

**В.А. Яшков, Л.В. Силин**  
**V.A Yashkov, L.V Silin**

Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО  
«Владимирский государственный университет»  
Murom Institute (Branch)  
Vladimir State University

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ**

### **ENSURING QUALITY FOR INTERNAL GRINDING SURFACE**

Рассмотрены вопросы обеспечения качества отверстия при внутреннем шлифовании. Проанализированы вопросы течения СОЖ при использовании нового способа шлифования сборным абразивным кругом с радиально подвижными сегментами.

**Ключевые слова:** внутреннее шлифование, СОЖ, сборный абразивный круг.

In work questions of maintenance of quality of an aperture are considered at internal grinding. Questions of current metalworking fluids are analysed at use of a new way of grinding by modular abrasive circle with radially mobile segments.

**Keywords:** internal grinding, the thermal phenomena, productivity of process, streams metalworking fluids.

Производительность традиционных процессов внутреннего шлифования чаще всего ограничивается образованием тепловых дефектов в поверхностном слое деталей. Была поставлена задача повысить производительность процесса при обеспечении требуемого качества поверхности путем управления потоками СОЖ. Для ее решения требовалось провести исследования по установлению зависимостей подачи СОЖ к обрабатываемой поверхности от конструктивных параметров инструмента и режимов шлифования. В качестве инструмента использовали сборный абразивный круг с радиально подвижными сегментами, который, как показали предыдущие исследования [1], обладает неоспоримыми достоинствами.

При исследовании решалась задача по построению математической модели течения СОЖ в зоне обработки, а также разрабатывалась методика выбора геометрических параметров сборного абразивного круга и режимов резания, обеспечивающих безприжоговое шлифование внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин. Роль процесса шлифования как финиш-

ной операции при производстве деталей машин общеизвестна. Однако высокоскоростное внутреннее шлифование характеризуется повышенным теплообразованием и увеличением температуры в зоне резания, что может отрицательно отразиться на качестве обрабатываемой поверхности. Поэтому при этом виде шлифования процесс охлаждения зоны обработки особенно важен.

При внутреннем шлифовании температура обрабатываемой поверхности

$$\theta_s = \theta_p + \theta_0,$$

где  $\theta_p$  – температура, образующаяся при шлифовании;  $\theta_0$  – начальная температура детали.

При шлифовании охлаждение внутренней обработанной поверхности заготовки осуществляется конвективным теплообменом. В соответствии с законом Ньютона – Рихмана [2] количество теплоты передаваемой из обработанной поверхности в СОЖ

$$Q = \alpha S(\theta_s - \theta_0)\tau, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – площадь поверхности, на которой происходит теплообмен;  $\theta_s$  и  $\theta_0$  – температуры поверхности и среды;  $\tau$  – время обработки.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  имеет первостепенное значение, так как характеризует процесс и условия теплообмена между заготовкой и средой охлаждения. Коэффициент  $\alpha$  входит как основной в критерий Нуссельта, характеризующий условия теплообмена на границе «твердое тело – жидкость»:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где  $l$  – определяющий геометрический размер (ширина зоны контакта при шлифовании);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости.

В общем виде критериальное уравнение для рассматриваемого случая

$$Nu = f(Pe, Re, Cr, Pr),$$

где  $Pe$  – критерий Пекле;  $Cr$  – критерий Грасгофа;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля.

Анализируя данное уравнение по названным критериям, имеем следующие ограничения и упрощения:

$$Pe = \frac{Vl}{2a},$$

где  $V$  – скорость потока;  $a$  – скорость температуропроводности.

Критерий Пекле, характеризующий отношение переноса тепла теплопроводностью к переносу тепла конвекцией, в приложении к шлифованию для одинаковых предельных распределений температур будет одинаков и может самостоятельно во внимание не приниматься. В то же время он в сочетании с критерием Био ( $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$ ) входит в комплекс  $\frac{2\alpha a}{\lambda V}$ , представляющий отношение критериев  $Bi$  и  $Pe$ , который используется для расчета температур при охлаждении. Критерий Био по форме похож на критерий Нуссельта, но принципиально от него отличается, так как параметр  $\lambda$  в нем является характеристикой твердой стенки, а не жидкости.

