

УДК 621. 922

Исследование геометрических параметров взаимодействия шлифовального круга с заготовкой*


А.Б. Переладов, И.П. Камкин

Курганский государственный университет, 640669, Курган, Российская Федерация, ул. Гоголя, д. 25.

Study of the geometric parameters of the contact area between the workpiece and the grinding wheel

A.B. Pereladov, I.P. Kamkin

Kurgan State University, Gogol str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation.

 e-mail: tp@kgsu.ru, ipkamkin@gmail.com

i В известных методиках численного расчета, используемых при проектировании операций шлифования, практически не учитываются геометрические параметры и площадь взаимодействия инструмента — шлифовального круга (ШК) с заготовкой вследствие отсутствия и невозможности определения подобных данных, что в значительной мере снижает точность расчетов и практическую ценность методик. В статье предложена методика 3D моделирования в САД системах, которая позволяет определить изменение площади и формы контакта ШК с заготовкой в зависимости от наиболее значимых параметров элементов факторного пространства процесса шлифования. С помощью разработанной методики получена расчетная зависимость для определения площади контакта и производных показателей. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании процессов алмазно-абразивной обработки.

Ключевые слова: шлифовальный круг, площадь контакта, 3D моделирование, заготовка, операция шлифования.

i The conventional numerical methods of designing grinding processes usually do not take into account the geometric parameters of the contact area between the grinding wheel and the workpiece because of the absence of such data or difficulty to find them. This fact significantly reduces the accuracy of calculations and the practical value of these procedures. This paper proposes a method of 3D modeling using CAD systems that allows determining changes in the size and shape of the contact area between the grinding wheel and the workpiece depending on the most significant elements of the factor space of the grinding process. The developed methodology is used to deduce relationships for calculating the contact area size and the derived parameters. The obtained mathematical relationships will be useful when designing diamond and abrasive machining processes.

Keywords: grinding wheel, contact area, 3D modeling, workpiece, grinding operation.

К важным мерам, способствующим повышению эффективности производства, относится дальнейшее совершенствование режимно-инструментального оснащения шлифовальных операций, которые, в большинстве своем, являются финишными и в значительной мере определяют качество поверхностного слоя изделий и срок их эксплуатации. Эффективность

процесса шлифования (ПШ) в значительной степени обусловлена правильным подбором характеристик шлифовального круга (ШК) и режимов обработки. Однако в настоящее время решение подобных оптимизационных задач в значительной мере затруднено по причине отсутствия универсальных математических моделей, адекватно описывающих факторное

* Исследование проводится по контракту с Фондом содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере (Фонд Бортника).

пространство системы операции шлифования и динамике изменения ее показателей.

Сложность исследования и математического описания ПШ связаны, в том числе, с его многофакторностью и нестационарностью, что является причиной отсутствия адекватных расчетных методик. Выходные параметры ПШ значительно изменяются в течение периода стойкости ШК и времени его работы до полного износа. Причинами этому являются уменьшение размеров ШК, изменение формы его рабочей поверхности (РП) из-за образования заборного конуса [1], что, в свою очередь, приводит к изменению размеров и формы поверхности контакта ШК с заготовкой, параметров резания активными зернами материала заготовки, их числа и, как результат, меняются производные показатели работы инструмента: режим работы (осыпание, самозатачивание, затупление), силы и мощность шлифования, шероховатость шлифованной поверхности и др.

В настоящее время при проектировании операций шлифования расчетные методики практически не применяются или используется в виде идеализированных моделей [2, 3] в отличие от методик проектирования операций лезвийной обработки, в которых геометрия рабочей части ШК, степень ее износа и геометрические параметры взаимодействия ШК с заготовкой являются основой расчетных формул, применяемых для определения сил, стойкости и других показателей процесса резания. Поэтому очевидно, что осведомленность о параметрах взаимодействия ШК с заготовкой и динамике их изменения позволит с большей степенью достоверности прогнозировать результаты шлифования, обоснованно осуществлять корректировку режима работы инструмента, в соответствии с изменяющимися условиями обработки и приоритетами оптимизации.

Цель работы — изучение характера зависимости площади F поверхности контакта (ПК) ШК и заготовки от изменения значимых факторов операции шлифования и получение базовых расчетных математических моделей.

