

УДК 658.52.011.56

Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»***ЗАВИСИМОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ОТ
МАКРОШЕРОХОВАТОСТИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

На образование макрошероховатости поверхностей цилиндрических зубчатых колес при зубообработке оказывают исходное состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки; точность базирования и закрепления заготовки зубчатого колеса и фрезы; геометрия фрезы и кинематика перемещения фрезы и обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса. При скоростном зубофрезеровании дисперсия исходного состояния поверхностного слоя приводит к динамическому изменению радиальной силы, а следовательно, и к вынужденным колебаниям фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки. Анализ полученных результатов исследований показывает, что основное влияние на макрошероховатость при скоростном зубофрезеровании и накатывании оказывают жесткость технологической системы, скорость, подача, величина коэффициента формообразования поверхностного слоя. Для уменьшения макрошероховатости при накатывании необходимо обеспечить равномерность пластических деформаций в зоне контакта и уменьшить величину внедрения конического ролика в обрабатываемую поверхность, применением инструмента с каплевидным контактом.

Ключевые слова: макрошероховатость поверхностей, цилиндрические зубчатые колеса, параметры, зубообработка, кинематика перемещения фрезы, накатывание, жесткость технологической системы.

Форм. 16. Літ. 5.

Ю.В. Тимофієв, О.М. Шелковий, О.О. Клочко
**ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВІД
МАКРОШОРСТКОСТІ ЇХ ПОВЕРХОНЬ**

На утворення макрошорсткості поверхонь циліндричних зубчастих коліс при зубообробки надають початковий стан поверхневого шару оброблюваної заготовки; точність базування і закріплення заготовки зубчастого колеса і фрези; геометрія фрези і кінематика переміщення фрези і оброблюваного циліндричного зубчастого колеса. При швидкісному зубофрезеруванні дисперсія вихідного стану поверхневого шару призводить до динамічного зміни радіальної сили, а отже, і до вимушених коливань фрези відносно оброблюваної поверхні заготовки. Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що основний вплив на макрошорсткість при швидкісному зубофрезеруванні і наплив надають жорсткість технологічної системи, швидкість, подача, величина коефіцієнта формоутворення поверхневого шару. Для зменшення макрошорсткості на наплив необхідно забезпечити рівномірність пластичних деформацій в зоні контакту і зменшити величину впровадження конічного ролика в оброблювану поверхню, застосуванням інструменту з каплевидним контактом.

Ключові слова: макрошорсткість поверхонь, циліндричні зубчасті колеса, параметри, зубообробка, кінематика переміщення фрези, накопчування, жорсткість технологічної системи.

Y. Timofeev, A. Shelkovoy, A. Klochko
**THE DEPENDENCE OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS
COARSE-GRAINED GEAR WHEELS FROM
MACRO ROUGHNESS OF THEIR SURFACES**

On the formation of macroroughness surfaces of cylindrical gears in gear manufacturing provide the initial state of the surface layer of the workpiece; accuracy stationing and clamping of the workpiece gear wheel and the cutter; the milling cutter geometry and kinematics of movement of the cutter and machined spur gears. When high-speed gear milling dispersion of the initial state of the surface layer leads to dynamic changes in the radial forces and, consequently, and involuntary oscillation of the cutter relative to the processed surface of the workpiece. Analysis of the findings shows that the main influence on the undulations at high-speed gear milling and rolling provide the rigidity of the technological system, speed, flow, the value of the coefficient of formation of the surface layer. To reduce macroroughness during forming is necessary to ensure the uniformity of the plastic deformations in the contact zone and reduce the amount of introduction of the tapered roller to the treated surface, the application of the tool with drop-shaped contact.

Keywords: the macroroughness of surfaces, bevel gears, settings, gear manufacturing, the kinematics of the movement of the cutters, rolling, stiffness technological systems

Введение. Основными причинами возникновения макрошероховатости являются динамические процессы, протекающие при зубообработке цилиндрических зубчатых колес на зубообрабатывающих станках и вызывающие появление автоколебаний, вынужденных колебаний технологической системы [1,2]. Эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес в значительной мере зависят от макрошероховатости их поверхностей.

