структурні та фазові зміни. Область, у якій протікають термомеханічні процеси під впливом високих температур, що виникають при зміцненні, можна розділити на три характерні зони: перша – незначного підвищення температури перед джерелом теплової енергії, що наближається; друга – інтенсивного виділення теплоти під джерелом; третя – інтенсивного охолодження після проходження джерела теплової енергії (рис. 1). Такий поділ металу на зони дозволяє розглянути кінетику протікання термомеханічних процесів у зміцненому поверхневому шарі деталі.

Метод скінченних елементів базується на заміні цілісного середовища системою зі скінченною кількістю ступенів вільності [4]. Точність розрахунків підвищується зі зменшенням розмірів елементів, що створюють систему. Для визначення розподілу температури по глибині оброблюваної деталі під час фрикційного зміцнення приймаємо, що температура в зоні контакту інструмент-деталь на поверхнях контактуючих тіл є однаковою, а потужність теплового потоку у кожній точці площадки контакту дорівнює сумі інтенсивностей потоків теплоти, яку поглинає кожне тіло контактуючої пари, т.т. деталь і інструмент. Характерний розмір зони контакту, а саме її ширина, є набагато менша за розміри інструмента та деталі, тому останні можна розглядати як однорідні ізотропні півпростори, вздовж межі яких рухається зона контакту. Нас найбільше цікавить друга зона контакту інструмент-деталь, у якій відбувається інтенсивне високошвидкісне нагрівання поверхневих шарів металу. Зона контакту інструмент-деталь розглядається як адіабатичний стрижень, до торця якого прикладено джерело теплової енергії та навантаження. Побудову математичної моделі для визначення розподілу температури по глибині

поверхневого шару оброблюваної деталі здійснювали методом скінченних елементів у такий спосіб.

Нехай оброблювана деталь займає обмежену зв'язну область точок $x = (x_1, \dots, x_n)$ евклідового простору R^n ($n=1, 2$ або 3) з неперервною за Ліпшицем межею Γ і час $t \in [0, T]$, $0 < T < +\infty$. Потрібно знайти розподіл температури $u = u(x, t)$ такий, що задовольняє такі умови:

$$\begin{cases} c_{vr} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(I_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) = 0 \text{ в } \Omega \times [0, T], \\ u = 0 \text{ на } \Gamma \times [0, T], \\ u|_{t=0} = u_0 \text{ в } \Omega \end{cases} \quad (1)$$

Тут $u_0 = u_0(x)$ – початковий розподіл температури в деталі, фізичні характеристики якої характеризуються густиною маси $r = r(x) > 0$, коефіцієнтом теплоємності при сталому об'ємі $C_v = C_v(x) > 0$ та коефіцієнтами теплопровідності

$$\{I_{ij}\}_{i,j=1}^n, \quad I_{ij} = I_{ij}(x) \geq 0,$$

які володіють звичайними властивостями симетрії та еліптичності:

$$I_{ij} = I_{ji}, \quad I_{ij} x_i x_j \geq I_0 x_i x_j \quad x_i \in R^n, \quad I_0 = \text{const} > 0 \quad (2)$$

Крім цього, будемо вважати, що для даних початково-крайової задачі (1) існують включення

$$C_v, r, I_{i,j} \in L^\infty(\Omega), \quad u_0 \in L^2(\Omega) \quad f \in L^2(0, T, H^{-1}(\Omega)). \quad (3)$$

Введемо білінійні форми та лінійний функціонал:

$$m(u, v) = \int_{\Omega} r c_v u v dx, \quad a(u, v) = \int_{\Omega} I_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} \frac{\partial v}{\partial x_i} dx \quad \forall u, v \in V,$$

$$\langle l, v \rangle = m(f, v) + \int_{\Gamma} \bar{q} v dy \quad \forall v \in V,$$

тоді початково-крайова задача (1) допускає наступну варіаційну постановку:

$$\begin{cases} \text{задано } u_0 \in H, \quad l \in L^2(0, T, V'), \\ \text{знайти функцію } u \in L^2(0, T, V') \text{ таку, що} \\ m(u'(t), v) + a(u(t), v) = \langle l(t), v \rangle \quad \forall t \in (0, T) \\ m(u(0) - u_0, v) = 0 \quad \forall v \in V \end{cases} \quad (4)$$

