УДК 621.834

Н.В. Ліщенко
Одеська національна академія харчових технологій

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ЗУБОШЛІФУВАННЯ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМ КРИТЕРІЄМ

Розроблено прикладну методику визначення режимів профільного зубошліфування на основі показників питомої інтенсивності шліфування Q'_w і питомого обсягу матеріалу V'_w, що видаляється, які можна використовувати для технологічної діагностики операції профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК.

Ключові слова: *профільне зубошліфування, етапи зубошліфування, питома інтенсивність шліфування, питомий обсяг матеріалу, що видаляється, теплонапруженість зубошліфування, питома робота шліфування.*

Н.В. Лищенко
Одесская национальная академия пищевых технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ

Разработана прикладная методика определения режимов профильного зубошлифования на основе показателей удельной интенсивности шлифования Q'_w и приведенного объёма удаляемого материала V'_w, которые можно использовать для технологической диагностики операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ.

Ключевые слова: *профильное зубошлифование, этапы зубошлифования, удельная интенсивность шлифования, удельный объём удаляемого материала, теплонапряженность зубошлифования, удельная работа шлифования.*

N.V. Lishchenko
Odessa National Academy of Food Technologies

DETERMINATION OF GRINDING MODES BY TEMPERATURE CRITERIA

An applied technique for determining the profile gear grinding conditions is developed on the basis of both the specific material removal rate Q'_w and the material removal rate V'_w which the two might be used for form gear grinding operation diagnostics on CNC machine.

Keywords: *form gear grinding, gear grinding stages, specific material removal rate, material removal rate, the heat stress of the gear grinding, the specific grinding work.*

Для оцінки продуктивності і проектування шліфувальної операції використовується ряд характеристичних величин, до числа яких відносяться: обсяг матеріалу, що видаляється за одиницю часу (material removal rate) Q_w (мм^3/с), загальний обсяг V_w матеріалу, що видаляється, (мм^3). У закордонній літературі перші два показники додатково наведені до одиниці ефективної (далі активної) ширини (width) шліфувального круга і позначені відповідно: Q'_w у мм^3/(с·мм) і V'_w у мм^3/мм [1]. У роботі [2] відмічається зв'язок показника Q'_w з теплонапруженістю процесу зубошліфування, у роботі [3] параметр V'_w є характеристикою ресурсу роботи шліфувального круга по мірі його зношування. У роботі [4] дана методика визначення Q'_w.

У роботі [5] автори розглядають структуру операції зубошліфування, що складається із трьох етапів: чорнового, напівчистового і чистового. Причому режими на кожний етап обираються виходячи з параметрів Q'_w і V'_w. Але в зазначеній роботі [5] не наведено технологічні критерії, за якими визначено чисельні значення показників Q'_w і V'_w. Видно тільки, що вони зменшуються від етапу до етапу. Не зазначено спосіб одержання режимних параметрів.

Таким чином у літературі не наведено прикладні методики визначення режимів зубошліфування на основі зазначених показників технологічної операції.

Метою статті є розробка методики визначення режимних параметрів профільного зубошліфування на основі показників Q'_w і V'_w і їх спільного використання з теплофізичною моделлю операції шліфування, а також розробка способу технологічної діагностики операції.

Основний матеріал. Максимальна температура шліфування на поверхні на етапі нагрівання T_H описується математичною залежністю, що представляє собою рішення одновимірного диференціального рівняння теплопровідності. Ця залежність при $x = 0$ має вигляд [6]

© Н.В. Ліщенко

$$T_H = \frac{2q\sqrt{a\,\tau_н}}{\lambda\sqrt{\pi}}\,, \qquad (1)$$

де q – щільність теплового потоку, Вт/м^2;

a, λ – коефіцієнти температуро – і теплопровідності, у м^2/с і Вт/(м·°С), відповідно;

$\tau_н = \dfrac{\sqrt{D\,t_v}}{V_f}$ – час дії теплового джерела на етапі нагрівання, с;

t_v – вертикальна глибина шліфування, мм;

D – миттєвий діаметр шліфувального круга в розглянутому перетині його профілю, мм;

V_f – осьова подача, мм/с.

