

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ ФАКТОРУ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф., Рябенков И.А.
(Харьковский национальный экономический университет)

Традиционно задачи повышения качества обработки решаются за счет снижения режимов резания, однако это, как известно, ведет к уменьшению производительности обработки и малоэффективно [1]. Гораздо эффективнее использовать более прогрессивные методы обработки, для чего необходимо знать их технологические возможности, уметь проводить сопоставимые сравнения и выбор оптимальных вариантов операций обработки на основе математического представления физических и технологических параметров обработки. Все это требует обоснования технологических закономерностей формирования параметров качества при абразивной и лезвийной обработках с учетом температурного фактора. Важными решениями в этом плане следует рассматривать результаты исследований теплофизики процессов механической обработки, в особенности мгновенной и средней температур при шлифовании. Они, как установлено, в совокупности позволяют раскрыть физическую сущность тепловых процессов при шлифовании и определить основные условия повышения качества и производительности обработки, однако не достаточно изучены и требуют дальнейших исследований. Поэтому целью работы является теоретическое обоснование путей повышения качества и производительности при абразивной и лезвийной обработках с учетом температурного фактора.

В основу решений положены расчетные схемы микрорезания отдельным зерном (резцом) и шлифования, рис. 1. Общим в этих схемах является то, что снимаемый припуск условно представлен множеством бесконечно тонких адиабатических стержней, которые перерезаются со скоростью $V_{рез}$, определяющей скорость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Согласно теоретическому подходу, предложенному в работе [2], адиабатический стержень разделен на два участка с длинами l_1 и l_2 . Длина l_1 соответствует перерезанной части стержня и определяет долю тепла, уходящего в образующиеся стружки. Длина l_2 равна глубине распространения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала вследствие его теплопроводности и определяет долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. На основе учета баланса тепла, образующегося при резании, установлено, что наибольшая температура θ , достигаемая в точке A (рис. 1,а), и длина l_2 для схем микрорезания отдельным зерном и шлифования описываются одними и теми же аналитическими зависимостями, отличающимися лишь параметрами $V_{рез}$ и σ :

$$\theta = \theta_{max} \cdot z; \quad l_2 = a \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}; \quad \bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V_{рез} = -\ln(1-z) - z, \quad (1)$$

где $\theta_{max} = \sigma / c \cdot \rho$ – максимально возможная мгновенная температура, К; σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; z – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1; \bar{l}_1 – безразмерная величина; a – толщина среза, м.

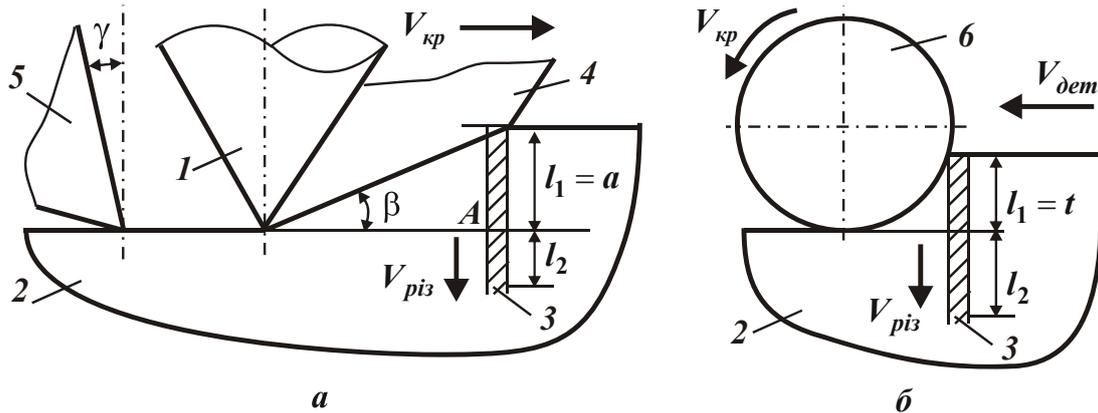


Рис. 1. Расчетные схемы микрорезания отдельным зерном (резцом) (а) и шлифования (б): 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень; 4 – стружка; 5 – резец; 6 – шлифовальный круг.

Установлено, что при микрорезании отдельным зерном $V_{рез} = V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta$, а при шлифовании $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{t / 2 \cdot R_{кр}}$, где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; t – глубина шлифования, м; $R_{кр}$ – радиус круга, м. Условное напряжение резания σ при шлифовании больше, чем при микрорезании отдельным зерном, т.к. в этом случае обрабатываемый материал контактирует не только с режущими зернами, но и со связкой круга, вызывая интенсивное трение в зоне резания. Поэтому температура, возникающая при шлифовании, по физической сути является средней, а при микрорезании отдельным зерном – мгновенной.

