

Аналогічно можна представити формування рельєфів і у інших смугах та для операторів $F_2^j(z)$.

Задавши відповідні оператори та значення вхідних параметрів h_0^j , можна дослідити процес виникнення та розкочування рельєфів шару фарби, що створюється формами з різноманітними рисунками друкувальних елементів.

Результати цієї роботи можуть служити основою для побудови моделей та моделювання значно складніших фарбових систем.

1. Алексеев Г.А. Красочные аппараты ротационных машин высокой и плоской печати. – М., 1980. – 184 с. 2. Верхола М.І. Моделювання і дослідження процесів та елементів фарбової системи друкарських машин // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. пр. – Львів, 2000. – № 5. – С. 9–22. 3. Верхола М.І., Гук І.Б., Луцків М.М. Модель осевого розкочування фарби у тривалковій фарбовій групі // Наукові записки УАД. – 1999. – Вип. 1. – С. 50–52. 4. Иванов В.А., Чемоданов Б.К., Медведев В.С. Основы теории автоматического регулирования. – М., 1971. – 808 с. 5. Куо Б. Теория проектирования цифровых систем управления. – М., 1986. – 448 с. 6. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – К., 1977. – 708 с.

УДК 621.9.02:621.914.6

І.Є. Грицай

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування

ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ І ТЕМПЕРАТУРОЮ ЇХ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ

© Грицай І.Є., 2002

Наведені основні засади розрахунку температурного поля черв'ячної фрези за роботою різання і тертя на її лезах та поверхнях. Розроблено метод прогнозування стійкості робочих елементів черв'ячних фрез на основі теплових потоків і температури на різальному клині її зубців.

The results of simulation and account of the temperature of the active area of a screw type hobs owing to cutting and abrasion on it teethies are reduced. The computational method of a resource of a screw type hobs owing to it's heat and temperature is designed

Стійкість до спрацювання служить найважливішим критерієм працездатності черв'ячних фрез, які на теперішній час є основним інструментом для нарізання циліндричних зубчастих коліс модулем до 25 мм у переважній більшості галузей сучасного машинобудування.

У роботах [1–6] наведені емпіричні залежності стійкості даних інструментів від умов обробки та робочих режимів, отримані дослідним шляхом. Стійкість черв'ячних фрез, розрахована за відомими формулами, здебільшого є вищою, ніж дійсна, яку досягають у виробничих умовах. У залежностях, наведених у вказаній літературі, по-різному оцінюють вплив факторів процесу, а значення розрахункового періоду стійкості, отримані з їх використанням для однакових відправних даних, відрізняються більше ніж на порядок.

Крім того, відомі залежності не розкривають фізичної і теплової дії процесу різання на робочі елементи черв'ячних фрез; враховують обмежену кількість факторів із тих, які реально впливають на працездатність і довговічність черв'ячних фрез. Незважаючи на важливість цієї проблеми та значний обсяг теоретичних і експериментальних досліджень, на сьогодні не розроблено теоретичних основ та моделі розподілу температури на активній довжині черв'ячної фрези, відсутня математична модель зношування та методика розрахунку періоду стійкості на рівні окремих зубців і лез. Уявлення про механізми і причини зношування зубців і лез, які склалися у теорії і практиці зубообробки, не відповідають реальним процесам і явищам, не дозволяють достовірно пояснити особливості спрацювання та розробити дієві заходи для підвищення стійкості черв'ячних фрез [7–9].

Такий стан цієї проблеми є наслідком значної працемісткості стійкісних експериментів й складності оцінки розподілу сумарної роботи різання між усіма активними робочими елементами черв'ячних фрез в умовах дії великої кількості факторів зубонарізання, а також пояснюється багатозубим і багатолезійним характером різання черв'ячною фрезою, що затрудняє теоретичне вивчення процесу.

З практичного досвіду та за результатами численних досліджень, зокрема [3, 9], встановлено, що максимуми на графіках зношування, температури і сили, або моменту різання, припадають на одну й ту ж групу зубців черв'ячної фрези, графіки даних параметрів збігаються за місцями локалізації їх екстремумів, а нагрівання є основним фактором, який визначає інтенсивність зношування інструмента. Це дає підстави для встановлення функції зношування і стійкості зубців залежно від температури на робочих поверхнях черв'ячної фрези.

Теплові потоки на зубцях і лезах

Основним джерелом теплоти та нагрівання різального клину є енергія, необхідна для виконання зсуву, та робота, яку треба виконати для подолання тертя на передній і задній поверхнях інструмента. Величина цієї роботи досліджена у працях [7, 8] на основі розроблених автором моделей силового поля, параметрів зрізів і контакту зубців та лез черв'ячної фрези.