Щільність теплового потоку q (у Вт/мм^2) може бути знайдена на основі формули, яка наведена в роботі [7], тобто

$$q = A_{пит}\psi\frac{V_f t_v \sin\alpha}{\sqrt{Dt_v}}\,, \qquad (2)$$

де ψ – частка теплоти, що поступає в заготовку;

$A_{пит}$ – питома робота шліфування, Дж/мм^3;

α – кут профілю, рад.

Формула (1) з урахуванням формули (2) може бути представлена у вигляді

$$T_H = 2\cdot 10^6 A_{пит}\,\psi\frac{t_v^{\,0,75}\,V_f^{\,0,5}\sin\alpha}{D^{0,25}\,\lambda}\sqrt{\frac{a}{\pi}} \qquad (3)$$

В формулі (3) параметри мають такі одиниці вимірювання: $A_{пит}$ [Дж/мм^3]; t_v [мм]; V_f [мм/с]; α [рад]; a [м^2/с]; D [мм]; λ [Вт/(м·°С)].

Враховуючи, що $Q'_w = t_v\,V_f$, формулу (3) можна представити у вигляді

$$T_H = 2\cdot 10^6 A_{пит}\,\psi\frac{Q'^{\,0,75}_w\,V_f^{\,-0,25}\sin\alpha}{D^{0,25}\,\lambda}\sqrt{\frac{a}{\pi}} \qquad (4)$$

З огляду літератури встановлено, що показники Q'_w і V'_w характеризують відповідно інтенсивність шліфування та ресурс стійкості шліфувального круга.

Інтенсивність шліфування Q'_w пов'язана з теплонапруженістю, оскільки з величиною цього параметра зв'язують появу шліфувальних припіків [2]. Шліфувальний круг по мірі роботи може мати різні проміжні стани, тобто змінюється його ріжуча здатність. Але при зміні ріжучої здатності параметр Q'_w не враховує цю зміну, що підтверджує його формальний характер. Можна навіть сказати, що Q'_w – інтенсивність шліфування для миттєвого стану шліфувального круга. Тому самому показнику Q'_w будуть відповідати різні температури шліфування, які залежать від фактичного стану шліфувального круга. Отже, необхідно встановити зв'язок Q'_w з температурою шліфування. Показник Q'_w можна зв'язати з температурою шліфування, якщо в рівняння зв'язку ввійде питома робота $A_{пит}$. Для встановлення зв'язку Q'_w і температури шліфування розглянемо рівняння (4) при $A_{пит}$ =50 Дж/мм^3. Нижче наведено розрахунки виконані для фіксованих значень змінних ψ = 0,8; $A_{пит}$= 50 Дж/мм^3; α = 20° (або $\dfrac{20\pi}{180^o}$ рад); теплофізичні параметри сталі 20Х2Н4А a =5,68276 10^{-6} м^2/с; λ=24 Вт/(м·°С); D=400 мм. При цьому параметри зубчастого колеса: z = 40; m =3,75; $d_д$=150 мм; d_a =153,75 мм; d_b =140,954мм; d_f=139 мм; коефіцієнт зсуву вихідного контуру x = – 0,3; α=20 °; β=0; ширина вінця B=24 мм. Характеристика шліфувального круга: 400х32х127; 54А80F15VPMF604H (фірма Winterthur).

Змінними параметрами будуть наступні (рис.1): V_f в інтервалі від 500 мм/хв (8,33 мм/с) до 7000 мм/хв (116,7 мм/с); Q'_w в інтервалі від 0,25 мм^3/(с·мм) до 8,6 мм^3/(с·мм).