Из зависимости (1) следует, что при микрорезании отдельным зерном с увеличением скорости $V_{рез}$ (увеличением скорости круга $V_{кр}$ и толщины среза a) относительная величина температуры z и соответственно мгновенная температура непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к единице, рис. 2,а. В этом случае практически все тепло, выделяющееся при резании, уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь уходит незначительная часть тепла. Параметр l_2 с увеличением скорости круга $V_{кр}$ уменьшается, а с увеличением толщины среза a увеличивается, рис. 2,б. Из этого вытекает, что уменьшить параметр l_2 и добиться повышения качества обработки можно за счет существенного увеличения скорости круга $V_{кр}$ – путем перехода в область

высокоскоростного шлифования, обеспечивая при этом мгновенную температуру θ ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Для выполнения данного условия, исходя из зависимости (1), необходимо уменьшить условное напряжение резания:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \operatorname{tg} \left(45^{\circ} + \frac{\psi - \gamma}{2} \right) = \sigma_{сж} \cdot \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2} \right), \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; γ – положительный передний угол инструмента (абразивного зерна); ψ – условный угол трения передней поверхности инструмента с образующейся стружкой; $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

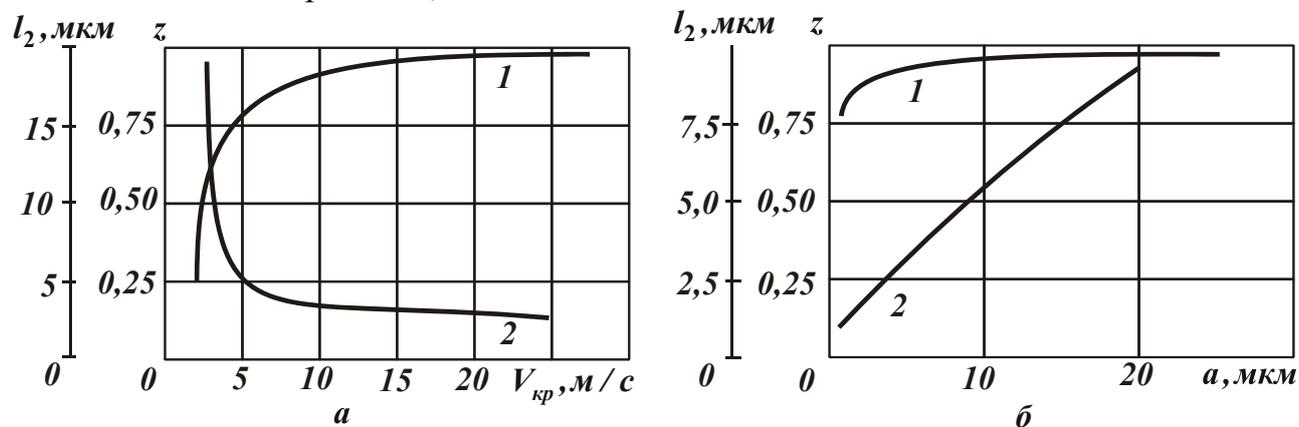


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры z (1) и параметра l_2 (2) от скорости круга $V_{кр}$ (а) и толщины среза a (б): а – $a=0,05$ мм; б – $V_{кр}=27,5$ м/с.

Это достигается уменьшением разности углов $(\psi - \gamma)$ или соответственно увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β (коэффициента резания $K_{рез} > 1$). При отрицательных передних углах γ , что характерно для шлифования, разность углов ψ и γ определяется выражением $(\psi + \gamma)$, уменьшить которое можно, во-первых, уменьшением интенсивности трения режущего зерна с обрабатываемым материалом за счет применения эффективных технологических сред, во-вторых, за счет поддержания высокой остроты режущих зерен (уменьшая отрицательный угол γ). Расчетами установлено, что при относительно небольших значениях коэффициента трения $f = \operatorname{tg} \psi$ обрабатываемого и инструментального материалов выполнить условие $K_{рез} > 1$ можно даже при отрицательных передних углах инструмента, рис. 3,а. А это, исходя из рис. 3,б, приводит к тому, что мгновенная температура θ принимает значения меньше температуры плавления $\theta_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$ обрабатываемого материала – стали ШХ15.

