

УДК 621.924:52-17



**Ю.В. Петраков,**

д.т.н., професор,

Национальный технический  
университет Украины «Киевский  
политехнический институт»

e-mail: yp-86@yandex.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ

**Ю.В. Петраков.** *Моделирование отклонений формы поверхностей при круглом шлифовании.* Разработана математическая модель динамических процессов при круглом врезном шлифовании, учитывающая влияние переходных процессов и дисбаланса шлифовального круга на формообразование. Создана прикладная программа, моделирующая процесс шлифования и позволяющая исследовать влияние различных параметров технологической обрабатывающей системы и процесса резания на образование волнистости или огранки обработанной поверхности.

**Y.V. Petrakov.** *Simulation of shape surfaces rejections at the round grinding.* The mathematical model of the dynamic phenomena is developed at the round grinding, which takes into account influence of transients and disbalance of wheel on surface forming. The application program which simulates grinding process and allows to study influence of different parameters of the technological machining system and cutting process on a wash boarding or verging of the surface machining is created.

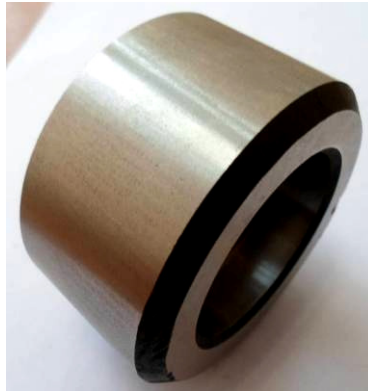
**Вступление.** Образование огранки или волнистости поверхности детали является довольно распространенным явлением на операциях круглого шлифования. В соответствии с [1] волнистость или огранка поверхности относятся к отклонениям формы, в частности, к отклонениям от круглости. Появление таких дефектов напрямую связано с динамическими явлениями при обработке резанием. Наибольшее влияние на появление волнистости или огранки при круглом шлифовании оказывает дисбаланс шлифовального круга [2].

К основным причинам, вызывающим появление неуравновешенности шлифовальных кругов относят [3]: погрешность геометрической формы, эксцентричность посадочного отверстия круга относительно его наружной поверхности, неравномерность структуры круга и смещение центра круга относительно его оси вращения вследствие зазора, образующегося между посадочным отверстием круга и планшайбой. Так или иначе практически дисбаланс имеет место всегда и оказывает существенное влияние на динамические процессы при шлифовании.

В целом, динамические процессы, приводящие к появлению на поверхности волнистости или огранки, зависят как от параметров технологической обрабатывающей системы (ТОС), так и от режима резания. Причем, если динамические характеристики ТОС изменить довольно трудно, то выбор режима резания выполняется при подготовке операции и может варьироваться в

определенном диапазоне. Поскольку динамический характер возмущений, действующих на ТОС при резании сильно зависит от сочетания составляющих режима резания, очень важно на этапе технологической подготовки операции оценивать такое влияние и учитывать при окончательном выборе режима шлифования.

Волнистость или огранка поверхности после операции шлифования может наблюдаться визуально и характеризуется переменной шероховатостью поверхности, а иногда наличием прижога во впадинах образовавшегося профиля (рис.1).



*Рис. 1. Огранка поверхности направляющего ролика прокатного стана*

Таким образом, проблема повышения качества операций круглого врезного шлифования путем выбора режима резания (сочетания составляющих) является актуальной научно-технической задачей.

**Постановка задачи.** Отклонения формы в виде волнистости или огранки являются следствием колебаний, возникающих в ТОС во время резания и взаимодействия инструментальной поверхности шлифовального круга с заготовкой. Таким образом, для исследования таких процессов необходимо составить математическую модель, которая адекватно отображает динамические характеристики ТОС, учитывает режим резания и геометрическое взаимодействие инструментальной поверхности шлифовального круга с заготовкой. Такая математическая модель, реализованная в виде прикладной программы, позволит оценить влияние всех главных параметров процесса на образование волнистости, выяснить причины и условия перехода волнистости в огранку, предложить методы устранения за счет правильного назначения режима резания во время технологической подготовки операции.

**Математическая модель.** Функциональная схема круглого врезного шлифования принципиально не отличается от функциональной схемы, разработанной в работе [4].

Эквивалентная упругая система (ЭУС) в направлении координаты  $Y$  находится под действием силового возбуждения от составляющей  $P_y$  силы ре-

зання и периодической силы инерции  $P_{ин}$  от дисбаланса шлифовального круга. Силовое возмущение вызывает упругую деформацию ЭУС, которая, вследствие замкнутости ТОС, влияет на взаимное расположение шлифовального круга и заготовки, а следовательно, на фактическую глубину  $H_{\phi}$  резания.

Математическая модель отличается то разработанной в работе [4] в части геометрического взаимодействия инструментальной поверхности шлифовального круга и расположения составляющих силы резания (рис.2).

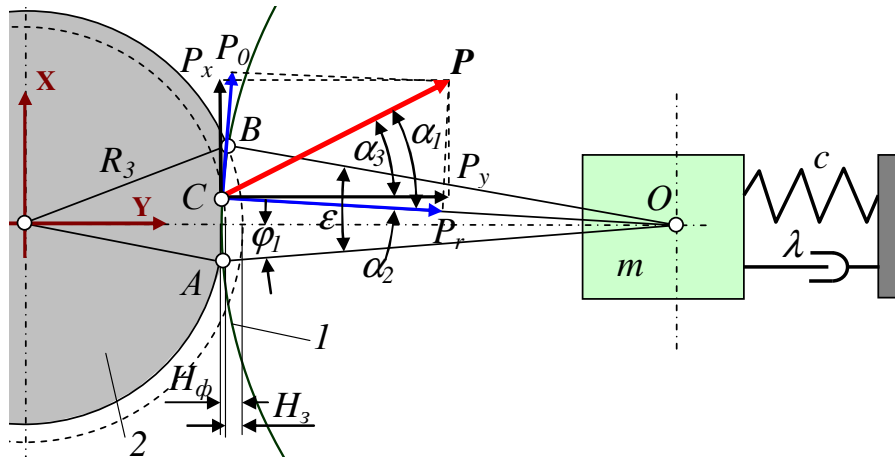


Рис. 2. Схема силового взаимодействия

Шлифовальный круг осуществляет резание по дуге контакта АВ и при этом создается сила резания  $P$ , которую можно разложить на две составляющие: радиальную  $P_r$  и окружную  $P_o$ . Окружная составляющая определяется по формуле [5]:

$$P_o = C_p \cdot (Q_v)^\alpha \cdot B, \quad (1)$$

где  $C_p$ ,  $\alpha$  – эмпирические коэффициент и показатель степени,  $Q_v$  – скорость удаления припуска,  $B$  – ширина резания.

Из геометрических построений схемы расположения векторов составляющих силы резания можно получить следующее соотношение между углами:

$$\alpha_2 = \frac{\varepsilon}{2} - \varphi_1, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – угол контакта шлифовального круга и заготовки.

Таким образом, с учетом известного из теории шлифования [3] соотношения между окружной и радиальной составляющими силы резания  $P_r = 2.5P_o$  и  $\alpha_3 = \alpha_1 - \alpha_2 = \arctan(2.5) + \varphi_1 - \varepsilon/2$ , после несложных преобразований можно получить формулу для расчета составляющей  $P_y$  силы резания:

$$P_y = 2,69 \cdot P_o \cdot \cos\left(1,19 + \varphi_1 - \frac{\varepsilon}{2}\right). \quad (3)$$

Сила  $P_{ин}$  инерции от дисбаланса определяется по формуле:

$$P_{ин} = \omega^2 \cdot db \cdot \cos(\omega t), \quad (4)$$

где  $\omega$  – частота вращения круга (рад/с),  $db$  – дисбаланс (кг·м).

Математическая модель ЭУС в первом приближении может быть представлена одностепенной динамической системой по координате  $Y$ , нормальной к обрабатываемой поверхности (смотри рис.2), которая находится под действием силового возбуждения в виде составляющей  $P_y$  силы резания с учетом постоянной времени  $T_p$  стружкообразования процесса резания [6] и силы  $P_{ин}$  инерции от дисбаланса шлифовального круга. Таким образом, математическая модель представляется в виде следующего дифференциального уравнения:

$$T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y + P_{ин} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + cy, \quad (5)$$

где  $m$ ,  $\lambda$ ,  $c$  – приведенная масса, коэффициент вязкого трения и приведенная жесткость ЭУС соответственно.

Используя полученные математические зависимости (1)-(5), можно составить структурную схему процесса шлифования (рис.3).

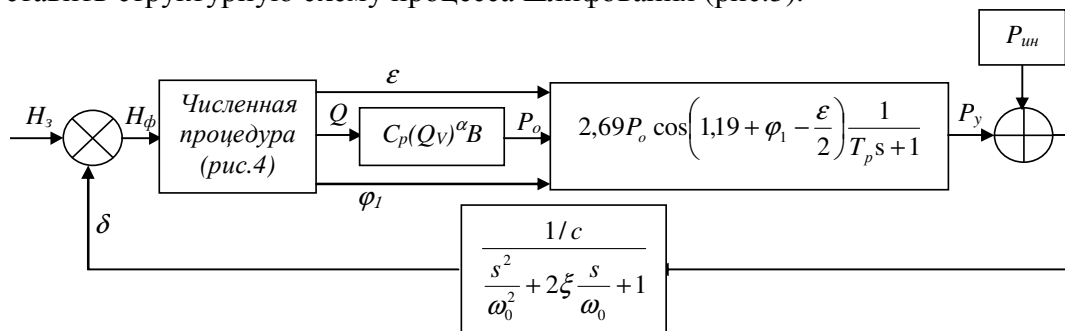


Рис.3. Структурная схема ТОС шлифования

На структурной схеме для ЭУС использована ее передаточная функция, полученная из стандартной формы представления уравнения движения (5), со следующими обозначениями:  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$  – собственная частота колебаний системы,  $\xi = \lambda/(2Tc)$  – коэффициент затухания колебаний.

На структурной схеме блок геометрического взаимодействия представлен численной процедурой, которая автоматически, во время моделирования определяет координаты точек входа и выхода периферии шлифовального круга в зоне резания при любом положении его центра в ходе колебаний ТОС. Такая процедура, алгоритм которой представлен на рис.4, хорошо себя зарекомендовала при решении плоских задач взаимодействия инструмента и заготовки [7] и позволяет рассчитывать главную характеристику процесса шлифования – аналог скорости срезания припуска. Кроме того, в эту проце-

дуру входить процедура перестроєння образованшого на каждом шаге моделювання профіля заготовки. Благодаря этому в процессе моделирования автоматически образуется массив профиля заготовки  $R_3[i]$ , сформированный периферией шлифовального круга, который и определяет форму поверхности детали.

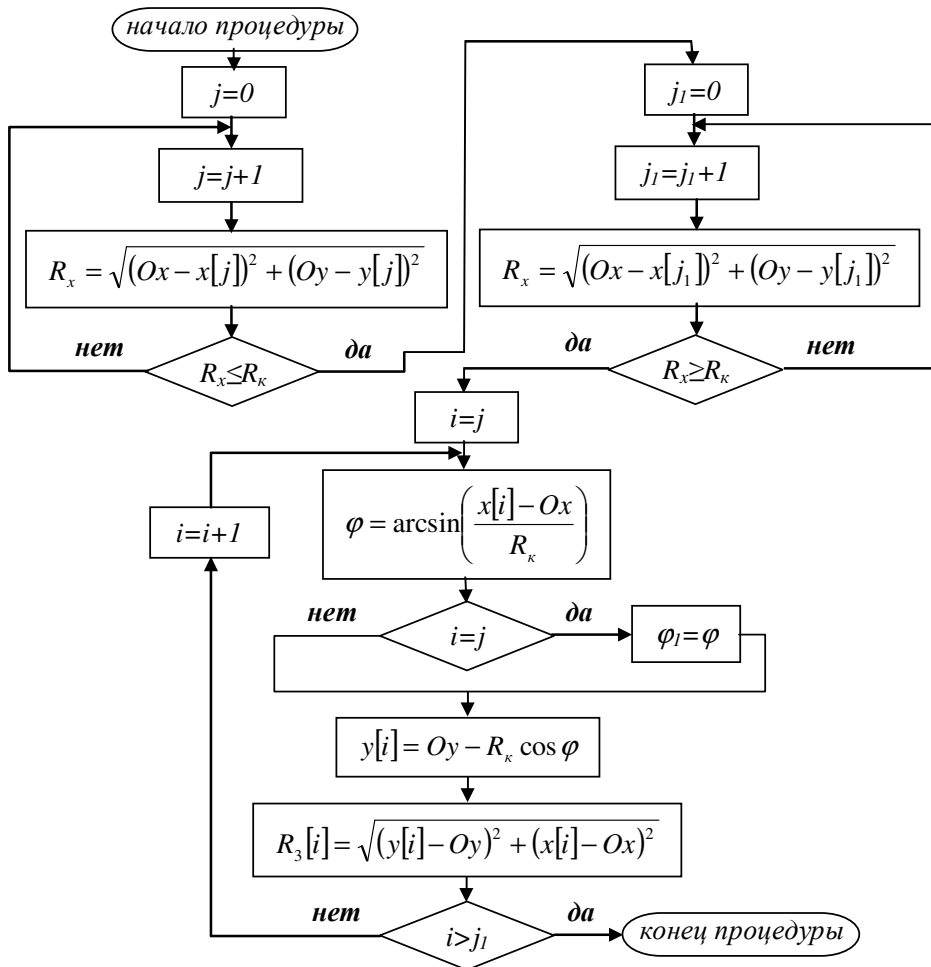


Рис. 4. Алгоритм численной процедуры моделирования геометрического взаимодействия:  $j$  - номер точки входа,  $j_1$  - номер точки выхода

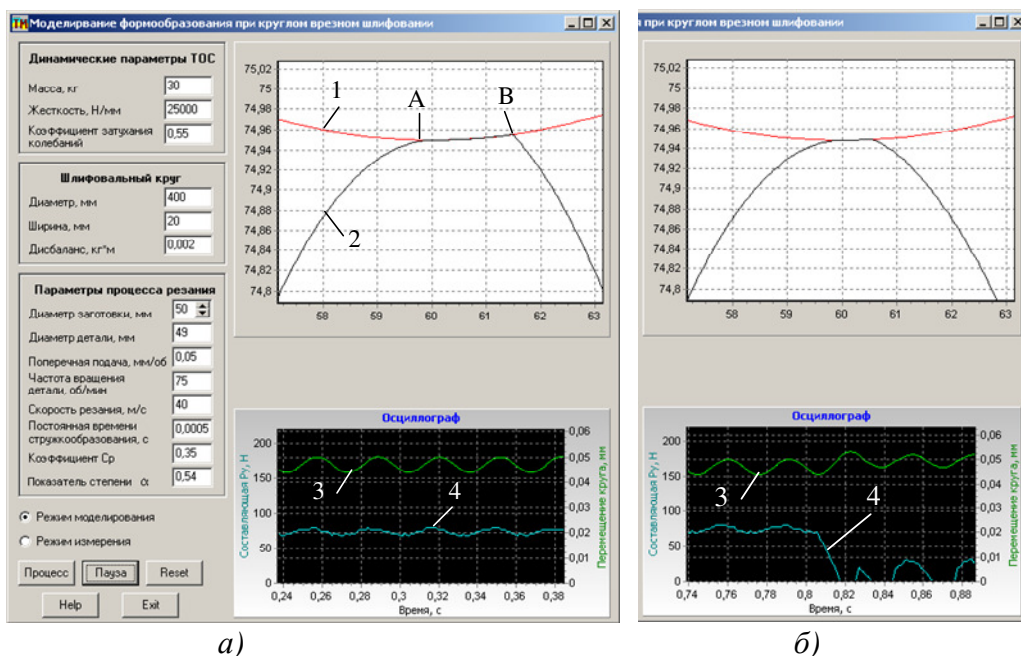
Окончательно скорость срезания припуска, которая используется в (1) рассчитывается по формуле:

$$Q_V = \frac{L_k^2}{2} \cdot S_3, \quad (6)$$

где  $L_k$  – дуга контакта,  $S_3$  – частота вращения заготовки.

**Результаты исследований.** Для проведения исследований динамических явлений, которые сопровождают процесс круглого врезного шлифования была создана прикладная программа, интерфейс которой представлен на рис.5. Слева на интерфейсе расположены окна для ввода исходных данных, внизу – кнопки управления, справа расположены графические окна с анимационным изображением процесса формообразования (вверху) и виртуальный осциллограф (внизу) для вывода на экран составляющей  $P_y$  силы резания и перемещения центра шлифовального круга в функции времени.

Исследования проводились с целью определения влияния режима резания на волнистость поверхности детали, а именно, влияние частоты вращения детали. Для этого при одинаковых исходных данных моделировался процесс шлифования с заданной глубиной резания 0,05мм при изменении частоты вращения детали в диапазоне от 60 об/мин до 135 об/мин с шагом 5 об/мин и оценивалась высота волнистости на первом проходе выхаживания. На рис.5: 1 – шлифовальный круг, 2 – контур заготовки, дуга АВ – дуга резания, линия 3 – перемещение центра шлифовального круга, линия 2 – составляющая  $P_y$  силы резания.



а)

б)

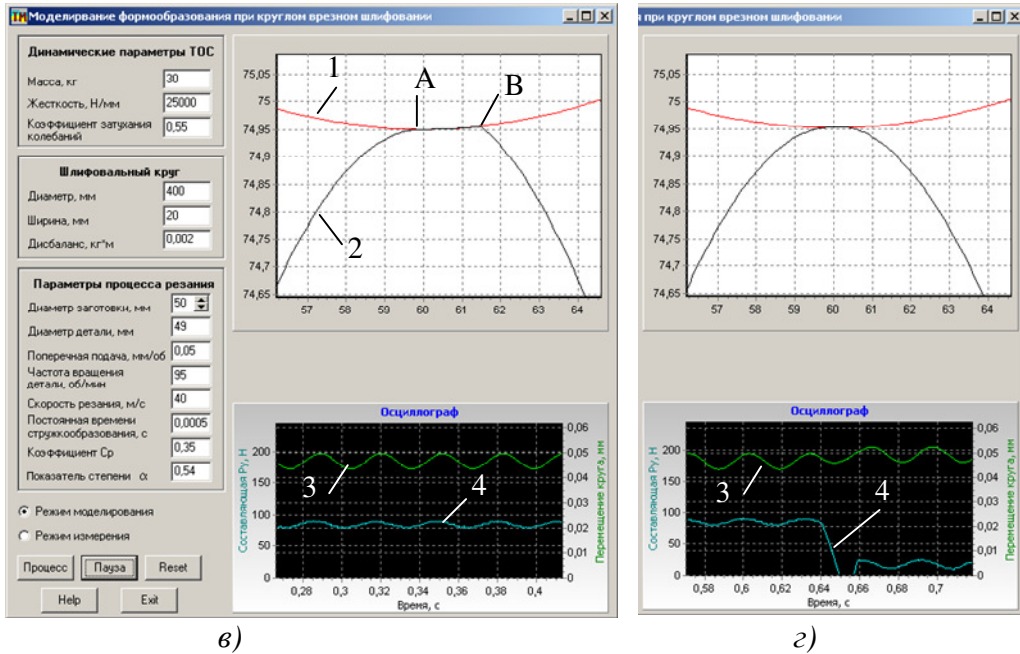


Рис. 5. Интерфейс прикладной программы во время моделирования

Из анализа полученных результатов следует, что, не смотря на относительно небольшое изменение частоты вращения детали, характер процесса резания на первом обороте выхаживания существенно меняется. Если при частоте вращения детали 75 об/мин на первом обороте выхаживания резание происходит только на некоторых участках поверхности, то при 95 об/мин – резание по всей поверхности, хотя периодический характер процесса сохраняется в обоих случаях.

Обнаруженный феномен объясняется тем, что, вследствие колебаний ТООС, образовавшаяся на первом проходе волнистость в зависимости от частоты вращения детали находится в фазе или в противофазе с колебаниями ТООС.

Когда фазы не совпадают, происходит неравномерное срезание припуска, на выступах волнистости, образовавшейся на первом проходе (рис.5, б) в результате чего высота волнистости уменьшается.

Когда фазы совпадают, то происходит резание по всей поверхности – срезается припуск, оставшийся от упругих деформаций и волнистость не уменьшается (рис.5, г).

Для количественной оценки высоты волнистости используется следующий режим работы прикладной программы - «Режим измерения» (рис.6, а). В этом режиме изображение профиля детали может быть увеличено и с помощью движка «поворот заготовки» повернуто для удобства выполнения измерений.

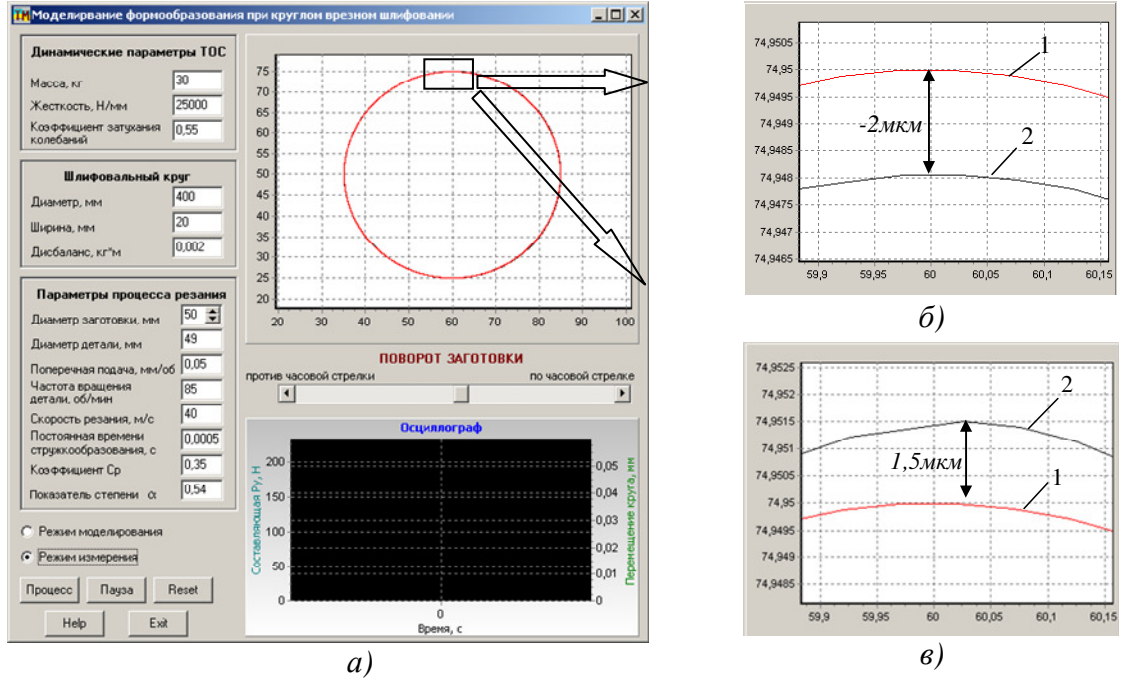


Рис. 6. Інтерфейс програми в режимі вимірювань

На рис.6, б и в показаны увеличенные участки профиля заготовки, где линия 1 представляет идеальный профиль детали (окружность), а линия 2 – полученный профиль детали.

Максимальные отклонения профиля от номинальной окружности определяются по соответствующим шкалам, расположенным слева графического окна. Высота образовавшейся при этом режиме шлифования волнистости составляет 3,5 мкм. Результаты проведенных экспериментов в графическом виде представлены на рис.7.



Рис. 7. Графіки залежності висоти хвилюватості від частоти обертання заготовки



## **Выводы**

1. Установлено, что волнистость поверхности при круглом врезном шлифовании существенно зависит от режима резания, в частности, от частоты вращения детали.

2. Разработанная математическая модель круглого врезного шлифования с учетом динамических параметров ТОС и созданная прикладная программа могут использоваться для определения направлений снижения волнистости на этапе технологической подготовки операции - выбора параметров ТОС и назначения режима резания.

## **Литература**

1. ГОСТ 24642-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. Межгосударственный стандарт. Группа Г00. с.118-162.

2. Братан С.М., Сазонов С.Е., Титков В.А. Разработка методов снижения волнистости поверхности на операциях шлифования. Оптимізація виробничих процесів. Вип. 10, зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2007. - с.107-110.

3. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. М., «Машиностроение», 1977, 391 с.

4. Петраков Ю.В., Кравець Н.А. Моделювання утворення хвилястості і ограновування поверхні при плоскому шліфуванні. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки», вип. 31, Луцьк, 2011.- с. 245-252.

5. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. Вид. УкрНДІАТ, Київ, 2004, 383с.

6. Оборский Г.А., Линчевский П.А., Оргиян А.А., Мацей Р.А. Обобщение представлений о динамической характеристике процесса резания. Праці Одеського політехнічного університету. Вип. 1 (38), 2012. – с.66-70.

7. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ. Вид. «Січкарь», Київ, 2011, 222с.