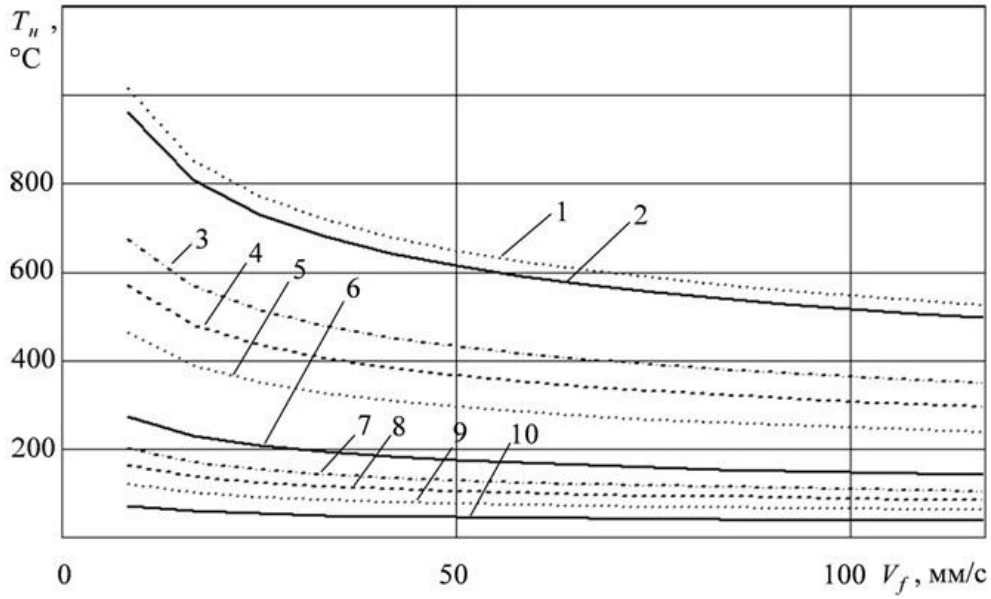

Рис.1. **Залежності T_H (V_f , Q'_w) при $A_{пит}$ = 50 Дж/мм^3 в інтервалі зміни Q'_w 0,25 – 8,6 мм^3/(с·мм): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – Q'_w = 8,6; 8; 5; 4; 3; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25 мм^3/(с·мм)**

Щоб встановити вплив $A_{пит}$ на температуру шліфування, побудовано аналогічні залежності при $A_{пит}$=25 Дж/мм^3 (рис. 2).

