

ГАСАНОВ М.И., ВОЛОШИН А.И., КЛОЧКО А.А., БАБЕНКО М.В.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОССТАНОВЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИХ СОСТОЯНИЯ

Предложена двухступенчатая схема технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес на основе разделении задач технолога и конструктора с регламентацией комплексных параметров на каждой из этих стадий и последующим решением задачи выбора оптимального значения эксплуатационных свойств. Предложена структура модели, на базе которой осуществляется выбор метода и режимов обработки поверхности восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес при обеспечении нескольких эксплуатационных свойств, с сохранением традиционных подходов к регламентации поверхности и включает в себя основные этапы определения структуры эксплуатационных свойств, которые предъявляются к восстановленным закаленным крупномодульным зубчатым колесам и установления численных и граничных значений, выбора комплексных параметров рабочих эвольвентных поверхностей, их теоретическое обоснование, расчет режимов и выбор оптимальной технологии восстановления зубчатых колес.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, восстановление, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, двухступенчатая схема, технологическое воздействие

ГАСАНОВ М.І., ВОЛОШИН О.І., КЛОЧКО О.О., БАБЕНКО М.В.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДНОВЛЕНИХ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ПАРАМЕТРІВ ЇХ СТАНУ

Запропоновано двоступенева схема технологічного впливу на забезпечення експлуатаційних властивостей відновлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі поділі завдань технолога і конструктора з регламентацією комплексних параметрів на кожній з цих стадій і подальшим вирішенням завдання вибору оптимального значення експлуатаційних властивостей. Запропоновано структуру моделі, на базі якої здійснюється вибір методу і режимів обробки поверхні відновлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс при забезпеченні декількох експлуатаційних властивостей, зі збереженням традиційних підходів до регламентації поверхні і включає в себе основні етапи визначення структури експлуатаційних властивостей, які пред'являються до відновлених загартованих крупномодульних зубчастими колесам і встановлення чисельних і граничних значень, вибору комплексних параметрів робочих вольвентних поверхонь, їх теоретичне обґрунтування, розрахунок режимів і вибір оптимальної технології відновлення зубчастих коліс.

Ключові слова: експлуатаційні властивості, відновлення, загартовані крупномодульні зубчасті колеса, двоступенева схема, технологічний вплив

HASANOV M.I., VOLOSHIN A.I., KLOCHKO A.A., BABENKO M.V.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL IMPACT ON ENSURING OPERATIONAL PROPERTIES OF RESTORED LARGE-MODULAR GEAR WHEELS ON THE BASIS OF APPLICATION OF INTEGRATED PARAMETERS OF THEIR CONDITION

A two-stage scheme of technological impact on ensuring the operational properties of restored quenched large-modular gears is proposed based on the separation of the tasks of the technologist and designer with the regulation of complex parameters at each of these stages and the subsequent solution of the problem of choosing the optimal value of operational properties. The structure of the model is proposed, on the basis of which the method and surface treatment modes of restored hardened large-modular gears are selected while providing several operational properties, while maintaining traditional approaches to surface regulation and includes the main stages of determining the structure of operational properties that are presented to restored hardened large-modular gears wheels and the establishment of numerical and boundary values, the choice of complex working parameters volventnyh surfaces, their theoretical basis, the calculation mode and selection of the optimal recovery technology gears.

Keywords: operational properties, reconditioned, hardened large-modular gears, two-stage scheme, technological impact

1.Введение. Рассмотрен один из методов решения задачи многокритериальной оптимизации технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей в машиностроении. Приведена система комплексных параметров, обоснование их выбора, элементы функционально-стоимостного анализа при обеспечении эксплуатационных свойств поверхности восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес и вероятностной оценки методов ее зубообработки.

2.Основная часть. В настоящее время качество поверхности регламентируется параметрами в соответствии с ГОСТ 2.308-79 и 2789-73. В тоже время, как показывают научные исследования [1, 6, 8,11], технологическое обеспечение наиболее

эффективно осуществлять с помощью комплексных параметров состояния поверхности. Их выбор, обеспечение при изготовлении, раскрывает новые резервы снижения себестоимости и повышения качества зубчатых колес.

Двухступенчатая схема технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств (эксплуатационных свойств) основывается на разделении задач технолога и конструктора с регламентацией комплексных параметров на каждой из этих стадий. А затем с последующим решением задачи выбора оптимального значения эксплуатационных свойств.

Предложена структура модели, на базе которой осуществляется выбор метода и режимов обработки поверхности восстановленных закаленных

крупномодульных зубчатых колес при обеспечении нескольких эксплуатационных свойств, с сохранением традиционных подходов к регламентации поверхности. Она включает в себя следующие этапы:

1. Определение структуры эксплуатационных свойств, которые предъявляются к закаленным крупномодульным зубчатым колесам и установления формальных численных и граничных значений;
2. Выбор комплексных параметров рабочих эвольвентных поверхностей, их теоретическое обоснование, расчет их численных значений на стадии конструкторской или технологической разработки и их регламентация;
3. Назначение возможных методов обеспечения комплексных параметров на стадии выбора технологического метода зубообработки;
4. Функционально-стоимостной анализ (ФСА) методов обработки с позиции совместного обеспечения необходимых значений эксплуатационных свойств;
5. Расчет режимов и выбор оптимальной технологии зубообработки.
6. Прогнозирование гарантии качества

характеристик поверхностей и как следствие восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес при выборе данного технологического обеспечения.

При конструировании важной задачей является установление эксплуатационных свойств предъявляемых к закаленным крупномодульным зубчатым колесам. В работе [1, 2, 3] отмечено, что нужно установить лимитирующие эксплуатационных свойств, которые определяют надежность и точность зубчатых колес. Эти и другие вопросы рассматриваются при решении задачи в блоках 1 – 4 (рис. 1), при этом следует обратить внимание на их численные значения и рациональность назначения.

