

УДК 621.833:621.914.5

А.Н. Шелковой, профессор, д-р техн. наук,

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002*

Е.В. Мироненко, профессор, д-р техн. наук,

А.А. Клочко, доцент, канд. техн. наук

*Донбасская государственная машиностроительная академия,
ул. Шадинова, 72, г. Краматорск, Донецкая обл., Украина, 84313
klochko21@rambler.ru*

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗУБООБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В статье рассмотрены основные научные принципы формирования моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес определением оптимальных сочетаний параметров технологического регламента, обеспечивающих достижение заданной точности зубообработки при других удовлетворительных значениях показателей точности, качества, производительности, себестоимости и обеспечением максимальной точности поддержания параметров режимов резания в их оптимальном сочетании в процессе зубообработки с учетом возможностей динамической технологической станочной системы (ДТСС).

Ключевые слова: *моделирование, технология, формообразование, крупномодульные закаленные колеса, точность, качество, производительность, себестоимость.*

Задача моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки [1-4] закаленных крупномодульных зубчатых колес (рисунок 1) интегрируется с помощью фазового пространства (рисунок 2).

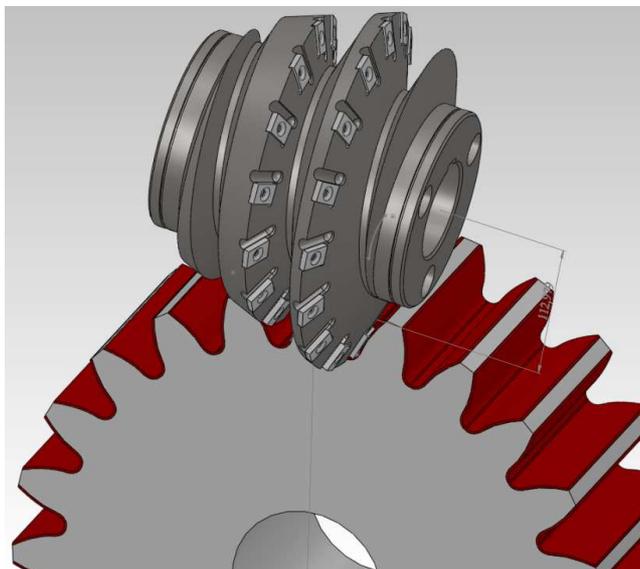


Рисунок 1 – Моделирование параметров технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес

Пространственную форму зубчатого колеса определяет сочетание различных поверхностей. Для обеспечения обработки используются геометрические поверхности: плоские, круговые цилиндрические и конические, шаровые, торовые, гипоидные. Геометрическая поверхность представляет собой совокупность последовательных положений (следов) одной производящей линии, расположенных на другой линии определяющей образующую поверхность. При обработке эвольвентных поверхностей на зубообрабатывающих станках образующие и направляющие линии воспроизводятся комбинацией движений заготовки и инструмента, скорости которых согласованы между собой.

При зубофрезеровании эвольвентной поверхности зубчатого колеса перемещение режущего лезвия инструмента из начального положения (точка M_0 при $t=0$) в конечное (точка M_k при $t=t_n$)

положение под действием управляющих воздействий $u_1 \dots u_n$ может быть осуществлено по различным траекториям в рамках технологических и технико-экономических ограничений. Каждой траектории соответствует определенное значение критерия оптимальности J . Задача сводится к определению такого управляющего воздействия $u(t)$, при котором процесс перехода $x(t)$ из точки M_0 в точку M_k обеспечивается при минимуме функционала Φ с соблюдением ограничений, причем

$$\Phi = \int Q(x, u, F, t) dt,$$

где F – внешнее возмущение.