В общем случае на образование макрошероховатости поверхностей цилиндрических

зубчатых колес при зубообработке оказывают влияние следующие факторы: исходное состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки; точность базирования и закрепления заготовки зубчатого колеса и фрезы; геометрия фрезы и кинематика перемещения фрезы и обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса.

Основная часть. В зависимости от методов и режимов зубообработки степень влияния перечисленных факторов на образование волнистости будет различной. Таким образом, средняя высота волнистости, образуемой на эвольвентной поверхности цилиндрического зубчатого колеса при зубообработке, складывается из всех перечисленных составляющих в соответствии с правилами суммирования случайных величин:

$$W_z = 1,2\sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2}. \quad (1)$$

Составляющая высоты волнистости H_1 , обусловленная исходным состоянием поверхностного слоя обрабатываемой заготовки при встречном зубофрезеровании, исходя из разности сил, действующих на инструмент, вызываемой разнородностью состояния поверхностного слоя заготовки и динамикой процесса, как и для шероховатости, может быть определена по формуле:

$$H_1 = \frac{c_y S^y \rho v^2 P [HB_{\max}^n t^x p - HB_{\min}^n (t - W_{2\text{исх}} - R_2 \text{исх})^x p_0]}{HB_{\text{ср}}^n j_{\text{сп}} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T h^2 \lambda^2}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{исх}}$ – исходная высота волн.

При скоростном зубофрезеровании дисперсия исходного состояния поверхностного слоя приводит к динамическому изменению радиальной силы, а следовательно, и к вынужденным колебаниям фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки.

При зубообработке колебания фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки представляют собой сложение радиальных, осевых и касательных перемещений (рис. 1). Колебания фрезы могут быть представлены в виде системы с тремя степенями свободы. [3, 4]

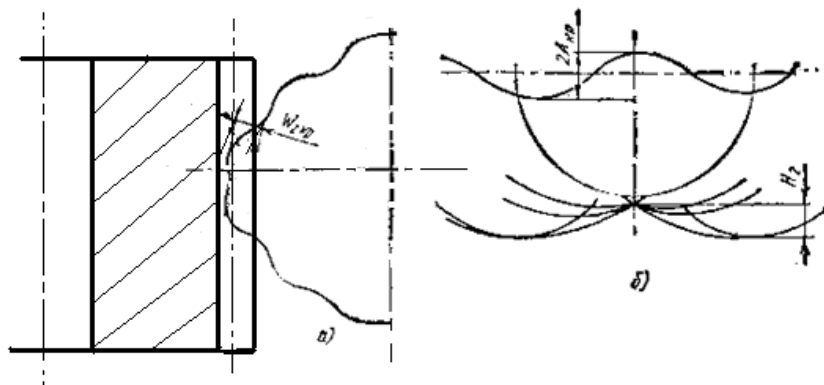


Рис.1. Исходная схема для расчета составляющей H_2 при скоростном зубофрезеровании от вынужденных колебаний фрезы (а) и от автоколебаний фрезы (б)

Причем на высоту образующихся волн первостепенное влияние будут оказывать колебания вдоль осей y и z . Составляющая H_2 , обусловленная этими колебаниями:

$$H_2 = 2C_0 \left\{ 1 + \cos \left[(n-1) \frac{180}{n} \right] \right\}, \quad (3)$$

где C_0 – амплитуда главного колебания вдоль оси y , определяемая из равенства

$$C_0 = H_1/2. \quad (4)$$

При скоростном зубофрезеровании радиальное биение фрезы вызывают колебание радиальной силы, приводящей к вынужденным колебаниям оси фрезы (рис. 1). Составляющая от этих колебаний:

$$H_2 = A_{\text{фр}} \left\{ 1 - \cos \left[13,2 \frac{vD}{\tau_n} \sqrt{\frac{1}{A_{\text{кр}}}} \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{d} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где $A_{\text{фр}}$ – амплитуда биения оси фрезы; f_n – частота биения.

Изменение радиальной силы резания при скоростном зубофрезеровании приводит к неравномерному износу фрезы и появлению волнистости на обрабатываемой поверхности профиля зубчатого колеса.

