

**М.И. ГАСАНОВ**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**А.А. ПЕРМЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»  
**А.А. КЛОЧКО**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**В.С. ФЕДОРЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРИ ЗУБООБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННЫХ КОЛЕС**

Взаимосвязь теоретической зависимости скорости резания от различных технологических факторов, физико-механических свойств материалов инструмента и закаленного зубчатого колеса позволяет осуществлять выбор рациональных режимов резания в каждом конкретном производственном случае с учетом требуемых показателей стойкости инструмента, производительности обработки, точности и качества поверхностного слоя. Разработаны схемы резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке с использованием метода численного моделирования процесса формообразования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и разработаны рекомендации по выбору технологического регламента обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения.

**Ключевые слова:** схемы резания, технологические факторы, качество поверхности, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, численное моделирование

## **М.І. ГАСАНОВ, О.О. ПЕРМ'ЯКІВ, А.А. КЛОЧКО, В.С. ФЕДОРЕНКО ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСТАТКУВАННЯ ПРИ ЗУБООБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНИХ КОЛІС**

Взаємозв'язок теоретичної залежності швидкості різання від різних технологічних факторів, фізико-механічних властивостей матеріалів інструменту та загартованого зубчатого колеса дозволяє здійснювати вибір раціональних режимів різання у кожному конкретному виробничому випадку з урахуванням необхідних показників стійкості інструменту, продуктивності обробки, точності та якості поверхневого шару. Розроблено схеми різання та технологічного оснащення при інтенсивній та високоякісній зубообробці з використанням методу чисельного моделювання процесу формування поверхневого шару, що дозволило отримати напружено-деформований стан поверхневого шару оброблюваного зубчатого колеса, інструменту та стружки та розроблено рекомендації щодо вибору. Метод чисельного моделювання ґрунтується на розв'язанні системи рівнянь механіки суцільного середовища (рівняння руху, нерозривності, енергії). Як замикають систему рівнянь використовуються визначальні співвідношення теорії пружності, пластичності та руйнування.

**Ключові слова:** схеми різання, технологічні фактори, якість поверхні, загартовані зубчасті колеса, чисельне моделювання

## **M.I. GASANOV, A.A. PERMYAKOV, A.A. KLOCHKO, V.S. FEDORENKO TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR GEARWORKING OF HARDENED WHEELS**

The relationship between the theoretical dependence of the cutting speed on various technological factors, the physical and mechanical properties of the tool materials and the hardened gear allows the

choice of rational cutting conditions in each specific production case, taking into account the required indicators of tool life, processing productivity, accuracy and quality of the surface layer. Cutting schemes and technological equipment were developed for intensive and high-quality gear cutting using the method of numerical simulation of the surface layer shaping process, which made it possible to obtain the stress-strain state of the surface layer of the gear being machined, tool and chips, and recommendations were developed for choosing the technological processing schedule. The numerical simulation method is based on solving a system of continuum mechanics equations (equations of motion, continuity, energy). The constitutive relations of the theory of elasticity, plasticity, and fracture are used as closing equations for the system.

Keywords: cutting schemes, technological factors, surface quality, hardened large-module gears, numerical simulation

**Введение.** Тяжелые зубофрезерные станки мод. 5А342 по жесткости и быстроходности не предназначены для работы методом обкатки твердосплавными червячными фрезами, а также из-за сравнительно невысокой стойкости используемых твердых сплавов, производственный опыт ряда заводов показал, что точность обработки крупномодульных закаленных до  $HRC, 50...55$  колес модулем  $m > 12$  мм червячными твердосплавными фрезами по нормам плавности и контакта не превышает 9...10-ой степеней точности по ГОСТ1643- 81.

