

ТЕРТЯ НА ПОВЕРХНЯХ КОНТАКТУ В ПРОЦЕСІ ВИКІНЧУВАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС З ВІБРАЦІЯМИ

© Грицай І.Є., Волошин І.О., 2011

Досліджено параметри процесу чистової обробки та поверхневого зміцнення зубчастих коліс. Проаналізовано сили, які виникають під час процесу зміцнення, роботи тертя на поверхнях контакту оброблюваного колеса.

A study of characteristics of the finishing and surface hardening of gears. The forces that arise during the process of strengthening the work of friction on surfaces machined wheels.

Суть методу. Під час експлуатації машин в початковій стадії цього процесу на поверхнях контакту деталей відбувається прискорене стирання, яке переходить у стадію рівномірного зношування. У цей період зменшується висота мікро- і макронерівностей, відбувається поверхневе зміцнення та перерозподілення напружень у поверхневих ділянках з формуванням нової структури. Ці процеси, які є негативним експлуатаційним чинником, можуть бути використані в технології остаточної обробки для формування заданих властивостей поверхневих шарів з метою підвищення довговічності і безвідмовності деталей і машин.

На кафедрі технології машинобудування розробляється метод поверхневого зміцнення зубчастих коліс, який полягає в обкочуванні заготовки зубчастим колесом-обкатником з обмеженим навантаженням та надання одному з елементів – колесу-заготовці або колесу-обкатнику вібрацій. Відмінність від інших методів оброблення-зміцнення зубчастих коліс, де використовують вібрації, полягає у тому, що у цьому випадку віброколивання використовуються не для ударної дії на поверхню, а для створення додаткового тертя і теплових потоків у поверхню зубчастого колеса.

З іншого боку, на відміну від відомих процесів чистового оброблення зубчастих коліс силовим обкочуванням, у цьому методі зусилля притискання є значно меншими, що не вимагає спеціального обладнання підвищеної жорсткості та міцності.

Сили, які виникають в процесі зміцнення. Для виникнення певної сили контактного тертя навантаження у зачепленні можна створювати прикладанням обертового моменту з контактом по одній системі профілів і зміною напрямку обкочування, або прикладанням радіальної (розпірної) сили з навантаженням одночасно по правих і лівих профілях.

У першому випадку використаємо компоновальну схему установки першого виду (рис. 1), а другого виду – на рис. 2.

Схема обробки (рис. 1) з однопрофільним зачепленням і навантаженням обертовим моментом реалізується на токарному верстаті. Зубчасте колесо 1 установлюють на жорстку оправку 2 в патрон 4, який надає обертовий момент, та центр 3. Інструмент 5 міститься у пристрої 6, змонтованому на різцетримачі 7 токарного верстата. Джерелом коливач обкатника слугує електромагніт 10. Амплітуду коливач можна регулювати в межах 0,015 – 2,5 мм за допомогою зазора між сердечником електромагніта і пластиною 9. Навантаження можна змінювати в межах 35–120 Н залежно від модуля і твердості заготовки за допомогою тарованої пружини 11.

На рис. 2 показано компоновальну схему з двопрофільним зачепленням, принцип її дії полягає у тому, що до установки прикріплений додатковий вантаж 12, який збільшує зусилля між колесом та обкатником. На цьому рисунку показано, що вантаж 12 можна перемістити на інший бік. Отже, ми можемо обробляти два профілі зубчастого колеса.

