

**КЛОЧКО А.А., БАБЕНКО М.В., ЮРЬЕВА М.В. СЮЙ ЦЮАНЬЯО, ФУ ХУН**

## **ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНИСТОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Построение информационной модели технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес является одним из этапов управления технологической структурой и параметрами автоматизации проектирования технологического процесса. С учетом принципов классификации информации автоматизируемый процесс зубообработки рассматривается как объект управления, состоящий из ряда технологических объектов: исходный материал (вход объекта управления); окружающая среда (условия протекания процесса); зубчатое колесо (выход объекта управления, количественная и качественная характеристика поверхностного слоя); модуль обработки с системой управления и технологической оснасткой (собственно объект управления). Задача оптимального управления зубообработкой формулируется как задача выбора формообразования, который обеспечивает максимальную производительность с обеспечением качественного поверхностного слоя закаленных зубчатых колес при заданной точности с учетом показателя себестоимости.

**Ключевые слова:** Информационная модель, технологический процесс, параметры, зубообработка, автоматизации проектирования, оптимальное управление, качество поверхностного слоя

**КЛОЧКО А.А., БАБЕНКО М.В., ЮРЬЕВА М.В., СЮЙ ЦЮАНЬЯО, ФУ ХУН**

## **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛЯСТОСТІ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС**

Побудова інформаційної моделі технологічних процесів зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс є одним з етапів управління технологічною структурою і параметрами автоматизації проектування технологічного процесу. З урахуванням принципів класифікації інформації автоматизується процес зубообробки розглядається як об'єкт управління, що складається з ряду технологічних об'єктів: вихідний матеріал (вхід об'єкта управління); навколишнє середовище (умови протікання процесу); зубчасте колесо (вихід об'єкта управління, кількісна та якісна характеристика поверхневого шару); модуль обробки з системою управління та технологічним оснащенням (власне об'єкт управління). Завдання оптимального управління зубообробки формулюється як задача вибору формоутворення, який забезпечує максимальну продуктивність із забезпеченням якісного поверхневого шару загартованих зубчастих коліс при заданій точності з урахуванням показника собівартості.

**Ключові слова:** Інформаційна модель, технологічний процес, параметри, зубообробки, автоматизації проектування, оптимальне управління, якість поверхневого шару.

**KLOCHKO A.A., BABENKO M.V., YURIEVA M.V., XU QUANIAO, FU HONG**

## **INFLUENCE OF WAVE PARAMETERS ON OPERATIONAL PROPERTIES OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS**

The construction of an information model of the technological processes of tooth treatment of hardened large-modular gears is one of the stages of controlling the technological structure and parameters of the automation of the design of the technological process. Taking into account the principles of information classification, the automated process of gear processing is considered as a control object, consisting of a number of technological objects: source material (input of the control object); environment (process conditions); gear wheel (control object output, quantitative and qualitative characteristics of the surface layer); processing module with a control system and technological equipment (the actual control object). The task of optimal control of tooth processing is formulated as the task of choosing a shaping that provides maximum performance while ensuring a high-quality surface layer of hardened gears with a given accuracy, taking into account the cost indicator.

**Keywords:** information model, technological process, parameters, gear processing, design automation, optimal control, surface layer quality

**1. Введение.** Эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес в значительной мере зависят от волнистости их поверхностей. Основными причинами возникновения волнистости являются динамические процессы, протекающие при зубообработке цилиндрических зубчатых колес на зубообрабатывающих станках и вызывающие появление автоколебаний, вынужденных колебаний системы ДТСС. В общем случае на образование волнистости 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.

**2. Основная часть.** Взаимосвязи от методов и режимов зубообработки степень влияния

перечисленных факторов на образование волнистости будет различной [1, 4, 16, 17]. 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:

$$H_1 = \frac{c_y S^y \rho v^2 P [HB_{max}^n t^{xp} - HB_{min}^n (t - W_{2\text{исх}} - R_{2\text{исх}})^{xp}]}{HB_{cp}^n j_{cp} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + Th^2 \lambda^2}}, \quad (2)$$

где  $W_{2\text{исх}}$  – исходная высота волн

© А.А. Клочко, М.В. Бабенко, М.В. Юрьева, Сюй Цюаньяо, Хун Фу, 2020

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 [2, 5, 14].

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 (поступательное движение вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ ).

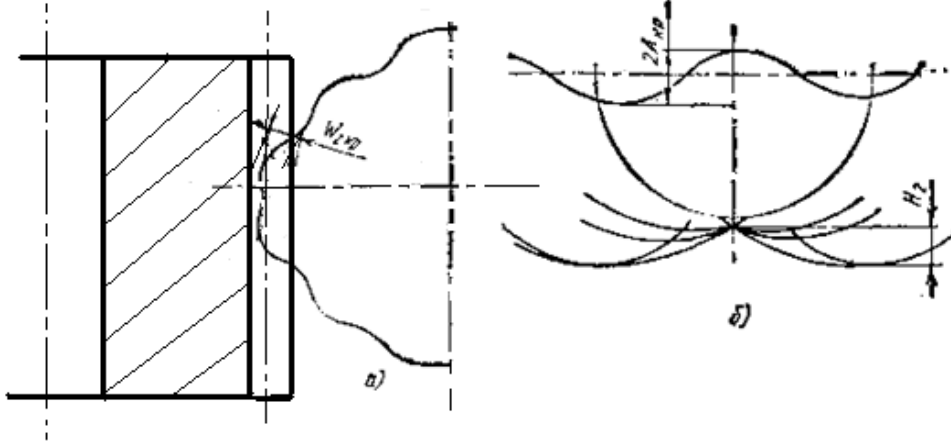


Рис. 1 – Исходная схема для расчета составляющей  $H_2$  при скоростном зубофрезеровании от вынужденных колебаний фрезы (а) и от автоколебаний фрезы (б)

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:

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

где  $A_{фр}$  – 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 [3, 6 10, 15].

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

$$H_2 = R_p \text{ исх} \left\{ \frac{150 \Delta P K_{\phi 0} (1+f^2)^{0,5}}{\pi R t_m \text{ исх} c' \sigma_T \left[ \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{пл}}{a_{пл}}}{a_{пл}} (h_{киц} - h_{уп}) - 2h_{уп} \right]} \right\}^{\frac{1}{v_{исх}}}, \quad (6)$$

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

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

где  $\Delta_p$  – 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:

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

$$\text{где } \delta = \frac{180 l_{вп} v_D}{\pi v_{кр} D}, \quad (9)$$

$l_{вп}$  – окружной шаг скоростной фрезы.

При ППД обработке  $H_3$  определяется толщиной слоя металла, приводящего к образованию напльва в направлении движения деформирующего элемента, обусловленной кинематикой перемещения и геометрией инструмента.

В процессе обработки перед рабочим роликом движется напльв обрабатываемого материала [7, 9, 13]. Высота напльва постепенно увеличивается, приводя к увеличению пл ельно, к их упругому отжатию. При достижении критической величины напльва ролик ошадя контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью, а следовательно 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

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

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 зубофрезеровани:

$$W_z = \frac{1,2c_y s^y p y^2 p z (H B_{max}^n \zeta^{p y} - H B_{min}^n (t - W_2_{исх} - R_{zисх})^{x p y})}{H B_{ср\снид}^{n_j} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h \lambda^2}} \times \sqrt{1 + \left\{ 1 + \cos \left[ (n - 1) \frac{180}{n} \right] \right\}^2}. \quad (11)$$

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

$$W_z = \frac{1,2c_y s^y p y^2 p y (H B_{max}^n t^{x p} - H B_{min}^n (t - W_2_{исх} - R_{zисх})^{x p})}{H B_{ср\снид}^{n_j} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h \lambda^2}}. \quad (12)$$

Высота сглаживания профиля волнистости при зубофрезеровании для нормального закона распределения определяется из равенства  $W_p \approx 0,5W_z$ . (13)