Внаслідок концентрування значної кількості теплоти на вістрі різального клину та під дією високої температури, яка встановлюється на вістрі під час усталеного різання, відбувається втрата твердості та затуплення зубця. Внаслідок періодичності процесу різання черв'ячною фрезою, короткого часу тривалості одної різі, відсутності неперервного контакту стружки з поверхнею, по якій вона сходить, та пружної взаємодії зрізуваних шарів з передньою поверхнею, при обробці вуглеводистих та малолегованих сталей температура різання не перевищує 500...600 °С. У цих умовах адгезійна та дифузивна складові, які спостерігаються, в основному, при високих температурах різання (у межах 1000⁰), не мають суттєвого впливу на зношування черв'ячних фрез, а спрацювання їх робочих поверхонь має, переважно, механічно-абразивний характер.

При великих ступенях деформації, характерних для механічної обробки, на деформацію кристалічної решітки затрачається незначна частка роботи різання. Основна частина цієї роботи перетворюється у теплову енергію, а механічна потужністю процесу різання практично дорівнює її тепловому еквіваленту [10]. Теплота, яка виділяється під час різання, розподіляється між елементами цього процесу – інструментом, заготовкою, стружкою, мастильно-охолоджуваною рідиною та навколишнім середовищем. Якщо не враховувати вторинних перетоків теплоти між вказаними елементами, то схему теплових потоків можна

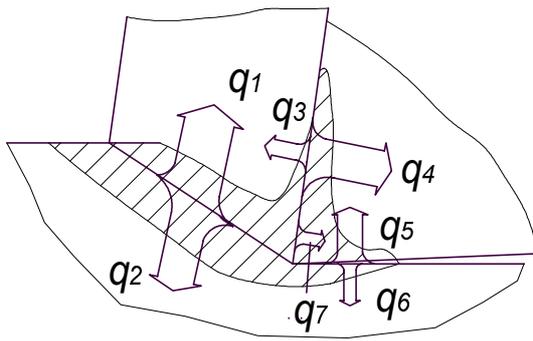


Рис. 1. Схема теплових потоків в умовній площині зсуву і на контактних поверхнях інструмента

зобразити як на рис. 1, на якому q_1, q_2, q_7 – густина теплових потоків, що виникають у ділянках зсуву; q_3, q_4 та q_5, q_6 – густина теплових потоків, які виникають внаслідок тертя відповідно на передній і задній поверхнях.

Інтенсивність цих теплових потоків визначається швидкістю різання і співвідношенням між теплопровідністю матеріалів інструмента та заготовки. Зокрема, при збільшенні коефіцієнта теплопровідності оброблюваного матеріалу зростає теплопередача q_3 і q_5 та зменшується q_5 , а із збільшенням швидкості різання зростає потік теплоти q_5 в інструмент із утворюваної поверхні.

Щоб знайти частку теплоти, яка переходить у фрезу, прийемо, що процеси, які відбуваються на кожному із активних лез при зубофрезеруванні, служать елементарними джерелами теплоти постійної інтенсивності, значення якої відповідає середнім по дузі контакту значенням сил зсуву на лезі й тертя на його контактних поверхнях.

Розглядаючи різання, як процес із внутрішнім джерелом теплоти, джерело цієї теплоти для поверхні зсуву у стосунку до інструмента прийемо рухомих плоским, напрямком дії якого утворює з напрямком головного руху кут, що дорівнює куту зсуву Φ . Джерело теплоти, яка утворюється на передній поверхні, прийемо плоским стаціонарним, з розміром контактної площадки $C \times b$, де C – ширина ділянки контакту стружки і передньої поверхні, b – ширина поперечного перетину зрізу. На задній поверхні інструмента теплоутворення відносно інструмента імітує плоске нерухоме джерело розміром $C_\alpha \times b$, де C_α – розмір ділянки контакту задньої поверхні інструмента і утворюваної поверхні. Стаціонарність джерел випромінювання теплової енергії на контактних поверхнях зумовлюється постійним місцеположенням відповідних джерел на передній і задній поверхнях інструмента під час різання і розглядається в межах тривалості одної різі. Коефіцієнти теплопровідності і теплоємності у всіх точках поверхні зсуву і на контактних поверхнях будемо вважати такими, що не залежать від температури.

Під час пластичного деформування зрізуваного шару в інструмент переходить незначна частка теплоти, величина якої не перевищує 3 % теплоти деформування, а при швидкостях різання понад 40 м/хв, які використовуються у практиці зубообробки, ця частка зменшується до 1 %. Це свідчить про практичну відсутність впливу теплоти і температури в умовній площині зсуву на температуру на поверхнях контакту [10]. Отже, нагрівання леза можна розглядати як дію теплоти, що генерується лише в результаті тертя на його передній та задній поверхнях. У цьому випадку інтенсивність теплових потоків на передній q^* та задній q^{**} поверхнях кожного з лез зубців фрези буде становити відповідно

$$q^* = \frac{F \cdot V}{60 \cdot \xi \cdot C \cdot b} \text{ Дж}/(\text{мм}^2 \cdot \text{с}); \quad (1.1)$$

$$q^{**} = \frac{F_\alpha \cdot V}{60 \cdot C_\alpha \cdot b} \text{ Дж}/(\text{мм}^2 \cdot \text{с}), \quad (1.2)$$

а нагрівання леза визначиться сумарним тепловим потоком

$$q = q^* + q^{**} \text{ с.} \quad (2)$$

Ширину S ділянки контакту стружки з передньою поверхнею можна визначити, використовуючи відому формулу теорії різання

$$S = (2,05 \cdot \xi - 0,55) \cdot a. \quad (3)$$

Ширину S_a ділянки контакту леза інструмента з задньою поверхнею прийемо такою, що дорівнює допустимій величині зношування, що відповідає регламентованому періоду стійкості та виду обробки; її значення наведено у довідниковій літературі з зубообробки.

Закономірності розподілу потоків тепла на лезах активної довжини L_a під час роботи з зустрічною і попутною подачею під час нарізання коліс $m = 10$ мм твердістю НВ 190–220 показано на рис. 2 (швидкість різання 10; 30; 40; 50; 60 і 80 м/хв; глибина різання $t = 0,6$ h; осьова подача $s_0 = 1,5$ мм/об, робота з охолодженням; значення ширини і товщини поперечного перетину отримано на основі моделювання зрізів). На цьому рисунку від'ємні значення віддалі відповідають вхідній частині фрези; рух обкочування – у напрямку годинникової стрілки; конструктивний рух поверхні основного черв'яка – зліва направо; точка 0 відповідає міжцентровій лінії.

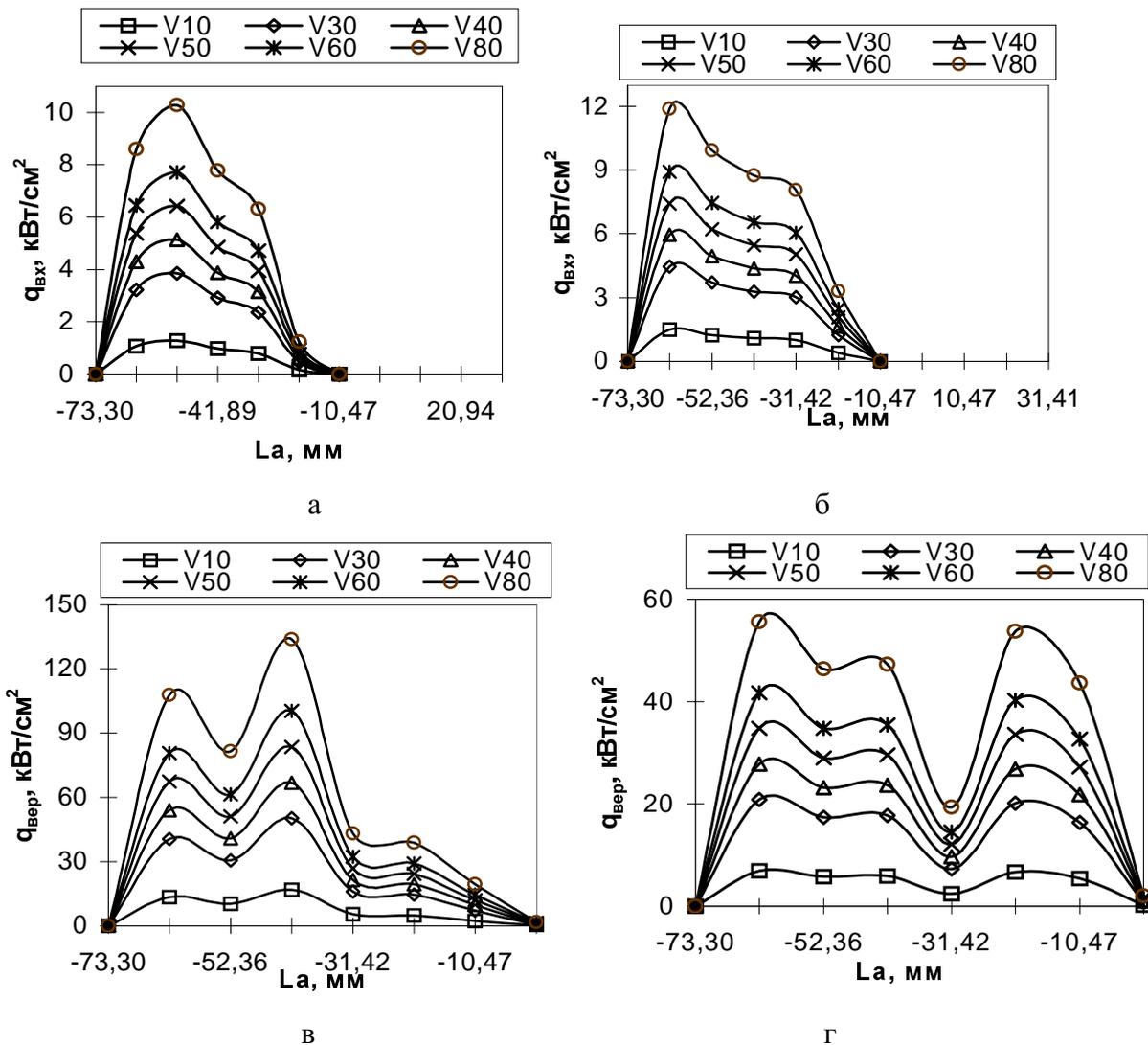


Рис. 2. Інтенсивність сумарних теплових потоків на вхідних (а, б), верхніх (в, г) лезах під час зубофрезерування з зустрічною (а, в) і попутною (б, г) подачею:

$m = 10$ мм; $z = 88$; $d_{aф} = 170$ мм; $h = 0,6$ t; робота з охолодженням, тепловідведення 70 % теплоти

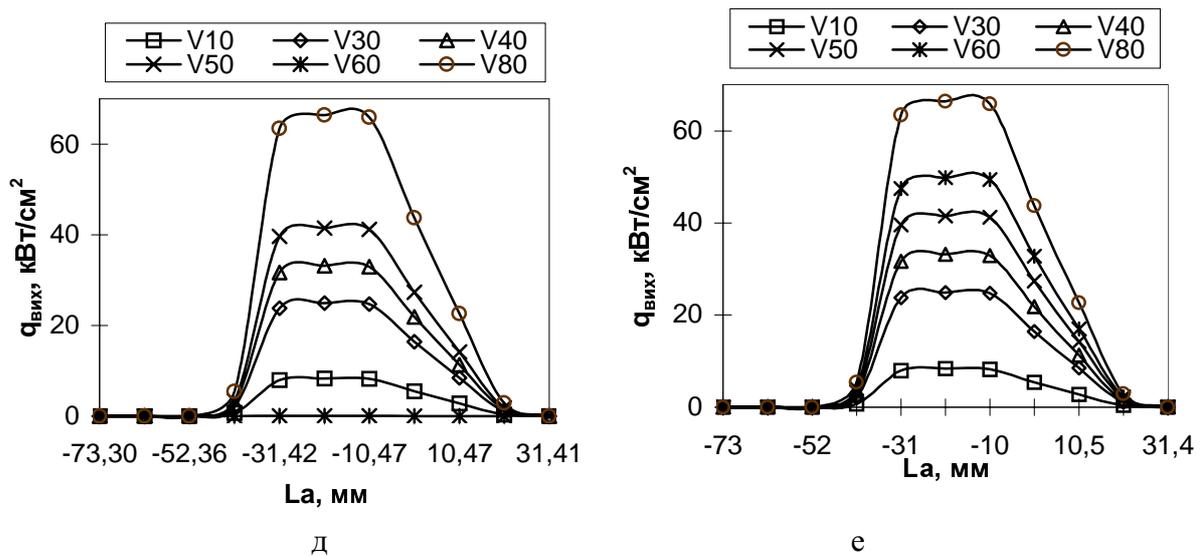


Рис. 2. Інтенсивність сумарних теплових потоків на вихідних (д, е) лезах під час зубофрезерування з зустрічною (д) і попутною (е) подачею:
 $m = 10$ мм; $z = 88$; ; $d_{аф} = 170$ мм; $h = 0,6$ т; робота з охолодженням, тепловідведення 70 % теплоти

Розподіл температури на активних зубцях і лезах

Теплові потоки, які діють на лезах та поверхнях зубців, визначають температурне поле черв'ячної фрези і дозволяють розрахувати температуру у кожній точці її активного простору. Для плоского джерела постійної інтенсивності середня температура, яка характеризує теплову напругу на лезі, дорівнює [10]

$$\theta = 0,184 \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{l \cdot \chi}{V}} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності інструментального матеріалу, Дж/(мм²·с·°C); χ – коефіцієнт температуропровідності інструментального матеріалу, см²/с; q – інтенсивність джерела тепла, Дж/(см²·с); l – віддаль від місця виникнення теплового імпульсу до точки тіла, мм; V – швидкість різання, м/хв.

Оскільки температура, яка встановлюється у тілі зубця, залежить від віддалі до стаціонарного джерела тепла, прийmemo температурну точку А розташованою у тілі зубця на однаковій віддалі від передньої і задньої поверхні кожного з лез. Ця умова дає можливість вважати температуру на контактних поверхнях зубця і у його тілі на даній глибині однаковою, а нагрівання леза розглядати як результат дії сумарної теплоти, яка генерується від двох теплових потоків, що сходяться у даній точці:

$$\theta = 0,184 \cdot \frac{q^* + q^{**}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{l \cdot \chi}{V}} \cdot k_\theta \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

де $q^* + q^{**} = q$ – сумарна інтенсивність теплової передачі.

У формулі (5) k_θ – коефіцієнт тепловідведення, який враховує зміну інтенсивності теплового потоку, нагрівання і рівня температури внаслідок використання МОР. На основі опрацювання даних, наведених у різних джерелах, можна прийняти $k_\theta = 0,25 - 0,35$ для охолоджуючої суспензії і $k_2 = 0,33 - 0,40$ для машинного масла; при роботі без охолодження $k_\theta = 1$.

Нижче наведено графіки температурних полів, які характеризують закономірності розподілення температури на поверхнях лез (рис. 3), та середніх температур, що встановлюються внаслідок дії сумарних теплових потоків у тілі зубців черв'ячних фрез $m = 10$ мм під час першого переходу ($t = 0,6h$), при зустрічному і попутному напрямках подачі, від швидкості різання (рис. 4) ($\lambda = 0,094$ кал / (см \cdot °C \cdot с) = 0,401 Дж/(см \cdot с \cdot °C); $\chi = 0,072$ см 2 /с); L_a – активна довжина черв'ячної фрези; N – порядковий номер зубця на основному черв'яку фрези.

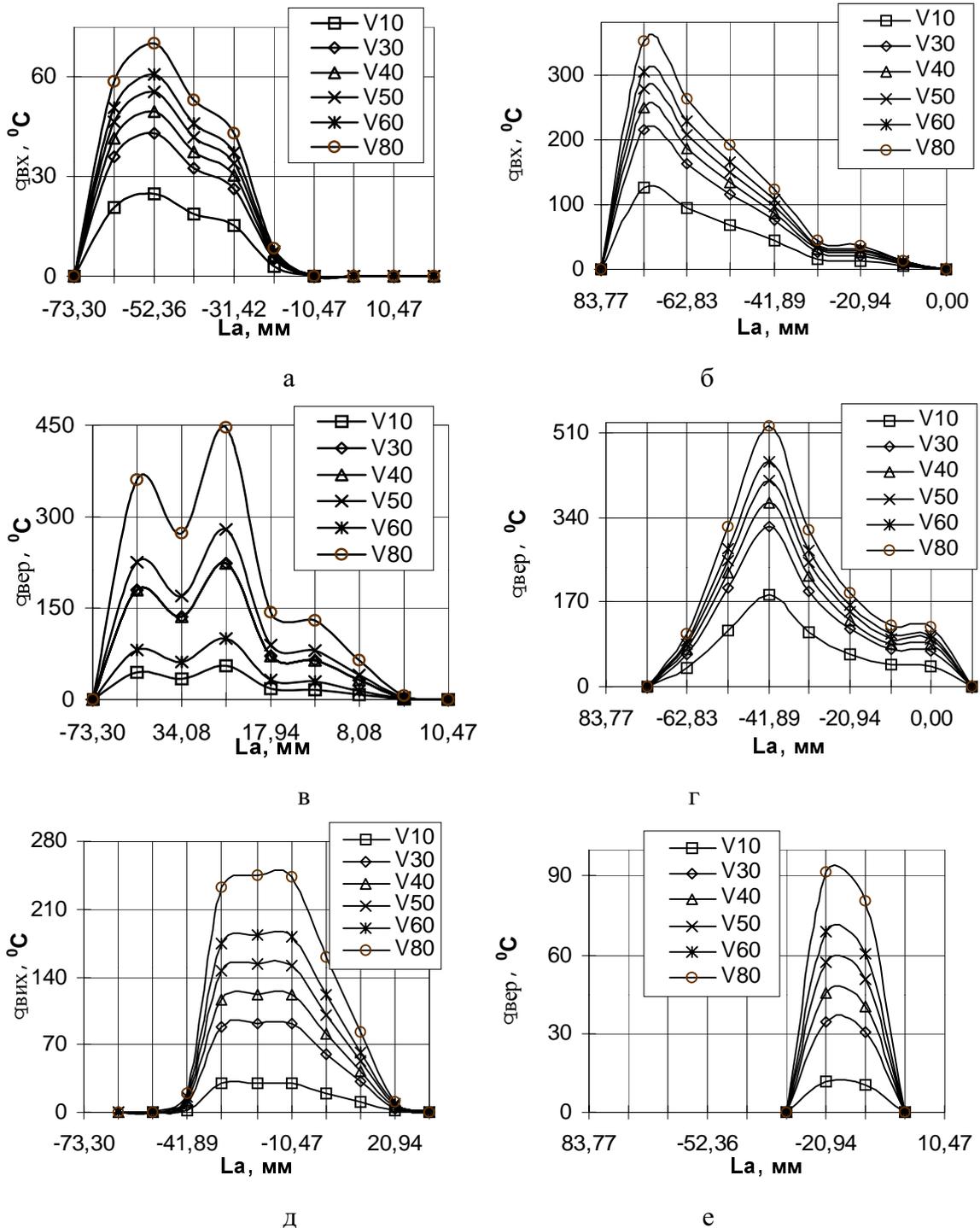


Рис. 3. Середня температура від сумарних теплових потоків на вхідних (а, б), вершинних (в, г), вихідних (д, е) лезах під час зубофрезерування з зустрічною (а, в, д) та попутною (б, г, е) подачами зубчастого колеса $m = 10$ мм; $t = 0,6h$; робота з охолодженням, відведення 70 % теплоти; HB 190-220

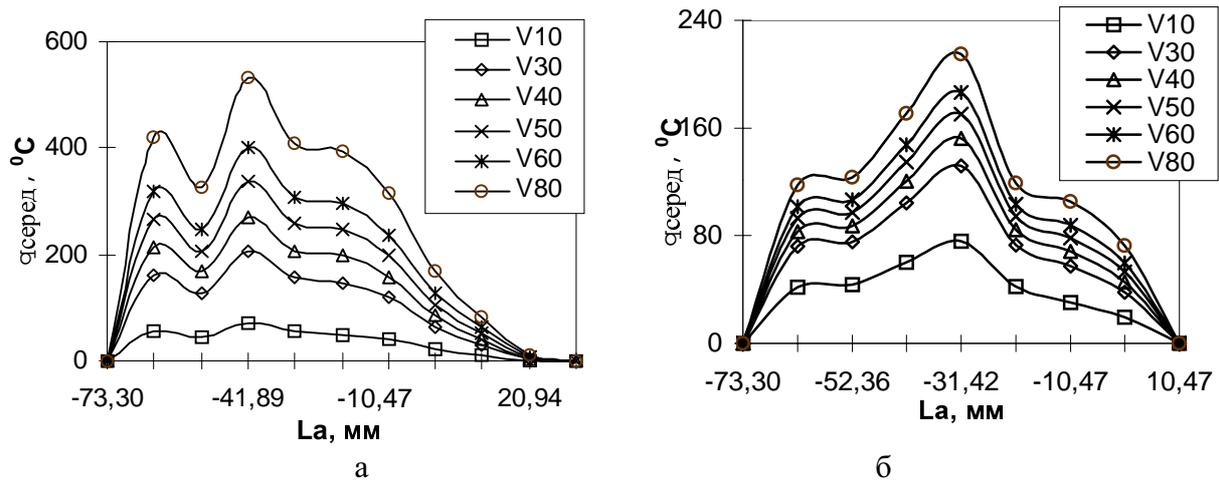


Рис. 4. Розподіл середньої температури на поверхнях зубців під час зубонарізання з зустрічною (а, в) та попутною (б, г) подачами на активній довжині черв'ячної фрези: робота з охолодженням, відведення з різального клину 70 % теплоти; $t = 0,6h$; НВ 190–220

Стійкість як функція температури різального клину

Внаслідок неоднорідного теплового навантаження на зубці, а також різного рівня нагрівання їх вхідних, верхових і вихідних лез, температура та інтенсивність зношування робочих елементів черв'ячної фрези, що розташовані у різних ділянках активної довжини, різні.

Відомо, що крива, яка характеризує залежність стійкості швидкорізального інструмента від температури, має локальний мінімум, який припадає на температурний діапазон 300...600 °С, та локальний максимум, який припадає на температуру 800...900 °С [11]. Основною причиною підвищення стійкості до спрацювання інструментів із швидкорізальних сталей при високих температурах є наростоутворення, завдяки чому полегшуються умови деформування під час різання та зменшуються навантаження на леза. Проте, внаслідок перервного періодичного характеру різання та використання, здебільшого інтенсивного змащування й охолодження зони різання, діапазон робочих температур зубофрезерування, здебільшого становить 300...600 °С.

На основі порівняння відомих залежностей, які ув'язують стійкість, температуру і швидкість різання, для цих температурних режимів отримано функцію періоду стійкості від температури різального клину на лезі

$$T = \frac{K_T}{\theta^g} \cdot k \text{ хв}, \quad (6)$$

де θ – максимальна середня температура, що встановлюється на різальному клині; K_T – коефіцієнт, який характеризує механічні і фізичні властивості матеріалу зубчастого колеса; g – показник степені, $g = 1,3$ для НВ 160–240 та $g = 1$ – для НВ 250–300 (відповідно до даних [1]); k – коефіцієнт, що коректує розрахунковий період стійкості залежно від умов обробки, зокрема, від частки довжини врізання і виходу фрези у загальному шляху різання, від співвідношення між теплопровідністю матеріалів інструмента і заготовки зубчастого колеса, від співвідношення між часом різання і періодом одного оберту фрези тощо.

Значення коефіцієнта K_T визначено на основі експериментальних досліджень, спостережень за стійкістю у виробничих умовах та узагальнення даних Львівського автобусного, інструментального та локомотиворемонтного заводів. Об'єктом досліджень служили зубчасті колеса і шестерні твердістю НВ160–240, які нарізалися модульними черв'ячними

фрезами стандартної конструкції із швидкорізальних сталей марок P18, P6M5 і P6M10 з попутною і зустрічною подачами. За критерій зношування приймалася ширина фаски по задній поверхні вершинних лез: для фрез $t = 4$ мм – 0,5 мм; для фрез $t = 10$ мм – 1 мм. Результати статистичної обробки фактичних значень періоду стійкості на першому переході нарізання зубчастих коліс наведені у табл. 1. Дослідні дані наведені до однієї швидкості різання 30 м/хв. шляхом врахування середнього показника степені у залежностях $T = T(V)$ [1–6], що дорівнює 2,65.

Таблиця 1

Результати статистичної обробки фактичних значень періоду стійкості на першому переході нарізання зубчастих коліс

Марка сталі	Твердість HB	Модуль, мм	
		4,5	10
		Стійкість у хв. різання	
сталь 20	160–165	230	194
сталь 45	180–190	320	256
сталь 50	205–210	276	215
12ХН3А	230–240	245	200

На основі експериментальних даних встановлено, що при нарізанні коліс на повну глибину профілю за один перехід стійкість швидкорізальних фрез зменшується у 2 рази порівняно із стійкістю, яку має черв'ячна фреза при роботі із глибиною різання, що дорівнює 0,6h. При двоперехідній обробці із співвідношенням глибини різання першого і другого переходів, як 0,6:0,4, стійкість другого переходу становить 0,9–0,95 від стійкості першого переходу.

За результатами експериментальних досліджень стійкості та розрахунковим значенням температури на поверхні найбільш навантаженого за тепловою дією зубця встановлено середні значення коефіцієнтів відповідності K_T у залежності (6) періоду стійкості лез черв'ячної фрези від температури різального клину, які наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Середні значення коефіцієнтів відповідності

Сталь	Межа міцності σ_b , МПа	Твердість HB	Відношення до $M_{кр}$ сталі 45	Відносне видовження δ	Коефіцієнт $K_T \cdot 10^3$
20	420	160 – 165	1,33	25	151,4
45	610	180-190	1	16	229,5
50	640	205-210	1,1	14	208,1
12ХН3А	950–980-	215-225	1,36	11	172,2

На рис. 5 показано графіки розрахункових значень стійкості вершинних і вихідних бокових лез черв'ячних фрез, які зазнають найбільшого стирання під час зубообробки, для першого переходу з глибиною різання $t = 0,6h$; початкові дані ті ж, що у попередньому випадку. Порівняння теоретичних значень параметра стійкості, розрахованих за проведеною тут методикою з численними даними, почерпнутими із різних джерел, у широкому діапазоні зміни модулів і робочих режимів, показує високий рівень збігу.

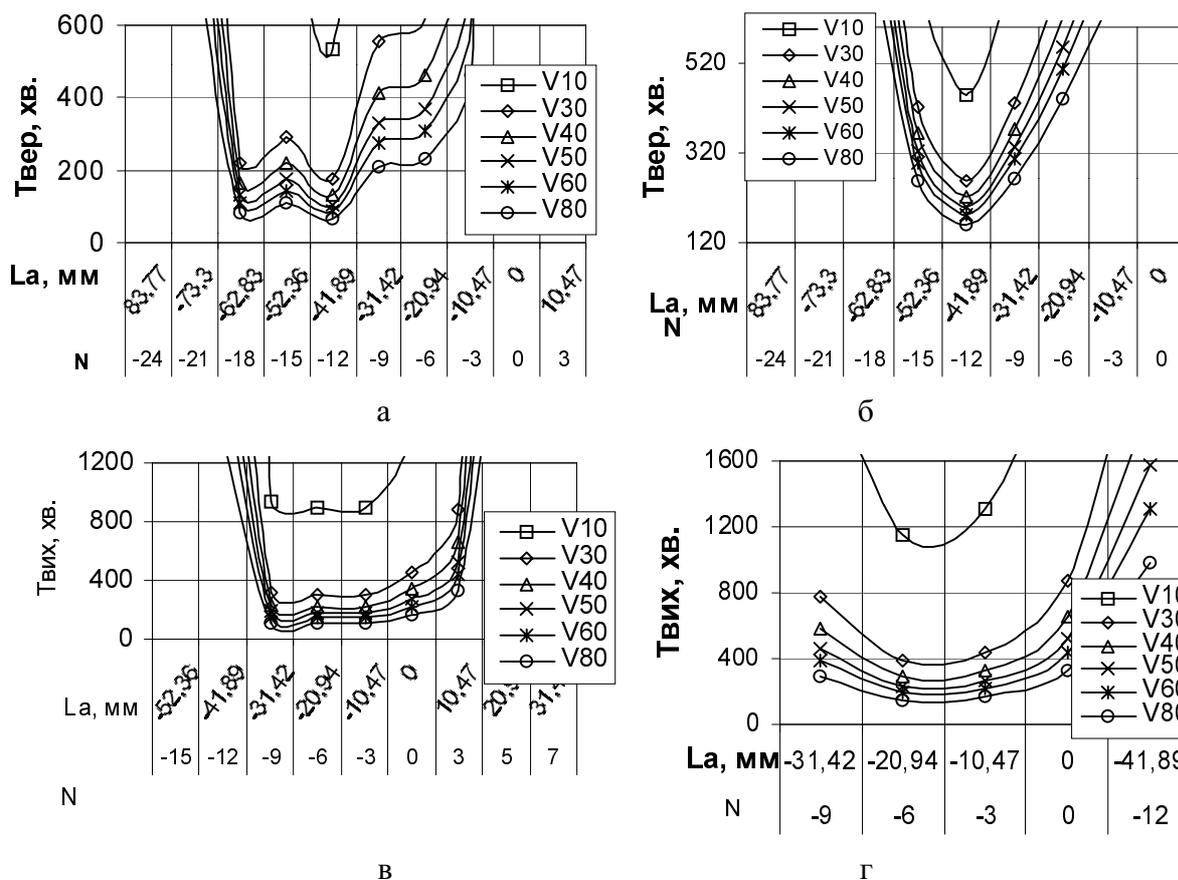


Рис. 5. Розрахунковий період стійкості вершинних лез (а, б) та вихідних бокових лез (в, г) при роботі з зустрічною (а, в) та попутною (б, г) подачею; $t = 10$ мм; робота з охолодженням; $t = 0,6$ h; HB 190–220

Отже, на основі положень температурного поля черв'ячної фрези та результатів експериментальних досліджень розроблено метод прогнозування стійкості черв'ячних фрез. Цей метод дає можливість знаходити стійкість кожного із активних зубців та лез черв'ячної фрези у широкому діапазоні зміни початкових умов практично без обмежень значень вхідних параметрів та вибирати оптимальні робочі режими або найвигідніші конструктивно-технічні параметри черв'ячних фрез.

1. Производство зубчатых колес: Справочник / С.Н. Калашиников, А.С. Калашиников, Г.И. Коган и др.; Под общ. ред. Б.А. Тайца. – М., 1990. – 464 с. 2. Овумян Г.Г, Адам Я.И. Справочник зубореза. – М., 1983. – 223 с. 3. Митряев К.Ф. Новые исследования в области динамики и тепловых явлений при зубофрезеровании: В кн.: Прогрессивные методы производства зубчатых колес и их технологичность / Под ред. М.Б. Громана. – М., 1962. – С. 286–302. 4. Организация процессов обработки металлов резанием // Стойкостные зависимости червячных зуборезных фрез. – М., 1961. – Вып. 52. – 1°с. 5. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное нарезание фрезами. – М., 1981. – 104 с. 6. Федулов И.Г. Исследование эффективности применения распыленных СОЖ при зубофрезеровании чугунок: В кн.: Трение и смазка при резании металлов. – Чебоксары, 1972. – С. 160–165. 7. Грицай І.Є. Параметрична модель стійкості черв'ячної фрези за роботою різання її зубців та лез // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів: Зб. наук. праць. – Львів, 2000. – Вип. 3. – С. 53–57. 8. Грицай І.Є. Структурна модель процесу зно-

шування черв'ячної фрези // *Проблеми трибології: Міжнар. наук. журн.* – 2001. – № 1. – С. 12–21. 9. Грицай И.Е., Козут Н.С. Влияние параметров срезов на динамические характеристики процесса резания червячными фрезами с разделенным исходным контуром // *Вестн. Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”.* – 2000. – Вып. 39. – С. 163–177. 10. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М., 1981. – 279 с. 11. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ при резании // *Вестн. машиностроения.* – 1995. – № 1. – С. 26–32.

УДК 621.833.002-19

Е.М. Гуліда

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування

ПОХИБКИ ОБРОБЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

© Гуліда Е.М., 2002

Розглянуто класифікацію зубооброблювальних операцій та визначено джерела похибок оброблення зубчастих коліс. Встановлено закони їх дії та вплив на точність зубчастого колеса, а також наведено методику їх аналізу. Всі зубчасті колеса були поділені на два класи і шість груп залежно від методу оброблення зубців та інструмента, який використовували при зубонарізанні. Враховуючи клас і групу зубчастого колеса розглядали джерела похибок.

It considered the classification of gear machining operations and determined the resources of its errors. The laws of these errors action and its influence on the gear precision are established. The methods of its analysis are led. All cogwheels were divided into two classes and six groups in dependence on a method of processing tooth and tool, which used for want of processing tooth. Proceeding from a class and groups of a cogwheel were considered sources of errors.

На сучасному етапі у вітчизняній і закордонній практиці використовують у виробничому процесі різні зубооброблювальні операції з використанням високопродуктивного обладнання та інструментів. Але з погляду прогнозування точності оброблення зубчастих коліс, яку можна досягти під час отримання зубців на зубооброблювальних операціях (зубофрезерних, зубошліфувальних, зубошевінгувальних тощо), та довговічності їх роботи, найбільш доцільно для спрощення розглядання цих питань провести певну класифікацію зубооброблювальних операцій. Така класифікація дозволить деякою мірою спростити методику математичного моделювання процесу зубооброблення, виявити джерела похибок, а також розробити і впровадити засоби виділення або зменшення цих похибок і тим самим сприяти розв'язанню поставлених задач.

Зубооброблювальні операції, які зараз використовують у вітчизняній та закордонній практиці при обробленні зубчастих коліс, доцільніше класифікувати за двома основними ознаками: 1) за методом оброблення бокових поверхонь зубців; 2) за використаним інструментом, який може бути одним з елементів уявної спряженої пари зубчастої передачі (оброблюване колесо – інструмент) або відтворюючий його.