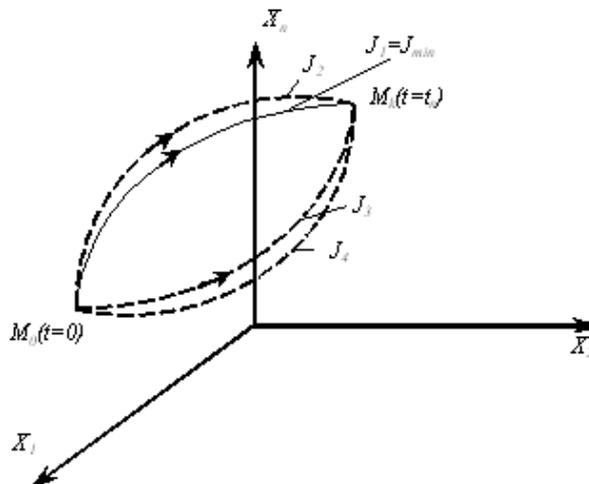


Рисунок 2 – Геометрическое интегрирование оптимального управления процессом формообразования

Требование минимизации критерия Φ формально можно заменить требованием минимизации конечного значения одной из координат объекта управления. Для этого в уравнение объекта

$$dx_1/dt = \alpha_1(x_1 \dots x_n; u_1 \dots u_m; F_1 \dots F_l; t) \quad (1)$$

$$dx_n/dt = \alpha_n(x_1 \dots x_n; u_1 \dots u_m; F_1 \dots F_l; t) \quad (2)$$

вводим дополнительную координату, которой является функционал Φ , т.е. новое уравнение имеет вид $dx_0/dt = Q(x_1 \dots x_n; u_1 \dots u_m; F_1 \dots F_l; t)$, причем $x_0(0) = 0$, а в общем случае нелинейная функция.

С учетом выражений (1) и (2) следует $\Phi = x_0(t_f)$.

Математическое моделирование оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес выходит на изменение процессов формообразования поверхностного слоя зубчатых колес во времени и рассматривается в динамике.

Задача моделирования процесса управления формообразования зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес является задачей с фиксированными параметрами при заданных начальных и конечных точках траектории. Методы поиска оптимального критерия качества J_k и критерия точности J_T определяются показателями критериями качества и точности функций.

При изменении параметров формообразования во времени, показатели качества J_k и точности J_T являются функциями параметров процесса $\Phi = \int Q(x, u, F, t) dt$.

Анализ и выбор показателей оптимальности процесса моделирования технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес, технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес базируются на основе оптимального управления, которое обеспечивает наилучшее значение критерия оптимальности, характеризующего эффективность технологического управления при заданных ограничениях. Таким критерием оптимальности технологических процессов зубообработки крупномодульных зубчатых колес является высокая производительность обработки, точность и качество.

Общепринятыми характеристиками эффективности зубообработки крупномодульных зубчатых колес являются качество, точность, производительность и себестоимость. К соответствующим показателям процесса, через которые в различных условиях проявляется критерий оптимальности, относятся предельная точность, высокое качество, максимальная производительность, минимальная себестоимость.

Задача оптимального управления процессом зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес может быть разбита на два этапа: первый связан с обоснованием выбора значений технологических параметров режима резания, удовлетворяющим заданному критерию качества, параметрами формирования толщины срезаемого слоя глубины резания (рисунок 3); второй –

предполагает управление режимами резания с целью поддержания оптимального значения показателя критерия качества в условиях действия на процесс возмущающих воздействий.

В случаях, когда основными показателями оценки режимов резания является обеспечение качества поверхностного слоя, точность обработки, производительность при определении скоростей резания и других расчетах принимаются коэффициента функционального формирования поверхностного слоя – K_ρ и стойкость инструмента, соответствующая наибольшей производительности – T_q .