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

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

Подставляя (11), (12) и (13) в (14), получим общее уравнение для расчета высоты волн при ППД обработке: При  $R_{pисх} = 3R_{aисх}$ ,  $h_{киц} < \rho$  и  $f = 0,1$  (14) примет вид

$$W_z = 1,2 \left\{ \left[ W_{zисх} - \left( \frac{9\rho R a_{pисх}^2}{\pi R_{np} H B} \right)^{1/3} \right] + \left[ \frac{27 j_{дтсс} (W_{zп}^2 + \Delta \beta)^{0,5} R a_{pисх}^2}{\pi r c' \sigma_T \frac{a_{пл}}{a_{пл}} (h_{киц} - h_{уп}) - 2h_{уп}} \right]^2 + h_{киц}^2 \right\}^{0,5}. \quad (15)$$

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 [8, 11, 12], при скоростном зубофрезеровании и накатывании коническими роликами (ППД) цилиндрических зубчатых колес модулем  $m = 16$  мм из стали 40X на зубоизмерительной машине Mahr (Германия) MarGear GMX 275 (Рис. 2). Применение зубоизмерительной машине MarGear GMX 275 обеспечивает оптимальное качество контроля и представления результатов проверки параметров зубчатого венца, в т.ч. параметров волнистости. Получаемые результаты дают полную информацию о причинах возникновения

погрешностей и позволяют использовать эту информацию для соответствующей корректировки технологии изготовления детали. К недостаткам данного метода проверки следует отнести длительный цикл измерения и сложность в применении зубоизмерительной машины непосредственно около станка — являясь метрологическим средством очень высокой точности, машина требует установки в специально подготовленное помещение.

Принцип работы зубоизмерительной машины и традиционных приборов для контроля эвольвенты, направления зуба и шага зубьев во многом схож. В процессе измерения шуп измерительной машины

сканирует боковую поверхность зуба по профилю (рис. 3) и последовательно касается всех боковых сторон зубьев. В результате этих основных проверок определяется погрешность профиля, волнистость эвольвентной поверхности зубьев, отклонения шагов и погрешность радиального биения.

Получаемый результат аналогичен результату проверки на эвольвентомере. Если профиль зуба представляет собой правильную эвольвенту с заданными параметрами, то результатом измерения в графическом представлении будет прямая.

Проверка профиля и линии зуба проводится, как правило, на 3–4 зубьях. Это делается с целью сокращения времени измерения. При этом информативность такого неполного измерения вполне достаточна, так как выявляет все погрешности зубчатого венца, изготовленного методом обката.

На любом выбранном зубе может быть проведена проверка профиля и линии зуба в нескольких сечениях. В этом случае результатом измерения является топография поверхности зуба. Во многих случаях используется модификация поверхности зуба по профилю и направлению, имеющая целью оптимизацию технологии изготовления колес (например, модификация зуба при черновой обработке с целью компенсации деформаций при термической обработке) или улучшение параметров готового изделия (оптимизация пятна контакта в паре зубчатых колес). Возможность оценки топографии зуба дает возможность наглядно оценить модификацию поверхности зуба. Кроме того, при применении дополнительного программного обеспечения для зубоизмерительных машин существует возможность моделирования и оценки контакта измеренного зуба либо в зацеплении с идеальным колесом, либо в зацеплении с другим измеренным колесом.

Получаемые при измерении детали протоколы дают широкие возможности для оценки причин возникновения погрешностей. Для этого существуют определенные методики.



Рис. 2 – Зубоизмерительная машина Mahr (Германия) MarGear GMX 275 для контроля отклонения высоты волн  $W_z$  эвольвентной поверхности зубьев от жесткости динамической технологической станочной системы

Например, при получении диаграммы профиля, можно определить пять основных причин возникновения погрешности:

- биение фрезы на оправке (может быть вызвано плохой фрезой, поврежденной оправкой или загрязнением оправки при монтаже);
- неправильная заточка фрезы (фреза была переточена с радиальным биением из-за установки с перекосом на оправку или оправки на заточной станок);
- слабо закрепленная или изношенная оправка в противоопоре станка;
- слишком большой люфт шпинделя фрезы фрезерного станка;
- слишком большой люфт стола фрезерного станка.