**Основная часть.** Для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых фрез, оснащенных керамическими пластинками и специальными фрезерными суппортами. Метод прерывистого обката используется на зубострогальных и зубошлифовальных станках и обладает тем преимуществом, что в момент рабочего хода инструмента заготовка колеса неподвижна или совершает незначительный поворот, т.е. обработка протекает, по сравнению с методом обкатки с обеспечением наибольшей контактной жесткости инструмента и определяет способность поверхностных слоев зубчатых колес, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, с учетом радиуса округления  $\rho$  мм, обеспечивать процесс резания.

В соответствии со сложившимся представлением о процессе обработки поверхностей зубчатых колес, одним из его результатов является образование равновесной шероховатости. Несущая способность поверхности зубчатых колес, коэффициент трения и интенсивность износа при трении скольжения наряду с шероховатостью, определяются макроотклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микротвердость и остаточные напряжения), видом обработки и технологическими особенностями конструкции немодульных фрез. Поэтому образующаяся шероховатость поверхностей будет зависеть от остальных параметров состояния поверхностного слоя инструмента и обрабатываемой поверхности зубчатых колес.

Для разработки схем резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке использовался метод

численного моделирования процесса формообразования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и рекомендовать оптимальный технологический регламент обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения. Система уравнений решается при заданных начальных и граничных условиях.

На основании выполненных работ разработана математическая модель технологического процесса встречного зубофрезерования с переменным изменением формообразования поверхностного слоя. Модель предназначена для исследования пластического течения металла в зоне стружкообразования, расчета скоростей деформации, напряжений в условной плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента, исследования напряжений в слоях металла, расположенных на различной удаленности от обработанной поверхности, создания базы для изучения нестационарных процессов: врезания инструмента, прерывистого резания, напряжений в условиях элементного и псевдоэлементного стружкообразования и т.п.

Численное моделирование процесса встречного зубофрезерования рассмотрено в двумерной динамической постановке с использованием лагранжева описания движения среды. Метод решения задачи аналогичен известному конечно-разностному методу *HEMP*, поэтому система уравнений Прандтля-Рейса записывается в том же виде.

Уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_x, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_y; \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\dot{v}}{v} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\dot{E} = -P\dot{V} + (S_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + 2 \cdot S_{xy}\dot{\epsilon}_{xy}) \cdot V. \quad (3)$$

Скорости деформации

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right). \quad (4)$$

В условиях плоской деформации  $u_z = 0$ ,  $e_{zz} = e_{yz} = 0$ ,

Скорость вращения

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{xy} = -\dot{\omega}_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Полная деформация включает в себя упругую и пластическую части:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p. \quad (6)$$

Тензор напряжений разбивается на девиаторную  $s$ -шаровую  $P$  части  
Девиатор напряжений с учетом поворота локальной системы координат

$$\begin{aligned}\dot{S}_{xx} &= 2\mu \left( \dot{\varepsilon}_{xx} - \frac{1}{3} V/V \right) + \overline{\omega}_{xx}; \\ \dot{S}_{yy} &= 2\mu \left( \dot{\varepsilon}_{yy} - \frac{1}{3} V/V \right) + \overline{\omega}_{yy}; \\ \dot{S}_{xy} &= 2\mu \dot{\varepsilon}_{xy} + \overline{\omega}_{xy},\end{aligned}\quad (7)$$

где  $\overline{\omega}$  – поправка, учитывающая поворот элемента среды.  
Гидростатическое давление

$$\dot{P} = -K \frac{\dot{V}}{V}, \quad (8)$$

где  $V = \rho_0/\rho$  – относительный объем.

Условие пластичности Мизеса

$$2J_2 - \frac{2}{3} Y^2 \leq 0, \quad (9)$$

где  $2J_2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ ,  $Y$  – предел текучести при растяжении.

В качестве меры упрочнения принята работа пластической деформации  $W^{pl}$ :

$$Y = Y(W^{pl}) = Y_0 + \alpha (W^{pl})^\beta \text{ Мбар}, \quad (10)$$

где  $x, y$  – пространственные координаты;  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты вектора скорости;  $s_y$  – компонента тензора деформации;  $c_y$  – компонента тензора напряжений;  $s_y$  – компонента девиатора напряжений;  $P$  – давление;  $E$  – удельная энергия;  $\rho$  – плотность;  $\rho_0$  – первоначальная плотность среды;  $V_{отн}$  – относительный объем;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $\mu$  – модуль сдвига. Точка сверху означает производную по времени.