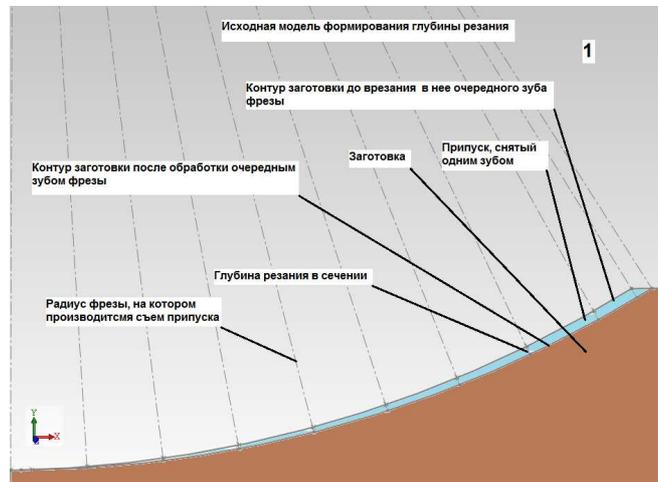


Рисунок 3 – Исходная модель формирования процесса формообразования

Период стойкости T инструмента определяется глубиной резания t , подачей S_o , скоростью V и радиусом округления режущей кромки зубьев фрезы ρ , т.е. параметрами режима резания и условиями формообразования с учетом параметра функционального формирования поверхностного слоя при зубофрезеровании $K_\rho = f(a/\rho, R_z, t_m, (k)H_{\mu 0}, \sigma_0, h_{H\mu})$ и обрабатываемости материала C_v .

Учитывая, что процесс встречного зубофрезерования связан с нестабильностью по причине прерывистого резания, постоянно изменяющейся толщины срезаемого слоя a_i , где толщина срезаемого слоя дифференцированно изменяется с изменением $\Psi_{ск}$ по зависимости $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \phi$, где S_z – подача на зуб; ϕ – угол профиля зуба фрезы в нормальном сечении, определим минимальные значения углов скольжения без СОЖ (3) и с ее применением (4):

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}; \tag{3}$$

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}. \tag{4}$$

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить оптимальные углы скольжения $\Psi_{ск}$, при которых обеспечивается стабильность процесса зубофрезерования, необходимые условия по стойкости инструмента и качество обрабатываемой поверхности по отношению к наибольшему углу контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемым зубчатый изделием при наивысшей производительности. Соотношение между углом скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшим углом контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент функционального формирования поверхностного слоя K_ρ :

$$K_\rho = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ск}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\%. \tag{5}$$

Подставляя в (5) технологические параметры обработки получим, удобное для теоретических и экспериментальных исследований выражение коэффициента эффективности функционального формирования поверхностного слоя K_ρ :

$$K_\rho = \left(1 - \frac{a \sin \left(K_{сож} \cdot \frac{\rho_i \cdot Z \cdot 10^3 \cdot V}{S_{mi} \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \phi} \right)}{a \sin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D - H)}}{D}} \right) \cdot 100\% \tag{6}$$

где $K_{сож} = 0,5$ при обработке без СОЖ, $K_{сож} = 0,31$ при обработке с СОЖ

Период стойкости T инструмента определяется по зависимостью (7)

$$T = (C_v)^{1/m} \cdot K_\rho / (v^{1/m} \cdot S_y^{y/m} \cdot t^x \cdot v^m). \quad (7)$$

Для прогнозирования показателей качества поверхностного слоя разработана математическая модель с учетом технологических, геометрических параметров (3.8) и физико-механических свойств при условии перехода пластического отнесения материала с обрабатываемой поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес во взаимосвязи с комплексным параметром состояния поверхностного слоя, выраженном через параметр шероховатости R_z .

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41} \cdot K_\rho^{0,24}} = \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{3/4} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2} \cdot k^{-3}}{H_p^{1/4} \cdot W_p^{1/4}} \quad (8)$$

где R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам в мм, R_a – средне арифметическое отклонение профиля в мм, W_z – высота сглаживания профиля волнистости по десяти точкам в мм, P_z – главная составляющая силы резания, в н, S_z – подача на зуб в мм/зуб, a_i – толщина срезаемого слоя в мм, ρ – радиус округления режущей кромки в мм, V – скорость резания в м/с, γ – передний угол фрезы в град, K_ρ – коэффициента эффективности функционального формирования поверхностного слоя, σ_T – напряжение текучести, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению поверхности зубчатых колес, I – интенсивность износа зубчатых колес в период нормального износа, χ – коэффициент, учитывающий параметры опорной кривой, p – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта, H_p – высота сглаживания макроотклонения, W_p – высота сглаживания профиля волнистости, S_m – средний шаг неровностей, $k(H_{\mu 0})$ – степень упрочнения.

Уравнение (8) адекватно описывает процесс формообразования. Полученные данные используются в качестве технических ограничений по системе параметров поверхностного слоя зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства, при выборе технологических методов и режимов обработки.

Особое значение имеет информация о частотных свойствах технологического процесса [1, 4] формообразования поверхностного слоя зубчатых колес.