Эти зубоизмерительные машины обладают уникальной встроенной системой термокомпенсации, что обеспечивает точность измерения даже при колебаниях температуры в помещении. Например, при колебании температуры в помещении на 8 градусов разброс результатов измерения составляет всего 0,6 микрона. Конструктивно зубоизмерительные машины Mahr сделаны на базе кругломеров высокой точности, при этом все функции кругломера сохранены в базовом программном обеспечении. На практике это означает, что, приобретая одну машину Mahr, заказчик фактически приобретает два метрологических средства — зубоизмерительную машину и кругломер. Важнейшим элементом машины является сканирующая головка. Головка машины Mahr представляет собой миниатюрную копию трехкоординатной измерительной машины и обеспечивает измерение с постоянным измерительным усилием всегда по нормали к измеряемой поверхности.



Рис. 3 – Сканирование волнистости боковой поверхности зуба по профилю на зубоизмерительной машине MarGear GMX 275

При наличии дополнительного программного обеспечения можно реализовать дополнительные функции измерения цилиндрических колес: сравнение параметров колес до и после термической обработки (результат представляется в графическом виде, что позволяет легко и быстро определить деформации

детали при термической обработке); измерение «колес» с определением их основных параметров (для тех случаев, когда имеется колесо, у которого можно только измерить наружный диаметр и сосчитать число зубьев неизвестных, с определением остальных конструктивных размеров); измерять колеса после операции зубофрезерования с исключением влияния следа от подачи; измерять форму и размеры тел вращения (т. е. деталей с зубчатыми венцами), т. е. использовать зубоизмерительную машину как кругломер и координатно-измерительную машину.

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

**Выводы.** Как и для шероховатости, явление технологической наследственности особенно ярко проявляется при ППД: 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. Это достигается применением инструмента с каплевидным контактом.

#### Список литературы:

1. Ямпольский, Л.С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – К.: Техника, 1988. – 175 с.
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. Ключко [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. Анділахай О.О., Ключко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Старченко Є.П. Технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шліцевих з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту: Машинобудування і зварювальне виробництво / Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць. – Мариуполь: ДВУЗ «ПДТУ», 2019. – Вип. 19. – С.50–63.
6. Пермяков А.А., Ключко А.А., Набока Е.В., Перминов Е.В., Новиков Ф.В. Технологические предпосылки снижения динамических нагрузок и шума за счёт создания и прогнозирования априорных передаточных чисел с формированием оптимального поверхностного слоя зубчатых передач // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-практической конференции. 16–18 мая 2019, г. Харьков. – Одеса.: ОНПУ, 2019. – С. 134–138.
7. Новиков Ф. В., Ключко А. А., Камчатная-Степанова Е. В., Старченко Е. П. Анализ перспективных технологических схем зубофрезерования крупномодульных шевронных закаленных колес // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-практической конференции. 16–18 мая 2019, г. Харьков. – Одеса.: ОНПУ, 2019. – С. 124–129.
8. Беловол А.В., Гасанов М.І., Ключко О.О., Набока О.В., Скоркин А.О., Шелковой О.М. Імітаційне моделювання в задачах машинобудівного виробництва: навч. пос. / за ред. О.М.Шелкового. □ Харків: НТУ «ХПІ», 2019. □ 500 с. ISBN 978-617-05-0284-1.
9. Ковалев В.Д., Клименко С.А., Антонюк В.С., Васильченко Я.В., Ключко А.А., Рябченко С.В., Волошин О.І., Статкевич О.В., Иванов С.О. Створення та впровадження інноваційних технологій виготовлення крупногабаритних редукторів важкого машинобудування. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 5 – 6. ISBN 978-966-379-853-0.
10. Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Старченко О.П., Камчатна-Степанова К.В., Анциферова О.О. Підвищення точності, якості та продуктивності обробки крупногабаритних евольвентних шліцевих поверхонь. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 36 – 37. ISBN 978-966-379-853-0.
11. Ключко О. О.; Иванченко В. В. Мехатронне пристосування для обробки зубчастих коліс методом обкочування на універсальних фрезерних верстатах. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 52. ISBN 978-966-379-853-0.
12. Guo, S Mao, Y. Yang, Y. Kuang, Optimization of cutter blade profile for face-hobbed spiral bevel gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 85 (2016) 209–216.
13. G. Li, Z. Wang, A. Kubo, K. Yuan, Z. Geng, Error-sensitivity analysis of ease-off based for spiral bevel gears using a semi-analytical loaded contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 230 (7) (2016) 147–161.
14. M. Wasif, Z.C. Chen, S.M. Hasan, Determination of cutter-head geometry for the face-milling of hypoid gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 86 (9) (2016) 3081–3090.
15. P. Wang, Y. Zhang, M. Wan, Global synthesis for face milled spiral bevel gears with zero transmission errors, ASME J. Mech. Des. 138 (2016) 1–9 Art. no. 033302.
16. N. Park, A generalized hypoid gear synthesized with common crown rack positioned between pinion and gear blanks, J. Mech. Des. 139 (2017) 085001–1–9.
17. M. Kolivand, G.K Steyer, M.F. Stroh, A study on hypoid gears NVH robustness, SAE Int. J. Veh. Dyn. Stab. NVH 1 (2) (2017) 417–427.