В основу разработанной программы положены научные основы стабилизационных или искусственных вязкостей.

Отделение срезаемого поверхностного слоя осуществлялось с использованием специального алгоритма разделения узлов сетки (рис. 1).

Реализация граничных условий в области контакта материала с режущим инструментом осуществлялась по схеме коррекции движения узлов расчетных ячеек.

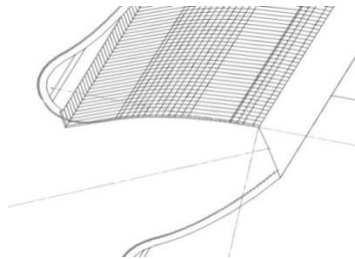


Рис.1 – Схема формообразования сетки на обрабатываемой поверхности зубчатого колеса

Процедура расчета на каждом временном интервале, включала следующую последовательность операций:

1. Расчет движения узлов сетки (рис. 2) при соответствующих граничных условиях. На всех поверхностях, где эти условия заранее не заданы, а определяются в ходе решения задачи, используются условия свободных поверхностей;

2. Расчет контактного взаимодействия поверхностей (условие непроникновения и закон скольжения Амонтона-Кулона) и коррекция движения в соответствии с взаимодействием;

3. Расчет напряженно-деформированного состояния в ячейках сетки;

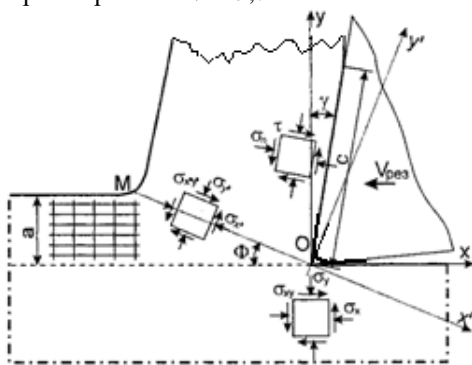
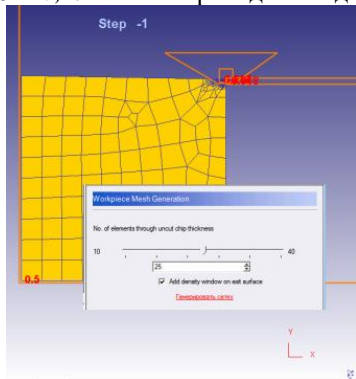
4. Проверка условия разрушения и формирование новых поверхностей (разделение узлов и задание соответствующих условий на новых поверхностях для отделения срезаемого слоя).

Решение осуществлялось с учетом технологического процесса моделирования формообразования поверхностного слоя и стружки. Поскольку характерное время процесса зубофрезерования значительно превышает время прохождения волн деформации, решение задачи производилось для различных временных интервалов.

Процесс формообразования зубчатых колес при встречном фрезеровании методами численного моделирования заключается в получении минимального значения угла скольжения  $\Psi_{ск}$ , или получения максимального значения  $\sin \psi_{\text{нелет}}$ , при котором процесс резания отсутствует с учетом варьирования переменных параметров режимов резания ( $S_{\text{мин.}}$ ,  $V$ ) и геометрических параметров зуборезных фрез ( $\rho$ ,  $d_{\text{фр}}$ ,  $Z$ ) [2, 3].

Соотношение между углом скольжения  $\Psi_{ск}$  и наибольшим углом контакта зуба фрезы  $\Psi_{\text{max}}$  с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент эффективности функционального формирования поверхностного слоя  $K_p$ .