Критерий Грасгофа, характеризующий соотношение между подъемной силой в жидкости вследствие разности плотностей и силой вязкости, имеет решающее значение при свободной конвекции, но не в рассматриваемом примере внутреннего шлифования.

Гидродинамический режим потока СОЖ отражает критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vl}{\nu},$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости СОЖ.

Критерий Рейнольдса – это основной критерий, определяющий процесс течения охлаждающей жидкости.

Связь температурных и скоростных полей в зоне охлаждения определяет критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}.$$

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что решением уравнений гидродинамики в критериальной форме для теплообмена будет

$$Nu = f(Re, Pr).$$

Конкретный вид данной функциональной зависимости после приближенных эмпирических расчетов и случая, когда шлифуемая поверхность омывается турбулентным потоком [3]:

$$Nu = 0,086 Pr^{0,4} Re^{0,8}.$$

Если учесть, что турбулентный поток СОЖ может характеризоваться числом  $Re$  в пределах от  $10^4$  до  $4 \cdot 10^6$ , а число  $Pr$  для водных растворов при температуре до  $100^\circ C$  близко к  $1,75$ , то предыдущая зависимость упрощается до

$$Nu = 0,043 Re^{0,8}.$$

С учетом того, что для воды при 100 °С  $\lambda = 0,683$  Вт/(м·К),  $a = 1,69 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с,  $\nu = 2,95 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с вычисление коэффициента теплообмена между обрабатываемой поверхностью и СОЖ можно производить по формуле

$$\alpha = 6 \cdot 10^4 V^{0,8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость потока СОЖ, м/с.

Анализируя выражения (1) и (2), можно сделать вывод, что количество теплоты, отдаваемой обрабатываемой поверхностью в СОЖ, зависит от времени охлаждения и скорости омывания обрабатываемой поверхности турбулентным потоком, что позволяет предотвратить нагрев обработанной поверхности.

Таким образом, можно считать, что скорость течения СОЖ по обрабатываемой поверхности является показателем оценки эффективности метода внутреннего шлифования.

Для исследования был выбран способ внутреннего шлифования сборным инструментом с радиально подвижными абразивными сегментами.

Известный способ внутреннего шлифования инструментом с прерывистой режущей поверхностью [4] также позволяет увеличить производительность процесса, но такой инструмент генерирует чрезвычайно мощные воздушные потоки, выдувающие жидкость из зоны обработки, не позволяя ей эффективно охлаждать обрабатываемую поверхность, что ограничивает скорость шлифования. Для анализа эффективности охлаждающего действия СОЖ в зоне обработки была построена математическая модель течения СОЖ. За инструмент моделирования движения текучей среды была выбрана система дифференциальных уравнений Навье – Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Этими уравнениями моделируются турбулентные, ламинарные и переходные (переход определяется критическим значением числа Рейнольдса) течения.

Аналитическое решение данных уравнений может быть получено только для простых случаев. Поэтому для описания закономерностей движения среды и определения значений ее скорости в условиях, близких к реальным, данную систему уравнений решали численными методами на ЭВМ (программный продукт CosmosFloWorks). В программе CosmosFloWorks для моделирования турбулентных течений уравнения Навье – Стокса осредняются по Рейнольдсу, т.е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения учитываются введением соответствующих производных по времени. Это относится к таким гидродинамическим параметрам потока, как давление и скорость. В результате уравнения имеют дополнительные члены – напряжения по Рейнольдсу, а для решения этой системы уравнений в COSMOSFloWorks используются уравнения переноса кинетической энергии. Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии неста-

ционарного пространственного течения имеет следующий вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат, вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси, проходящей через ее начало:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i,$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H,$$

где  $t$  – время;  $u$  – скорость текучей среды;  $\rho$  – плотность текучей среды;  $P$  – давление текучей среды;  $S_i$  – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды;  $E$  – полная энергия единичной массы текучей среды;  $Q_H$  – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текучей среды;  $\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений;  $q_k$  – диффузионный тепловой поток (нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям).