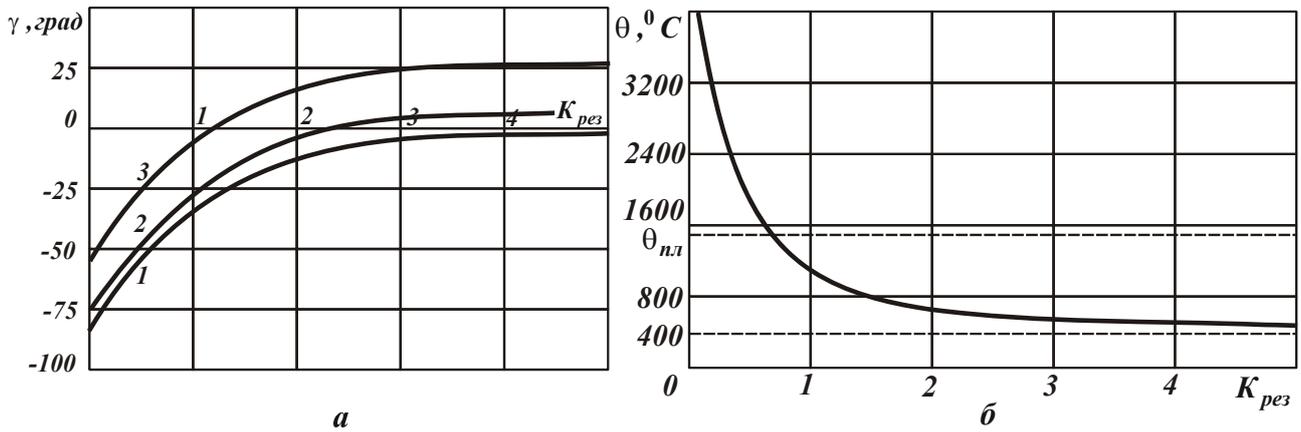


Рис. 3. Зависимости угла γ (а) и мгновенной температуры θ (б) от $K_{рез}$: а 1 – $\psi = 10^\circ$ ($f = 0,176$); 2 – $\psi = 20^\circ$ ($f = 0,364$); 3 – $\psi = 40^\circ$ ($f = 0,839$).

Из зависимости (1) вытекает, что чем меньше условное напряжение резания $\sigma = \sigma_{сж} / tg\beta$, тем больше относительная величина температуры z и меньше параметр l_2 . Следовательно, уменьшение σ позволяет одновременно уменьшить параметр l_2 и мгновенную температуру θ , что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе.

Как известно, при шлифовании режущие зерна круга контактируют не с “холодным”, а с “горячим” обрабатываемым материалом, нагретым ранее проработавшими зернами. Вследствие этого, мгновенная температура при шлифовании и параметр l_2 будут больше, чем при микрорезании отдельным зерном. Это вытекает из зависимостей (1), рассматривая вместо толщины среза a глубину шлифования t :

$$l_2 = t \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}; \quad \bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t \cdot V_{кр} \cdot tg\beta = -\ln(1-z) - z. \quad (3)$$

Расчетами установлено, что при микрорезании отдельным зерном скорость $V_{рез} = V_{кр} \cdot tg\beta$ всегда больше, чем при шлифовании: $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{t / 2 \cdot R_{кр}}$. Соответственно, мгновенная температура (кривая 1 на рис. 4,а) больше средней температуры (кривая 2 на рис. 4,а), а глубина проникновения мгновенной температуры в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 , наоборот, меньше глубины проникновения средней температуры (рис. 4,б), которая может многократно превышать глубину шлифования t . Следовательно, повысить качество обработки можно, во-первых, за счет уменьшения мгновенной температуры, что достигается, как показано выше, увеличением скорости круга $V_{кр}$ и уменьшением условного напряжения резания σ при микрорезании отдельным зерном. Во-вторых, уменьшением глубины проникновения средней температуры l_2 за счет снижения или даже исключения трения связки круга с обрабатываемым материалом. Из этого сделан вывод о том, что необходимым условием повышения качества обработки при шлифовании является существенное снижение интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом.