Использовались следующие константы обрабатываемого материала:  $K = 180$  ГПа,  $\mu = 80$  ГПа,  $p = 7,85$  г/мм<sup>3</sup>,  $Y_0 = 0,4$  ГПа,  $a = 1/150$ ,  $\beta = 0,2$ . Расчеты проводились для скорости резания  $V = 3,0$  м/с.



*a*

*б*

Рис. 2 – Схематическое изображение процедуры разделения узлов сетки: *a* – вдоль линии среза, *б* – схема процесса формообразования

На рис. 3 приведено полученное при исследовании модели распределение интенсивности напряжений в зоне стружкообразования при зубофрезеровании.

Пластическое течение материала сосредоточено вблизи условной плоскости сдвига и передней грани инструмента. На рис. 3 также достаточно четко просматриваются зоны упругого сжатия впереди зуба фрезы и растяжения под задней поверхностью зуба фрезы.

Известно, что поведение материала, не обладающего свойствами деформационного упрочнения (или описываемого в таких рамках), имеет тенденцию к локализации пластической деформации. В связи с этим использование данной модели может оказаться полезным для выделения наиболее активной зоны деформации.

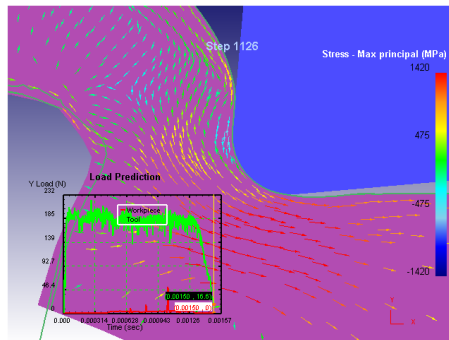


Рис. 3 – Распределение интенсивности напряжений в области формообразования поверхностного слоя

Пластическое течение материала начинается значительно раньше, чем частицы металла оказываются на условной плоскости сдвига, угол наклона которой существенно меньше (рис. 3).

Напряженное состояние не является неизменным в течение процесса. Как физически, так и численно это обусловлено неравномерностью разрушения материала перед зубом фрезы с учетом угла скольжения  $\Psi_{ск}$ . Очевидно, что дискретизация этого процесса связана с технологией численного расчета и значительно усиливает неравномерность. В момент разделения очередного узла сетки происходит разгрузка материала в прилегающей области и излучение упругих волн. Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига показано на рис. 4. Понятно, что в такой ситуации уровень напряжений вблизи лезвия будет циклически меняться, а

картина распределения напряжений зависит от местоположения лезвия инструмента в пределах расчетной ячейки, т.е. от момента времени. Именно с этим связана нестабильность процесса формообразования.

На рис. 4 представлены результаты расчета напряжений, действующих на условной линии сдвига, на рис. 5– изменение интенсивности скорости деформации частиц металла на пути превращения их в стружку. Изменение интенсивности скорости деформации  $\dot{\epsilon}_T$ , вначале плавно, а затем вблизи условной линии сдвига резко возрастает, после чего падает до нуля.

Наибольшая скорость деформации имеет место в слое, прилегающем к лезвию инструмента (кривая 4, рис. 5), наименьшая – в срединных слоях.

Однако, после прохождения условной линии сдвига, скорость деформации по всему сечению остается близкой к ее величине в срединных слоях при прохождении условной плоскости сдвига. При этом отрезок времени активной деформации существенно превышает период наиболее высокоскоростной пластической деформации.