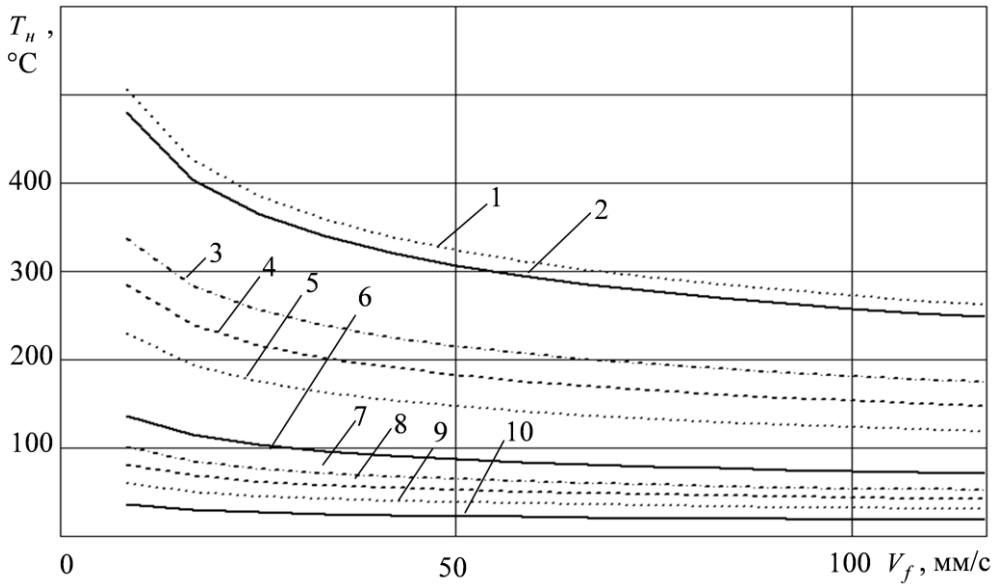

Рис.2. **Залежності T_H (V_f , Q'_w) в інтервалі зміни Q'_w 0,25 – 8,6 мм^3/(с·мм) і $A_{пит}$ = 25 Дж/мм^3: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – Q'_w = 8,6; 8; 5; 4; 3; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25 мм^3/(с·мм)**

З рис.1 і 2 видно, що зменшення $A_{пит}$ у два рази від 50 Дж/мм^3 до 25 Дж/мм^3 призводить до прямопропорційної зміни температури T_H (V_f , Q'_w). Розділивши вісь ординат на величину $A_{пит}$ одержимо відносну температуру $\frac{T_H}{A_{пит}}$, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування

(рис.3). Тобто для одержання абсолютної температури шліфування відповідне значення по осі ординат необхідно помножити на величину $A_{пит}$. Отримане при цьому значення температури буде в градусах Цельсія.

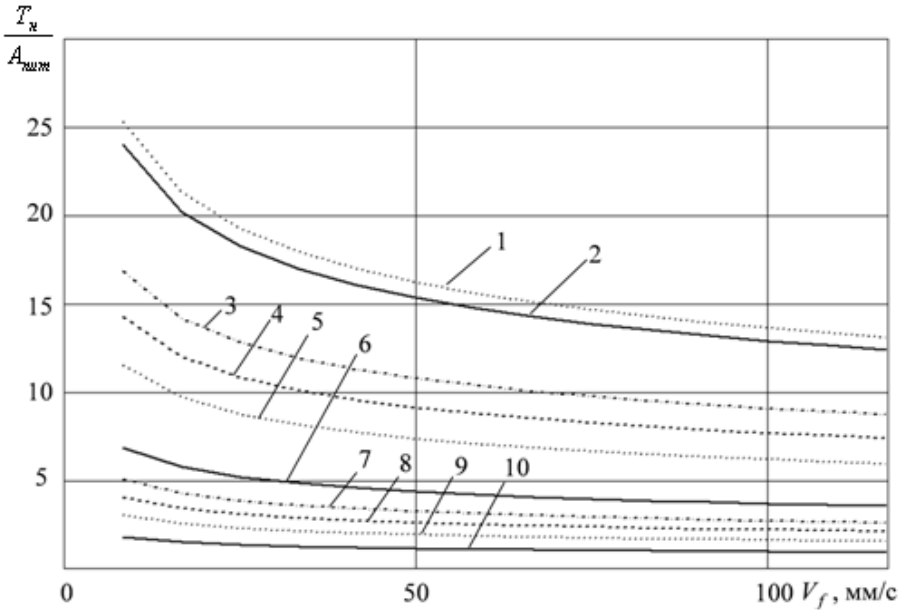

Рис.3. **Залежності $\frac{T_H}{A_{пит}}$ в інтервалі зміни Q'_w 0,25 – 8,6 мм³/(с·мм): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – Q'_w = 8,6; 8; 5; 4; 3; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25 мм³/(с·мм)**

Вибір режимів зубошліфування на чорновий, напівчистовий і чистовий етапи виконують за наступною методикою. Попередньо встановлено величину питомої роботи $A_{пит}$=50 Дж/мм³.

1. Задають показник Q'_w залежно від етапу шліфування відповідно до табл. 1.

Таблиця 1.

Параметр Q'_w по етапах

Етап	чорновий	напівчистовий	чистовий
Q'_w, мм³/(с·мм)	8,6...5	5...1	1...0,25

Наприклад, для першого етапу шліфування задають, наприклад, Q'_w = 8,6 мм³/(с·мм).