При ППД обработке составляющая волнистости H_2 от биения рабочей поверхности ролика и ее волнистости может быть описана через изменение рабочего усилия ΔP :

$$H_2 = R_p \text{ и ск} \left\{ \frac{150 \Delta P K_{\Phi_0} (1+f^2)^{0,5}}{\pi R t_{\text{и ск}} \sigma_T \left[\frac{180 - \arccos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{a_{\text{пл}}} (h_{\text{киц}} - h_{\text{уп}}) - 2h_{\text{уп}} \right]} \right\}^{\frac{1}{V_{\text{и ск}}}} \quad (6)$$

Принимая распределение составляющих приращения усилия от волнистости и биения рабочего ролика по закону Гаусса., имеем

$$\Delta P = 1,2 j_{\text{ДТСС}} \sqrt{W_{z_p}^2 + \Delta_p^2}, \quad (7)$$

где Δ_p – биение поверхности ролика.

При скоростном зубофрезеровании форма инструмента и кинематика его перемещения влияют на волнистость через составляющие H_1 и H_2 .

Составляющая H_3 особенно ярко проявляется при прерывистом скоростном зубофрезеровании в виде так называемой кинематической волнистости, которая:

$$H_3 = \frac{D(1 - \cos \delta)}{2, \cos \delta}, \quad (8)$$

где

$$\delta = \frac{180 l_{\text{вн}} V D}{\pi V_{\text{кр}} D}, \quad (9)$$

$l_{\text{вн}}$ – окружной шаг скоростной фрезы.

При ППД обработке H_3 определяется толщиной слоя металла, приводящего к образованию наплыва в направлении движения деформирующего элемента, обусловленной кинематикой перемещения и геометрией инструмента [2, 4].

В процессе обработки перед рабочим роликом движется наплыв обрабатываемого материала. Высота наплыва постепенно увеличивается, приводя к увеличению площади контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью, а следовательно, к их упругому отжатию. При достижении критической величины наплыва ролик проскальзывает его, вызывая образование составляющей H_3 , и под действием радиальной силы занимает свое исходное положение. Затем этот процесс повторяется. Величина образующейся волнистости при этом может быть рассчитана по формуле

$$H_3 = h_{\text{киц}} - r \left[1 - \frac{f P_x + P_y}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)(1+f^2)}} \right], \quad (10)$$

где P_x – осевая сила, действующая на ролик.

Подставляя (2) и (3) в (1) и произведя математические преобразования, получим уравнение для определения средней высоты волн при зубофрезеровании:

$$W_z = \frac{1,2 c_y S^y p y \sqrt{p z} (HB_{\text{max}}^n \zeta^{py} - HB_{\text{min}}^n (t - W_2 \text{ и ск} - R_{\text{зи ск}})^{xpy})}{HB_{\text{ср сред}}^{nj} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h \lambda^2}} \times \sqrt{1 + \left\{1 + \cos \left[(n-1) \frac{180}{n} \right] \right\}^2} \quad (11)$$

Так как n на два порядка больше 1, (11) примет вид

$$W_z = \frac{1,2 c_y S^y p y \sqrt{p z} (HB_{\text{max}}^n t^{xpy} - HB_{\text{min}}^n (t - W_2 \text{ и ск} - R_{\text{зи ск}})^{xpy})}{HB_{\text{ср сред}}^{nj} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h \lambda^2}} \quad (12)$$

Высота сглаживания профиля волнистости при зубофрезеровании для нормального закона распределения определяется из равенства

$$W_p \approx 0,5W_z . \quad (13)$$

Аналогичным образом получено уравнение для расчета высоты волн при ППД обработке:

$$W_z = 1,2 \sqrt{\left\{ \frac{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]}{j_{спид} \pi B E_1 E_2} \times \ln \frac{2\pi E_1 E_2 (D+d) B}{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]} \times \ln \frac{2\pi E_1 E_2 (D+d) B}{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]} \right\}^2 + \left\{ A_{кр} \left[1 - \cos \left(13,2 \frac{v_D}{f_n} \sqrt{\frac{1}{A_{кр}}} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right) \right) \right] \right\}^2 + \left(6 c_{py} W_{z_{кр}}^{x_{py}} v^y D^{py} v_{кр}^{z_{py}} \sum k_1 \right)^2 - \left[\frac{D(1 - \cos \frac{180 | \Delta P_y v_D |}{\pi v_{кр} D})}{2 \cos \frac{180 | \Delta P_y v_D |}{\pi v_{кр} D}} \right]^2} . \quad (14)$$