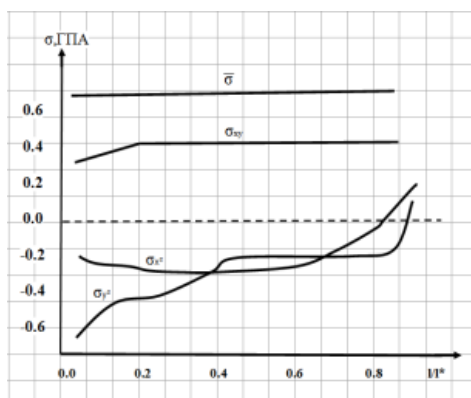


Рис.4 – Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига

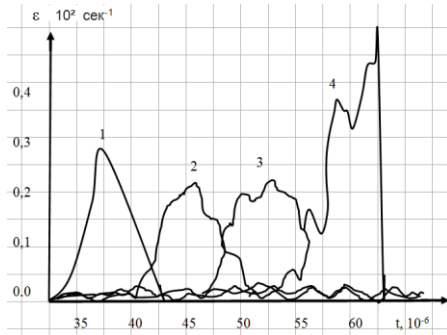


Рис.5 – Изменение интенсивности скорости деформации с течением времени

Сжатие материала, которое наблюдается в области, лежащей впереди зуба фрезы, сменяется интенсивным растяжением при приближении лезвия инструмента; это хорошо видно на рис. 6. Если вертикальная компонента напряжений (в силу граничных условий) после прохождения резца обращается в ноль (рис. 6, б), то для горизонтальной составляющей ситуация значительно отличается. Верхние слои уже обработанной детали вновь оказываются в состоянии сжатия (рис. 6, а).

В разработанной численной модели в качестве установочных параметров были использованы исходная геометрия инструмента, коэффициент трения и свойства материала заготовки. К числу модельных идеализаций относятся переменная толщина срезаемого слоя, радиус округления режущего лезвия и соответствующая схема отделения срезаемого слоя; модель упругопластического поведения материала.

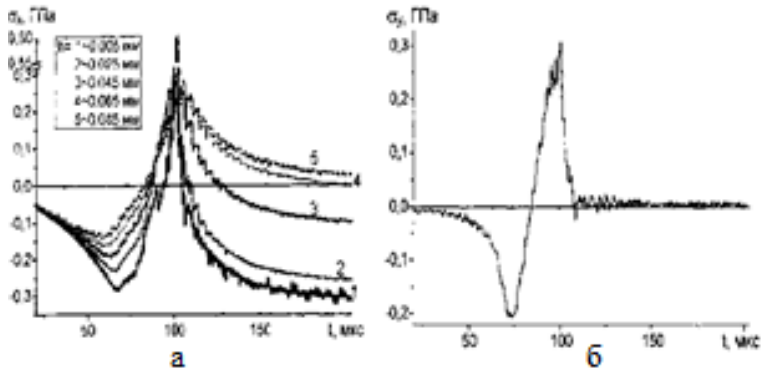


Рис. 6 – Изменение напряжений: а - по глубине поверхностного слоя, б - с течением времени по мере перемещения зуба фрезы



Разработанная на основании проведенных исследований численная модель достаточно хорошо описывает многие явления процесса зубофрезерования. Возможно и дальнейшее уточнение расчетов путем учета влияния температуры, задания переменного закона трения на передней грани и т.п.

Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным.

Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа.

При реализации технологии лезвийной обработки закаленных колес инструментами дискового типа предложены схемы резания I и II (рис. 7, а, б).

Для обработки зубчатых колес различного модуля необходимо регулировать установочное расстояние  $l_y$  между фрезами, которое ориентировочно можно определить по зависимости:

$$l_y = 3,98 \cdot m. \quad (11)$$

Возможна разновидность схемы IV, которую назовем схемой V, когда обработка правой и левой поверхностей зубьев производится отдельно путем установки на оправке вначале одной, например, левой фрезы, а затем правой. Обработка колеса производится в два прохода.

Достоинство схем резания III, IV, V по сравнению со схемами I, II заключается в возможности использования инструментов, размеры режущих кромок которых не зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса и значительно, в 3...7 раз меньше, чем размеры кромок инструментов, рассмотренных в работе.