2. Обирають максимально можливу осьову подачу V_f. Наприклад, для першого етапу V_f = 116,667 мм/с (7000 мм/хв).

3. За номограмою рис.3 визначають відносну температуру, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування. У цьому випадку відносна температура становить $\frac{T_H}{A_{пит}}$ =10,478. Абсолютну температуру шліфування одержують добутком відносної температури 10,478 на питому роботу $A_{пит}$=50 Дж/мм³. У цьому випадку температура шліфування T_H =10,478·50=524°С. Таким чином, T_H (V_f , Q'_w) = T_H (7000 мм/хв., 8,6 мм³/(с·мм)) = 524 °С.

4. Порівнюють отриману температуру T_H із критичним рівнем температури припікоутворення $T_{КР}$.. Наприклад, порівнюють із $T_{КР}$=550 °С. Тому що 524 °С < 550 °С, знайдене значення осьової подачі фіксують. У цьому випадку V_f =7000 мм/хв. Якщо T_H > $T_{КР}$, то значення параметра Q'_w зменшують.

5. Для заданого значення показника Q'_w = 8,6 мм^3/(с·мм) і фіксованого значення осьової подачі V_f = 116,667 мм/с (7000 мм/хв) за формулою $t_v = Q'_w / V_f$ знаходять t_v. Тобто

$$t_v = \frac{Q'_w}{V_f}.$$

У цьому випадку $t_v = \frac{8,6}{116,667}$ =0,07371 мм.

Тому що припуск на обробку обчислюють у нормальному напрямку до оброблюваної поверхні (сума подач на сторону), при визначенні числа ходів необхідно визначити нормальну глибину шліфування (подачу на сторону). Можна використовувати наступну спрощену залежність між цими глибинами різання

$$t_n = t_v \sin\alpha, \tag{5}$$

де α – кут профілю в радіанах.

У цьому випадку при α = 20° нормальна глибина шліфування t_n = 0,02521 мм.

Таким чином, режими на чорновий етап шліфування наступні: t_n = 0,02521 мм; t_v =0,07371 мм; V_f =7000 мм/хв.

Наприклад, загальний припуск за нормальним вирахуванням є 0,77 мм і видаляється послідовно на трьох етапах шліфування: на першому етапі z_1=0,5 мм; на другому етапі z_2=0,25 мм; на третьому етапі z_3=0,02 мм.

6. Визначають число робочих ходів на перший етап зубошліфування

$$i_1 = \frac{z_1}{t_{n1}}.$$

У цьому випадку $i_1 = \frac{0,5}{0,02521}$ =19,832 мм.

Округляють знайдене число ходів до найближчого цілого. У цьому випадку i_1=19. Перераховують нормальну глибину різання t_n=0,026 мм. Перераховують температуру шліфування з урахуванням скоректованого значення вертикальної глибини t_v=0,077 мм. Температура шліфування T_H за формулою (3) становить 541 °С.

Визначають обсяг матеріалу, що видаляється, на одиницю активної ширини шліфувального V'_w круга за формулою

$$V'_w = B t_v. \tag{6}$$

Наприклад, для першого етапу V'_w =24·0,077=1,847 мм^3/мм.

Формують вихідні дані для ЧПК верстата (табл.2) із вказівкою розрахункової температури шліфування.

Таблиця 2.

Режими зубошліфування на 1 етап (чорновий)

№	Подача на сторону (t_n), мм	Радіальна подача (t_v), мм	Осьова подача (V_f), мм/хв	Q'_w, мм^3/(с·мм)	V'_w, мм^3/мм	T_H, °С
1	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541
2	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541
3	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541
…	…	…	…	…	…	…
19	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541

Аналогічно обирають режими зубошліфування на другий етап для видалення припуску z_2=0,25 мм.

Наприклад, для другого етапу шліфування задаємо Q'_w = 5 мм^3/(с·мм).

Вибирають максимально можливу осьову подачу V_f . Наприклад, для другого етапу V_f = 116,667 мм/с (7000 мм/хв).