Щоб побудувати числову схему розв'язування задачі (4), спочатку поділимо відрізок часу $[0, T]$ на частини $[t_j, t_{j+1}]$, $j = 0, \dots, N_T + 1$, довжини $\Delta t = t_{j+1} - t_j$ на кожному з яких розв'язок $u(t) \in V$ будемо апроксимувати лінійною функцією вигляду

$$u_{\Delta t}(t) = \left[1 - \Delta t^{-1}(t - t_j) \right] u^j + \Delta t^{-1}(t - t_j) u^{j+1} \quad \forall t \in [t_j, t_{j+1}]; \\ j = 0, \mathbf{K}, N_T$$

з невідомими $u^j, u^{j+1} \in V$. Для відшукування останніх побудовано рекурентну схему обчислень:

$$\begin{cases} \text{задано параметри } \Delta t > 0, q \geq [0,1] \text{ та } u^0 \in V; \\ \text{знайти } u^{j+1/2}, u^{j+1} \in V_h \text{ такі, що} \\ m(u^{j+1/2}, v) + \Delta t q a(u^{j+1/2}, v) = \\ = \left\langle l \left(t_j + \frac{1}{2} \Delta t \right), v \right\rangle - a(u^j, v) \forall v \in V, \\ u^{j+1} = u^j + \Delta t u^{j+1/2} \quad j = 0, \mathbf{K}, N_t \end{cases} \quad (5)$$

Схема (5) є безумовно стійкою за вибору $q \geq 1/2$ і має квадратичну збіжність, якщо $q = 1/2$.

На додаток кожна з варіаційних задач (5) дискретизується за допомогою процедури Гальоркіна за просторовими змінними з використанням просторів апроксимацій методу скінченних елементів [4].

Розглянемо розподіл температури під зоною контакту інструмент-деталь при зміцненні сталі 40X у загартованому і низьковідпущеному стані інструментом, виготовленим зі сталі 45 у стані постачання з нарізаними пазами на його робочій частині.

Для збільшення інтенсивності зсувного деформування поверхневих шарів металу на робочій поверхні інструмента були вирізані поперечні пази. Ширина пазу вибиралась з умови виходу інструмента з контакту оброблюваною поверхнею. Межі зміни вибирались у широкому діапазоні для дослідження впливу часу дії теплового імпульсу та паузи на зміну температури поверхневого шару металу оброблюваної деталі. Змінювали також кількість пазів на робочій частині інструмента.

При фрикційному зміцненні у зоні контакту інструмент-деталь діє джерело теплової енергії дуже великої інтенсивності за рахунок високошвидкісного тертя інструмента (60 – 70 м/с) по оброблюваній поверхні деталі. Швидкість переміщення деталі є малою (0,01 – 0,1 м/с) у порівнянні зі швидкістю обертання диска. Інструмент притискається до оброблюваної поверхні з силою (600 – 1200 Н) у залежності від режимів обробки та ширини зони контакту [5].

Теплова енергія, яка утворюється у зоні контакту, частково йде у поверхневий шар оброблюваної деталі, а частково переноситься в інструмент. При проходженні пазу над оброблюваною поверхнею тепловий потік перестає діяти на неї. У цей момент відбувається охолодження оброблюваної поверхні. Співвідношення ширини пазу до гладкої частини вибрали у межах від 1:10 до 1:1.

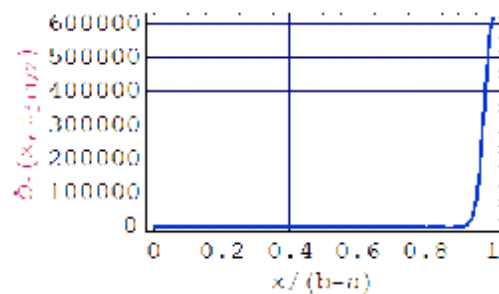
Оскільки ми маємо рухоме джерело енергії, час його дії на одиничний об'єм поверхневого шару металу оброблюваної деталі буде визначатися часом проходження зони інструмент-деталь над певною точкою поверхні. Після проходження джерела теплової енергії оброблювана поверхня починає інтенсивно охолоджуватись. Оскільки швидкість переміщення стола верстата, а відповідно зони контакту, є невеликою порівняно зі швидкістю обертання інструмента, то в зоні контакту інструмент-деталь відбувається декілька циклів нагрівання і охолодження поверхневого шару металу оброблюваної поверхні за

рахунок проходження по чергово через неї гладкої поверхні і паза.