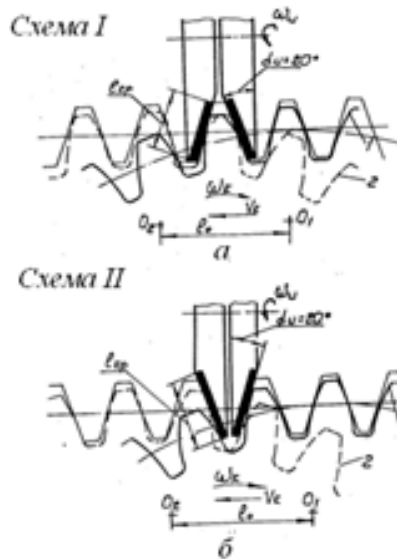


Рис. 7 – Технологические схемы резания дисковыми немодульными фрезами:  
*a* – схема одновременной обработки двух профилей одного зуба, *б* – схема  
одновременной обработки двух профилей соседних зубьев

Общим недостатком схем I и II является то, что в обоих случаях размеры режущих кромок зубьев  $l_{kp}$  инструмента зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса. При крупном модуле зубьев  $m = 18 \dots 36$  мм размеры кромок составляют  $l_{kp} = 45 \dots 90$  мм. Это усложняет процесс припоя твердосплавных зубьев и последующее затачивание инструмента или оснащение его керамикой и сверхтвердыми материалами. Инструмент такой конструкции имеет сравнительно большие периметры резания, что повышает силы резания и способствует возникновению вибраций.

Достоинство схем I и II в том, что оба инструмента расположены на одной и той же оправке, т.е. имеется возможность осуществить привод вращения от одного электродвигателя.

При схеме III (рис. 8,а) в качестве станочной линии зацепления пары инструмент – деталь используется нормаль к эвольвентам *ПК*, расположенная горизонтально. Профильный угол зубьев инструмента - дисковой фрезы близок к  $\alpha_u = 0^\circ$ . Фреза в первоначальный момент обработки расположена со смещением относительно оси колеса на расстоянии  $l_0$ , определяемом по следующей зависимости:

$$l_0 = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_a, \quad (12)$$

где  $r_b$  – радиус основной окружности зубьев;  $\alpha_a$  – угол профиля

эвольвенты на вершине зуба.

Обработка правой и левой боковых поверхностей зубьев колеса осуществляется раздельно, обработка ведется за два прохода.

Схема резания IV (рис. 8,б) предполагает одновременную обработку обеих боковых поверхностей зубьев колеса с использованием двух дисковых фрез, расположенных с наклоном на угол  $\alpha_p = 20^\circ$ . Профильный угол зубьев фрезы равен  $\alpha_p = 0^\circ$ .

Инструменты располагают с охватом одного или нескольких зубьев колеса. Однако с ростом числа зубьев в охвате увеличивается и путь обката, что снижает производительность обработки.

При схемах I и II режущие кромки инструментов полностью задействованы в обработке, точка контакта лезвия и зуба колеса перемещается по всей длине кромки. В этих условиях оснащение всего периметра режущей кромки керамическими пластинками из-за разности их размеров не позволит получить профиль зуба достаточно высокой степени точности.

Применение схем резания III, IV, V позволяет оснастить дисковые фрезы 4<sup>х</sup>-гранными керамическими пластинками марки ВОК-71 с размерами 12,7 x 12,7 мм. Инструмент при этом не требует затачивания и перетачивания, удобен в эксплуатации и ремонте. Так как обработка эвольвентных поверхностей зубьев производится практически одними и теми же участками пластин, то это повышает точность обработки профиля зубьев.

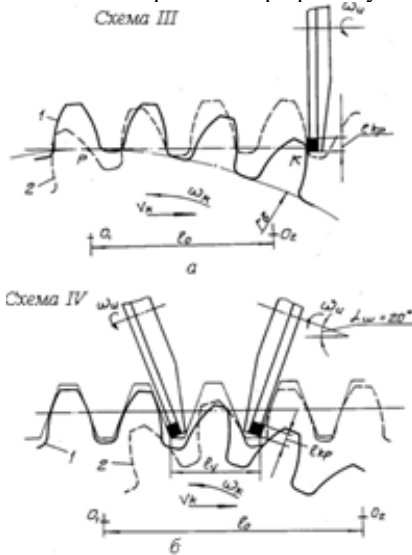


Рис.8 – Перспективные технологические схемы скоростного зубофрезерования: *a* - схема резания III; *b* - схема резания IV

В табл1 представлены расчетные значения длины пути обката, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев  $z_k = 25 \dots 100$  при модуле  $m = 28$  мм.