На этапе конструкторской подготовки производства выбор комплексных параметров, характеризующих эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес можно производить, используя табл. 1.

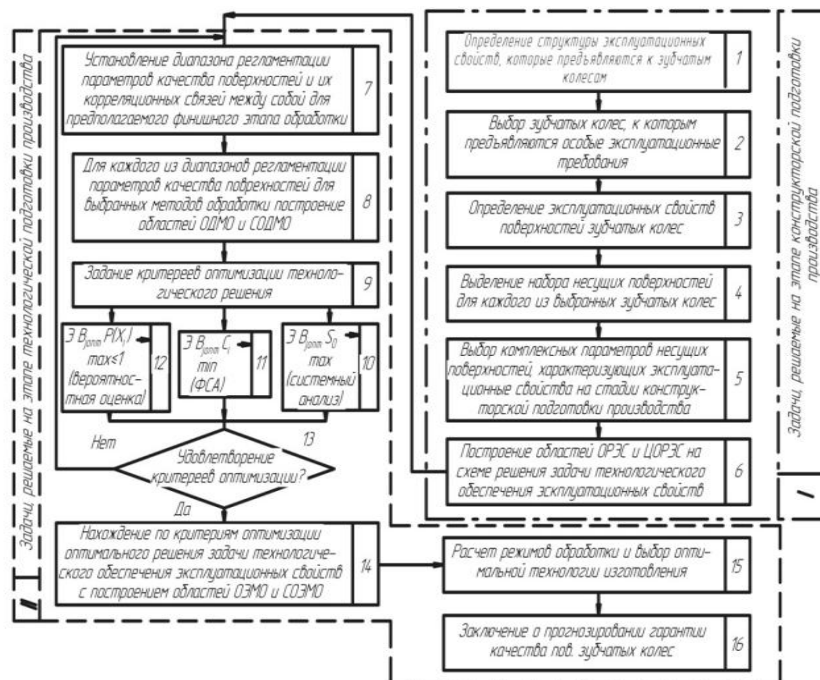


Рис. 1 – Структура моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес

В табл. 1, H_p – высота сглаживания макроотклонения; W_p – высота сглаживания профиля волнистости; R_p – расстояние от линии выступов до средней линии; S_m – средний шаг неровностей; K^1 – коэффициент упрочнения поверхностного слоя; H_{max} – максимальная высота макроотклонения; t_m – относительная опорная площадь неровностей на уровне средней линии; σ_T – предел текучести; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; $J_{пл}$ – деформационная составляющая; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных

напряжений на число циклов нагружения; χ – коэффициент; P – удельное давление на поверхность; γ – безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения σ_T/σ_B ; $\sigma_{1д}$ – предел выносливости детали; σ_{-1} – предел выносливости не упрочненного образца; C – коэффициент жесткости; f – коэффициент трения; M , d и l – параметры соединения: крутящий момент, приложенный к сопряжению, диаметр и длина сопряжения соответственно.

Таблица 1 – Комплексные параметры (КП), применяемые при технологическом обеспечении эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес в период нормального износа

Наименование поверхности	КП	Технологическое значение параметров	Расчетно-конструкторское значение параметров
Работающие в условиях выкрашивания активных поверхностей	C_x	$\frac{H_p \cdot W_p \cdot (R_p)^4}{(S_m)^6 \cdot (K^1)^{12}}$	$3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot J_{II} \cdot \lambda}{\chi \cdot P} \right)^6$
Работающие в условиях отслаивания поверхностных слоев зубьев	Π	$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^1)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$	$\left[\frac{\sigma_T \cdot J_{III}^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}$
Работающие в условиях поломки зубьев	H	$\frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{\max}}$	$\frac{P}{A \cdot \sigma_T}$
Работающие в условиях абразивного износа зубьев	$И$	$\frac{R_a}{S_m \cdot K^1}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}$
Работающие в условиях пластических деформаций зубьев	$\mathcal{D}$	$\frac{K^1 \cdot S_{mw}^{0.4} \cdot R_a}{W_a^{0.2} \cdot S_m \cdot t_m}$	$\frac{\gamma^{0.2}}{13.5} \cdot \left[\frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} - 1 \right]$
Работающие в условиях заедание	C_M	$R_p + W_p + H_p$	$\Delta - 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{\pi d l f} \cdot \frac{C}{E}$

На этом этапе комплексный параметр принимается равным значению параметра в период нормального износа. Данная задача решается в блоке 5 (рис. 1).

Построение области регламентируемых значений эксплуатационных свойств можно проводить с использованием прикладной математики [2, 4, 5, 16]. При обеспечении нескольких эксплуатационных свойств нужно построить для каждого из них свою область эксплуатационных свойств и пересечением этих областей друг с другом определить целесообразную область регламентируемых значений эксплуатационных свойств. Эта область будет включать все эксплуатационных свойств, достижение которых, поставил конструктор перед технологом. По сути дела, это выходная информация конструктора, необходимая технологу, как исходные данные для технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес (блок 6, рис. 1).

Для решения задачи оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств необходимо определить параметры области эксплуатационных свойств:

$$S_{P\Sigma ij} = (X_{iP\Sigma ij \max} - X_{iP\Sigma ij \min}) \cdot (Y_{jP\Sigma ij \max} - Y_{jP\Sigma ij \min}) \quad (1)$$

$$S_{Pij} = (X_{iPij \max} - X_{iPij \min}) \cdot (Y_{jPij \max} - Y_{jPij \min}) \quad (2)$$

где, $X_{iP\Sigma ij \max}$, $X_{iP\Sigma ij \min}$ - минимальные и максимальные значения параметров качества поверхности, являющихся ограничительными функциями области $P_{\Sigma ij}$; $Y_{jP\Sigma ij \max}$, $Y_{jP\Sigma ij \min}$ - минимальные и максимальные значения комплексных параметров состояния поверхности, отражающих ее эксплуатационные свойства;

Задачей технолога, на первом этапе, является предварительное установление финишного этапа

зубообработки поверхностей при помощи графовой модели технологического процесса, с использованием вместо среднего арифметического отклонения профиля R_a и качества точности IT , комплексного параметра и качества точности IT .