Исследования проводились с использованием разработанной методики и инженерных программных комплексов Inventor и SolidWorks. Моделирование ПК осуществлялось для схем плоского и круглого наружного шлифования периферией ШК прямого профиля с поперечной (осевой) подачи.

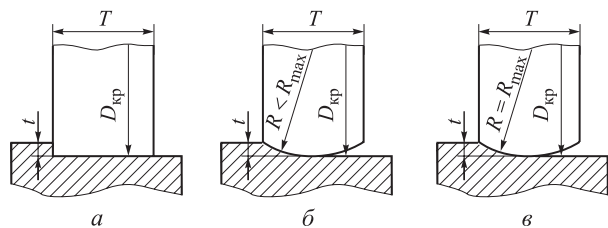


Рис. 1. Формы профиля РП модели ШК в поперечном сечении:

а — неизношенная РП; б — изношенная РП; в — предельно изношенная РП

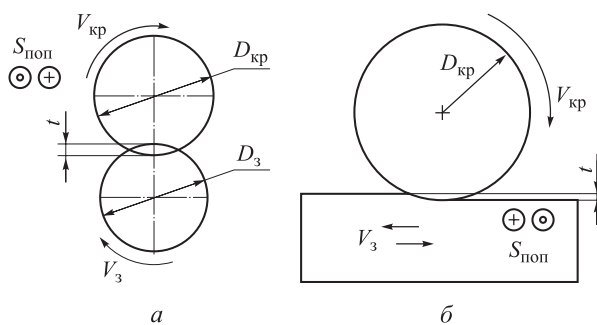


Рис. 2. Схемы круглого наружного (а) и плоского (б) шлифования

лировании ПК факторное пространство процесса шлифования состояло из следующих элементов: диаметр ШК $D_{кр}$, радиус износа РП ШК в осевом сечении R , диаметр обрабатываемой заготовки $D_з$, поперечная (осевая) подача заготовки или инструмента $S_{поп}$. Значением R ($0 \leq R \leq R_{max}$) задавалась величина «заборного конуса», образующегося на РП ШК в процессе шлифования. При оптимизации режима обработки изменялись: скорость шлифования $V_{кр}$, глубина шлифования (технологическая) t , круговая (тангенциальная) подача заготовки $V_з$.

Форма профиля осевого сечения модели РП ШК (рис. 1) задавалась следующим образом:

- отрезками прямой при отсутствии «заборного конуса» в начальный период работы инструмента после правки при $R = 0$ (рис. 1, а);
- дугами определенного радиуса кривизны и соединяющим их отрезком прямой при $0 < R < R_{max}$ (рис. 1, б);
- дугой окружности при $R = R_{max}$ (рис. 1, в).

Параметрическое моделирование ПК при взаимодействии ШК с заготовкой осуществлялось в следующем порядке:

1) задавались форма, размеры и координаты взаимного расположения в пространстве 3D моделей ШК и цилиндрической (плоской) поверхности заготовки, соответствующие схемам круглого наружного и плоского шлифования, заданному режиму обработки (рис. 2);

2) выделялся общий объем пересечения ШК с заготовкой, определялись геометрические параметры площади их контакта (рис. 3–5);

3) осуществлялась обработка результатов моделирования и оформлялись полученные данные.

Влияние упругих и тепловых деформаций при моделировании не учитывалось.

Во всех приведенных ниже формулах значения параметров $D_{кр}$, $D_з$, T , R , R_{max} , t , $t_{ср}$ следует подставлять в миллиметрах; значение $S_{поп}$ — в миллиметрах на оборот заготовки (ход рабочего стола); значения $V_{кр}$ и $V_з$ — в миллиметрах в секунду.

Полученные в ходе моделирования данные, позволили получить математическую модель для определения F , мм² [1]:

$$F = F_0 \left(1 + \frac{0,12TR_d^{0,41}}{S_{поп}} \right). \quad (1)$$

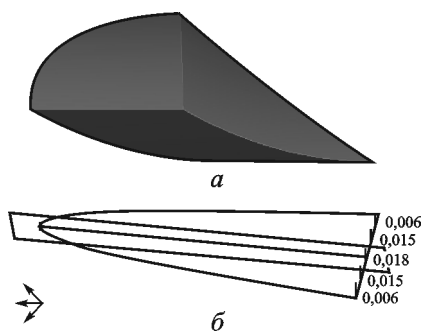


Рис. 3. Выделение пересечения объемов ШК и заготовки (а), определение размеров и площади поверхности контакта ШК с заготовкой (б)