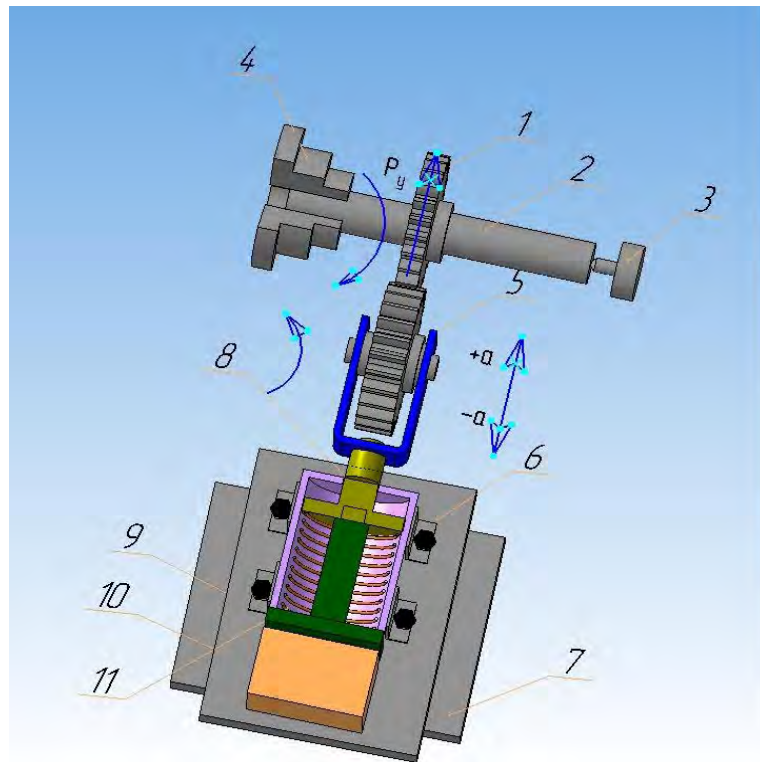


Рис. 1. Компонувальна схема з однопрофільним зачепленням

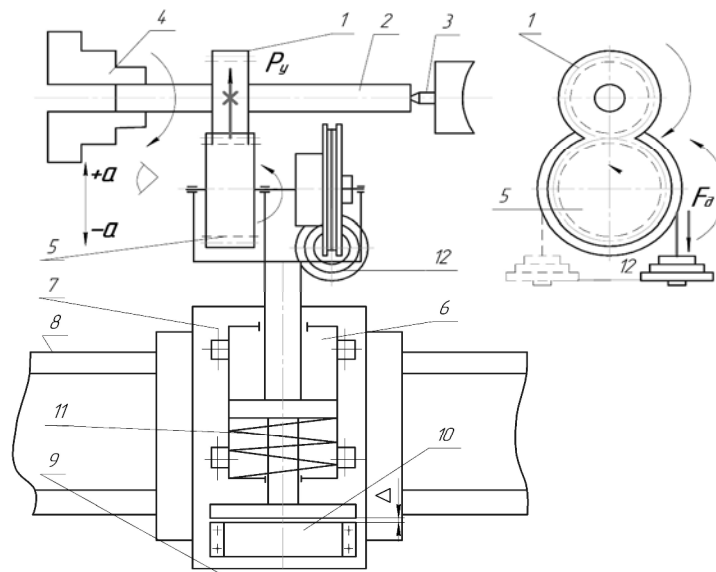


Рис. 2. Компонувальна схема з двопрофільним зачепленням

Вибір схеми оброблення залежить від умов роботи передачі. Якщо колесо в редукторі передає момент тільки в одному напрямі (наприклад, в лебідках), то достатньо обробляти тільки одні профілі, що зменшує працемісткість процесу. Якщо передача працює з реверсом, то друга схема зміцнення є продуктивнішою.

Обидві схеми можуть видозмінюватися в достатньо широких межах. Рух обточування і вібрації може надаватися і колесу, і обкатнику. Оброблення вузьких зубчастих коліс може здійснюватися з постійним статичним радіальним навантаженням, а також з радіальною подачею. Зубчасті колеса великої ширини можна обробляти з осьовою подачею інструмента. Для покращання якості оброблюваної поверхні можлива обробка з перехрещенням осей заготовки і обкатника, як у шевінгуванні. Процес можна здійснювати на верстатах різних типів, наприклад, на

токарному, стругальному або фрезерному. Для підвищення інтенсивності тертя і більшої тепловіддачі на поверхнях зубців інструмента можна утворювати регулярний рельєф накатуванням або насічуванням.

