

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК
ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ****Горобец И. А., Голубов Н. В., Чвала И. А.**

Исследуется вопрос повышения качества поверхностного слоя заготовок из природного камня при шлифовании. Разработан план проведения экспериментальных исследований. Выбраны технологические средства, аппаратура и методы исследований. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса шлифования гранита. Разработана математическая модель прогнозирования топографии обработанной поверхности. Предложены концепция технологических воздействий при обработке заготовки шлифованием и конструкции адаптивного приспособления для улучшения параметров топографии поверхности заготовки.

Досліджуються питання підвищення якості поверхового шару заготовок з природного каменю при шліфуванні. Розроблено план проведення експериментальних досліджень. Обрані технологічні засоби, апаратура та методи досліджень. Наведені результати експериментальних досліджень процесу шліфування граніту розроблена математична модель прогнозування топографії обробленої поверхні. Запропоновані концепція технологічних впливів при обробці заготовки шліфуванням та концепція адаптивного приладдя для покращення топографії поверхні заготовки.

The question of improvement of quality of a grinding layer of workpieces from a natural stone by grinding process is investigated. The test plan is worked out. Technological tools, equipment and methods of researches are chosen. Results of experimental researches of grinding process of a granite are given. The mathematical model of prediction of topography of the workpiece surface is given. The concept of technological influences in the time of grinding process and designs of the adaptive device for improvement of parameters of topography of the grinding layer of workpieces are offered.

Горобец И. А.

канд. техн. наук, доц. ДонНТУ
gorobec@mech.dgtu.donetsk.ua

Голубов Н. В.

ст. преп. ДонНТУ
goloobov@mail.ru

Чвала И. А.

магистр ДонНТУ
i.chvala@gmail.com

УДК 622.92

Горобец И. А., Голубов Н. В., Чвала И. А.

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК
ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ**

Украина является традиционным поставщиком полуфабрикатов и производителем изделий из твердых пород камня: гранитов, габбро, лабрадорита для архитектурно-строительной промышленности и машиностроения. Благоприятное геологическое положение Украины способствует тому, что на её территории появляются все больше и больше предприятий, которые занимаются не только добычей, но и обработкой камня. Приведенные в [1] экспертные оценки дают заключения о том, что Украина может в 1,5–2 раза увеличить экспорт продукции минерально-сырьевого комплекса, доходы от которого могут составлять до 20 млрд грн в год. Одним из трудоемких и продолжительных процессов обработки заготовки из камня является его шлифование [2]. Поверхность заготовки камня после предварительной обработки (порезки на мерные плиты) имеет неровности поверхности, связанные не только с шероховатостью, но и макрогеометрией поверхностного слоя (выпуклостью, вогнутостью, волнистостью и т. д.). Величина волнистости на пиленном блоке природного камня достигает 3–5 мм [3, 4]. Поэтому, одним из актуальных вопросов является повышение точности макрогеометрических параметров поверхности готовых изделий из камня, что может быть достигнуто усовершенствованием технологического процесса шлифования.

Исследованиям вопросов снижения параметров макронеровностей поверхностного слоя посвящены работы ряда ученых [5–6]. Авторы работы [5] доказывают, что при определении микро- и макрогеометрии поверхностного слоя необходимо учитывать ряд факторов: физико-механические свойства обрабатываемого материала, режимы резания, шероховатость режущих кромок инструмента, жесткость технологической системы, степень износа режущего инструмента и пр. Отсутствие учета указанных факторов может привести к существенным ошибкам (до 300 %) при определении, например, параметров шероховатости [6]. Одной из причин возникновения волнистости поверхностного слоя обработанной поверхности заготовки является и недостаточная жесткость конструкции технологического оборудования, и наличие автоколебательных процессов при шлифовании. Так, в монографии [7], автор указывает на влияние качества поверхностного слоя обрабатываемого материала от неуравновешенности абразивного инструмента, волнистости периферии шлифовального круга, образующаяся после правки инструмента, влияние износа на шероховатость поверхности. Однако вопросы влияния технологических и динамических параметров СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) на макронеровности поверхностного слоя заготовки автором монографии не рассматривались.