При формообразовании поверхностного слоя одним зубом фрезы моделирование снятия припуска соответствует теоретическим исследованиям процесса формирования припуска (рисунок 4).

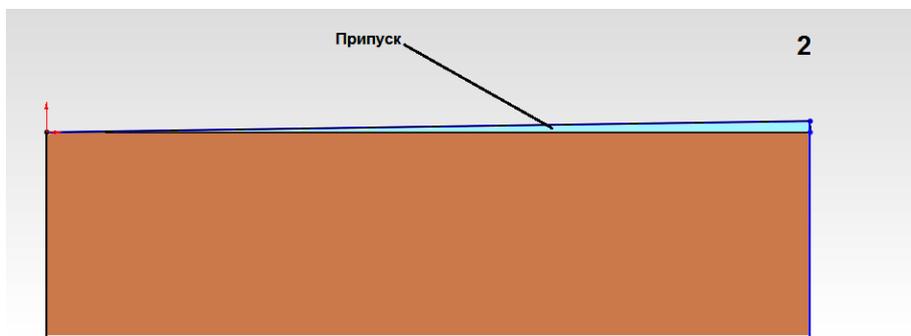


Рисунок 4 – Формообразование поверхностного слоя одним зубом зубообрабатывающей фрезы

Зависимости (1), (2), (7), (8), используются для ограниченной области технологических параметров формообразования:

$$\begin{aligned} T_{\min} &\leq T \leq T_{\max}; \\ v_{\min} &\leq v \leq v_{\max}; \\ S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\ K_{\rho \min} &\leq K_\rho \leq K_{\rho \max}; \\ R_{z \min} &\leq R_z \leq R_{z \max}. \end{aligned} \quad (9)$$

Физические величины, входящие в выражение (9), рассматриваются как математические ожидания соответствующих случайных величин, а само выражение представляется как многофакторная корреляционная зависимость, справедливая в области существования с определенной точностью и надежностью. Задача упрощается, если кривую износа инструмента на рабочем участке аппроксимировать прямой и допустить, что начальный износ на всех режимах одинаков. Для режимов, используемых при обработке одной детали, это допущение не является слишком грубым. Упрощение

задачи вытекает из того, что в принятых допущениях износ инструмента на всех режимах (как переменных, так и постоянных, обеспечивающих одинаковую стойкость T) определяется одной прямой.

При врезании зуба фрезы зуб фрезы скользит по обрабатываемой поверхности на угле на угле скольжения $\Psi_{ск}$ (рисунок 5) при $\alpha_i < K_{сож}\rho$, на рисунке 6 $\alpha_i < K_{сож}\rho$ происходит пластическое деформирование поверхностного слоя без снятия припуска, на рисунке 7. $\alpha_i = K_{сож}\rho$ начало процесса стружкообразования на угле скольжения $\Psi_{ск}$, что соответствует началу формирования поверхностного слоя, на рисунке 8 $\alpha_i > K_{сож}\rho$, начало устойчивого процесса стружкообразования с формированием поверхностного слоя в течении времени контактирования зуба фрезы до полного выхода из контакта с обрабатываемой .поверхностью на угле Ψ_{max} . Соотношение углов скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшего угла контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемой поверхностью определяют эффективность процесса формообразования.

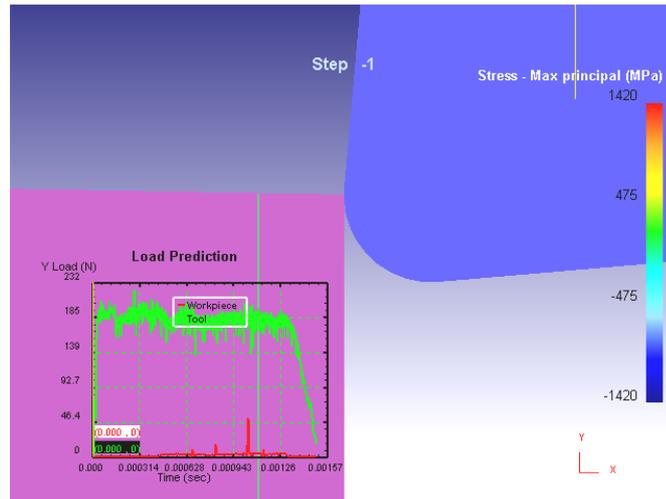


Рисунок 5 – Формообразование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i < K_{сож}\rho$

Стойкость, соответствующая условиям эффективности функционального формирования поверхностного слоя при максимальной производительности,

$$T_Q = K_p(1/m - 1) \cdot \tau_{с.м} \tag{10}$$

где $\tau_{с.м}$ – время на смену и подналадку инструмента за период его стойкости между очередными переточками; m - показатель степени.