#### References (transliterated)

18. Yampol'skij, L.S. Optimizaciya tekhnologicheskikh processov v gibkikh proizvodstvenny`kh sistemakh / L. S. Yampol'skij, M. N. Polishhuk. – K.:Tehnika, 1988. – 175 s.
19. Tekhnologiya proizvodstva i metody` obespecheniya kachestva zubchaty`kh koles i peredach / Pod obshh. red. V. E. Starzhinskogo, M. M Kane. – S-Pb.: Professiya, 2007. – 832 s.
20. Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodu`ny`kh zakalenny`kh zubchaty`kh koles [Tekst] / N.V. Kravczov, Yu.V. Timofeev, A.A.Klochko [i dr.]; Nauch. Red.. A.A.Permiyakov;

- VolGTU – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 254 s., il., tabl.; - (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev), ISBN 978-59903090-6-7.
21. Kane M.M. Upravlenie kachestvom produkcii mashinostroeniya / M. M. Kane, A. G. Suslov, O. A. Gorlenko i dr. pod obshh. red. d.t.n. M. M. Kane. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 416 s.
  22. Andri'khaj O.O., Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Starchenko Ye.P. Tekhnologični zasobi obrobki krupnogabaritnikh evol'ventnikh shli'cz'ovikh z'yednan' z modifi'kaczi' yej zubori' znogo instrumentu: Mashinobuduvannya i zvyruval'ne virobnicztvo / Nauka ta virobnicztvo : mi'zhvuzi'vs'kij tematičnij zb'irnik naukovikh prac'. – Mariupol' : DVUZ «PDTU», 2019. – Vip. 19. – S.50–63.
  23. Permyakov A.A., Klochko A.A., Naboka E.V., Perminov E.V., Novikov F.V. Tekhnologicheskie predposylki snizheniya dinamičeskikh nagruzok i shuma za schyot sozdaniya i prognozirovaniya apriorny'kh peredatočny'kh chisel s formirovaniem optimal'nogo poverkhnostnogo sloya zubchaty'kh peredach // Novy'e i netradicijonny'e tekhnologii v resurso - i e'nergobereženii: Materialy' mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferenczii. 16–18 maya 2019, g.Khar'kov. – Odesa.: ONPU, 2019. – S. 134–138.
  24. Novikov F. V., Klochko A. A., Kamchatnaya-Stepanova E. V., Starchenko E. P. Analiz perspektivny'kh tekhnologicheskikh skhem zubofrezerovaniya krupnomodul'ny'kh shevronny'kh zakalenny'kh koles // Novy'e i netradicijonny'e tekhnologii v resurso - i e'nergobereženii: Materialy' mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferenczii. 16–18 maya 2019, g.Khar'kov. – Odesa.: ONPU, 2019. – S. 124–129.
  25. Belovol A.V., Gasaov M.G., Klochko O.O., Naboka O.V., Skorkin A.O., Shelkovej O.M. Gimi'taczi'jne modelyuvannya v zadachakh mashinobudi'vnogo virobnicztva: navch. pos. / za red. O.M.Shelkovogo. □ Kharki'v: NTU «KhPI», 2019. □ 500 s. ISBN 978-617-05-0284-1.
  26. Kovalev V.D., Klimenko S.A., Antonyuk V.S., Vasil'chenko Ya.V., Klochko A.A., Ryabchenko S.V., Voloshin O.G., Statkevich O.V., G'vanov S.O. Stvorennya ta vprovadzhennya i'nnovaczi'jnikh tekhnologij' vigotovlennya krupnogabaritnikh reduktori'v vazhkogo mashinobuduvannya. Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi 04 – 07 lipnya 2019 roku / Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 5 – 6. ISBN 978-966-379-853-0.