В работе [8] рассмотрено влияние динамических характеристик СПИД на качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки на станках шлифовальной группы. В ней автор представил динамическую систему в виде схемы, рис. 1. Дополнительная обратная связь с запаздыванием, равным времени τ_0 одного оборота детали, возникает, если обработка производится «по следу» от предыдущего прохода по детали. Для шлифования имеет существенное значение так же обратная связь с запаздыванием $\tau_{кр}$ через износ и затупление круга. Её влияние выражается в появлении характерного неравномерного износа круга. Причём последний вид связи существует не только при шлифовании, но и при всех видах обработки, но обычно не учитывается.

Авторами предложены конструктивные варианты устройств на базе динамических гасителей колебаний и упругодемпфирующих элементов, позволяющих снизить негативное влияние автоколебательной системы на макронеровности поверхностного слоя заготовки.

В работе предложены и методы автоматизации процессов шлифования заготовок посредством реализации адаптивных систем управления. Вместе с тем, отсутствие возможности моделирования средствами ЭВМ процессов шлифования с учетом динамических характеристик системы, не позволило авторам выполнить анализ происходящих вынужденных колебаний при шлифовании и их связи со степенью устойчивости динамической системы станка.

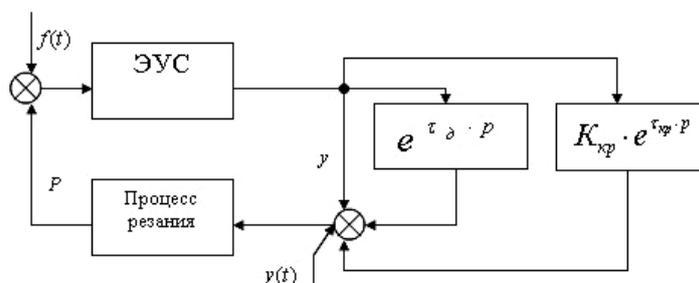


Рис. 1. Схема динамической системы процесса шлифования

Требуемые значения параметров качества, по мнению авторов работ [9, 10], можно определить с помощью комплексных параметров свойств поверхностного слоя. Так, комплексный параметр свойств поверхностного слоя детали, определяющий ее несущую способность (контактную жесткость), имеет вид:

$$\Pi = \left(\frac{Rp^{\nu} Wp^2 Hp^2}{k} \right)^{\frac{1}{\nu+4}}, \tag{1}$$

где Wp, Hp – высота сглаживания соответственно волнистости и макроотношения поверхности детали; ν – параметр экстраполяции начального участка кривой относительных опорных длин профиля шероховатости поверхности ($\nu \approx 2$ [9, 10]); k – отношение микротвердости поверхности после шлифования и исходной микротвердости поверхности.

Повышение точности макрогеометрических параметров поверхности готовых изделий из камня может быть достигнуто за счет совершенствования технологического процесса шлифования и применения адаптивных станочных приспособлений.

Для выявления особенностей влияния технологических и конструктивных параметров технологической оснастки на характеристики топографии поверхности изделий была проведена серия экспериментов.

Целью данной работы является выявление в ходе экспериментальных исследований влияния технологических факторов и конструктивных параметров технологической оснастки на характеристики топографии поверхности изделий из природного камня при обработке шлифованием.

Задачи исследований:

- экспериментально определить взаимосвязь топографии обрабатываемой и обработанной поверхностей заготовки.
- получить математическую модель топографии обработанной поверхности.
- разработать конструкцию адаптивного станочного приспособления для шлифования заготовок из камня.

В соответствии с поставленными задачами в качестве контролируемых величин принимались:

- входные величины: режимы резания, характеризующиеся скоростью подачи V_n , усилием прижима инструмента P_o , припуском обработки Z .
- выходные величины: усилие подачи P_x , величина съема материала h по поверхности заготовки.

– в качестве заготовок при проведении экспериментальных исследований принят гранит. Обработывались образцы Янцевского месторождения (прочность при сжатии $210 \div$ МПа, плотность $2,62 \div 2,82$ г/см³).

Для каждого образца заготовки и двух вариантов инструмента (базовый и модернизированный [2]) проводился полный факторный эксперимент. Скорость шлифования принята равной 8,8 м/с (частота вращения инструмента $n = 1600$ об/мин).