Ограниченной области технологических параметров формообразования поверхностного слоя аппроксимирует функциональное изменение коэффициента формирования поверхностного слоя при встречном зубофрезеровании [1, 2, 3, 4].

$$K_{pQ} = T \cdot (v^{1/m} \cdot S_v^y \cdot t^x \cdot v^m) / (C_v)^{1/m} \tag{11}$$

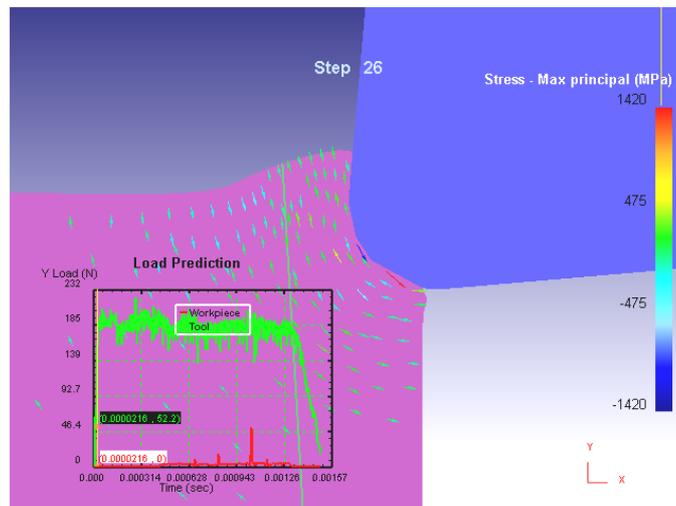


Рисунок 6 – Формообразование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i < K_{сож}\rho$

Значению стойкости соответствует оптимальная скорость v_q , которая может быть найдена в результате подстановки T_Q в выражение (2):

$$v_q = m \cdot c \cdot [(1 - m) \cdot \tau_{c,m} \cdot K_\rho \cdot S^y \cdot v^m \cdot t^x \cdot v^m]. \quad (12)$$

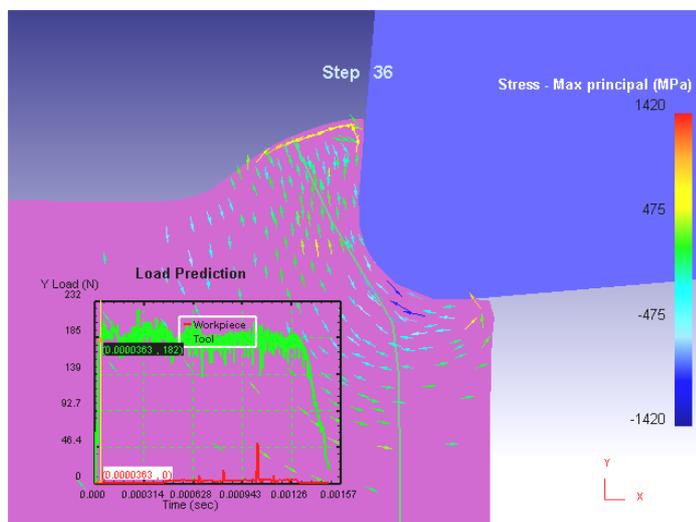


Рисунок 7 – Формообразование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i = K_{сожр}$

Значения T_Q , $K_{\rho q}$ и v_q должны входить в область возможных изменений стойкости инструмента, ограниченной области технологических параметров формообразования поверхностного слоя и скорости резания:

$$\left. \begin{aligned} T_Q &= T_{\min}, T_{\max} \\ K_{\rho q} &= K_{\rho \min}, K_{\rho \max} \\ v_q &= v_{\min}, v_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Максимальную стойкость $T_Q = \max$ можно получить из выражения (11) минимизируя входные параметры.

Применять режимы, оптимальные по стойкости режущего инструмента, целесообразно при необходимости экономии расхода дефицитного инструмента.

Условие наименьшей себестоимости моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес рассматривается при выборе экономичного варианта технологического регламента с учетом полной C_n , заводской C_a , цеховой C_c и технологической C_m себестоимости [1, 4].

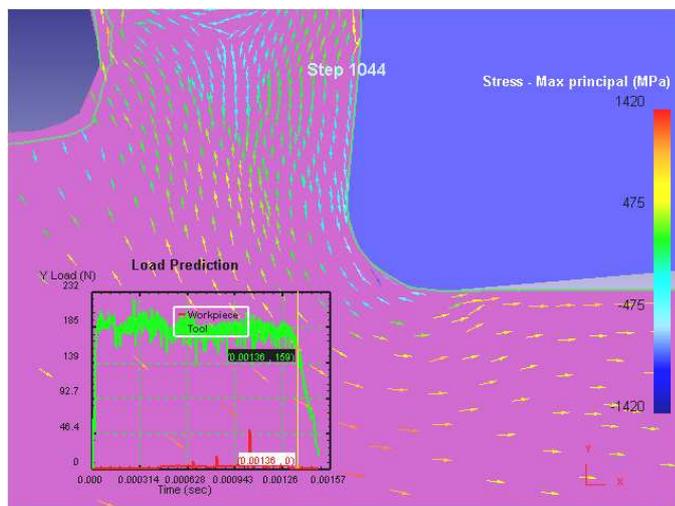


Рисунок 8 – Формообразование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i > K_{сожр}$

Если из полной себестоимости операции исключить внепроизводственные расходы и затраты на несоответствующую продукцию, приходящиеся на операцию, а также не учитывать не зависящую от режимов резания часть штучно-калькуляционного времени, то условно полная себестоимость операции $C_{y.l.}$ может быть представлена в виде

$$C_{y.l.} = B \cdot C \cdot T^m + (I + B \cdot \tau_{c.m.}) \cdot C \cdot T^{m-1}, \quad (14)$$

где B - условно полная себестоимость 1 станко-мин без учета инструментальной составляющей; I - затраты на инструмент, приходящиеся на период стойкости; $C \cdot T^m = \tau_0$ (τ_0 - машинное время обработки).

Оптимальной по себестоимости будет та скорость резания, при которой величина себестоимости операции $C_{y.l.}$ окажется минимальной:

$$v_c = m C_T / [(1-m) (\tau_{c.m.} + B/I) S_v^{y/m} \cdot t_v^{x/m} J^m] = C_v / (T_{э.к.})^m \cdot S_v^y \cdot t_v^x \quad (15)$$

Этому значению v_c соответствует экономичная величина стойкости инструмента

$$T_c = (I m / -m) \cdot (\tau_{c.m.} + B/I). \quad (16)$$

Методы определения оптимальных величин ограниченной области технологических параметров формообразования поверхностного слоя рассматриваются во временной функции и все параметры режимов резания являются переменными величинами, влияющие на образование характеристик поверхностного слоя зубчатых колес, точности обработки, получение стойкости T зубообрабатывающего инструмента, время обработки τ_0 и время обслуживания $\tau_{об}$, а следовательно, на штучно-калькуляционное время и себестоимость операции в целом, т. е. $C_{y.l.} = f(v, S, t, K_p)$. Под влиянием технических ограничений и текущих условий обработки каждая из величин параметров режима резания может изменяться, что приводит к появлению различных сочетаний v, S, t . Поэтому экономической задачей оптимальности процесса обработки является отыскание такого сочетания v, S, t, K_p , которое обеспечивает выполнение условий $T = const; C_{y.l.} = const, K_p = const$.

Показатель точности обработки является определяющим, так как несоответствие достижимой точности обработки цилиндрических зубчатых колес согласно ГОСТ1643-81 по параметрам кинематической точности, нормам плавности, нормам бокового зазора приводит к несоответствию параметров точности зубчатых колес.

Таким образом, задача повышения точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес решает общую задачу - повышение точности обработки с целью обеспечения экономически целесообразных размеров в допуске, необходимых для выполнения окончательных формообразующих операций.