  27. Zakovorotnij O.Yu., Klochko O.O., Starchenko O.P., Kamchatna-Stepanova K.V. Anciferova O.O. Pi'dvishhennya točnosti', yakosti' ta produktivnosti' obrobki krupnogabaritnikh evol'ventnikh shli'cz'ovikh poverkhon'. Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi 04 – 07 lipnya 2019 roku / Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 36 – 37. ISBN 978-966-379-853-0.
  28. Klochko O. O.; G'vanchenko V. V. Mekhatronne pristosuвання dlya obrobki zubchastikh koli's metodom obkochuvannya na uni'versal'nikh frezernikh verstatakh. Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi 04 – 07 lipnya 2019 roku / Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 52. ISBN 978-966-379-853-0.
  29. Guo, S Mao, Y. Yang, Y. Kuang, Optimization of cutter blade profile for face-hobbed spiral bevel gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 85 (2016) 209–216.
  30. G. Li, Z. Wang, A. Kubo, K. Yuan, Z. Geng, Error-sensitivity analysis of ease-off based for spiral bevel gears using a semi-analytical loaded contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 230 (7) (2016) 147–161.
  31. M. Wasif, Z.C. Chen, S.M. Hasan, Determination of cutter-head geometry for the face-milling of hypoid gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 86 (9) (2016) 3081–3090.
  32. P. Wang, Y. Zhang, M. Wan, Global synthesis for face milled spiral bevel gears with zero transmission errors, ASME J. Mech. Des. 138 (2016) 1–9 Art. no. 033302.
  33. N. Park, A generalized hypoid gear synthesized with common crown rack positioned between pinion and gear blanks, J. Mech. Des. 139 (2017) 085001–1–9.
  34. M. Kolivand, G.K Steyer, M.F. Stroh, A study on hypoid gears NVH robustness, SAE Int. J. Veh. Dyn. Stab. NVH 1 (2) (2017) 417–427

. Поступила (received) 10.05.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Klochko Alexander Alexandrovich)** – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

**Бабенко Максим Віталійович (Бабенко Максим Витальевич, Babenko Maxim Vitalievich)** – студент, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (066)762-41-70; e-mail: babenko29052000@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3981-6408

**Юр'єва Марія Віталіївна (Юрьева Мария Витальевна, Yuryeva Maria Vitalievna)** – студентка, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (066)052-65-61; e-mail: maureva16@gmail.com.

**Сюй Цюаньяо (Сюй Цюаньяо, Хи Quaniao)** – ведучий спеціаліст Харбинської зони високотехнологічного промислового розвитку, науково-технічних інновацій і підприємництва м. Харбін; тел.: +86 18246070961; e-mail: huayuedongfang\_fh@163.com

**Фу Хун (Фу Хун, Фу Hong)** – ведучий спеціаліст Харбинської зони високотехнологічного промислового розвитку, науково-технічних інновацій і підприємництва м. Харбін; тел.: +86 18246070961; e-mail: huayuedongfang\_fh@163.com