Розроблений метод є універсальним, технічно простим у виконанні, економним, з незначними витратами на інструмент із недорогих і недефіцитних вуглецевих і легированих інструментальних сталей. Метод забезпечує високу продуктивність за незначних сил обкочування в системі, що дає змогу знизити його ефективну потужність і енерговитратність. Для теоретичного дослідження та описання складних процесів, які перебігають на поверхнях контакту, необхідно визначити сили і роботу тертя, яка є джерелом теплоти, теплових потоків і температурної зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів зубчастих коліс.

Цикли тертя внаслідок вібрацій. Важливим чинником у цьому процесі є вібрації на ділянках контакту. Унаслідок вібрацій в контактній зоні тертя і генерування теплоти є наслідком не стільки ковзання – обкочування, як періодичних поворотно-поступальних рухів інструмента. Вплив вібрацій залежить від прикладеної сили, співвідношення між їх частотою і амплітудою та швидкістю обертання заготовки. Ці параметри є робочими режимами цього процесу, а зміна кожного з них змінює інтенсивність тертя і теплової дії через кількість циклів тертя $N_{\text{ц}}$.

Шлях джерела теплоти, яка переміщається із швидкістю, що дорівнює швидкості відносного ковзання V_{sy} за період коливань T , становить $2a$. З цього випливає, що кількість циклів тертя на ділянці профілю та на ширині вінця визначатиметься співвідношенням

$$N_{\text{ц}} = \frac{2a}{L_T} = \frac{2a}{T} \cdot \frac{1}{V_{\text{sy}}} = \frac{V_a}{V_{\text{sy}}}, \quad (1)$$

де L_T – шлях джерела теплоти, яка переміщається із швидкістю V_{sy} ; a , T – амплітуда і період коливання обкатника; V_a – швидкість переміщення джерела теплоти внаслідок вібрацій.

На рис. 3 показана залежність кількості циклів від кута повороту колеса: частота коливань – 100 Гц, амплітуда – 300 мкм; частота обертання заготовки – 10–50 хв.⁻¹.

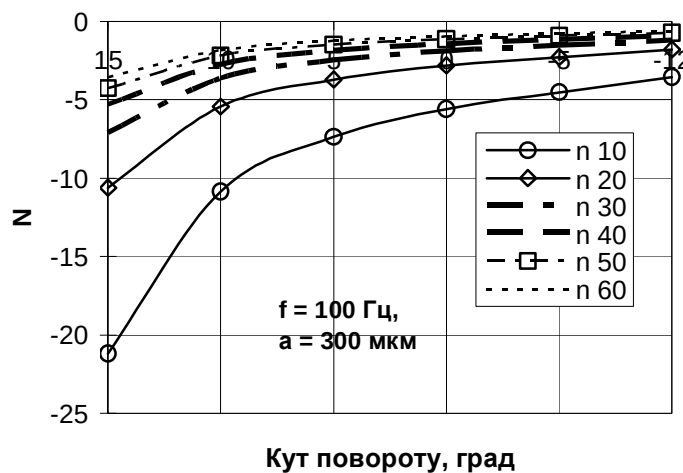


Рис. 3. Кількість циклів тертя

Робота тертя на поверхнях контакту. Визначимо роботу сили, яка діє дотично до евольвентного профілю зубця. Її величина визначається силою тертя та дотичною складовою сили у зубчастому зачепленні.

Результуюча сила R_t , що діє в контакті, дотична до профілю (перпендикулярна до лінії зачеплення):

$$R_t = P_n \mp P_n \cdot m = P_r \cdot (\cos \alpha_{\omega} \mp m \cdot \sin \alpha_{\omega}), \quad (2)$$

де верхній і нижній знак відносяться відповідно до правих і лівих профілів.