Таблица 1 – Расчетные значения длины пути обката

Схема резания	Путь обката $l_0$ , мм			
	Число зубьев колеса $Z_k$			
	25	50	75	100
I	218,1	218,1	218,1	218,1
II	213,9	229,0	233,7	239,4
III	296,4	308,2	313,2	316,2
IV	301,8	316,9	321,4	327,3
V	278,4	289,6	294,3	297,1

В табл. 2 представлены изменения параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев  $z_k = 25 \dots 100$  при модуле  $m = 28$  мм.

Таблица 2 – Изменение параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования

Схема резания	Параметры точности зубчатых колес, мкм				
	ГОСТ 1643-81				
	Нормы кинамитеской точности $F_r$	Нормы плавности $\pm f_{pt}$	Нормы бокового зазора $F_\beta$	Шероховатость поверхности и $R_a$	Параметр плавности $\pm f_{pt}$ после года эксплуатации
I	45	36	30	1,6	96
II	42	38	35	1,6	84
III	34	30	25	1,2	58
IV	36	28	26	1,1	50
V	32	30	25	1,4	56

Как видно из представленных в таблице данных, наименьший путь обката, а следовательно, и наибольшую производительность обработки, обеспечивает схема резания I. Для этой схемы путь обката не зависит от

числа зубьев обрабатываемых колес. Второй по производительности процесса является схема II. Однако эти схемы не позволяют использовать инструмент с уменьшенными размерами режущих кромок.

Из схем резания для дисковых фрез, оснащенных минералокерамикой (III, IV) наиболее эффективной является схема IV. Здесь путь обката наименьший, но необходимо учитывать величину вспомогательного времени, связанного с переустановкой инструмента и подналадкой заготовки колеса.

Схема III является второй по эффективности. Недостаток ее в том, что из-за большого исходного смещения инструмента относительно оси колеса на существующих тяжелых зубофрезерных станках возможна обработка косозубых колес только с наружным диаметром до 800 мм. Схема IV удобна в эксплуатации, т.к. не требует переустановки фрез.

В работе были приняты два направления. Первое заключалось в разработке несложных по конструкции специальных фрезерных суппортов, устанавливаемых на зубострогальных станках фирмы "МААГ" и реализующих схему резания III (рис. 8, а) [2, 78]. Второе учитывало разработку, изготовление и внедрение на заводах машиностроения специальных фрезерных суппортов к широко распространенным вертикально-зубофрезерным станкам. При этом реализовывались технологические схемы резания III и IV [1, 3, 5, 6, 8].

**Выводы.** Для обеспечения оптимальной долговечности и технологической надежности процесса формообразования зубчатых закаленных колес дисковыми фрезами разработаны схемы резания и рекомендации по выбору оптимальных технологических параметров обработки. Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным. Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа.

#### Список литературы

1. Тимофеев Ю. В. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 118. – С. 139–144.
2. Тимофеев Ю. В. Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Прикладная механ. ика. Издательство: Технологический центр (Харьков). Том 4, – № 7 (64) (2013). – С. 49–55.
3. Шелковой А. Н. Исследование динамики зубофрезерования крупномодульных закаленных зубчатых колес с помощью WAVLET-анализа [Текст] / А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации

машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева). (с. 106 – 115). **4.** Шелковой А. Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210. **5.** Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двухстороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 49. – С. 111–116. **6.** Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с. **7.** Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Вісник Донецького Національного технічного університету: зб. наук. пр. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДНТУ, 2013. – № 1 (10)'(2013). – С. 131–140. **8.** Клочко А. А. Области оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. А. Клочко, Ю. В. Тимофеев., А. Н. Шелковой // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 332–343. **9.** Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 274–280. 10.