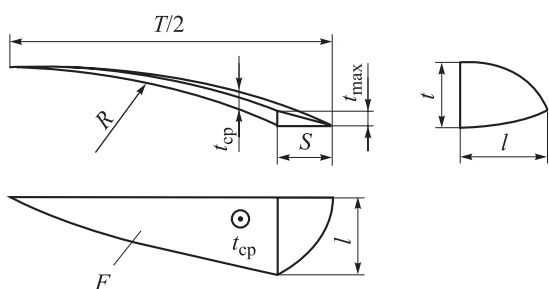


Рис. 4. Проекция поверхности контакта с определенными геометрическими параметрами

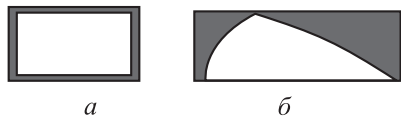


Рис. 5. Примеры изображений компьютерных моделей поверхностей контакта неизношенного (а) и изношенного (б) ШК с заготовкой (вид со стороны оси вращения круга)

Здесь F_0 — начальная площадь ПК. При $R = 0$ $F_0 = lS_{\text{пол}}$ (l — длина дуги контакта ШК с заготовкой, $l = [D_3 t_{\text{cp}} D_{\text{кр}} / (D_{\text{кр}} + D_3)]^{1/2}$, мм); T — высота круга, мм; R_d — текущий радиус износа в долях от максимального, $R_d = (R_{\text{max}} - R) / R_{\text{max}}$ (R_{max} — максимальный радиус износа ШК, $R_{\text{max}} = [t^2 + (T/2)^2] / (2t)$, мм).

С помощью зависимости (1) можно рассчитать, например, среднюю глубину резания по поверхности контакта t_{cp} (см. рис. 4) по формуле

$$t_{\text{cp}} = 0,667t \frac{F_0}{F}. \tag{2}$$

Зависимости, построенные с использованием полученных математических моделей (1) и (2), приведены на рис. 6.

Результаты исследований были использованы при назначении оптимальных режимов обработки и их корректировке на операциях шлифования бочек и шеек прокатных валков на станках фирмы Herkules при адаптации импортозамещающего инструмента отечественного производства на ОАО «Уралмашзавод» (г. Екатеринбург).

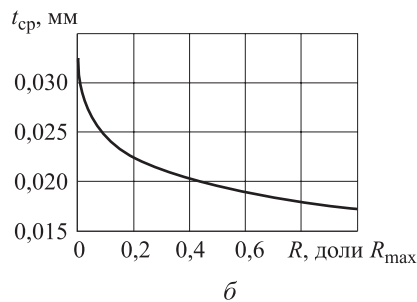
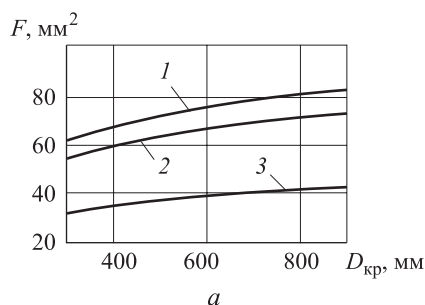


Рис. 6. Зависимости:

а — F от $D_{\text{кр}}$ ($1 - R = R_{\text{max}}$; $2 - R = 0,5R_{\text{max}}$; $3 - R = 0$);
 б — t_{cp} от R ($S_{\text{пол}} = 10$ мм/об. з., $t = 0,05$ мм, $T = 80$ мм, $D_3 = 600$ мм, $D_{\text{кр}} = 900$ мм)

Суть методики оптимизации и корректировки режимов заключалась в сохранении постоянных исходных значений показателя t_{cp} , который определяет средние площади сечений срезаемых стружек режущими зёрнами, силы шлифования и, тем самым, выбранный режим работы инструмента (самозатачивание или затупление) при шлифовании или выхаживании шлифованной поверхности. Требуемые значения t_{cp} при изменении R и $D_{\text{кр}}$ в первом приближении, обеспечивались за счет увеличения исходной технологической глубины шлифования t с использованием данных, полученных по формулам (1), (2). Примеры смоделированных поверхностей контакта для данной операции и зависимость площади контакта F от диаметра круга $D_{\text{кр}}$ и заготовки вала D_3 приведены на рис. 7, 8.