емым материалом, а достаточным условием – увеличение скорости круга $V_{кр}$. В работе получены приближенные зависимости (справедливые при $z < 0,6$) для определения средней температуры θ и параметра l_2 :

$$\theta = \frac{\sigma \cdot z}{c \cdot \rho} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot t \cdot V_{дем}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}, \quad l_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{V_{дем}}}. \quad (4)$$

Как видно, уменьшить среднюю температуру θ и параметр l_2 без снижения производительности обработки, определяемой произведением параметров $V_{дем} \cdot t$, можно увеличением $V_{дем}$ и уменьшением t . Учитывая то, что при шлифовании все же сложно исключить трение связки круга с обрабатываемым материалом, важнейшим условием уменьшения параметра l_2 при одновременном уменьшении температуры является применение лезвийной обработки, в особенности высокоскоростного резания (высокоскоростного фрезерования). В этом случае, например, в отличие от высокоскоростного шлифования исключается средняя температура, что позволяет реализовать условия высококачественной обработки: $l_2 \rightarrow 0$ (или $l_2 < t$); $z \rightarrow 1$, рис. 5.

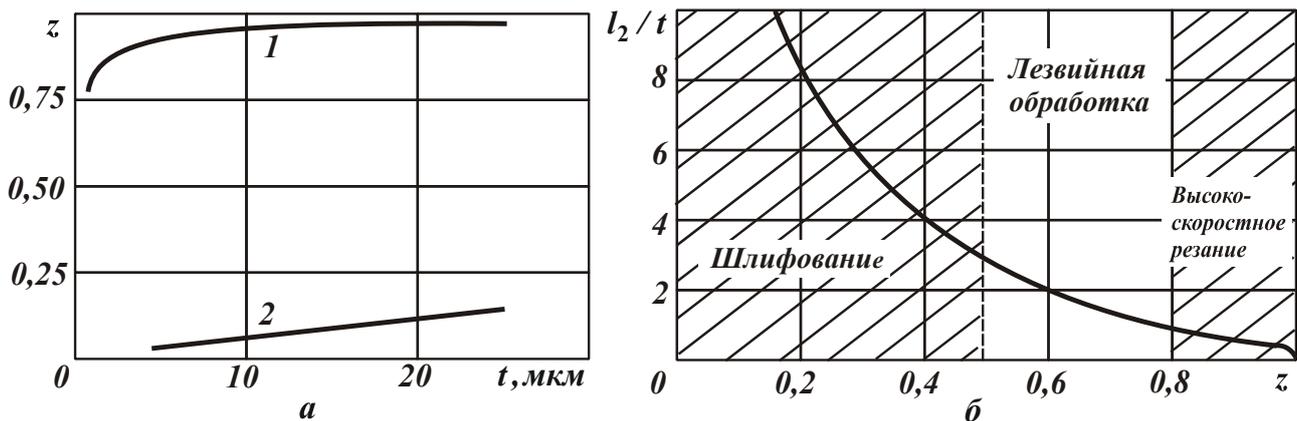


Рис. 4. Зависимости z от t (а) и l_2/t от z (б): а – 1 – $V_{кр} = 27,5$ м/с; $\text{tg}\beta = 0,25$; 2 – $V_{дем} = 30$ м/мин; диаметр круга $D_{кр} = 0,45$ м; обрабатываемый материал – сталь ШХ15 (коэффициент температуропроводности $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Полученные результаты позволяют произвести классификацию тепловых процессов, возникающих при абразивной и лезвийной обработке, по отношению l_2/t и параметру z . Как следует из рис. 4,б, при $l_2/t > 3$ и $z < 0,5$ реализуется шлифование, при $1 < l_2/t < 3$ и $0,5 < z < 0,8$ – лезвийная обработка, при $l_2/t < 1$ и $z > 0,8$ – высокоскоростное резание лезвийным инструментом. Фактически, исключая трение связки круга с обрабатываемым материалом, т.е. исключая среднюю температуру, можно в диапазоне $l_2/t < 1$ и $z > 0,8$ реализовать и высокоскоростное шлифование, обеспечивая тем самым существенное повышение качества и производительность обработки.

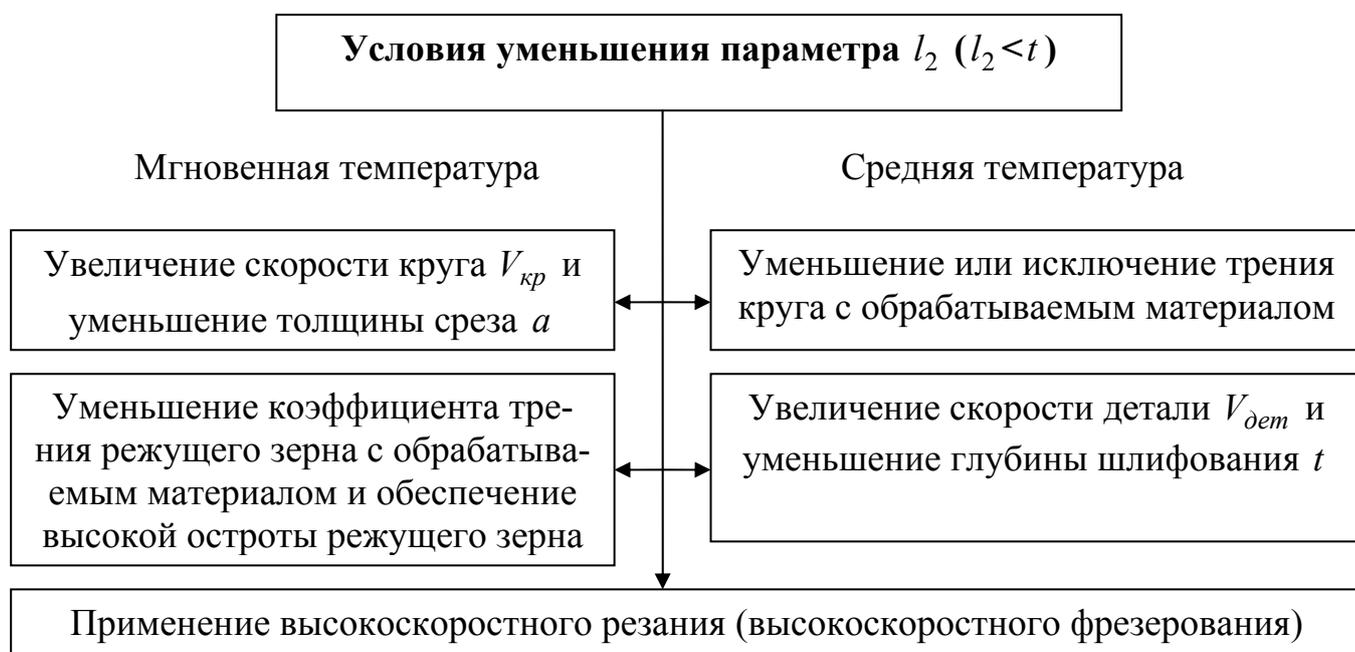


Рис. 5. Структурная схема условий уменьшения параметра l_2 ($l_2 < t$).

С целью оценки достоверности теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования отношения l_2/t при внутреннем шлифовании детали “кожух”, изготовленной из стали 16ХЗНВФМБ-Ш после цементации, абразивным кругом ЧК 50x25x13 25А 25П СМ1 7 на режимах: $V_{дет} = 36$ м/с, $S_{рад} = 0,11$ мм/мин; $t = 0,78$ мкм; $V_{кр} = 20...35$ м/с. Установлено, что в процессе обработки в широких пределах изменения режимов шлифования на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги глубиной $l_2 = 100...200$ мкм. Следовательно, справедливы условия: $l_2/t \gg 1$; $z \ll 1$, что соответствует теоретическим данным, приведенным на рис. 4,б. Определялось отношение l_2/t при высокоскоростном фрезеровании твердосплавной концевой фрезой отверстий в деталях, изготовленных из стали 7ХГ2ВМФ-Ш (HRC 51...56), с частотой вращения фрезы $n = 8000$ об/мин, глубиной резания $t = 0,15$ мм, круговой подачей $S = 0,25$ мм/об и вертикальной подачей – 125 мм/мин. Установлено, что на обрабатываемых поверхностях прижоги не образуются, а отношение $l_2/t = 0,5...1$. Это хорошо согласуется с теоретическими данными (рис. 4,б). Определялись также значения l_2/t на основе экспериментальных данных, приведенных в научнотехнической литературе. Так, по данным проф. Филимонова Л.Н. [3] при круглом наружном абразивном скоростном шлифовании стали $l_2/t = 3...8$. По данным проф. Якимова А.В. [1] при плоском абразивном шлифовании стали $l_2/t = 4...8$. По данным проф. Попова С.А. [4] при алмазном шлифовании по упругой схеме твердого сплава $l_2/t > 10$. По данным проф. Грабченко А.И. [5] при точении стали резцами из синтетических сверхтвердых материалов $l_2/t = 0,5...2$. Как видно, приведенные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими (рис. 4,б), что свидетельствует об их достоверности.

Таким образом, в работе обоснованы технологические закономерности формирования параметров качества при абразивной и лезвийной обработках с учетом температурного фактора и на их основе определены условия повышения качества и производительности обработки.

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.
3. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
4. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263с.
5. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко – Харків, ХДПУ, 1999. – 436 с.