За номограмою рис.3 визначають відносну температуру, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування. У цьому випадку відносна температура становить $\frac{T_H}{A_{пит}}$ =6,97655. Абсолютну температуру шліфування одержують добутком відносної температури 6,97655 на питому роботу $A_{пит}$ =50 Дж/мм^3. У цьому випадку температура шліфування T_H =6,97655·50=349 °С. Таким чином, T_H (V_f , Q'_w) = T_H (7000 мм/хв: 5 мм^3/(с·мм)) = 349 °С.

Порівнюють отриману температуру T_H із критичним рівнем температури припікоутворення T_{KP}. Наприклад, порівнюють із T_{KP} =550 °С. Тому що 349 °С < 550 °С, знайдене значення осьової подачі фіксують. У цьому випадку V_f =7000 мм/хв.

Для заданого значення показника Q'_w = 5 мм^3/(с·мм) і фіксованого значення осьової подачі V_f =7000 мм/хв знаходять t_v.

У цьому випадку $t_v = \frac{5}{116,667}$ =0,04286 мм.

Нормальна глибина шліфування (подачу на сторону) t_n =0,01466 мм. Таким чином, режими на напівчистовий етап шліфування наступні: t_n = 0,01466 мм; t_v =0,04286 мм; V_f =7000 мм/хв.

Визначають число робочих ходів на другий етап зубошліфування

$$i_2 = \frac{z_2}{t_{n2}}.$$

У цьому випадку $i_2 = \frac{0,25}{0,015}$ =17,056.

Округляють знайдене число ходів до найближчого цілого. У цьому випадку i_2 =17. Перераховують нормальну глибину різання t_n =0,015 мм.

Перераховують температуру шліфування з урахуванням скоректованого значення вертикальної глибини t_v =0,043 мм. Температура шліфування T_H за формулою (3) становить 350°С.

Для другого етапу V'_w =24·0,043=1,032 мм^3/мм.

Формують вихідні дані для ЧПК верстата (табл.3) із вказівкою розрахункової температури шліфування.

Таблиця 3.

Режими зубошліфування на 2 етап (напівчистовий)

№	Подача на сторону (t_n), мм	Радіальна подача (t_v), мм	Осьова подача (V_f), мм/хв	Q'_w, мм^3/(с·мм)	V'_w, мм^3/мм	T_H, °С
1	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350
2	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350
3	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350
…	…	…	…	…	…	…
17	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350

Аналогічно обирають режими зубошліфування на третій етап для видалення припуску z_1=0,02 мм.

Наприклад, для третього етапу шліфування задають, Q'_w = 0,5 мм^3/(с·мм).

Вибирають осьову подачу V_f. Наприклад, для третього етапу осьова подача V_f = 41,667 мм/с (2500 мм/хв).

Визначають відносну температуру, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування. У цьому випадку відносна температура становить $\frac{T_H}{A_{пит}}$=1,60484. Абсолютну температуру шліфування одержують добутком відносної температури 1,60484 на питому роботу $A_{пит}$=50 Дж/мм^3. У цьому випадку температура шліфування T_H=1,60484·50=80,242. Таким чином, T_H (V_f, Q'_w) = T_H (2500 мм/хв: 0,5 мм^3/(с·мм)) = 80 °С.

Порівнюють отриману температуру T_H із критичним рівнем температури припікоутворення T_{KP}. Наприклад, порівнюють із T_{KP} =550 °С. Тому що 80 °С < 550 °С, знайдене значення осьової подачі фіксують. У цьому випадку V_f =2500 мм/хв.

Для заданого значення показника Q'_w = 0,5 мм^3/(с·мм) і фіксованого значення осьової подачі V_f =2500 мм/хв знаходять t_v.

У цьому випадку $t_v = \frac{0,5}{41,667} = 0,012$ мм.