Уровни варьирования факторов:

– x_1 подача: 400–630–800 мм/мин.

– x_2 величина удаляемого припуска: 200–400–600–800–1000 мкм.

Измеряемым параметром являлась величина съема материала u , мкм, которая производилась в 25 точках поверхности с интервалом в 30 мм.

Перед проведением каждой точки плана эксперимента производилось измерение высоты площадки шлифования. Для проведения экспериментов была выполнена рандомизация точек проведения эксперимента. Для каждой точки факторного пространства выполнялось по три параллельных опыта.

В процессе шлифования осуществлялось два полных рабочих хода инструмента с продольной подачей, и фиксировалась осевая сила P_o .

При проведении экспериментов использовалась экспериментальная установка, состоящая из основного технологического оборудования, измерительных приборов и оснастки, а также вспомогательных устройств, рис. 2 [11]. Реализация торцевого плоского шлифования осуществлялась на модернизированном вертикально-фрезерном станке 6М13П. Модернизация станка заключалась в установке на конец шпинделя специальной головки для крепления торцевого шлифовального инструмента и подачи СОТС через центральное отверстие шлифовального круга.

В качестве инструмента для шлифования гранита использовали круги алмазные шлифовальные АГШГ Д160 мм АС50 400/315 М6-14.50 % ТУ 88 Украина 90. 513-81 производства ИСМ НАНУ.

В качестве измерительного средства использовался прибор, рис. 3 [2].

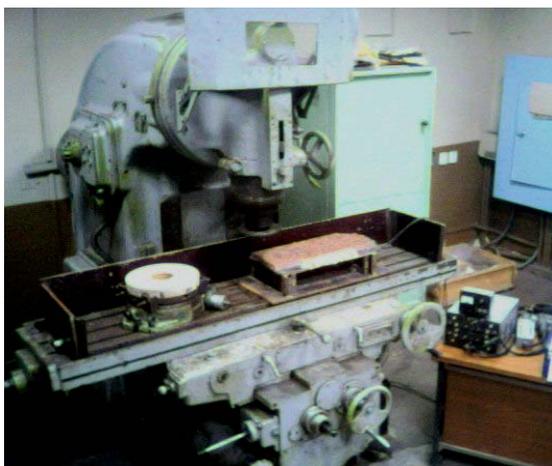


Рис. 2. Вид экспериментальной установки



Рис. 3. Устройство измерения величины съема поверхностного слоя

Для проведения точных тензометрических исследований характера и величины динамически изменяющихся усилий шлифования использовался разработанный авторами специальный тензометрический стол, рис. 4 [12–13].

В качестве усилительного, преобразующего аналогово-цифрового и записывающего устройства, использовались тензоусилитель ТА-5, аналогово-цифровой преобразователь Pico ADC-16 и персональный компьютер.

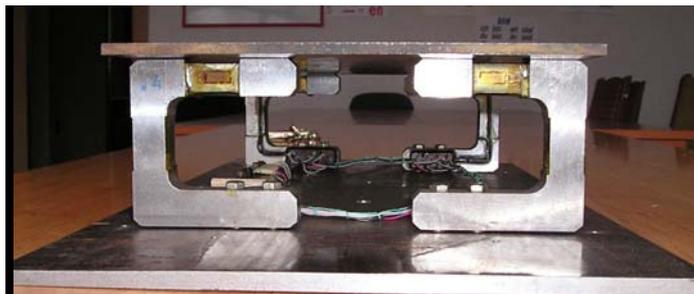


Рис. 4. Вид тензометрического стола

В результате обработки полученных данных, было установлено, что топографические характеристики поверхностных слоев (рис. 5), полученных в результате обработки, являются практически эквидистантными, т. е. при шлифовании камня макрогеометрия обрабатываемой поверхности практически не изменяется.