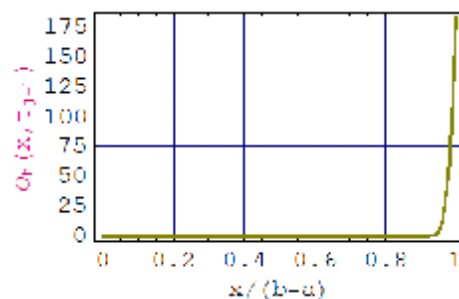
Розглянемо процеси, які відбуваються у поверхневому шарі металу під зоною контакту інструмент-деталь, при використанні інструмента з чотирма нарізаними пазами. Співвідношення довжини суцільної частини до ширини паза становило 1:1. При вибраних режимах обробки час контакту одиничної гладкої частини і час проходження паза був однаковим і складав $1,7 \cdot 10^{-3}$ с. Для вибраного навантаження зони контакту, яке виникає під дією нормальної складової сили взаємодії P_y рівної 1000 Н, час проходження одиничної точки на зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею складав $1,0 \cdot 10^{-2}$ с. За цей час над одиничною точкою зони контакту пройде 2,9 гладкої частини з пазами інструмента, тобто інструмент над одиничною зоною контакту проходить не повний оберт.

У початковий момент часу при входженні у контакт гладкої поверхні інструмента з оброблюваною поверхнею відбувається ударне навантаження зони контакту. Напруження на поверхні контакту різко зростають, також різко зростає швидкість нагрівання поверхневого шару. Так, через $1,5 \cdot 10^{-4}$ с швидкість нагрівання поверхні становить $6 \cdot 10^5$ К/с. З глибиною вона зменшується, аналогічно змінюється і температура. У перший момент часу температура на оброблюваній поверхні зростає до 180 °С. Густина теплового потоку, який йде у деталь, є найбільшою на поверхні оброблюваної деталі і становить $1,9 \cdot 10^6$ Дж/(с·м²), з глибиною також зменшується (рис. 2).

Розглянемо досліджувані параметри при закінченні тертя першої гладкої частини інструмента, тобто через $1,7 \cdot 10^{-3}$ с від початку контакту інструмента з оброблюва-

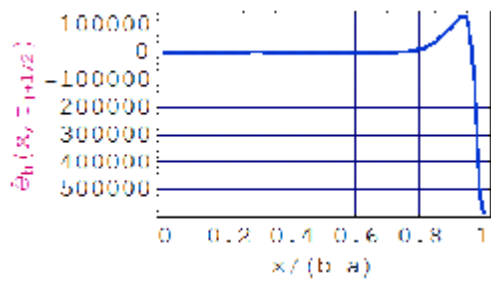


a)

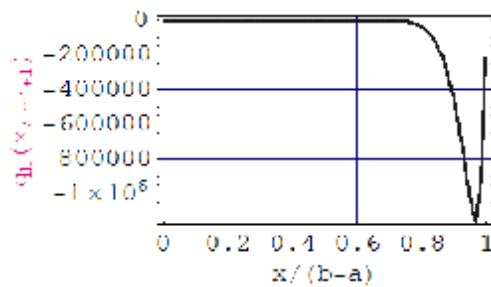


б)

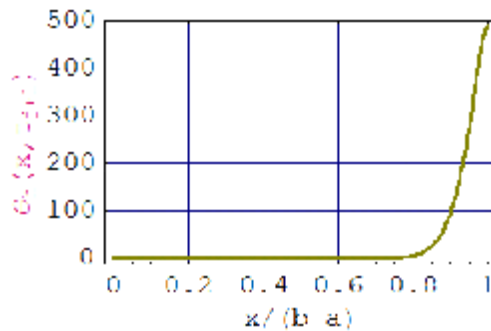
Рис. 2. Зміна швидкості нагрівання (а), температури по глибині поверхневого шару (б) у деталі на початку тертя першого гладкого виступу інструмента



а)



б)



в)

Рис. 3. Зміна швидкості нагрівання (а), величини теплового потоку (б), температури по глибині поверхневого шару (в) у деталі на початку проходження паза інструмента

ною поверхнею. З часом, який становить проходження однієї довжини гладкої частини інструмента, швидкість нагрівання змінилася і на поверхні сягає вже $1,9 \cdot 10^5$ K/c. З глибиною плавно зменшується і на глибині близько 1 мм сягає $2,5 \cdot 10^5$ K/c. Інтенсивно зростає температура поверхневого шару. На поверхні оброблюваної деталі вона досягає до 600 °C, з глибиною температура зменшується.

При виході з контакту з оброблюваною поверхнею деталі гладкої частини інструмента зона контакту розвантажується і припиняється процес тертя, а відповідно і дія теплового потоку. На поверхні тепловий потік рівний нулеві, але з глибиною він продовжує діяти та переміщується у глибину оброблюваного матеріалу (рис. 3). Інтенсивність його з часом зменшується.

Як тільки до оброблюваної поверхні перестав підводитись тепловий потік, вона починає різко охолоджуватись. Швидкість охолодження сягає $6,0 \cdot 10^5$ K/c, але на

певній глибині від дії попередньої гладкої частини продовжує переміщатись тепловий потік. На оброблюваній поверхні тепловий потік рівний нулеві, але тепловий потік є інерційним і продовжує переміщатись у глибину деталі, але його інтенсивність зменшується. Максимальна швидкість нагрівання підповерхневих шарів сягає до $1,2 \cdot 10^5$ K/c, яка з часом проходження паза над оброблюваною поверхнею різко зменшується, і в кінці проходження паза становить біля $2,0 \cdot 10^4$ K/c. Ми маємо одночасне охолодження поверхневого шару і продовження нагрівання глибинних шарів, але вже з меншою інтенсивністю.

Температура на оброблюваній поверхні починає різко зменшуватись. На початку проходження паза над оброблюваною поверхнею температура понизилась до 500 °C. Вона продовжує досить інтенсивно знижуватись. За час проходження паза над оброблюваною поверхнею, а це $1,7 \cdot 10^{-3}$ с, температура понизилась до 260 °C. Перепад температур на поверхні становить біля 350 °C.

При проходженні інструмента через пляму одиничного контакту, ширина якої залежить від сили притиску інструмента до оброблюваної поверхні, остання нагрівається максимально до температури 960 °C (рис. 4). При даних режимах обробки інструментом з чотирма пазами на робочій частині і співвідношенням довжини гладкої частини до ширини паза 1:1 одинична пляма контакту обробляється при проходженні через неї трьох гладких частин і трьох пазів. Поверхневий шар сприймає досить значне циклювання температури (зміна температури складає біля 350 °C) – нагрівання до температури 610 °C, охолодження до температури 260 °C, далі наступний цикл нагрівання – охолодження і ще один цикл. Від дії циклювання теплової енергії відбувається переміщення зони контакту оброблюваної поверхні, тобто збільшення розмірів деталі по висоті.

При виготовленні робочої частини приймали парну кількість нарізаних поперечних пазів на робочій частині і відповідно отримували парну кількість кроків, які складаються з гладкої частини і відповідного паза. Вибирали що гладка частини становить 0,5; 0,75 та 0,9 від величини кроку робочої частини інструмента. Ширина паза становила 0,5; 0,25 та 0,1 частини кроку. Теоретичні дослідження показали, що ширина пазів на робочій частині інструмента значно впливає на теплові характеристики, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь. Так,

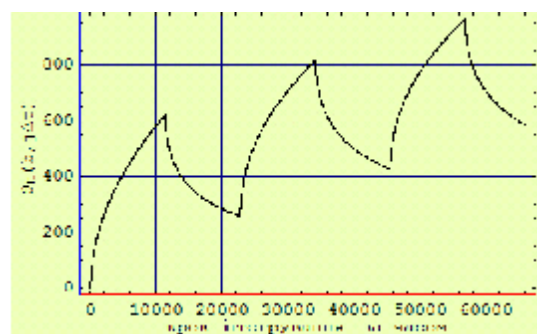
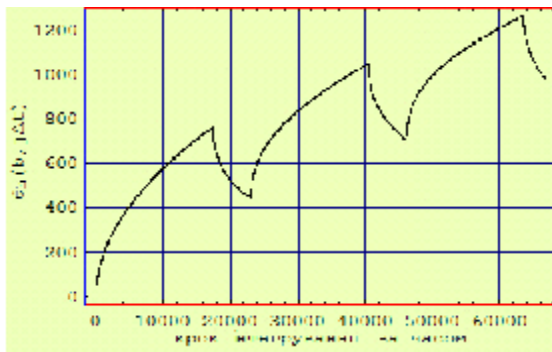
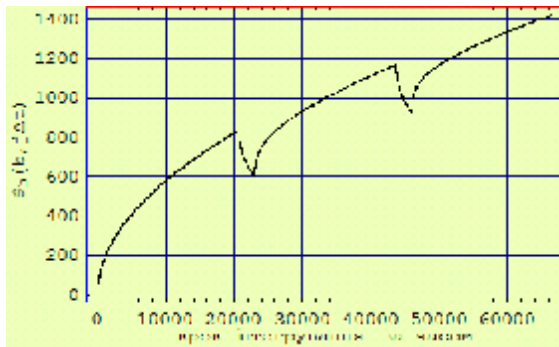


Рис. 4. Зміна температури нагрівання оброблюваної поверхні на оброблюваній поверхні деталі в кінці проходження інструмента через зону контакту інструмент-деталь



а)



б)

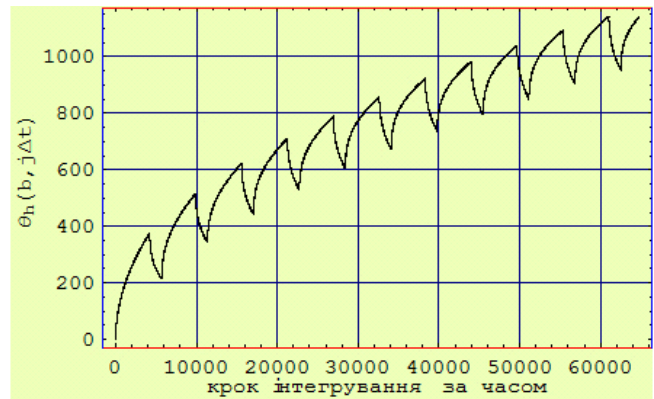
Рис. 5. Зміна температури на оброблюваній поверхні при зміцненні інструментом з чотирма пазами на робочій частині і різною шириною пазу: а – 0,25 кроку; б – 0,1 кроку

зменшення ширини пазу приводить до збільшення часу тертя гладкої частини інструмента, а це, у свою чергу, збільшує кількість енергії, яка підводиться до зони контакту інструмент-деталь на оброблюваній поверхні деталі.

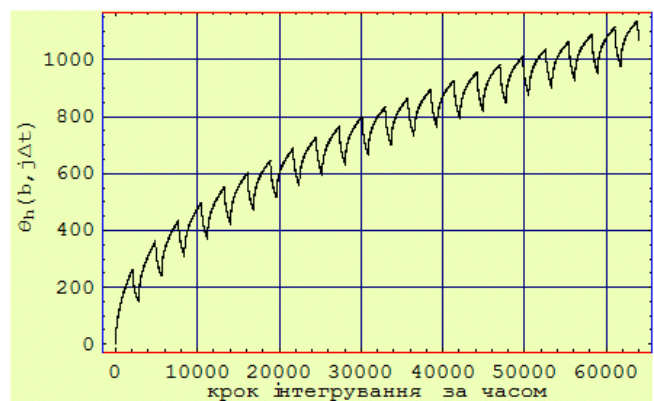
Зменшення ширини пазу приводить до збільшення температури нагрівання одиначної зони контакту при зміцненні інструментом з чотирма пазами на робочій частині інструмента. Так, при фрикційній обробці інструментом з гладкою частиною, яка становить 0,5 кроку і відповідно паз становить 0,5 кроку, зона одиначного контакту нагрівається до температури 970 °С (див. рис. 4). При проходженні першого пазу над зоною контакту спад температури становить 360 °С, а при проходженні наступних пазів спад температури збільшується і становить вже 400 – 410 °С.

Якщо ширина пазу становить 0,25 кроку, то температура нагрівання поверхні одиначного контакту вже зростає до 1220 °С (рис. 5,а). У цьому випадку спад температури становить 330 – 350 °С. При зменшенні ширини пазу до 0,1 кроку температура на поверхні зростає вже до 1400 °С, а спад температури при проходженні пазу становить 230 – 240 °С (рис. 5,б).