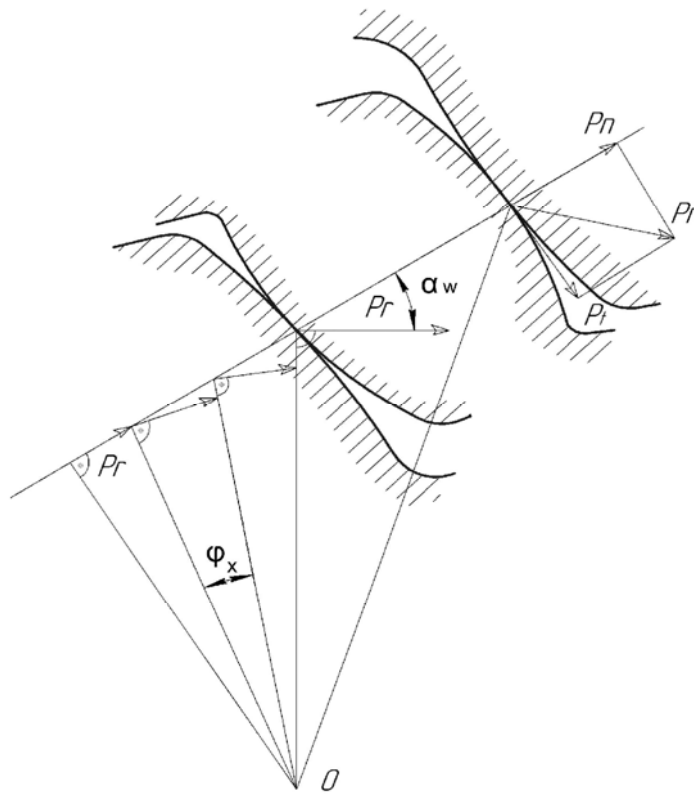


Рис. 3. Навантаження радіальною силою P_r

На основі теорії зубчастого зачеплення сумарну швидкість ковзання профілів внаслідок накладання двох рухів – обкочування і віброосциляцій – можна визначити такою залежністю:

$$V_{\Sigma} = V_{sy} + V_a = 2p \cdot m \cdot z \cdot \cos a_w \cdot n_1 \cdot (\operatorname{tg} a_y - \operatorname{tg} a_w) \pm 2 \cdot a \cdot f. \quad (3)$$

Потужність сили R_t тертя за час, що дорівнює тривалості циклів на поверхні, дорівнюватиме добутку сили на швидкість відносного ковзання і кількості циклів, тобто

$$N_m = R_t \cdot V_S \cdot N_y. \quad (4)$$

Робота сили тертя за період вібрацій:

$$A_m = R_t \cdot V_S \cdot T \cdot N_y = R_t \cdot T \cdot V_a \cdot \left(1 + \frac{V_a}{V_{sy}}\right). \quad (5)$$

Беручи до уваги вираз (1), залежність (5) подамо так:

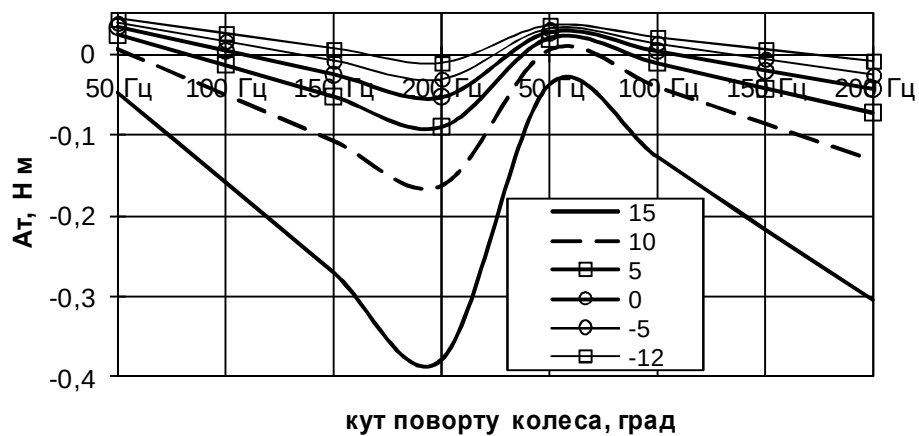
$$A_m = R_t \cdot T \cdot V_a \cdot (N_y + 1). \quad (6)$$

На рис. 4 показано роботу результуючої сили за кутом повороту колеса за частоти обертання заготовки 10 хв^{-1} (а) і 20 хв^{-1} (б).

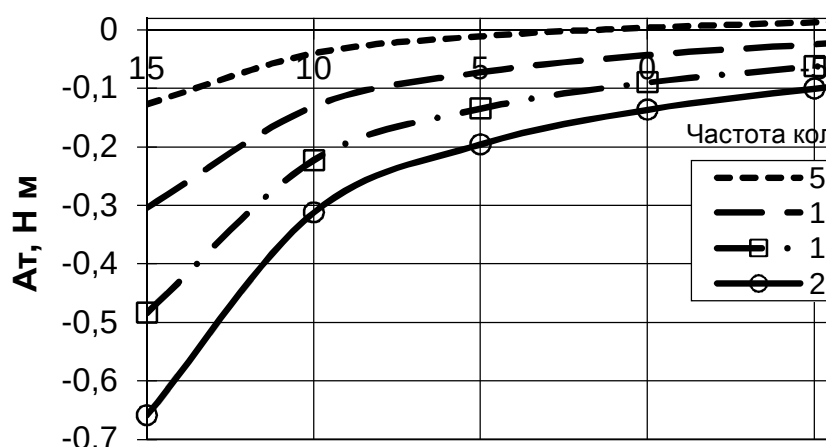
На рис. 4, а показано роботу результуючої сили залежно від частоти вібрацій для значень кута повороту колеса від 20° на вхідній ділянці до -12° – на вихідній ділянці зачеплення. Сила притискання – 100 Н, сила тертя – 83,7 Н, частота обертання шпинделя – 20 хв^{-1} , амплітуда вібрацій – 300 мкм, коефіцієнт тертя – 0,3; модуль колеса – 3 мм; кількість зубців – 30 (знак відповідає напрямку сили тертя, протилежної до напрямку швидкості обертання).

Із отриманих залежностей випливає, що максимальна (за абсолютною величиною) робота сили тертя припадає на ділянку, близьку до ніжки зубця, та відповідає максимальній частоті віброколивань.

За зміни частоти вібрацій спостерігається перерозподілення роботи тертя на ніжці зубця і його вершині. Із зменшенням частоти вібрацій зростає робота тертя на вершині зубця і зменшується на ніжці, і навпаки, за збільшення частоти вібрацій до 200 Гц уся робота тертя виконується лише біля основи зубця. На частоті вібрацій 100 Гц в ділянці дільного кола робота тертя дорівнює нулю.



a



b

Рис. 4. Робота сили тертя за кутом повороту профілю залежно від частоти віброколивань за частоти обертання заготовки 10 хв^{-1} (a) і 20 хв^{-1} (б)

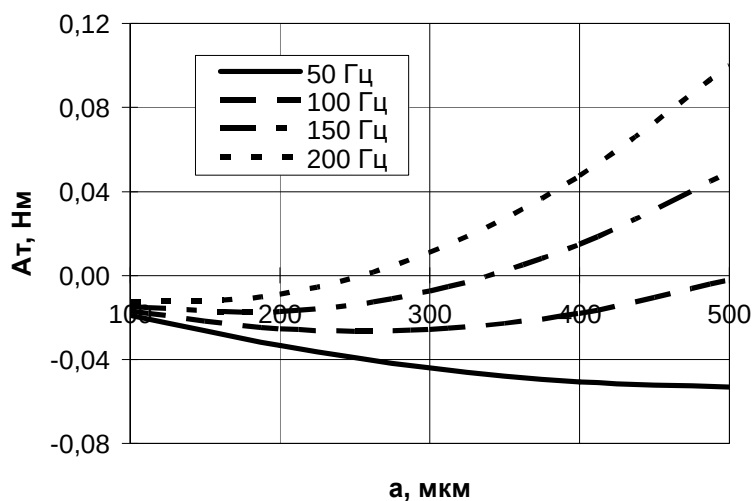


Рис. 5. Робота тертя на вершинах зубців залежно від амплітуди і частоти вібрації

Із залежностей (5) і (6) випливає, що збільшити роботу та інтенсивність теплоти внаслідок тертя можна, збільшуючи амплітуду і частоту коливань та зменшуючи швидкість обточування і частоту обертання шпинделя.