Системой моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес решаются две задачи.

Первая – определяются оптимальные сочетания параметров технологического регламента, обеспечивающие достижение заданной точности зубообработки при других удовлетворительных значениях показателей (точности, качества, производительности, себестоимости); вторая - обеспечение с максимальной точностью поддержание параметров режима резания в их оптимальном сочетании в процессе зубообработки с учетом возможностей динамической технологической станочной системы (ДТСС)

Выводы

1. Для прогнозирования показателей качества поверхностного слоя разработана математическая модель с учетом технологических, геометрических параметров и физико-механических свойств при условии перехода пластического отгеснения материала обрабатываемой поверхности зубчатых колес во взаимосвязи с комплексным параметром состояния поверхностного слоя, выраженном через параметр шероховатости Rz .

2. Рассмотрены технологические условия обеспечения показателей качества поверхностного слоя от угла скольжения при фрезеровании зубчатых колес.

3. Предложен синтез параметров операции зубонарезания спаренными фрезами с целью получения стабилизации технологических параметров обработки за счет изменения среднеквадратичной интегральной функции для расчета оптимального угла рассогласования и их влияния на качество обработки и эксплуатационных характеристик зубчатых колес.

4. Получило дальнейшее развитие изучения вредного влияния технологической наследственности в структурно-параметрическом анализе технологического процесса изготовления зубчатых колес в виде существования «технологических барьеров» и пути их уменьшения с помощью термической стабилизации в «заневоленном» положении с гарантированным усилием заземления.

5. Анализ структуры технологического процесса показал широкие возможности изменения технологических параметров обработки путем глубокого изучения процесса формообразования поверхностного слоя зубчатых колес и применения новых высокопроизводительных технологических способов обработки.

6. Определены конкретные условия обработки во взаимосвязи с функциональными параметрами состояния обрабатываемых поверхностей зубчатых колес.

7. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальных углов скольжения $\Psi_{ск}$ при которых устанавливается стабильность процесса зубофрезерования и необходимые условия по стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности по отношению к наибольшему углу контакта зуба фрезы $\Psi_{тах}$ с обрабатываемым зубчатым изделием через коэффициент эффективности формообразования.

Библиографический список использованной литературы

1. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. — М.: Машиностроение, 2005. — 736 с.
2. Зубчатые передачи: справочник / Е. Г. Гинзбург, Н. Ф. Голованов, Н. Б. Фирун, Н. Т. Халебский; под ред. Е. Г. Гинзбурга. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. — 416 с.
3. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. — М.: Машиностроение, 1987. — 208 с.
4. 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.

Поступила в редакцию 21.03.2013 г.

Шелковий О.М., Міроненко Є.В., Клочко О.О. Загальні принципи моделювання оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс

У статті розглянуті основні наукові принципи формування моделювання технологічних процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс визначенням оптимальних поєднань параметрів технологічного регламенту, що забезпечують досягнення заданої точності зубообробки при інших задовільних значеннях показників точності, якості, продуктивності, собівартості і забезпеченням максимальної точності підтримки параметрів режимів різання в їх оптимальному поєднанні в процесі зубообробки з урахуванням можливостей динамічної технологічної верстатної системи (ДТВС).

Ключові слова: моделювання, технологія, формоутворення, великого модуля загартовані колеса, точність, якість, продуктивність, собівартість.

Shelkovoy A.N., Mironenko E.V., Klochko O.O. General principles of design of optimal management the parameters of exactness, quality and productivity of gear treatment hard-tempered large module of gear-wheels.

In the article basic scientific principles of forming of design of technological processes of optimal management are considered by the parameters of precision, quality and productivity of gear treatment of hard-tempered huge modular gears by determination of optimal combinations of parameters of technological regulation, providing the achievement of the set precision of gear treatment at other satisfactory values of indexes of precision, quality, productivity, cost and providing of maximal precision of maintenance of the cutting mode parameters in their optimal combination in the process of gear treatment taking into account possibilities of the dynamic technological machine-tool system (DTMS) are observed.

Keywords: design, technology, forming, large module hard-tempered wheels, exactness, quality, productivity, prime price.