Подставляя (10), (11) и (12) в (13), получим общее уравнение для расчета высоты волн при ППД обработке:

При $R_{рисх} = 3R_{аисх}$, $h_{кин} < \rho$ и $f = 0,1$ (11) примет вид

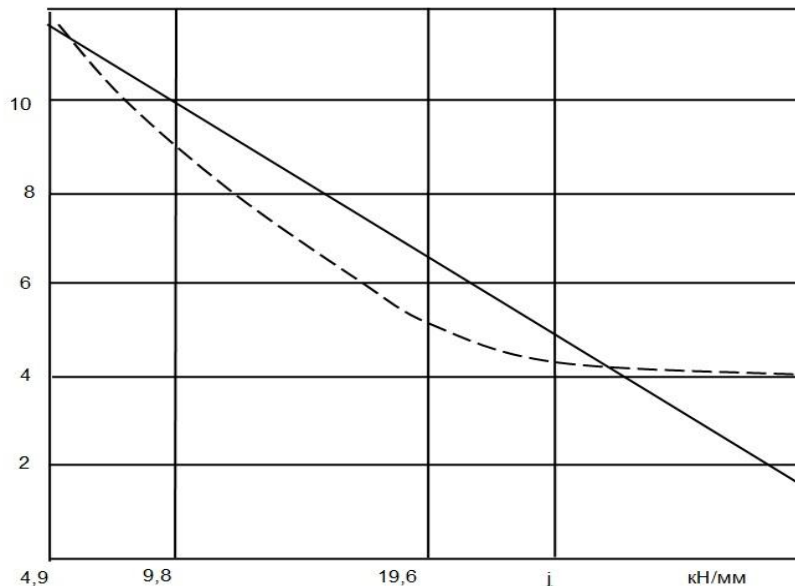
$$W_z = 1,2 \left\{ \left[W_{зисх} - \left(\frac{9 \rho R_{аисх}^2}{\pi R_{пр} H B} \right)^{1/3} \right] + \left[\frac{27 j_{дтсс} (W_{z_{кр}}^2 + \Delta P_y^2)^{0,5} R_{аисх}^2}{\pi r c' \sigma_T \frac{180 - \arccos \frac{2 - a_{пл}}{a_{пл}}}{a_{пл}} (h_{кин} - h_{уп}) - 2 h_{уп}} \right]^2 + h_{кин}^2 \right\}^{0,5} . \quad (15)$$

Высота сглаживания профиля волнистости при ППД определяется из равенства

$$W_p = 0,4W_z . \quad (16)$$

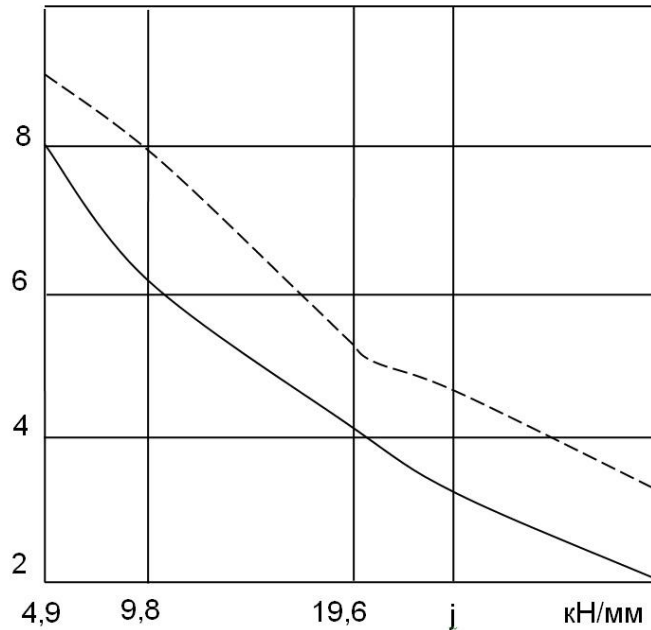
Экспериментальная проверка полученных теоретических уравнений была проведена при зубофрезеровании твердосплавными фрезами [5], при скоростном зубофрезеровании и накатывании коническими роликами (ППД) цилиндрических зубчатых колес модулем $m = 16$ мм из стали 40Х. Данные расчетов и экспериментальной проверки приведены на рисунках 2 – 4.