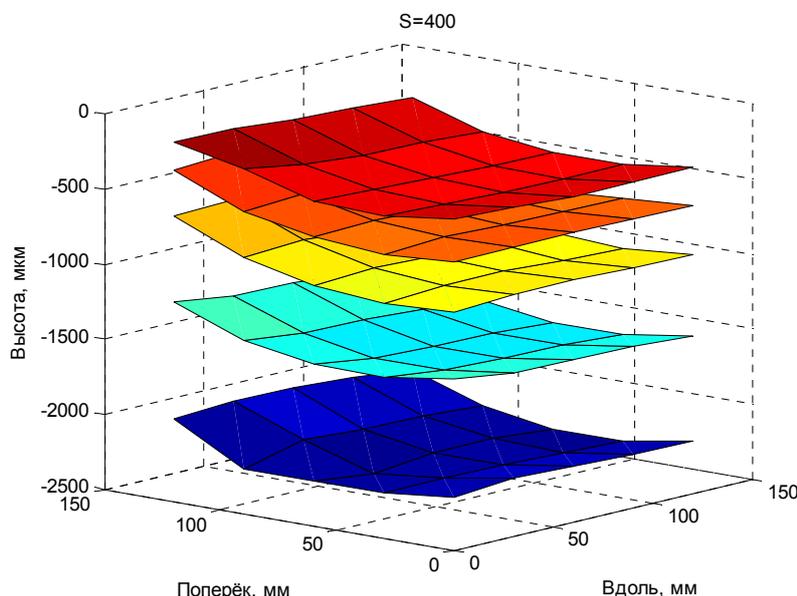


Рис. 5. Характер изменений топографии поверхностного слоя заготовки гранита при обработке шлифованием

Это обусловлено упругой деформацией элементов СПИД под действием сил шлифования. Так, при прохождении выпуклой части заготовки силы шлифования увеличиваются, и, соответственно, увеличивается отжим заготовки от инструмента. Таким образом, при реализации процесса шлифования природного камня работает механизм копирования макронеровностей поверхностного слоя.

В этом случае параметр высоты мгновенной точки поверхностного слоя заготовки подчиняется зависимости:

$$A_i = A_{i-1} \cdot k_i, \tag{2}$$

где A_i, A_{i-1} – высота макронеровностей до и после обработки; k_i – коэффициент уточнения:

$$k_i = \iint_{bl} f(x, y) dx dy, \tag{3}$$

где $f(x, y)$ – функция высоты профиля вдоль и поперек поверхности заготовки; b, l – ширина и длина заготовки.

Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что после четырех двойных проходов модернизированного круга и удалением общего припуска 1,6 мм при подаче 400 мм/мин отклонение обработанной поверхности заготовки от плоскостности составило: максимальное – 290 мкм, среднее – 94 мкм, при соответствующей первоначальной: максимальной – 320 мкм, средней – 117 мкм. При обработке базовым кругом при удалении припуска 1,97 мм при подаче 400 мм/мин отклонение обработанной поверхности заготовки от плоскостности составило: максимальное – 380 мкм, среднее – 135 мкм, при соответствующей первоначальной: максимальной – 530 мкм, средней – 226 мкм. Значительная погрешность обработки заготовки обусловлена износом станка, на котором проводился эксперимент. Под действием силы резания, из-за больших зазоров в шпиндельном узле станка, положение круга изменяется, ось его вращения располагается не перпендикулярно обрабатываемой поверхности и формируется криволинейная (вогнутая) поверхность (рис. 5).

Анализ экспериментальных данных доказал, что уменьшить высоту макронеровностей обработанной поверхности заготовки традиционным технологическим способом, заключающемся в многопроходном удалении припуска, не удалось даже при использовании модернизированного круга.

По результатам статистической обработки экспериментальных исследований была разработана математическая модель оценки топографии поверхностного слоя заготовки:

$$h_{i+1} = a + b \cdot S + c \cdot t + d \cdot h_i + e \cdot S^2 + f \cdot t^2 + g \cdot h_i^2 + h \cdot S \cdot t + i \cdot S \cdot h_i + j \cdot t \cdot h_i, \quad (4)$$

где $a...j$ – коэффициенты; S – подача; t – припуск; h_i – средняя величина неровностей поверхности на i проходе; h_{i+1} – средняя величина неровностей поверхности на $i + 1$ проходе.

Полученная модель позволяет при известной первоначальной величине макронеровностей обрабатываемой поверхности произвести оценку и прогнозировать величину макронеровностей обработанной поверхности.

Улучшение характеристик топографии поверхности заготовки может быть достигнуто управлением мгновенным положением заготовки при реализации процесса шлифования.