Современные программные средства дают возможность не только моделировать названные процессы, но и решать связанные с ними задачи. Однако говорить о подобии модели и природы можно только при равенстве применяемых для них постоянных чисел – критериев подобия.

На основе анализа условий подобия исследуемого процесса шлифования и математической модели был сделан вывод о необходимости соблюдения трех видов подобия – геометрического, кинематического и гидродинамического.

Соблюдение геометрического подобия означает, что все линейные размеры проточных частей модели и природы должны иметь постоянный критерий

$$C_l = \frac{l_n}{l_m} = \frac{R_n}{R_m},$$

где  $l_n$  – условный линейный размер природы;  $l_m$  – условный линейный размер модели;  $R_r$  – гидравлический радиус проходных сечений природы и модели соответственно.

Соблюдение кинематического подобия означает, что в геометрически сходных точках модели и природы треугольники скоростей, отражающие кинематику течения СОЖ в каналах шлифовального круга, должны быть подобны, т.е. соотношение абсолютных, относительных и переносных скоростей потока должно иметь постоянный критерий

$$C_V = \frac{C_n}{C_m} = \frac{U_n}{U_m} = \frac{W_n}{W_m},$$

где  $C$  – абсолютная скорость;  $U$  – переносная скорость;  $W$  – относительная скорость природы и модели.

Гидродинамическое подобие определяется равенством критерия Рейнольдса природы и модели:

$$\text{Re}^n = \text{Re}^m = \frac{CL}{\nu},$$

где  $C$  – абсолютная средняя скорость потока;  $L$  – характерный геометрический размер каналов СОЖ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости СОЖ.

Как обобщающее критериальное понятие может быть введено «материальное» подобие, определяющее взаимное соответствие частиц СОЖ по массе, проходящей по каналам шлифовального натурального и модельного кругов:

$$C_T = \frac{M_n}{M_m} = \frac{\rho_n V_n}{\rho_m V_m},$$

где  $\rho$  – плотность СОЖ природы и модели;  $V$  – объемный расход СОЖ природы и модели, определяемый как  $L^3 T^{-1}$ ;  $T$  – временной интервал.

Указанные показатели практического подхода к моделированию процессов и явлений подобия необходимы, но недостаточны. Полное подобие, которое может служить основанием для математического моделирования потоков несжимаемой СОЖ, должно учитывать гравитационное ускорение; тепловые потоки; пористость элементов проточной части; влияние частиц износа на динамику потока СОЖ; влияние вращения системы координат; начальные и граничные условия и т.д. При выполнении всех этих условий подобие процесса внутреннего шлифования на природе и модели может считаться относительно полным и к нему может быть в полной мере применимо математическое моделирование физических процессов, базирующееся на последних достижениях вычислительной гидродинамики CosmosFloWorks.

Для проверки полученной математической модели был проведен ряд экспериментальных исследований поведения СОЖ в зоне шлифования. Задача по выявлению зависимости давления СОЖ в зоне обработки от режимов шлифования и конструктивных параметров сборного абразивного круга с радиально подвижными сегментами решалась на новой основе с использованием индуктивной измерительной аппаратуры ВИ6-5МА [6]. Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Характерной особенностью аппаратуры является суммирование токов уже после их выпрямления. Поэтому схема аппаратуры является знакочувствительной, но не фазочувствительной. Шлифовальный круг 2 устанавливает-

ся соосно обрабатываемой заготовке 3, на которой установлен датчик 4 давления ДД-6 (с индуктивным типом преобразователя для измерений переменного давления в частотном диапазоне измеряемых процессов от 0 до 120 Гц и диапазоне измеряемых давлений от 0,06 до 2,5 МПа).