На рис. 5 показано залежність роботи тертя у ділянках максимальної швидкості ковзання (на вершинах зубців за максимального кута розгорнутості евольвенти) від амплітуди для частот від 50 до 200 Гц (інші початкові дані ті самі: частота обертання заготовки – 20 хв^{-1} , обертання проти годинникової стрілки, радіальна сила (сила притискання) – 100 Н; коефіцієнт тертя – 0,3; модуль колеса – 3 мм; кількість зубців – 30).

Як бачимо із графіків, на частоті 50 Гц робота тертя за абсолютною величиною монотонно зростає з амплітудою коливань. За амплітуди 100 мкм і частоти 500 Гц робота тертя для цього набору початкових даних фактично дорівнює нулю. На частотах в діапазоні 150–200 Гц за амплітуд 250–350 мкм сили тертя не виконують роботи. За частоти вібрацій 200 Гц і більше, починаючи із амплітуди 250 мкм, сила тертя збільшується і на крайніх режимах досягає 0,1 Дж.

Із залежності (1) можна визначити, якою має бути частота обертання заготовки для забезпечення заданої кількості циклів тертя у певному частотно-амплітудному діапазоні вібрацій. Прийнемо діапазон зміни амплітуди: $a = 50 - 300 \text{ мкм}$, частоти коливань обкатника – 50 – 150 Гц. Тоді для забезпечення умови $N_{\tau} > 10$ має бути: $V_{sy} < 0,15 - 2,5 \text{ м/хв}$. На рис. 6 показано найбільші значення частоти обертання заготовки за амплітуди коливань 50 мкм та частоти 50 Гц для кількості зубців 20–50 і модулів коліс 1–5 мм (передавальне відношення між колесом та обкатником дорівнює 1).

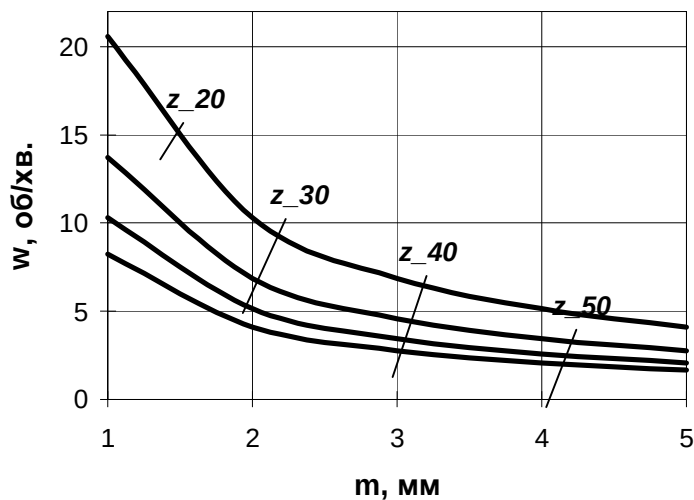


Рис. 6. Найбільші значення частоти обертання заготовки для $N_{\tau} > 10$ за амплітуди коливань 50 мкм та частоти 50 Гц

Висновки. Теоретичний аналіз і результати описання контактних процесів, наведені у цій роботі, дають змогу розраховувати сили і роботу контактного тертя у зубчастому зачепленні в процесі зміцнення і чистового оброблення зубчастих коліс. Отримані залежності створюють теоретичну основу для дослідження теплоти на поверхнях, закономірності формування поверхневих шарів зубчастих коліс та оптимізувати технологію їх оброблення і зміцнення вібраційним обкочуванням.

1. Благут Э.Н. Способ нарезки зубчатых передач синусоидальной передачи Благута / Патент Украины № 73550: МПК 7B23P15/14. – Бюл №8, 2005. 2. Грицай И.Е., Литвиняк Я.М. Изготовление червячных колес глобоидальных передач // Оборудование и инструмент. – 2009. – № 4. – С.12–14.