Также, его задачей является установление диапазона регламентации качества поверхностей на окончательном этапе зубообработки и выявление корреляционных связей между этими параметрами. Все эти задачи решаются в блоке 7 (рис. 1).

$$R_a = f(R_z); R_{\max} = \varphi(R_z); t_m = \psi(S_m); t_{mw} = \xi(S_{mw}); W_p = \chi(W_z); \quad (3)$$

$$W_z = F(S_{mw}); W_z = \zeta(W_{\max}); H_p = r(H_{\max}); \sigma = g(h_\sigma) \quad (4)$$

где, $f, \varphi, \psi, \xi, \chi, F, \zeta, r, g$ - функции корреляции параметров поверхностного слоя, σ - величина остаточных напряжений на поверхности, h_σ - глубина залегания остаточных напряжений поверхности, остальные параметры (табл. 1).

Далее следует построить схему системной оптимизации (блок 8, рис. 1) технологического обеспечения эксплуатационных свойств (рис. 2) с определением площадей областей эксплуатационных свойств, области достижимых значений эксплуатационных свойств метода обработки (ОДМО), совместной области ОДМО (СОДМО), области эффективных значений метода обработки (ОЭМО), совместной области ОЭМО (СОЭМО). На рис. 3 показана схема задачи функционально-стоимостного анализа (ФСА) и методов обработки с позиции совместного обеспечения необходимых значений эксплуатационных свойств

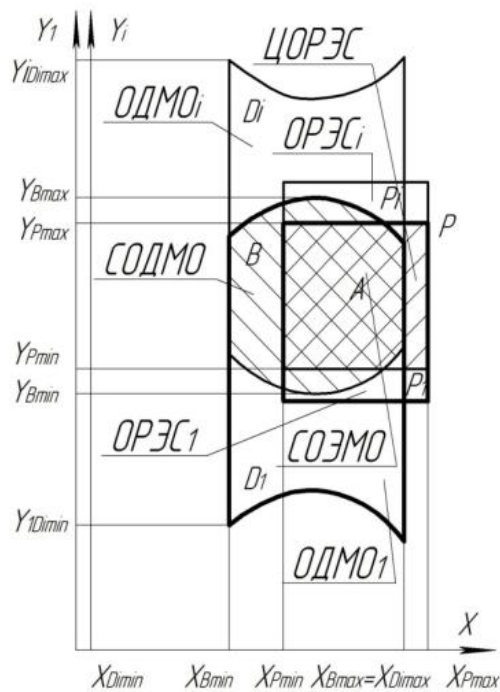


Рис. 2 – Схема системной оптимизации обеспечения нескольких эксплуатационных свойств

где, ψ - количество пересеченных множеств; X_i - значения i -го параметра, значения которого регламентируются и откладываются на оси абсцисс (параметр качества поверхности); K_{ij} - коэффициент, отражающий влияние не рассматриваемых j комплексных параметров при i регламентируемом параметре качества поверхности [2, 7, 9, 10]. $f_{HD\Sigma ij}(X_i)$, $f_{BD\Sigma ij}(X_i)$ - приведенная к j показателю функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $D_{\Sigma ij}$; $f_{HA\Sigma ij}(X_i)$, $f_{BA\Sigma ij}(X_i)$ - приведенная функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $A_{\Sigma ij}$ по регламентируемому параметру; $K_{BD\Sigma ij}$, $K_{HD\Sigma ij}$ - приведенные значения коэффициентов отражающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $D_{\Sigma ij}$; $K_{BA\Sigma ij}$, $K_{HA\Sigma ij}$ - приведенные значения коэффициентов, учитывающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $A_{\Sigma ij}$; e - количество образованных множеств СОДМО; t - количество образованных множеств СОЭМО.

Для оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств, при регламентации одновременно двух параметров качества поверхности, учитываются корреляционные связи между ними (3) и (4). Эту задачу стоит решать не в двумерной системе координат, а используя пространственное моделирование. В качестве примера выбрано обеспечение эксплуатационных свойств с использованием комплексного параметра для поверхностей, работающих в условиях линейного износа (табл. 1). Графически область ОДМО можно построить при помощи математического пакета MathCAD (рис. 4 и рис. 5) [1, 2, 8, 9, 11].

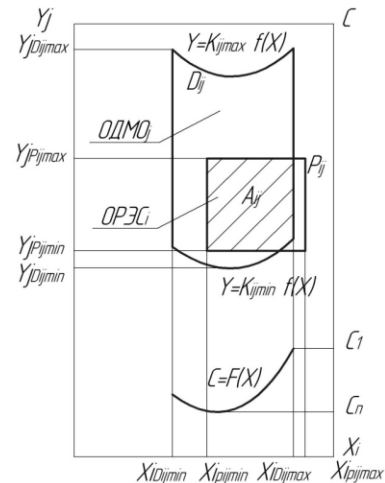


Рис. 3 – Схема задачи ФСА

$$S_{Dij} = (K_{ij \max} - K_{ij \min}) \cdot \int_{X_{ij \min}}^{X_{ij \max}} f(X_i) dX_i \quad (5)$$

$$S_{D\Sigma ij} = \sum_{\psi=1}^e [K_{BD\Sigma ij} \cdot f_{BD\Sigma ij}(X_i) - K_{HD\Sigma ij} \cdot f_{HD\Sigma ij}(X_i)] \quad (6)$$

$$S_{A\Sigma ij} = \sum_{\psi=1}^t [K_{BA\Sigma ij} \cdot f_{BA\Sigma ij}(X_i) - K_{HA\Sigma ij} \cdot f_{HA\Sigma ij}(X_i)] \quad (7)$$

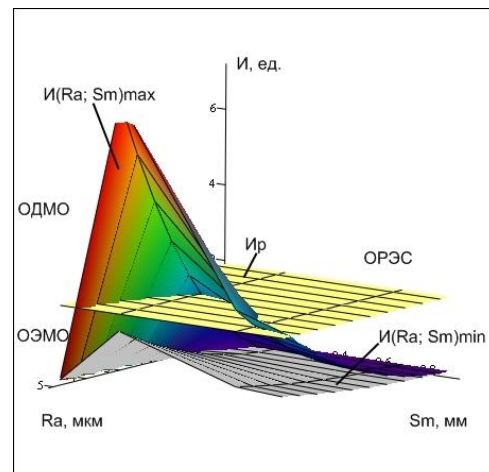


Рис. 4 – Область ОДМО для зубообработки червячной модульной фрезой при регламентации S_m и R_a

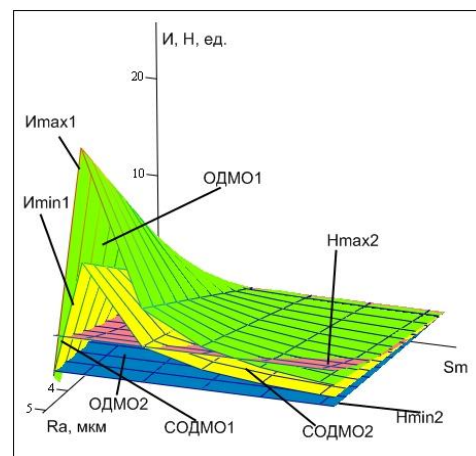


Рис. 5 – Область СОДМО при регламентации параметров S_m и R_a

Объем области ОДМО:

$$V_{ОДМО} = \iint_{D_1} \frac{R_a}{S_m \cdot K_{\max}^{\downarrow}} dR_a dS_m - \iint_{D_1} \frac{R_a}{S_m \cdot K_{\min}^{\downarrow}} dR_a dS_m = \quad (8)$$

$$= \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left[\frac{R_a}{K_{\max}^{\downarrow}} \cdot \left(\ln \frac{K_{f2} \cdot \sqrt[m]{R_a}}{K_{f1} \cdot \sqrt[n]{R_a}} \right) \right] dR_a - \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left[\frac{R_a}{K_{\min}^{\downarrow}} \cdot \left(\ln \frac{K_{f2} \cdot \sqrt[m]{R_a}}{K_{f1} \cdot \sqrt[n]{R_a}} \right) \right] dR_a$$

где, $V_{ОДМО}$ - объем области ОДМО; K_{fi} - коэффициент корреляции; n, m - показатели степени;

С помощью критериев оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств (рис. 1) нужно определить удовлетворяет ли данный метод обработки на финишном этапе максимальности значения площади области СОЭМО из всех выбранных методов, минимальности затрат (ФСА) и максимального значения вероятности $P(A)$ для данного метода обработки (блоки 9 – 14, рис. 1). Если нет, то следует вернуться к определению финишного этапа обработки или методу обработки на финишном этапе, а также смене регламентируемого параметра качества поверхности (блок 7, рис. 1) [1, 2, 12, 14].

Область эксплуатационных свойств обозначим как A , ОДМО – D , ОЭМО – B (Рис. 3). Используя теорию множеств, авторами сформулированы высказывания, отражающие критерии оптимизации технологического обеспечения нескольких эксплуатационных свойств поверхностей деталей:

1. Для каждого метода зубообработки ($MЗ$) на финишном этапе существует ограниченный набор (множество) областей D , для каждого из которых существует функция затрат C_i ;

2. Из множества областей B найдется такая область ОЭМО (одна), которая будет удовлетворять трем критериям:

2.1. Будет иметь максимальное значение площади пересечения ОДМО и эксплуатационных свойств (S_D);

2.2. Будет иметь минимальное значение функции затрат C_i ;

2.3. Будет иметь максимальную вероятность

$$P(A)_T = \frac{0,63-0,1}{0,8-0,1} - \frac{1}{0,8-0,1} \cdot \int_{0,385}^{0,63} \int_{0,016}^{0,416} f(K) dK = \frac{1}{0,7} \cdot \left[0,53-0,01 \int_{0,385}^{0,63} \left(\frac{x}{0,016} - \frac{1}{0,416} \right) dx \right] = 0,66 \quad (11)$$

Двумерное нормальное распределение параметров качества поверхности R_a и W_a , для случая независимости (некоррелированности) этих параметров имеет вид [2], приведенной на рис. 7 [1, 13, 14, 15].

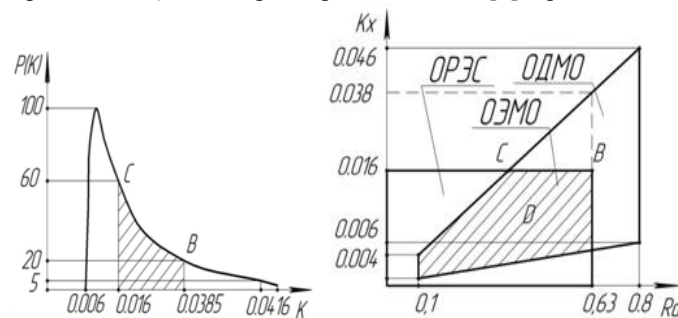


Рис. 6 – Функция плотности вероятности $F(K)$ для зубообработки

обеспечения эксплуатационных свойств для данного МЗ;

3. Эта область ОЭМО, удовлетворяемая критериям 2.1, 2.2 и 2.3, будет оптимальной с точки зрения технологического обеспечения эксплуатационных свойств.