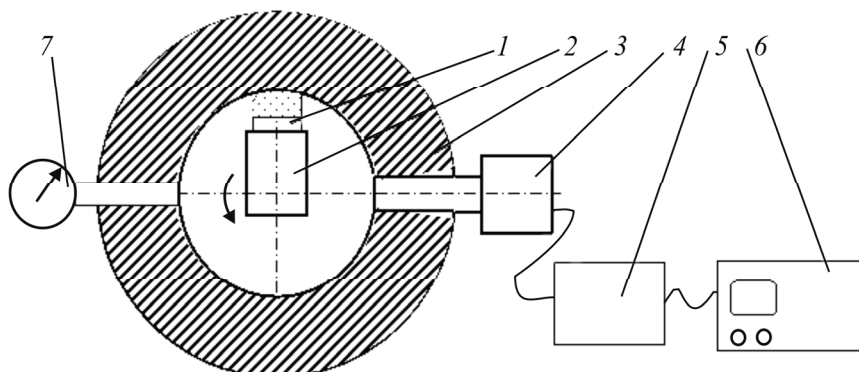


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – абразивный сегмент; 2 – корпус круга; 3 – обрабатываемая заготовка;  
4 – датчик давления ДД-6; 5 – измерительный комплекс ВИ6-5МА;  
6 – запоминающий осциллограф С8-13; 7 – образцовый манометр

В процессе внутреннего шлифования передача энергии потоку жидкости от вращения инструмента со скоростью  $2860 \text{ мин}^{-1}$  осуществляется при взаимодействии абразивного сегмента 1, корпуса шлифовального круга 2 (включая подвижные обоймы) с обрабатываемой заготовкой 3, имитирующей корпус насоса. СОЖ вращается в месте с элементами названной конструкции с некоторой угловой скоростью и под влиянием центробежных сил перемещается по каналам в зону обработки.

Работа центробежных сил и преобразование энергии относительного движения приводит к изменению энергии потока. Она возрастает в направлении движения от центра к поверхности обрабатываемой заготовки. Таким образом, давление СОЖ, создаваемое абразивными сегментами, подобными лопаткам центробежного насоса, повышается относительно среднего давления перед сегментами и понижается за ними. Возникает некоторая пульсация давления, которая регистрируется датчиком, обрабатывается на аппаратуре ВИ6-5МА и фиксируется на запоминающем осциллографе С8-13. Единицы давления, снятые со шкалы прибора, выражены в мВ. После обработки данных они пересчитываются в МПа. Значения среднего давления контролировались по образцовому манометру. Воспроизводимость результатов лабораторных измерений давления была удовлетворительная.

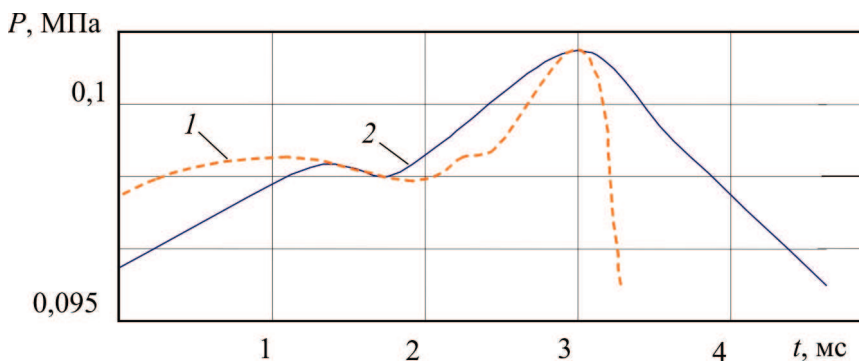


Рис. 2. Давления СОЖ в среднем сечении абразивного сегмента:  
 1 – результаты компьютерного моделирования; 2 – осциллограммы  
 реального процесса внутреннего шлифования

При проведении лабораторных исследований были использованы пластиковые сегменты 1 прямоугольной и треугольной формы со скосом на передней поверхности.

Результаты, полученные при реальном процессе шлифования и после компьютерной обработки математической модели (рис. 2), показали подобие осциллограмм. Таким образом, разработанная теоретическая модель процесса внутреннего шлифования адекватно отображает гидродинамические процессы, протекающие в зоне обработки (рис. 3).

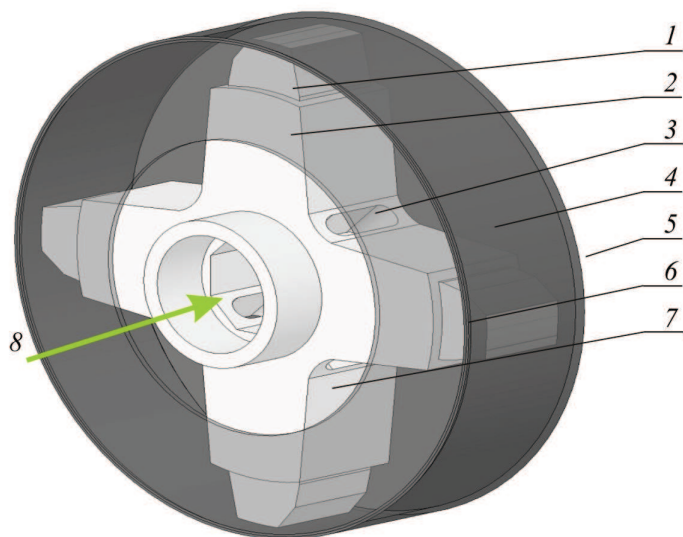


Рис. 3. Моделирование процесса внутреннего шлифования: 1 – шлифовальный сегмент; 2 – корпус круга; 3 – отверстие для подачи СОЖ; 4 – обрабатываемая заготовка; 5 – задняя крышка; 6 – передняя крышка; 7 – отверстие для слива СОЖ; 8 – основная подача СОЖ



Построение математической модели – это всегда трудоемкая, сильно теоретизированная и в значительной степени «новая» задача. После нахождения определяющего дифференциального уравнения класса подобных явлений, определения понятий подобия и их граничных условий, которые позволяют выделить из класса явлений «свою группу» со всеми свойствами и ограничениями моделируемого процесса, необходимо получить и проанализировать результаты, полученные с помощью CosmosFloWorks.

Были получены конкретные результаты по давлению в потоках СОЖ в различных полостях инструмента, т.е. количественная характеристика процесса (рис. 4 – шкала давлений). Получены картины течения СОЖ и шкалы давлений при изменении конфигурации абразивного сегмента и их количества от двух до восьми (рис. 5).

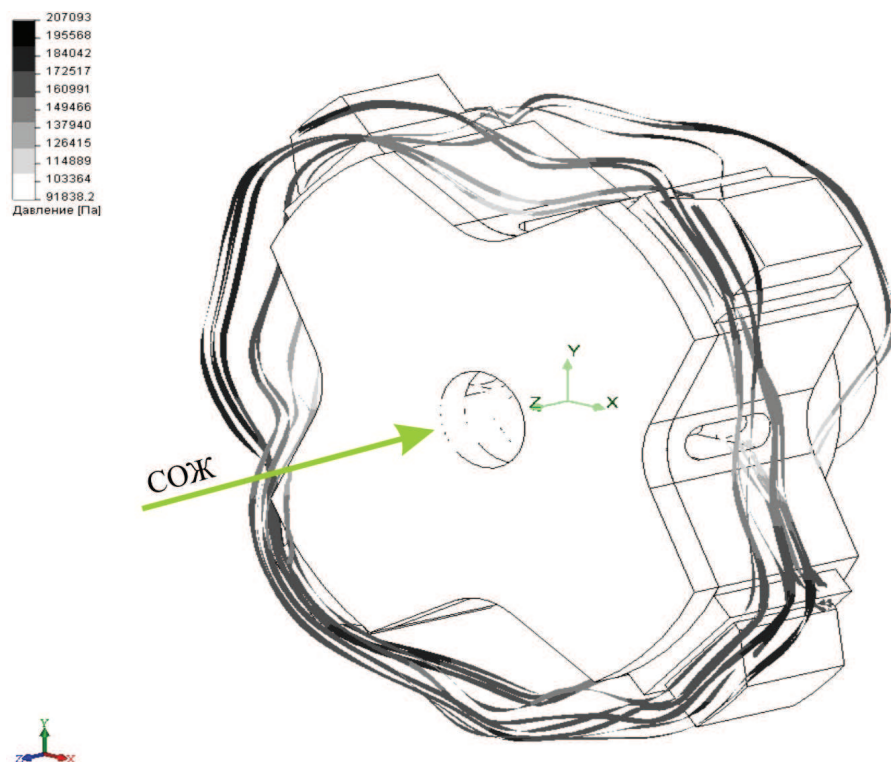


Рис. 4. Компьютерная картина течения СОЖ:

линии тока всех внутренних течений СОЖ по межсегментным каналам и в зоне шлифования, шкала расчетных давлений в каналах круга

Обработка результатов показала, что сопоставимость результатов работы программы CosmosFloWorks с лабораторными (в плане измерения уровня давления в различных точках межсегментных каналов) вполне удовлетворительная.

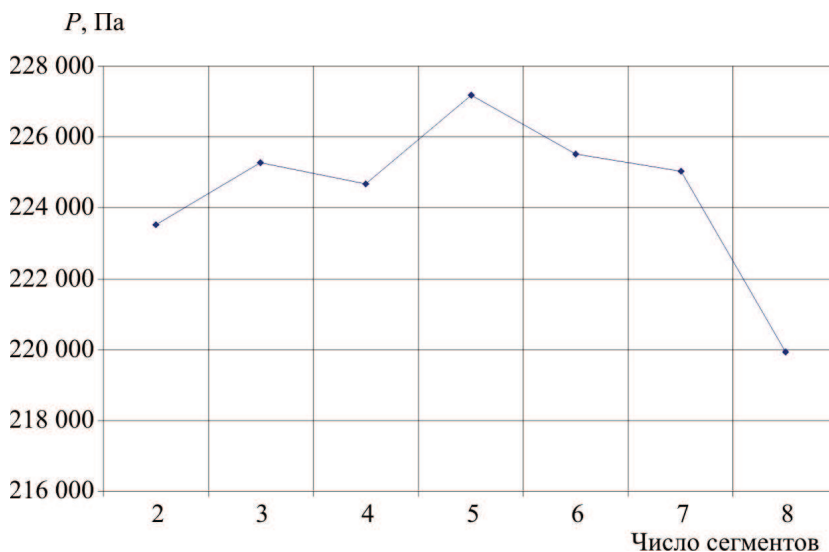


Рис. 5. Зависимость давления от числа сегментов

Таким образом:

- получена модель, которая была заложена в основу расчета (см. рис. 3);
- получен характер потоков СОЖ в зоне шлифования;
- получена качественная картина процесса (см. рис. 4).

Гидродинамические параметры потоков СОЖ (давление, скорости, температура) учитываются введением в программу соответствующих производных по времени.

Поставленная задача по исследованию оптимизации режима охлаждения зоны шлифования сборным абразивным кругом методом математического моделирования нашла свое решение. Однако требуются натурные технологические испытания, которые должны подтвердить правильность выбранного направления повышения эффективности процесса.

### Список литературы

1. Худобин Л.В., Поляковский Ю.В. Основные направления повышения качества шлифованных деталей путем применения СОЖ // Оптимизация технологических процессов механической обработки по параметрам качества деталей и их эксплуатационных свойств: тез. докл. всесоюз. конф. – Киев, 1980. – С. 189–194.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
3. Викторов Г.И. Подобие и моделирование в гидромашинах. – М.: МЭ, 1980. – 85 с.
4. Пат. 2182531 Российская Федерация. Способ внутреннего шлифования / Д.Р. Блурцян, В.Г. Гусев, Ю.В. Трифонова [и др.] – Бюл. 2002. – № 14.

Получено 21.02.2011