Однако такая корректировка в ряде случаев приводила к возникновению прижогов на шлифованной поверхности, вследствие увеличения площади ПК инструмента с заготовкой, числа режущих зёрен, одновременно находящихся в контакте с заготовкой и, соответственно, мощности шлифования [4–9]. В таких случаях, применялась комплексная корректировка параметров режима обработки с использованием условия, действительного для схемы круглого наружного шлифования периферией ШК:

$$\sqrt{\frac{D_3 t_{\text{cp}} D_{\text{кр}}}{D_{\text{кр}} D_3}} \frac{V_3}{V_{\text{кр}} D_3} = \text{const}. \tag{3}$$

Данное условие, обеспечивающее постоянную среднюю площадь срезаемых зёрнами стружек и, соответственно, действующие на них силы резания, было получено с использованием результатов экспе-

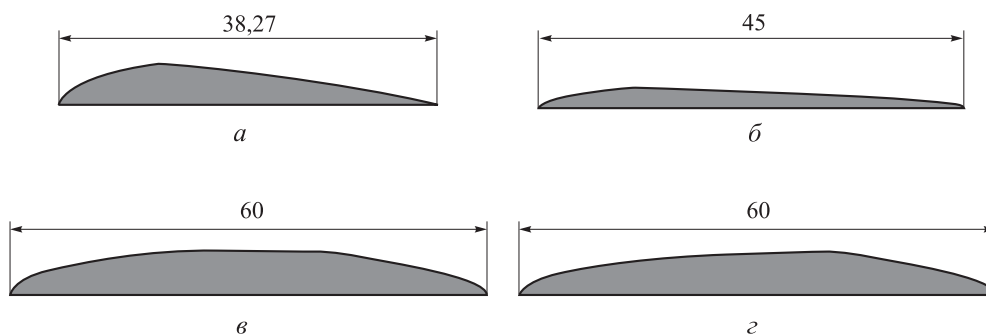


Рис. 7. Примеры изображений смоделированных поверхностей контакта ШК с заготовкой для операции шлифования бочки прокатного вала (вид со стороны оси вращения круга; круг 1 900×80×305, $D_3 = 1\ 800$ мм, $t = 0,05$ мм):

$a - R = 0,5R_{\max}, S_{\text{поп}} = 10$ мм/об. з.; $б - R = R_{\max}, S_{\text{поп}} = 10$ мм/об. з.; $в - R = 0,5R_{\max}, S_{\text{поп}} = 40$ мм/об. з.; $г - R = R_{\max}, S_{\text{поп}} = 40$ мм/об. з.

риментального исследований показателей кинематического взаимодействия режущих зерен с обрабатываемой поверхностью [4].

Общие рекомендации при осуществлении комплексной корректировки с использованием условия (3) состоят в следующем. Уменьшение значения $t_{\text{ср}}$ при увеличении F можно, например, частично компенсировать повышением t (до появления прижогов) и затем увеличением V_3 и/или $V_{\text{кр}}$ до получения исходных (начальных) значений в правой части уравнения (3). Повышение V_3 позволяет снизить риск появления прижогов за счет увеличения скорости движения источника нагрева, находящегося на ПК инструмента и заготовки [4], а снижение $V_{\text{кр}}$ позволит уменьшить мощность процесса и, соответственно, нагрев поверхности заготовки [2, 4–6, 9–11] с некоторым увеличением, как показала практика, шероховатости шлифованной поверхности. Выполнение данных рекомендаций обеспечивает сохранение исходного режима работы ШК (самозатачивание, затупление) и отсутствие прижогов на шлифованной поверхности заготовки. В конкретных случаях при корректировке режима шлифования необходимо учитывать существующие особенности операции (обрабатываемый материал, характеристики инструмента, интенсивность охлаждения СОТС и др.), имеющиеся ограничения и приоритеты оптимизации.