Математически это может быть выражено так:

$$1. \forall MO \exists D \in C;$$

$$2.1. \exists_B B_{jonn} S_D \rightarrow \max$$

$$D = \{D_1, D_2, D_3, D_4\};$$

$$2.2. \exists_B B_{jonn} C_i \rightarrow \min (10);$$

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_i\};$$

$$2.3. \exists_B B_{jonn} P_i(A) \rightarrow \max (11);$$

$$C_i = F(x_i);$$

$$A \cap D = B; B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_j\}; B_{jonn} \in B;$$

Нужно помнить, что область СОЭМО является выходной информацией, необходимой для выполнения ФСА и вероятностной оценки (ВО) метода зубообработки. Не только ее площадь, но и положение в системе координат, играет существенное значение в обеспечении эксплуатационных свойств поверхности. т.к. проецирование экстремумов из этой области на функцию затрат определит величину издержек при данном методе обработки. А положение кривой распределения параметров качества поверхности по отношению к области СОЭМО определит вероятность обеспечения эксплуатационных свойств поверхности выбранным методом зубообработки.

Параметры качества поверхности R_p, S_m, R_a и др. представляют собой функцию случайной величины, эти рассуждения относятся к области достижимых значений комплексного параметра при рассматриваемом методе зубообработки D , а область P , является равновероятной.

Вероятность $P(A)$ для рассматриваемого метода обработки области ОЭМО может быть определена так (при независимости параметров качества поверхности, рис. 6)

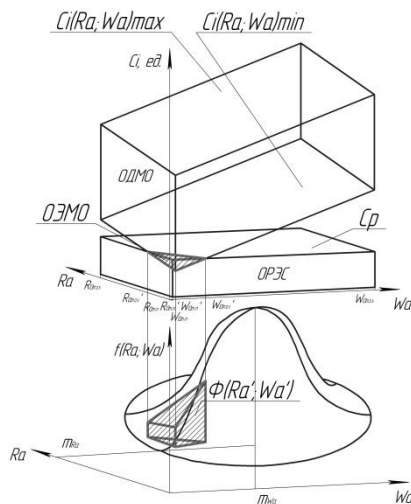


Рис. 7 – Схема задачи выбора метода обработки при регламентации двух параметров качества поверхности

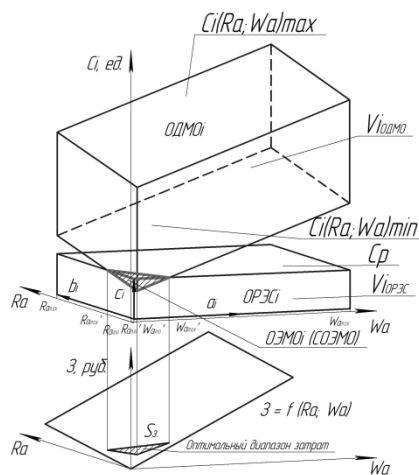


Рис. 8 – Выбор оптимального диапазона затрат при обеспечении эксплуатационных свойств поверхностей зубчатых колес

При проецировании поверхности $ОДМО_i$ на поверхность плотности распределения эта поверхность усекается и находится в интервалах $(R_{amin}^i \leq R_a \leq R_{amax}^i)$ и $(W_{amin}^i \leq W_a \leq W_{amax}^i)$. Плотность распределения (рис. 7):

$$F(R_a; W_a) = \frac{1}{\gamma \cdot \lambda} \cdot \left\{ \Phi(R_a) - \Phi(R_{amin}^i) \right\} \cdot \left\{ \Phi(W_a) - \Phi(W_{amin}^i) \right\}$$

$$\gamma = \Phi\left(\frac{R_{amax}^i - m_{R_a}}{\sigma_{R_a}}\right) - \Phi\left(\frac{R_{amin}^i - m_{R_a}}{\sigma_{R_a}}\right) = \Phi(R_{amax}^i) - \Phi(R_{amin}^i)$$

$$\lambda = \Phi\left(\frac{W_{amax}^i - m_{W_a}}{\sigma_{W_a}}\right) - \Phi\left(\frac{W_{amin}^i - m_{W_a}}{\sigma_{W_a}}\right) = \Phi(W_{amax}^i) - \Phi(W_{amin}^i)$$

где, $(1 - \gamma)$ – степень усекаения интервала $(R_{amin} \leq R_a \leq R_{amax})$; $(1 - \lambda)$ – степень усекаения интервала $(W_{amin} \leq W_a \leq W_{amax})$; Φ – функция Лапласа; m_{R_a} , m_{W_a} – математические ожидания соответственно случайных величин параметров R_a и W_a ; σ_{R_a} , σ_{W_a} – средние квадратические отклонения соответственно

случайных величин параметров R_a и W_a соответственно

$$P\{(R_a; W_a) \in D\} = \iint_D F(R_a; W_a) dR_a dW_a \quad (13)$$

где, P – вероятность попадания случайной величины параметров качества R_a и W_a в область D .

Для обеспечения эксплуатационных свойств при задании ограниченного набора параметров качества поверхности вероятность для выбранного метода зубообработки определится так:

$$P(R_{ij}) = \prod_{i=1}^n P(R_i) \quad (14)$$

где, $P(R_i)$ – вероятность обеспечения эксплуатационных свойств при регламентации i -го параметра состояния поверхностного слоя.

Назначение режимов зубообработки, обеспечивающей заданные эксплуатационных свойств (блок 15, рис. 1). Для определения режимов обработки используются эмпирические уравнения параметров состояния поверхностного слоя:

$$(R_a, R_p, S_m) = f(S; \mathcal{G}; r; \gamma) \quad (15)$$

где, S – подача, мм/об.; v – скорость резания, м/мин.; r и γ – параметры режущего инструмента, радиус режущей кромки и передний угол соответственно.

Для обеспечения эксплуатационных свойств используются критерии оптимизации в виде неравенства (табл. 1): [2, 5, 9, 16]

$$[\Pi] \leq \Pi \quad (16)$$

где, Π – расчетно-конструкторское значение комплексного параметра Π ; $[\Pi]$ – значение комплексного параметра Π , достижимого зубообработкой поверхности.