$W_z, \text{ мкм}$



($V = 2,5$ м/с, $t = 2,25t$ мм, $j_{дтсс} = 19,6$ кН/мм, $S_{мин} = 50,0$ мм/мин, $W_z = 16$ мкм, $R_{зисх} = 10$ мкм, сплошные линии – теория, штриховые – эксперимент)

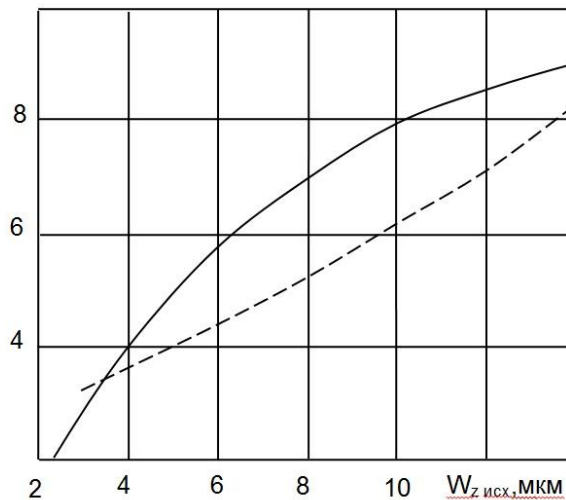
Рис. 2. Зависимость высоты волн W_z от жесткости динамической технологической станочной системы ($дтсс$) $j_{дтсс}$ при зубофрезеровании



(сплошныя лініі – теорія, штриховыя – эксперымент)

Рис. 3. Зависимость высоты волн W_z от жесткости динамической технологической станочной системы (ДТСС) $j_{ДТСС}$ при скоростном зубофрезеровании

$W_z, \text{мкм}$



(сплошныя лініі – теорія, штриховыя – эксперымент)

Рис. 4. Зависимость высоты волн W_z от ее исходной величины при накатывании

Анализ полученных результатов исследований показывает, что основное влияние на волнистость при скоростном зубофрезеровании и накатывании оказывают жесткость технологической системы, скорость, подача, величина коэффициента формообразования поверхностного слоя.

Выводы. При скоростном зубофрезеровании дисперсия исходного состояния поверхностного слоя приводит к динамическому изменению радиальной силы, а следовательно, и к вынужденным колебаниям фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки. Колебания фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки представляют собой сложение радиальных, осевых и касательных перемещений. Высота образующейся волнистости зависит от ее исходного значения; величины исходной шероховатости и физико-механических свойств обрабатываемого зубчатого колеса. Для уменьшения волнистости при накатывании необходимо обеспечить

равномерность пластических деформаций в зоне контакта и уменьшить величину внедрения конического ролика в обрабатываемую поверхность, применением инструмента с каплевидным контактом.

1. Предпосылки моделирования контактно-гидродинамической задачи высокоскоростных цилиндрических зубчатых передач тяжелых токарных станков / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, Т.В. Терещенко // Сборник научных трудов "Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2015: сборник научных трудов [Текст] / ЗАО «ОНИКС». – Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2015. – С. 120–131. (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN-978-5-906703-08-8.
2. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. – С-Пб. : Профессия, 2007. – 832 с.
3. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А.Клочко [и др.]; Науч. Ред.. А.А.Пермяков; ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с., ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.
4. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М. : Машиностроение, 2010. – 416 с.
5. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Сборник научных трудов "Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск: ДГМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2014. – С. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3

Стаття надійшла до редакції 12.10.2015.