Полученные в результате проведенных исследований новые сведения о процессе шлифования позволят обоснованно определять оптимальные режимы обработки с учетом рассмотренных эле-

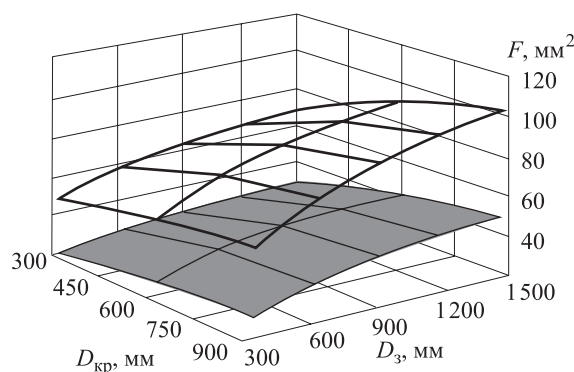


Рис. 8. Пример зависимостей F от $D_{\text{кр}}$ и D_3 для схемы круглого наружного шлифования ($S_{\text{поп}} = 10$ мм/об. з., $t = 0,05$ мм, $T = 80$ мм, $R = 0$ (1) и $R = R_{\max}$ (2))

ментов факторного пространства операции шлифования.

Выводы

1. Установлены зависимости F от режимов обработки и геометрических параметров ШК и заготовки для схем многоходового плоского и круглого шлифования периферией инструмента с поперечной (осевой) подачей.
2. Разработана методика корректировки элементов режимов шлифования с использованием условия (3) для обеспечения постоянства режима работы инструмента.

Литература

[1] Переладов А.Б., Кожевников И.В. Изучение геометрических параметров поверхности контакта шлифовального круга с заготовкой для схем круглого и плоского шлифования с использованием твердотельного моделирования. *Вестник Курганского университета. Сер. Технические науки*, 2005, вып. 2, с. 79–81.

[2] Dąbrowski L., Marciniak M., Oczóś K.E. Cutting surface of the grinding wheel as a component of tribological system. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2002, vol. 2, no. 1–2. URL: <http://www.acme.pwr.wroc.pl/repository/12/online.pdf> (accessed 1 December 2013).

[3] Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. *3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования*. Харьков, НТУ (ХПИ), 2006. 364 с.

- [4] Переладов А.Б., Камкин И.П. Моделирование процесса шлифования с использованием программного комплекса T-Flex. *Зауральский научный вестник*, 2013, № 1(3), с. 30–33.
- [5] Янкин И.Н., Кисметов Ю.В. Компьютерная модель процесса шлифования. *Вестник СГТУ*, 2009, т. 1, № 2, с. 66–71.
- [6] Носенко В.А., Даниленко М.В., Шевцова Е.В. Математическая модель рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании. *Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 13–18 сентября 2010 г. В 4 т. Т. 2. Донецк, ДонНТУ*, 2010, с. 233–237.
- [7] Подборнов И.В., Свирщев В.И., Флегентов В.К. Геометрические параметры зоны контакта инструмента с деталью при плоском торцовом планетарном шлифовании. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009. Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград. ВолгГАСУ*, 2010, с. 85–89.
- [8] Ларшин В.П. Компьютерное моделирование и исследование зоны контакта при профильном шлифовании. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009. Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград, ВолгГАСУ*, 2010, с. 93–96.
- [9] Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, Industrial Press Inc., 2008. 372 p.
- [10] Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск, УлГТУ, 2007. 298 с.
- [11] Дьяконов А.А. Влияние схемы обработки на поле температуры самоподогрева детали в зоне шлифования. *Прогрессивные технологии в машиностроении. Темат. сб. науч. тр. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ*, 2007, с. 11–15.