Нормальна глибина шліфування (подачу на сторону) t_n =0,0041 мм. Таким чином, режими на чистовий етап шліфування наступні: t_n = 0,0041 мм; t_v=0,012 мм; V_f =2500 мм/хв.

Визначають число робочих ходів на третій етап зубошліфування

$$i_3 = \frac{z_3}{t_{n3}}.$$

У цьому випадку $i_3 = \frac{0,02}{0,0041}$ =4,873.

Округляють знайдене число ходів до найближчого цілого. У цьому випадку i_3=4. Перераховують нормальну глибину різання t_n=0,005 мм. При цьому вертикальна глибина t_v=0,015 мм.

Перераховують температуру шліфування з урахуванням скоректованого значення вертикальної глибини t_v=0,015 мм. Температура шліфування T_H за формулою (3) становить 93°С.

Для третього етапу V'_w =24·0,015=0,351 мм^3/мм.

Формують вихідні дані для ЧПК верстата (табл.4) із вказівкою розрахункової температури шліфування.

Таблиця 4.

Режими зубошліфування на 3 етап (чистовий)

№	Подача на сторону (t_n), мм	Радіальна подача (t_v), мм	Осьова подача (V_f), мм/хв	Q'_w, мм^3/(с·мм)	V'_w, мм^3/мм	T_H, °С
1	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93
2	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93
3	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93
4	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93

У межах чистового етапу для одержання необхідної шорсткості осьову подачу можна зменшувати, тому що це дозволить зменшити шорсткість, якщо вимоги до шорсткості високі. Для високих класів точності зубчастих коліс значення осьової подачі обирають, виходячи із забезпечення необхідного охолодження заготовки по мірі формування її остаточного розміру, щоб

усунути вплив теплових деформацій на точність обробки, у тому числі змінюючи структуру циклу шліфування (пропуск робочого ходу - тільки зустрічне, або тільки попутне, секторне шліфування).

Використовувані при розрахунку показники Q'_w (рис.4) і V'_w (рис.5) використовують як параметри стану в технологічній системі діагностики.