Таким образом, выражение (16) будет иметь вид:

$$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^I)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} \leq \left[\frac{\sigma_T \cdot (J_{пл.})^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (17)$$

Выразив из (16) не регламентируемый параметр шероховатости R_p и подставив его в соотношение (17) находится оптимальная скорость резания v и число оборотов шпинделя n , которая обеспечит заданные конструктором эксплуатационных свойств:

$$n \geq \frac{60 \cdot 10^3}{\pi \cdot D} \cdot \left[K_0 \cdot W_p \cdot H_p \cdot \frac{S^{K_1}}{r^{K_2}} \cdot \left(\frac{1.7 \cdot P}{\sigma_T \cdot (J_{пл.})^6 \cdot K^I} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{K_3}} \quad (18)$$

В дополнение к трем критериям оптимизации (2.1 – 2.3), рассмотренным выше, можно добавить еще и следующие, на основании рассмотренных рассуждений:

$$PO = \{PO_1, PO_2, PO_3, \dots, PO_n\};$$

$$GI = \{ЭГН_1, ЭГН_2, \dots, ЭГН_m\};$$

$$\begin{aligned}
Z &= \{Z_1, Z_2, \dots, Z_r\}; \\
\exists_B B_{j.onm} PO_n &\rightarrow onm.; \\
\exists_B B_{j.onm} GI_m &\rightarrow onm.; \\
VZ &= \{VZ_1, VZ_2, VZ_3, \dots, VZ_k\}; \\
\exists_B B_{j.onm} Z_r &\rightarrow onm.; \\
\exists_B B_{j.onm} VZ_k &\rightarrow onm.; \\
TC &= \{TC_1, TC_2, TC_3, \dots, TC_t\}; \\
\exists_B B_{j.onm} TC_t &\rightarrow onm.;
\end{aligned}$$

2.4. Множество оптимальных режимов обработки (РО) поверхности для обеспечения эксплуатационных свойств; 2.5. Множество оптимальных параметров геометрии инструмента (ГИ) при обработке поверхности для обеспечения эксплуатационных свойств рассматриваемым МО; 2.6. Множество оптимальных параметров заготовки (З) для рассматриваемой поверхности при обеспечении эксплуатационных свойств предложенным МО; 2.7. Множество оптимальных параметров технологической системы (ТС) при обработке поверхности для обеспечения эксплуатационных свойств рассматриваемым МО; 2.8. Множество оптимальных параметров условий эксплуатации (УЭ) поверхности, которые обеспечиваются заданным МО.

Не имея информации о всем технологическом процессе изготовления зубчатых колес, за функцию стоимости можно взять приведенные затраты на выполнение перехода (рис. 8):

$$Z = \left(\frac{t_{ш.-к.} \cdot (C_{эф} + 3C_{сэ})}{60} + \frac{3_{II}}{N_T} \right) \cdot N_i \quad (19)$$

где, $C_{эф}$ - часовая тарифная ставка f -го разряда станочника, грн.; N_i - годовая программа выпуска i -го изделия; 3_{II} - затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости, грн.; N_T - количество зубчатых колес, обработанных за период стойкости инструмента, шт.; $3_{сэ}$ - затраты на содержание и эксплуатацию оборудования в течении часа его работы, грн.; $t_{ш.-к.}$ - штучно-калькуляционное время, мин.

В свою очередь приведенные затраты метода механической зубообработки определяются по штучно-калькуляционному времени, которое является функцией основного времени и как следствие частоты вращения шпинделя n и подачи S : $t = f(n; S)$. Функция затрат представляет собой зависимость двух переменных параметров качества поверхности и может рассматриваться как поверхность затрат (рис. 8) (например, $Z = f(H_{max}; R_a)$). Схема решения задачи ФСА представлена на рис. 3.

По приведенным выше зависимостям можно, на основании ограничения (16), провести оптимизацию режимов резания, для выбранного метода зубообработки (рис. 9). В дополнении к ограничениям (рис. 9) подачи и чисел оборотов шпинделя по

мощности привода станка, прочности его механизмов подачи и главного движения, максимальных и минимальных возможных их значений, добавляется ограничение по возможности обеспечения эксплуатационных свойств обрабатываемой поверхности (16).

При регламентации не одного R_z параметра шероховатости поверхности необходимо использовать не плоские графические корреляционные зависимости этих параметров с режимами обработки, а объемные (рис. 10), представляющие собой поверхности в системе координат: $PR_z W_z, V_n R_z W_z, S_n R_z W_z$ и др.

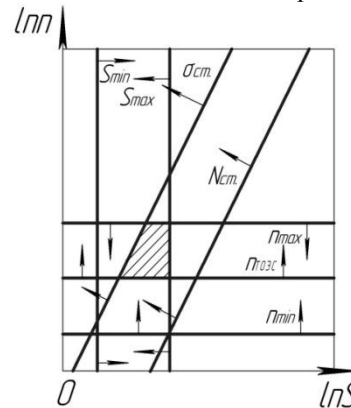


Рис. 9 – Оптимизация режимов зубообработки

Следовательно, выбор оптимальной технологии (блок 15, рис. 1) изготовления является сложной многовариантной задачей. Выбор параметров, обеспечивающих эксплуатационных свойств поверхности, можно проводить в строгом соответствии с табл. 1, а также описанной выше схемы. Критерии оптимизации, рассмотренные в этой статье, позволяют эффективно регулировать качество эксплуатационных свойств изделий с применением комплексных параметров состояния поверхностного слоя.