Чим менша ширина пазу, тим до вищих температур нагрівається поверхня одиначної зони контакту, а відповідно і на більшу глибину прогріється поверхневий шар металу.



а)



б)

Рис. 6. Зміна температури оброблюваної поверхні при зміцненні інструментом з шириною пазу 0,25 кроку і різною кількістю пазів на робочій частині: а – 16; б – 24

Наші дослідження показали, що зміна кількості пазів мало впливає на температуру нагрівання поверхні зони одиначного контакту. Так, при використанні інструментів з шириною пазу рівною 0,25 кроку і кількістю пазів від 4 до 32 на робочій частині інструмента температура на обробленій поверхні становила 1220 °С (при 4-х пазу) (див. рис. 5,а), 1190 °С (при 16-ти пазу) (рис. 6,а) і 1170 °С (при 32-х пазу) (рис. 6,б).

Як видно з проведених теоретичних досліджень при збільшенні кількості пазів на робочій частині інструмента температура на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь навіть незначно зменшується.

На основі проведених теоретичних досліджень зміни температури у поверхневих шарах у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного зміцнення інструментом з нарізаними поперечними пазу на його робочій частині можна зробити наступні висновки:

1. Метод скінченних елементів є ефективним засобом для дослідження теплових процесів, які проходять у поверхневих шарах металу при фрикційному зміцненні.
2. Показано, що кількість поперечних пазів, нарізаних на робочій частині інструмента, неістотно впливають на

температуру обробленої поверхні у зоні контакту інструмента. У той же час ширина паза істотно впливає на величину температури.

Література

1. *Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г.* Поверхностное упрочнение металлов. – К.: Наук. думка, 1995. – 256 с.

2. *Подстригач Я.С.* Неустановившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинах / Я.С. Подстригач, Ю.М. Коляно. – К.: Наук. думка, 1972. – 308 с.

3. *Бабей Ю.И.* Влияние импульсного упрочнения на температурные поля в цилиндрических деталях / Ю.И. Бабей, В.Н. Максимович, З.Д. Максимишин и др. // Физико-химическая механика материалов. – 1985. – № 3. – С. 85–88.

4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

5. *Гурей І.В.* Характеристики зміцненого шару після фрикційного оброблення // *Машинознавство*. – 2004. – №5. – С. 35-39.

Отримана 00.00.11

G. Shynkarenko¹, I. Lutciw², V. Guref²

Simulation of changes of temperature in area of contact instrument-detail under friction hardening of machines details

¹*Ivan Franko Lviv National University, Lviv;*

²*Ivan Poluj Ternopil National Technical University, Ternopil*

The research of change of the temperature in a superficial layer at the friction hardening of machines details by an instrument with cross slots on the working part is presented. It is show, that the width the slot is influences considerably for the value of the temperature profile on the depth of layer but amount of the slots – insignificantly.

Інформація

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

3-я Міжнародна науково-технічна конференція
Україна, м. Львів, 7 – 9 листопада 2012 р.

Мінісимпозиуми:

«Вплив корозійних та водневмісних середовищ на міцність і руйнування матеріалів та конструкцій»

«Діагностика матеріалів, конструкцій і машин»

Тематика конференції:

Проблеми якості та конкурентоспроможності продукції машинобудування.

Автоматизація проектування, підготовки і управління виробництвом.

Моделювання, синтез і оптимізація машинобудівних конструкцій.

Динаміка та міцність машин.

Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій.

Матеріалознавство та інженерія поверхні

Новітні техно-ло-гії у машинобудуванні.

Зварювання та споріднені процеси і технології.

Застосування вібрацій у техніці і технологіях.

Методи і засоби діагностування матеріалів та конструкцій.

Діагностика і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій та споруд тривалої експлуатації.

Проектування, виготовлення, експлуатація і сервіс транспортних засобів.

Адреса для кореспондування:

А/с 6758, м. Львів, 79058, Україна,
e-mail: me@in.lviv.ua; zncnan@mail.lviv.ua
Тел.: (032) 261-07-19; (032) 258-21-71;
+38 0679998734; +38 0974409900
<http://www.znc.com.ua/>