#### Bibliography (transliterated)

**1.** Timofeev, U.V., A.A. Klochko and V. F. Shapovalov. *New technology high-speed machining of hardened gears coarse-grained special disc cutter* P. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinoprikladobuduvannya that transport." -Sevastopol, 2011. - VIP. 118. -C. 139-144. **2.** Timofeev U.V., A.A. Klochko and A.N. Kravtsov. *Optimization of technological support of operational properties of surfaces hardened gears coarse-grained [Text]*. East European Journal of advanced technologies: Applied clockworks Ica . Publisher: Technology Centre (Kharkiv). Volume 4, - No 7 (64) '(2013). - P. 49-55. **3.** Shelkovoy A.N., A. N. Kravtsov and A.A. Klochko. *Investigation of the dynamics of coarse-grained hobbing of hardened gears using WAVLET-analysis [Text]*. Problems of design and automation engineering industries: a collection of research laborP. - Volgograd: VolgGTU, Togliatti: Irbit: ЗАО "ONYX", 2013. - 208 p. : ill., Table. ; - (Series: Quality Management processes in engineering / under total. Ed. YM Solomentseva). (p. 106 - 115). **4.** Shelkovoy A.N., E.V. Mironenko and A.A. Klochko. *General principles of modeling the optimal control parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gear* P. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinoprikladobuduvannya that transport." - Sevastopol, 2013. - Vip. 140. - P. 203-210. **5.** Timofeev U.V., et al. *Processing Technology coarse-grained cogwheels Monohull cutters cutting with alternating double conical toothed rack* P. News Natsionalnogo tehchnogo universitetu "Harkivsky politehnychny institut ": ST. ScienceP. pr. temachnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU KhPI, 2010. - No 49. - pp 111-116. **6.** Kane M.M. et al. *Quality Management Engineering*. - Moscow: Mechanical Engineering, 2010. - 416 p. **7.** Timofeev U.V., et al. *Technological bases ensure productivity, accuracy and quality gear treatment quenched coarse-grained gear* P. News of Donetsk Natsionalnogo tehchnogo universitetu: ST. ScienceP. pr. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznnavstvo. - Donetsk: DNTU, 2013. - No 1 (10) '(2013). - P. 131-140. **8.** Klochko A.A., U.V. Timofeev and A. N., Shelkovoy. *Fields optimal. control the parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gear* P. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramators'k: DSEA, 2012. - Vol. 32. - P. 332-343. **9.**

Shelkovoy A.N., U.V Timofeev and A.A. Klochko.AN *Technological obpespechenie given system parameters of the surface layer of cylindrical gears hardened coarse-grained.*Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Vol. 32. - P. 274-280.

*Поступила (received) 05.02.2021*

УДК 621.91.01  
2

DOI: 10.20998/2079-004X.2021.1(3).02

**М.С. СТЕПАНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;  
**М.С. ІВАНОВА**, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»

## **СИЛОВІ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ОТВОРІВ КОМБІНОВАНИМ ОСЬОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ**

Досліджена осьова складова сили різання и крутний момент при послідовно-паралельній схемі різання комбінованим осьовим інструментом. Досліджений вплив кількості ступенів комбінованого осьового інструмента на сумарні силові навантаження та характер їх зміни при збільшенні кількості одночасно працюючих ступенів інструмента. Зроблено висновок про доцільну кількість одночасно працюючих ступенів комбінованого осьового інструмента.

**Ключові слова:** комбінований осьовий інструмент, режими різання, осьова сила різання, крутний момент, відведення стружки.

**М.С. СТЕПАНОВ, М.С. ІВАНОВА**  
**СИЛОВЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВОРОВ КОМБИНИРОВАННЫМ  
ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**