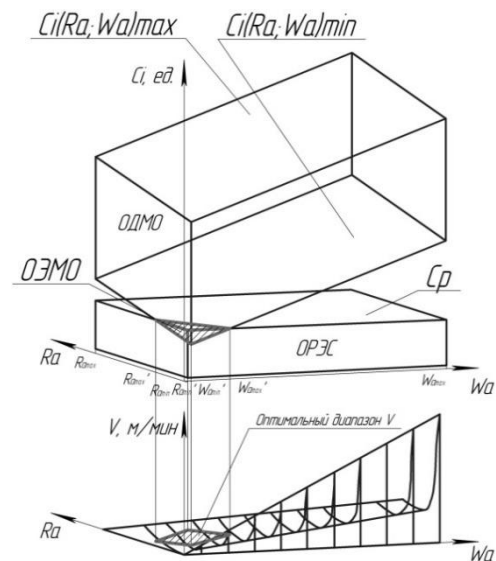


Рис. 10 – Оптимальный диапазон скорости резания при регламентации двух параметров качества поверхности W_a и R_a

Выводы. Рассмотрены вопросы обеспечения качества

восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес при их изготовлении за счет обеспечения эксплуатационных свойств их поверхностей. Приведен алгоритм двухступенчатого обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей на основе применения комплексных параметров состояния поверхности и ее многокритериальной оптимизации.

Сформулированы критерии оптимизации технологического обеспечения нескольких эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес с использованием комплексных параметров их состояния, рассмотрены вопросы назначения оптимальных режимов их зубообработки, предложены графические схемы решения этих задач.

Обоснованы решения слабо изученных вопросов, решаемых при конструкторско-технологической подготовке зубообработки, оптимизация технологического обеспечения параметров состояния, характеризующих эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Результаты работы опробованы при разработке технологических процессов механической зубообработки восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес 6, 7 и 8 норм точности по ГОСТ1643-81.

Список литературы:

1. *Инженерия поверхностей деталей* / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: «Машиностроение», 2008. – 320 с.
2. *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.
3. *Технология производства и методы методы обеспечения качества зубчатых колес и передач* / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М.М.Кане. – СПб.: Профессия, 2007. – 832 с.
4. Тимофеев, Ю. В. *Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес* [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Прикладная механика. Издательство: Технологический центр (Харьков). Том 4, – № 7 (64) (2013). – С. 49–55.
5. Клочко А.А. *Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом* / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, О.А. Анциферова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – С. 54–55.
6. *Погрешности технологических процессов обработки отверстий корпусных деталей тяжелых токарных станков с ЧПУ* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу». Випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 32–33.
7. *Трибологический метод выбора технологического регламента при скоростном лезвийном зубофрезеровании* / Н.С. Равская, А.А.

- Охрименко, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Труды XXVII международной конференции «Новые технологии в машиностроении» (3–8 сентября 2017 г., Коблево). – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2017. – С. 19–20.
8. *Технологические особенности обеспечения точности изготовления корпусов крупногабаритных редукторов* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Набока // Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20–22 сентября 2017 г., Харьков. – Одесса: ОНПУ, 2017. – С. 108–109.
9. *Актуальность дифференцированного и комплексного прогнозирования в условиях имитационного моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, А.А. Охрименко, М.И. Гасанов // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези доповіді VII Всеукраїнської науково-технічної конференції, 5–9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 127–129.
10. Гасанов М.И. *Оптимизация технологического процесса восстановления крупномодульных зубчатых колес* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 29 – 31 травня 2018 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 17.
11. Гасанов М.И., Шелковий О.М., Клочко О.О., Анциферова О.О. *Имитационное моделирование технологических процессов восстановления крупногабаритных зубчатых колес с учетом прогрессирующих видов износа* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 29–31 травня 2018 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 18.
12. Пермяков А.А., Клочко А.А., Гасанов М.И. *Математическая модель синтеза технологического регламента восстановления функциональных свойств крупномодульных зубчатых передач*. XIX Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, 29 червня - 01 липня 2018 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – Т. 4. – С. 348–350.
13. Гасанов М.И., Клочко А.А., Черкашина Г.И., Перминов Е.И. *Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.
14. *Особливості підвищення якості відновлення крупномодульних зубчастих коліс спреєрним загартуванням* / В.М. Літвінов, М.І. Гасанов, О.О. Клочко // Труды Двадцать девятой международной конференции «Новые технологии и в машиностроении» (2-8 сентября 2019 г., Коблево). – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2019. – С.9.
15. *Проблеми лезвийної обробки на тяжєльх токарних станках с ЧПУ* / Е.В. Мироненко, М.И. Гасанов, С.Юй Цюаньяо, Фу Хун, Д.А. Дмитриев // Матеріали V-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 5. – Херсон: ХНТУ, 2019. – С.143 – 145.
16. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V Klochko., Alexander A., Gasanov Magomedemin I. *Technology of restoration of large gear boxes*. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.

References (transliterated)

1. *Inzheneriya poverkhnostej detalej* / Koll. avt.; pod red. A.G. Suslova. M.: «Mashinostroenie», 2008. – 320 s.
2. *Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul'nykh zakalennykh zubchatykh koles* [Tekst] / N.V. Kravcov, Yu.V. Timofeev, A.A.Klochko [i dr.]; Nauch. Red.. A.A.Permjakov; VolGTU – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 254 s., il., tabl.; - (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev), ISBN 978-59903090-6-7.
3. *Tekhnologiya proizvodstva i metody` metody` obespecheniya kachestva zubchaty`kh koles i peredach* / Pod obshh. red. V. E. Starzhinskogo, M.