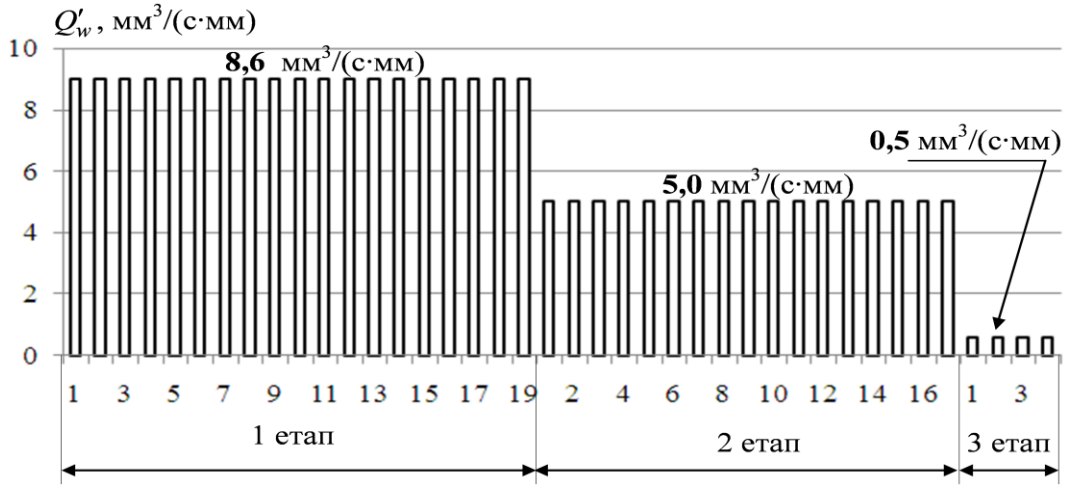

Рис. 4. **Зміна параметра Q'_w за етапами і робочими ходами**

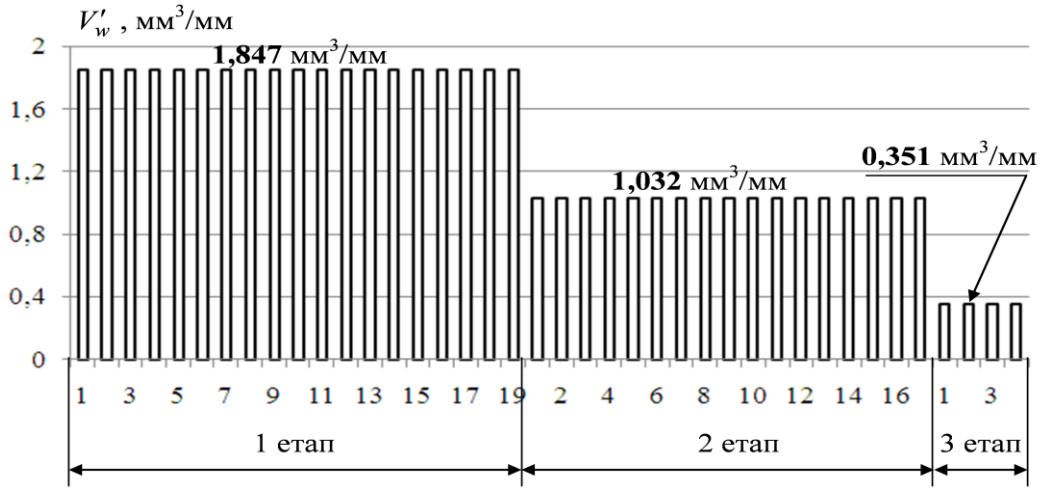

Рис. 5. **Зміна параметра V'_w за етапами і робочими ходами**

Висновки.

1. Розроблено прикладну методику визначення режимів зубошліфування на верстатах з ЧПК, що працюють за методом копіювання, виходячи з поділу показників Q'_w і V'_w за функціональним призначенням: теплонапруженість процесу та ресурс стійкості шліфувального круга, відповідно.

2. Виконано контрольний приклад розрахунку режимних параметрів зубошліфування: подачі на сторону (нормальна глибина шліфування), радіальної подачі (вертикальна глибина шліфування) і осьової подачі (швидкість деталі) (таблиці 1 - 3).

3. Запропоновано використовувати показники Q'_w і V'_w не тільки для визначення режимів зубошліфування, але одночасно для технологічної діагностики операції профільного зубошліфування, коли ці показники є параметрами стану технологічної системи.

4. Для визначення режимів шліфування на етапі випробування шліфувальних кругів визначають три технологічних параметри: $A_{пит}$, Q'_w, V'_w. Це необхідно враховувати при розробці програми випробувань зубошліфувальних кругів.

Список використаних джерел

1. Brecher C. Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Markus Brumm, Florian Hübner / Gear Technology. – September/October 2015. – P.86-90.

2.Türich A. Innovative concepts for grinding wind power energy gears /A. Türich, C. Kobialka, D. Vucetic // Gear technology. – June 2009. – P. 39-44.

3.Gorgels C. Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Gorgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology. – November/December 2006. – P.34-41

4.Лищенко Н.В. / Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 11. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 150-162.

5.Gear grinding prossesing developed for high-presition gear manufacturing / Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Technical Review Vol.45 No. 3 (Sep.2008).

6.Лищенко Н.В. Влияние принудительного охлаждения на температуру шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць. – Д.: Ліра. – 2015. – С. 48-54.

7.Ларшин В.П. Технология многониточного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов / В.П. Ларшин // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999. – Вып.2(8) . – С. 87-91.

Рецензенти:

1. **Іванова Л.О.,** зав. каф. інженерної графіки і технічного дизайну Одеської національної академії харчових технологій, професор, доктор технічних наук.
2. **Лебедєв В.Г.,** професор каф. технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету, доктор технічних наук.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2017.

© Н.В. Ліщенко