References

- [1] Pereladov A.B., Kozhevnikov I.V. Izuchenie geometricheskikh parametrov poverkhnosti kontakta shlifoval'nogo kruga s zagotovkoi dlia skhem kruglogo i ploskogo shlifovaniia s ispol'zovaniem tverdotel'nogo modelirovaniia [The study of geometrical parameters of the contact surface of the grinding wheel with the work piece schemes for round and flat grinding using solid modeling]. *Vestnik Kurganskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Herald Kurgan State University. Ser. Technical Sciences]. 2005, issue 2, pp. 79–81.
- [2] Dąbrowski L., Marciniak M., Oczóś K.E. Cutting surface of the grinding wheel as a component of tribological system. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2002, vol. 2, №1–2. Available at: <http://www.acme.pwr.wroc.pl/repository/12/online.pdf> (accessed 1 December 2013).
- [3] Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A. 3D modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia [3D modeling of diamond abrasive tools and grinding processes]. Khar'kov, NTU «KhPI» publ., 2006. 364 p.
- [4] Pereladov A.B., Kamkin I.P. Modelirovanie protsessa shlifovaniia s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa T-Flex [Grinding process modeling using software package T-Flex]. *Zauralskii nauchnyi vestnik* [Zauralskiy Scientific Bulletin]. 2013, no. 1(3), pp. 30–33.
- [5] Iankin I.N., Kismetov Iu.V. Komp'yuternaia model' protsessa shlifovaniia [Computer model of grinding process]. *Vestnik SGTU* [Vestnik SSTU]. 2009, vol. 1, no. 2, pp. 66–71.
- [6] Nosenko V.A., Danilenko M.V., Shevtsova E.V. *Matematicheskaia model' rabochei poverkhnosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii* [Mathematical model of the working surface of the abrasive tool for grinding]. 17 Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia «Mashinostroenie i tekhnosfera 21 veka» [17 International Scientific Conference «Engineering and Technosphere of the 21 Century»]. In 4 vol. Donetsk, DNTU publ., 2010, vol. 2, pp. 233–237.
- [7] Podbornov I.V., Svirshhev V.I., Flegentov V.K. *Geometricheskie parametry zony kontakta instrumenta s detal'iu pri ploskom tortsovom planetarnom shlifovanii* [Geometric parameters of the contact area with the workpiece when the tool flat machined planetary grinding]. *Protsessy abrazivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. Shlifabraziv-2009. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii* [Processes of abrading, abrasive tools and materials. Shlifabraziv 2009. Collected papers of the International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VSUACE publ., 2010, pp. 85–89.
- [8] Larshin V.P. *Komp'yuterno modelirovanie i issledovanie zony kontakta pri profil'nom shlifovanii* [Computer simulation study of the contact zone and in profile grinding]. *Protsessy abrazivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. Shlifabraziv-2009. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii* [Processes of abrading, abrasive tools and materials. Shlifabraziv 2009. Collected papers of the International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VSUACE publ., 2010, pp. 93–96.
- [9] Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, Industrial Press Inc., 2008. 372 p.

- [10] Khudobin L.V., Unianin A.N. *Minimizatsiia zasalivaniia shlifoval'nykh krugov* [Minimizing brining grinding wheels]. Ul'ianovsk, UlSTU publ., 2007. 298 p.
- [11] D'iakonov A.A. *Vliianie skhemy obrabotki na pole temperatury samopodogreva detali v zone shlifovaniia* [Influence of processing schemes on the temperature, the self items in the grinding zone]. *Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii. Tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* [Advanced technologies in mechanical engineering. Thematic collection of scientific papers]. Cheliabinsk, SUSU publ., 2007, pp. 11–15.

Статья поступила в редакцию 03.04.2014

Информация об авторах

ПЕРЕЛАДОВ Александр Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», директор Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: tp@kgsu.ru).

КАМКИН Иван Павлович — аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», инженер Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: ipkamkin@gmail.com).

Information about the authors

PERELADOV Aleksandr Borisovich (Kurgan) - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Automation of Manufacturing Processes» Department, Director of Industrial Park. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: tp@kgsu.ru).

KAMKIN Ivan Pavlovich (Kurgan) – Post-Graduate of «Automation of Manufacturing Processes» Department, Engineer of Industrial Park. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: ipkamkin@gmail.com)..



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие

«Основы проектирования переносных зенитных ракетных комплексов»

авторов В.М. Кашина, А.Л. Лифица, М.И. Ефремова.

Настоящее пособие является первым общедоступным изданием, в котором приведена современная методология проектирования переносных зенитных ракетных комплексов. При этом авторы ставили перед собой задачу познакомить читателя не только с основными подходами к вопросам проектирования, но и дать представление о принципах построения и современном состоянии этого вида вооружения в России. Материалы пособия отражают сегодняшнее положение теории и практики создания переносных зенитных ракетных комплексов, являясь результатом обобщения накопленного многолетнего опыта их разработки в нашей стране. Основное внимание уделено вопросам, связанным со спецификой проектирования переносных зенитных ракетных комплексов, поскольку общие вопросы проектирования (аэродинамика, теория полета, внутренняя баллистика двигателей, расчет и проектирование информационных приборов наведения, прочность и др.) зенитных ракет с ракетными двигателями твердого топлива в полной мере изложены в научно-технической литературе.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru