

Ф.В. НОВИКОВ, докт. техн. наук (г. Харьков)

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Розглянуті умови підвищення точності і продуктивності механічної обробки з урахуванням пружних переміщень в технологічній системі.

Conditions of increase of accuracy and productivity of machining are considered in view of elastic movings to technological system.

Вопросы повышения точности и производительности механической обработки чрезвычайно актуальны для машиностроения. Им посвящены многочисленные научные труды, в том числе наши публикации [1–6], в которых установлены аналитические зависимости для определения параметров точности и производительности обработки с учетом упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Применительно к лезвийной обработке величина упругого перемещения y описывается зависимостью [3]:

$$y = \frac{R \cdot b}{c} \cdot (4 \cdot HV)^{0,67} \cdot (\alpha \cdot \tau_{сдв})^{0,33}, \quad (1)$$

где $\alpha = a/R$; a и b – толщина и ширина среза, м; R – радиус округления вершины режущего инструмента, м; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; HV , $\tau_{сдв}$ – соответственно твердость и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м².

Условие стружкообразования при резании выполняется при значениях $\alpha > 0,04$.

Из зависимости (1) следует, что основным путем уменьшения величины y и соответственно повышения точности обработки является уменьшение радиуса R . Это, в частности, достигается за счет перехода от лезвийной к абразивной обработке, рис. 1. Кроме того, уменьшить y можно уменьшением ширины резания b и соотношения $\alpha = a/R$ (толщины среза a) до минимально возможного значения, а также увеличением $c \rightarrow \infty$ (в том числе за счет применения методов пластического деформирования металлов, например, при обработке высокоточных отверстий с использованием рейберов).

Проведем анализ зависимости для определения упругого перемещения y в технологической системе при продольном (тонком) точении (рис. 2), представляя зависимость (1) в виде:

$$y = \frac{t \cdot R}{c \cdot \cos \varphi} \cdot (4 \cdot \text{HV})^{0,67} \cdot (\alpha \cdot \tau_{\text{сшв}})^{0,33}, \quad (2)$$

где t – глубина резания, м; φ – угол резца в плане; $a = S_0 \cdot \cos \varphi$; S_0 – продольная подача на один оборот детали, м/об.

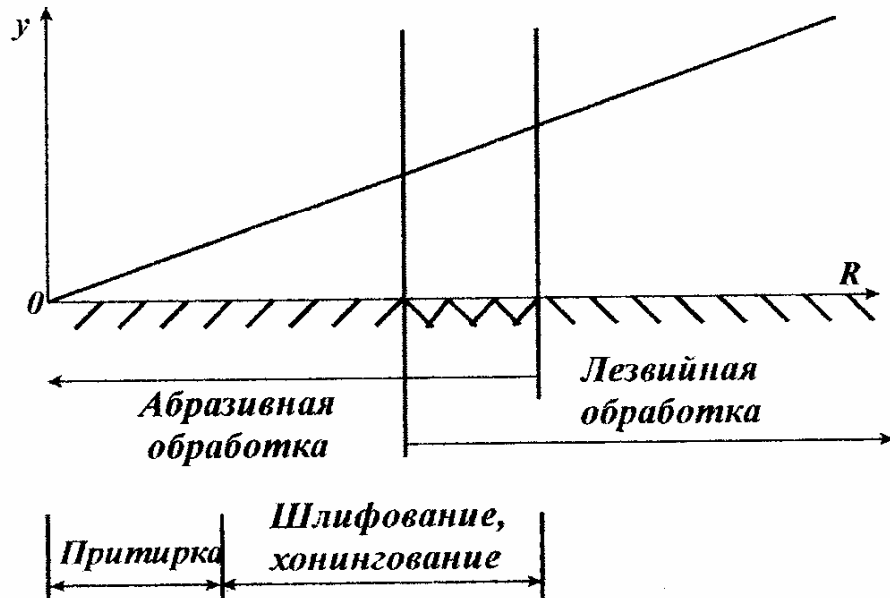


Рисунок 1 – Характер изменения величины упругого перемещения y от R при условии $\alpha = \text{const}$.

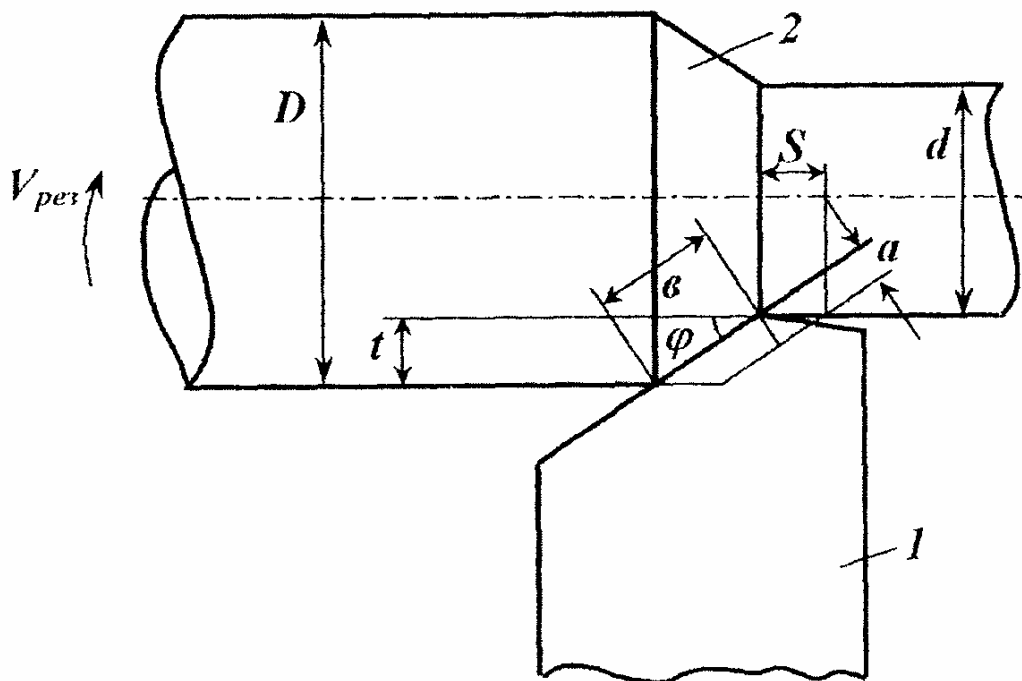


Рисунок 2 – Расчётная схема продольного точения: 1- резец, 2 – деталь.

Из зависимости (2) следует, что уменьшить величину y можно уменьшением параметров t , R и увеличением c . Однако уменьшение глубины резания t ведет к снижению производительности обработки. Следовательно, эффективно увеличивать жесткость c и уменьшать радиус R . Так как величина c ограничена, основным путем уменьшения y следует рассматривать уменьшение R , т.е. необходимо обеспечить высокую остроту режущей кромки инструмента. Это достигается применением как лезвийных, так и абразивных инструментов. Большими возможностями в этом плане располагают алмазно-абразивные инструменты благодаря высокой остроте режущих кромок алмазных зерен. При этом важно обеспечить своевременное удаление с рабочей поверхности круга затупившихся зерен с увеличенным радиусом R .

Приведенная, как пример, зависимость (2) открывает новые возможности анализа и выбора оптимальных способов финишной обработки. Например, по изменению радиуса R можно проанализировать с единых позиций все известные способы лезвийной и абразивной обработки с точки зрения обеспечения наибольшей точности и производительности обработки. При этом большое значение имеет управление коэффициентом α путем установления правильного соотношения между толщиной среза a и радиусом округления режущей кромки инструмента R .

Как известно, с точки зрения улучшения процесса стружкообразования при резании коэффициент α необходимо увеличивать за счет увеличения толщины среза a и уменьшения радиуса R . Исходя из зависимости (2), с целью уменьшения упругого перемещения y в технологической системе коэффициент α следует уменьшать до минимально возможного значения, при котором возможно стружкообразование. Например, экспериментально установлено, что процесс стружкообразования при микрорезании единичным зерном наиболее интенсивно протекает при значениях коэффициента $\alpha > 0,35$. Как отмечалось выше, при $\alpha < 0,04$ процесс стружкообразования прекращается, т.е. обрабатываемый металл подвергается лишь упругому и упруго-пластическому деформированию без отделения стружки.

Таким образом, существует оптимальное (с точки зрения обеспечения высокой точности обработки) значение коэффициента α . Однако, данный коэффициент входит в зависимость (2) с относительно небольшой степенью – 0,33. Поэтому, решать задачу уменьшения величины упругого перемещения y необходимо, прежде всего, за счет изменения параметров, которые входят в зависимость (2) с большей степенью, – это параметры t , R , c . Как отмечалось выше, более эффективно – за счет уменьшения радиуса R . Однако, при этом следует иметь в виду то, что с уменьшением R увеличивается коэффициент $\alpha = a/R$. Поэтому, для поддержания на заданном

уровне коэффициента α необходимо уменьшать толщину среза a и соответственно продольную подачу S_0 и производительность обработки.

Из этого вытекает, что между параметрами, входящими в зависимость (2), существует сложная связь. С одной стороны, радиус R входит в числитель зависимости, а с другой стороны, – в знаменатель зависимости, но с меньшей степенью – 0,33. В итоге радиус R входит в зависимость со степенью 0,67 и его необходимо уменьшать с целью уменьшения величины u . Коэффициент α при этом будет увеличиваться, а производительность обработки останется неизменной. При таком подходе не будет нарушаться условие стружкообразования $\alpha > 0,04$, т.к. коэффициент α будет увеличиваться с уменьшением R , усиливая интенсивность процесса стружкообразования.

Предложенный теоретический подход принципиально отличается от известных и описанных в научно-технической литературе подходов, которые не учитывают коэффициент α в расчетных зависимостях. Из-за неучета коэффициента α в расчетных зависимостях рекомендуемые условия резания могут находиться в области $\alpha < 0,04$, в которой процесс резания (стружкообразования) неосуществим. Учет коэффициента α при расчетах, по сути, обеспечивает выполнение физического закона сохранения энергии при резании.

Анализируя зависимость (2) следует обратить внимание на то, что параметры HV и $\tau_{сдв}$, определяющие твердость и прочность обрабатываемого материала, не в одинаковой степени влияют на величину упругого перемещения u . Твердость HV в большей степени влияет на u , чем предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг $\tau_{сдв}$. Это означает, что упругие перемещения и точность обработки, в первую очередь определяет твердость материала, т.е. чем тверже материал, тем труднее добиться требуемой точности обработки.

Из зависимости (2) можно сделать еще один важный вывод. Уменьшая α до значений, ниже 0,04, мы переходим в область пластического деформирования металла (без отделения стружки), что приводит к уменьшению величины u . Уменьшение коэффициента α следует обеспечить за счет уменьшения толщины слоя деформируемого металла a .

Соотношение $t/\cos\varphi$ в зависимости (2) равно ширине резания. Чем меньше эта величина, тем меньше u . В этом плане эффективна, например, обработка выглаживателем и другими инструментами для пластического деформирования обрабатываемого материала, обеспечивающими уменьшение ширины обработки. Данный процесс обработки может быть осуществлен с минимальными толщинами a , что предполагает выход практически на нулевые значения u . Радиус R при этом не играет той определяющей роли в процессе, как при резании. Радиус R должен принимать

значения, при которых $\alpha = \frac{a}{R} \rightarrow 0$ (за счет уменьшения толщины a). Из этого вытекает эффективность применения различных инструментов для обработки металлов пластическим деформированием, в особенности обработки поверхностей отверстий, когда контактная жесткость c (входящая в зависимость (2)) неограниченно увеличивается $c \rightarrow \infty$ и приводит к выполнению условия $y \rightarrow 0$.

Рассмотрим связь между производительностью обработки Q и величиной y (при точении), исходя из зависимости

$$Q = (y \cdot c)^3 \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{\diamond}}{4 \cdot t \cdot R \cdot HV} \right)^2 \cdot \frac{V_{\text{рез}}}{\tau_{\text{сдв}}}, \quad (3)$$

где $Q = a \cdot b \cdot V_{\text{рез}}$, м³/с; $V_{\text{рез}}$ – скорость резания, м/с; t – глубина резания, м; φ – угол резца в плане.

На рис. 3 приведена структурная схема условий повышения производительности обработки Q . Исходя из зависимости (3), наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывают величины y и c , входящие в третьей степени. Следовательно, уменьшение y (т.е. повышение точности обработки) существенно снижает производительность обработки Q и требует применения технологического оборудования повышенной жесткости. Если возможности увеличения жесткости системы c ограничены, необходимо уменьшить параметры t , R и φ , которые входят в зависимость (3) во второй степени. Уменьшение R предполагает применение лезвийных инструментов из высокотвердых материалов, например, синтетических сверхтвердых материалов: синтетических алмазов, кубического нитрида бора и т.д. При этом инструмент должен обладать высокой стойкостью, т.е. длительное время сохранять высокую остроту режущей кромки и производить резание с весьма малыми значениями R .

Наибольшего эффекта от уменьшения R можно добиться при абразивной и главным образом алмазно-абразивной обработке, применяя мелкозернистые инструменты и процессы алмазного шлифования, хонингования, притирки и т.д. Например, для поддержания в процессе шлифования высокой остроты алмазного круга эффективно использовать бесконтактные электрофизико-химические методы правки круга на металлической связке или комбинированные процессы алмазного шлифования с введением в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электроимпульсных разрядов или электрохимического растворения металлической связки и продуктов обработки.

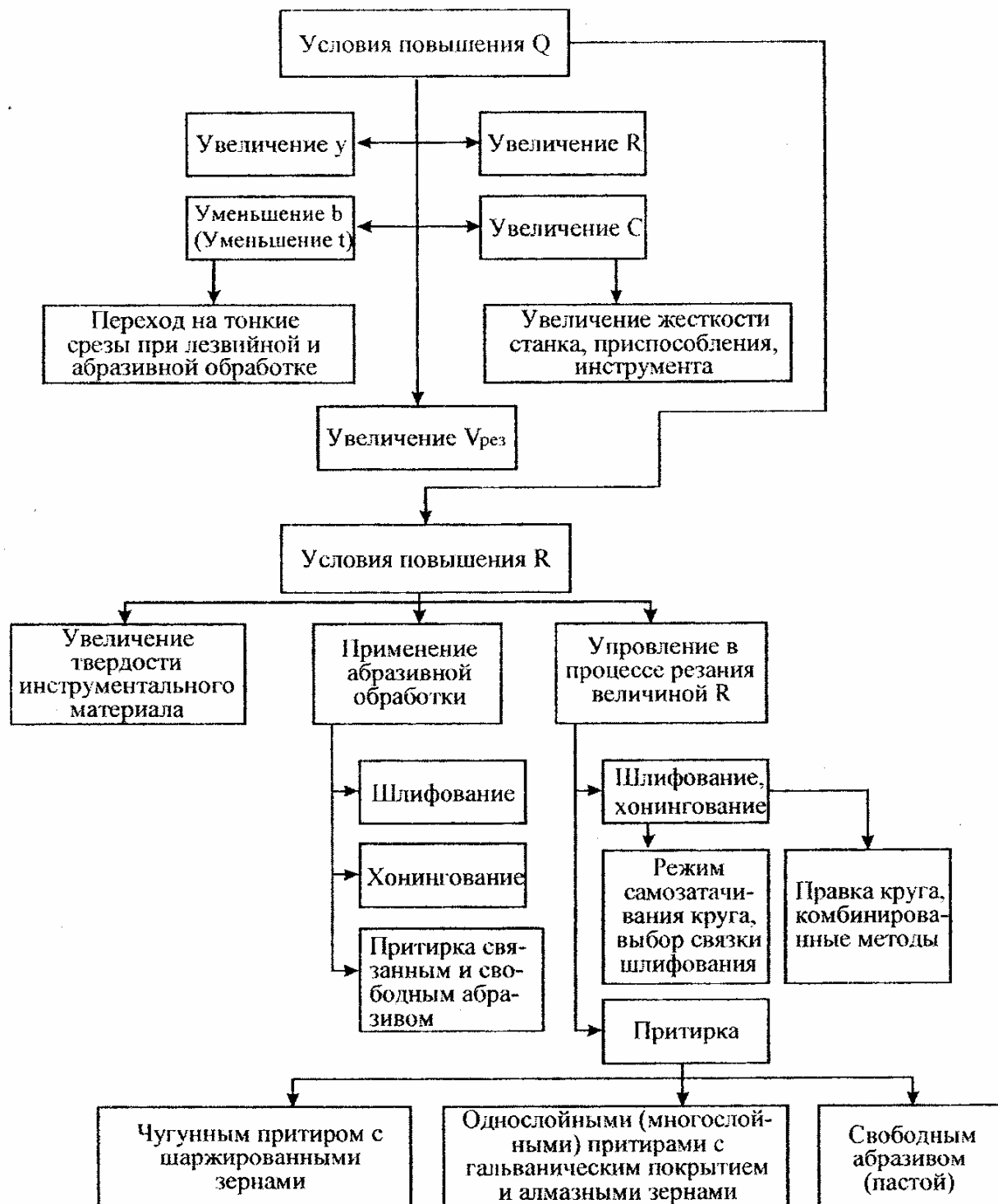


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема условий повышения производительности обработки Q.

Чрезвычайно большие возможности процессов шлифования в плане уменьшения величины R и соответственно обеспечения высокой производительности обработки Q при заданном значении y, предопределили их широкое практическое использование. В настоящее время существуют десятки различных кинематических схем шлифования, применяемых для

обработки различной степени сложности поверхностей деталей и агрегатов. Для выявления их потенциальных возможностей важно с единых позиций на основе создания математических моделей провести сравнительную оценку, принимая в качестве целевой функции производительность, основного технологического ограничения – точность обработки.

Из зависимости (3) следует чрезвычайно большое влияние характеристик обрабатываемого материала на производительность обработки Q . С увеличением прочности $\tau_{сдв}$ и особенно твердости HV обрабатываемого материала производительность обработки существенно уменьшается. Этим объясняются сложности финишной обработки деталей из высокотвердых материалов.

С увеличением скорости резания $V_{рез}$ при точении прямо пропорционально увеличивается производительность обработки Q . Однако рост $V_{рез}$ ограничен действием возникающих при резании тепловых процессов, которые приводят, во-первых, к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей, во-вторых, к потере режущих свойств инструмента, его износу, затуплению и увеличению R , что согласно зависимости (3), снижает производительность обработки Q . Следовательно, уменьшение $V_{рез}$ требует применения инструментальных материалов, способных противостоять действию температурного фактора или обеспечить быстрый отвод тепла из зоны резания. К ним следует отнести синтетические сверхтвердые материалы. Уменьшить температуру резания можно также за счет использования эффективных смазочно-охлаждающих технологических сред.

Как видим, производительность обработки Q определяется механическими и тепловыми процессами, происходящими в зоне резания, обобщенно выражаемыми связью параметров $V_{рез}$ и R . Чем больше $V_{рез}$, тем больше (очевидно) параметр R , что в конечном итоге может привести к уменьшению производительности обработки Q . Исходя из этого, можно предположить о существовании оптимальных соотношений между параметрами $V_{рез}$ и R , при которых производительность обработки Q достигает максимального значения, т.е. поиск эффектов обработки необходимо производить на основе анализа соотношения параметров $V_{рез}$ и R , важного резерва интенсификации механической обработки. Для реализации предложенных путей повышения производительности обработки Q необходимо обеспечить условие стружкообразования при резании, т.е. заданное значение отношения $\alpha = a/R$, которое определяется из зависимости

$$\frac{a}{R} = \left(\frac{y \cdot c \cdot \sin \varphi}{t \cdot R} \right)^3 \cdot \frac{1}{(4 \cdot HV)^2 \cdot \tau_{сдв}} \quad (4)$$

На рис. 4 приведена структурная схема условий обеспечения заданного значения отношения a/R .

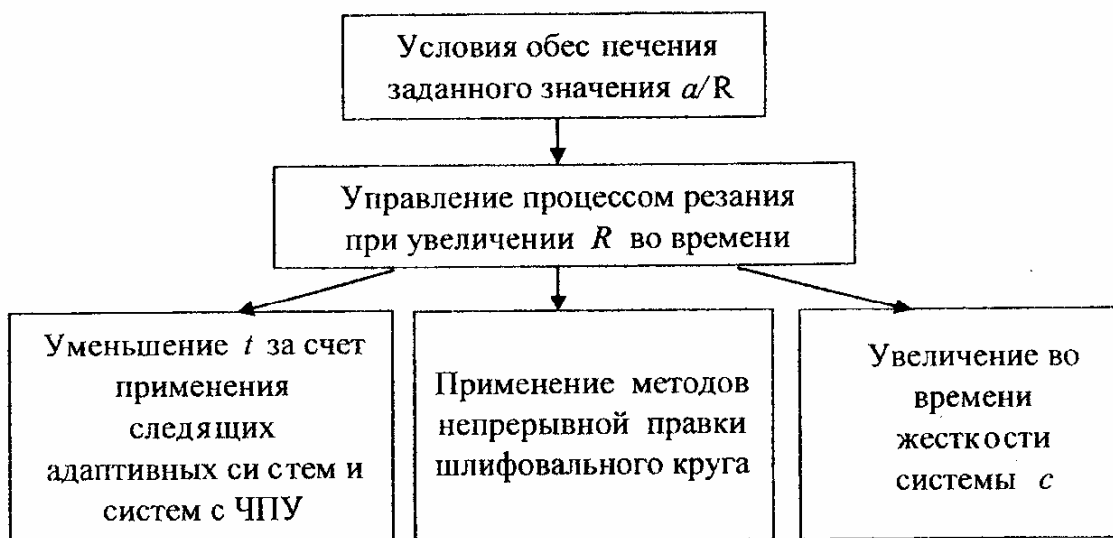


Рисунок 4 – Структурная схема условий обеспечения заданного значения отношения a/R .

Из зависимостей (3) и (4) следует одинаковый характер влияния параметров процесса на производительность обработки Q и отношение a/R , т.е. по сути, отношение a/R определяет производительность обработки. Большому значению a/R соответствует большее значение Q .

Проведенный теоретический анализ определяет основные пути решения задач повышения производительности и точности финишной обработки. Следуя предложенному научному подходу, появляется возможность вполне обоснованного выбора оптимальных способов и условий обработки высокоточных поверхностей, проведения научно обоснованной структурно-параметрической оптимизации обработки.

Список литературы: 1. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с. 2. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с. 3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 4. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. “Точность обработки деталей машин”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.

Поступила в редакцию 20.03.06