- M Kane. – S-Pb. : Profesiya, 2007. – 832 s.
4. Timofeev, Yu. V. *Optimizaciya tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej vosstanovlennyy'kh vosstanovlennyy'kh zakalenny'kh krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles* [Tekst] / Yu. V. Timofeev, A. A. Klochko, A. N. Kravczov // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovy'kh tekhnologij: Prikladnaya mekhanika. Izdatel'stvo: Tekhnologicheskij tsentr (Khar'kov). Tom 4, – # 7 (64)(2013). – S. 49–55.
 5. Klochko A.A. *Novy'e sposoby' vy'sokoskorostnoj obrabotki zakalenny'kh czilindricheskikh zubchaty'kh koles abrazivny'm instrumentom* / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, O.A. Anczy'ferova // Informatika, upravlin'nyya ta shuchnij i'ntelet. Materi'ali IV mi'zhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferencii'yi studentiv, magist'ri'v ta aspi'ranti'v. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – S. 54–55.
 6. *Pogreshnosti tekhnologicheskikh processov obrabotki otverstij korpusny'kh detalej tyazhely'kh tokarny'kh stankov s ChPU* / A.A. Pemyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Materi'ali mi'zhnarodnoyi naukovo–praktichnoyi konferencii'yi «Suchasni' tekhnologiy'yi promislivogo kompleksu». Vipusk 3. – Kherson: KhNTU, 2017. – S. 32–33.
 7. *Tribologicheskij metod vy'bora tekhnologicheskogo reglamenta pri skorostnom lezviynom zubroferovanii* / N.S. Ravskaya, A.A. Okhrimenko, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Trudy' XXVII mezhdunarodnoj konferencii «Novy'e tekhnologii v mashinostroenii» (3–8 sentyabrya 2017 g., Koblevo). – Khar'kov: NAKU «KhAI». – 2017. – S. 19–20.
 8. *Tekhnologicheskoe osobennosti obespecheniya tochnosti izgotovleniya korpusov krupnogabaritny'kh reduktorov* / A.A. Pemyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Naboka // Novy'e i netradicijny'e tekhnologii v resurso– i e'nergoberezenii: Materialy' mezhdunarodnoj nauchno–prakticheskoy konferencii, 20–22 sentyabrya 2017 g., Khar'kov. – Odessa: ONPU, 2017. – S. 108–109.
 9. *Aktual'nost' differencirovannogo i kompleksnogo prognozirovaniya v usloviyakh imitacionnogo modelirovaniya tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluatatsionny'kh svoystv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles* / A.A. Pemyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, A.A. Okhrimenko, M.I. Gasanov // Zbi'mik naukovikh prac'. Progresivni' tekhnologii'yi v mashinobuduvanni': Tezi dokladi'v VII Vseukrayins'koyi naukovo–tekhnichnoyi konferencii'yi, 5–9 lyutogo 2018 r. – Naczi'onal'nij uni'versitet «L'viv's'ka poli'tekhnika». – L'viv, 2018. – S. 127–129.
 10. Gasanov M.I. *Optimizaciya tekhnologicheskogo processa vosstanovleniya krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles* // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferencii'yi 29 – 31 travnya 2018 roku / Pi'd zag. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 17.
 11. Gasanov M.I., Shelkovij O.M., Klochko O.O., Anczyferova O.O. *Imitacionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov vosstanovleniya krupnogabaritny'kh zubchaty'kh koles s ucheto progressivny'kh vidov iznosa* // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferencii'yi 29–31 travnya 2018 roku / Pi'd zag. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 18.
 12. Pemyakov A.A., Klochko A.A., Gasanov M.I. *Matematicheskaya model' sinteza tekhnologicheskogo reglamenta vosstanovleniya funkcional'ny'kh svoystv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh peredach*. XI Kh Mi'zhnarodna naukovo–tekhnichna konferencii'ya „Progressivna tekhnika, tekhnologiya ta inzhenerma osvita“, 29 chervnya - 01 lipnya 2018 roku v Naczi'onal'nomu tekhnichnomu uni'versiteti' Ukrayini «Kiyiv's'kij poli'tekhnichnij i'nstitut i'meni' Gorya Si'kors'kogo». – Kiyiv: NTUU «KPI», 2018. – T. 4. – S. 348–350.
 13. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.I. *Grupovy'e marshrutny'e tekhnologicheskie processy' vosstanovleniya krupnogabaritny'kh zubchaty'kh koles na osnove imitacionnogo modelirovaniya s ucheto progressivny'kh vidov iznosa* // Nadi'jni'st' i'nstrumentu ta optimizacii' tekhnologicheskikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramators'k: DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.
 14. *Osoblivosti' p'dvishhennya yakosti' vi'dovlennya krupnomodul'nikh zubchastikh koli's sprejernim zagartuvannjam* / V.M. Li'tvinov, M.I. Gasanov, O.O. Klochko // Trudy' Dvadczat' devyatoj mezhdunarodnoj konferencii «Novy'e tekhnologii v mashinostroenii» (2–8 sentyabrya 2019 g., Koblevo). – Khar'kov: NAKU «KhAI». – 2019. – S.9.
 15. *Problemy' lezviynoj obrabotki na tyazhely'kh tokarny'kh stankakh s ChPU* / E.V. Mironenko, M.I. Gasanov, Syuj Czyuan'yao, Fu Khun, D.A. Dmitriev // Materi'ali V-yoi Mi'zhnarodnoyi naukovo–praktichnoyi konferencii'yi «Suchasni' tekhnologii'yi promislivogo kompleksu», vipusk 5. – Kherson: KhNTU, 2019. – S.143–145.
 16. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V Klochko, Alexander A., Gasanov Magomedemin I. *Technology of restoration of large gear boxes*. Dasić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vmjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – R. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.

Поступила (received) 16.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Гасанов Магомедмін Исамагомедович, Hasanov Magomedemin Isamagomedovich) – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (096)-590-8850; e-mail: kh.kajvika@gmail.com;

Волошин Олексій Іванович (Волошин Алексей Иванович, Voloshin Alexey Ivanovich) – головний інженер приватного акціонерного товариства «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ; тел.: +380626-478801; e-mail: voloshyn@nkmz.donetsk.ua ;

Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Klochko Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, професор кафедри технологій 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) – магістр, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (066)762-41-70; e-mail: babenko29052000@gmail.com.