Одним из способов достижения цели – улучшения макрогеометрических параметров поверхностного слоя, является усовершенствование технологии обработки, за счет использования мехатронных приспособлений [12]. Одним из современных направлений совершенствования обрабатывающих станков, с целью повышения эффективности их работы, является оснащение их средствами адаптивных систем управления [13].

Улучшение макрогеометрических показателей топографии поверхностного слоя заготовки можно достичь принудительным изменением взаимного положения шлифовального круга и заготовки. Поскольку варьировать положением шлифовального круга затруднительно, то целесообразно изменять мгновенное положение заготовки по отношению к обрабатываемому инструменту.

Эффективным направлением корректировки мгновенным положением заготовки при ее механической обработке на станке является использование движителей микроперемещений. В качестве таких движителей целесообразно использовать электрические приводы, поскольку в настоящее время управление их действием является быстрым по времени и наиболее развитым. В таком случае, в качестве приводом микроперемещений целесообразно использовать движители на основе обратного пьезоэффекта, реализуемого пьезодвигателем [8], или магнитострикционного принципа действия. Применение именно таких движителей позволит автоматизировать процесс управления положением заготовки во время обработки по высоте макронеровностей поверхностного слоя, путем приближения – удаления поверхности заготовки к движущейся режущей части инструмента.

Конструкция адаптивного приспособления показана на рис. 6. Приспособление состоит из основания 1, на котором установлены движители микроперемещений 4, работающие на

принципах магнестрикционного, либо обратного пьезоэффекта [14]. Приводы микроперемещений 4 соединены с плитой 2. Плита 2 предназначена для установки обрабатываемой заготовки. На нижней грани плиты 2 установлен пневмоцилиндр 3, шток которого соединен с зажимным элементом 6. Зажимной элемент 6 является самоустанавливающимся и перемещается по пазу в плите 2. Для базирования заготовки на верхней грани плиты 2 размещена опора 5. Приспособление крепится на столе станка при помощи станочных болтов, для которых в основании 1 выполнены пазы. Для управления вертикальным положением пьезодвигателей необходимо использовать управляющий сигнал, системы адаптивного управления [15–17].

В качестве сенсора усилий резания при реализации технологического процесса обработки изделия может быть использован датчик, работающий на принципах прямого пьезоэффекта и позволяющий измерять осевые усилия шлифования. Параметры режимов обработки могут быть определены по методикам [17].

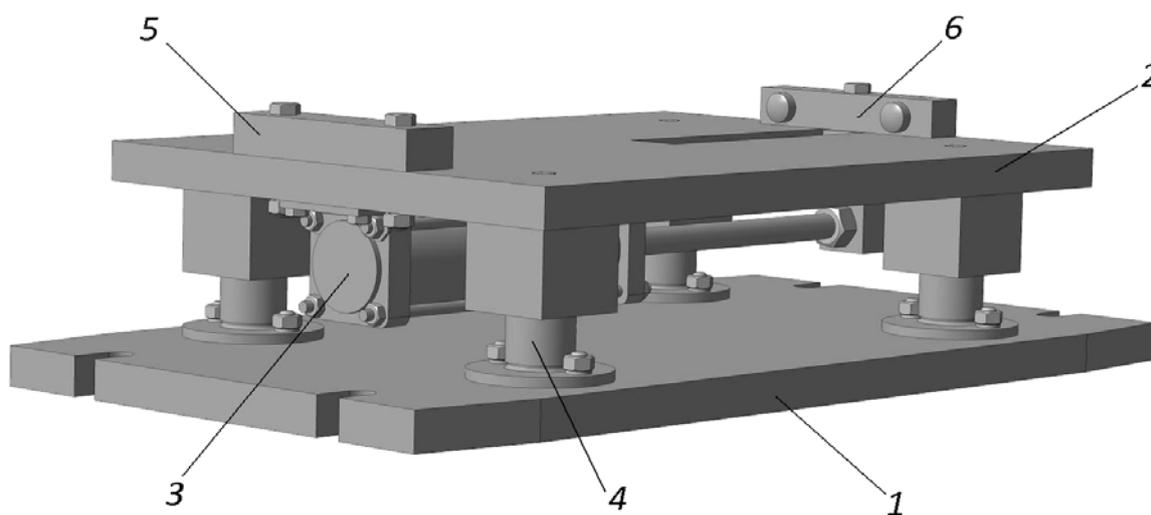


Рис. 6. Схема конструкции адаптивного приспособления:

1 – основание; 2 – плита; 3 – пневмоцилиндр; 4 – привода микроперемещений; 5 – опора; 6 – зажимной элемент

Приспособление работает следующим образом. На плиту 2 устанавливается заготовка в нужном положении, с упором в опору 5. После этого подается сжатый воздух в поршневую полость пневмоцилиндра 3. Зажимной элемент 6, прикрепленный к штоку пневмоцилиндра, перемещается и закрепляет заготовку. После закрепления заготовки начинается процесс шлифования. После момента касания инструмента с поверхностью заготовки, информация с датчика, фиксирующего осевую силу, поступает в систему управления. При увеличении осевой силы шлифования управляющий сигнал подается на пьезодвигатели. Они приподымают стол и заготовку на величину, соответствующую приросту осевой силы.

Количество двигателей микроперемещений выбирается из расчета устойчивости конструкции и получения необходимой точности выполнения технологического процесса шлифования заготовки. Для рациональной работы конструкции приспособления и возможности мгновенного воздействия на геометрические параметры топографии поверхности заготовки принято четыре пьезодвигателя, расположенных по краям приспособления.

ВЫВОДЫ

Выполнены экспериментальные исследования процесса шлифования природного камня и получены данные о топографии обработанных поверхностей. Разработана математическая модель, которая на основе данных о топографии обрабатываемой поверхности

и режимах обработки позволяет прогнозировать топографию обработанной поверхности. Анализ полученных результатов позволил предложить один из путей решения задачи – уменьшения величины макронеровностей обработанной поверхности за счет управлением мгновенным положением заготовки в процессе обработки.

Разработанная схема конструкции специального адаптивного приспособления с приводами малых перемещений позволяет осуществить управление макрогеометрическими параметрами поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Приспособление может использоваться в новых и при модернизации существующих конструкций камнеобрабатывающего оборудования, в новых технологиях обработки хрупких, дорогостоящих и труднообрабатываемых изделий. Полученные в результате исследований данные позволяют определить новые направления дальнейшего повышения качества и эффективности технологических процессов шлифования заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартыненко И. И. *Состояние и перспективы развития геологической отрасли в Украине* / И. И. Мартыненко // *Инструментальный світ*. – Київ : ІВЦ НАН України. – 2002. – № 2. – С. 10–12.
2. Горобець І. А. *Исследование влияния формы режущей кромки шлифовального круга на производительность обработки изделий из природного камня* / И. А. Горобець, А. Н. Михайлов, Н. В. Голубов // *Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнародний зб. наукових праць*. – Донецьк : ДонНТУ, 2008. – Вип. 35. – С. 49–58.
3. *Добыча и обработка природного камня : справочник* / Под общ. Ред. А. Г. Смирнова. – М. : Недра, 1990. – 445 с.
4. Карюк Г. Г. *Обработка камня инструментом из синтетических алмазов* / Г. Г. Карюк, Б. Л. Оситинский. – Киев : УкрНИИИТИ, 1968. – 23 с.
5. Хусу А. П. *Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход)* / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 344 с.
6. Дьяченко П. Е. *Качество поверхности при обработке металлов резанием* / П. Е. Дьяченко, М. О. Якобсон. – М. : Машиз, 1951. – 250 с.
7. Бишутин С. Г. *Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании : монография* / С. Г. Бишутин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
8. *Управление процессом шлифования* / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свирицев, В. П. Ларшин – К. : Техника, 1983. – 184 с.
9. *Качество машин : справ. В 2 т. Т. 1* / А. Г. Суслов, Ю. В. Браун, Н. А. Виткевич и др. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
10. Суслов А. Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин* / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
11. *Экспериментальная установка для исследования процессов шлифования изделий из природного камня* / А. Н. Михайлов, И. А. Горобець, А. В. Байков, Н. В. Голубов, А. Л. Ищенко // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – Донецьк, ДонНТУ, 2005. – Вып. 92. – С. 164–174. – (Серія «Машинобудування і машинознавство»).
12. Горобець І. А. *Управление качеством поверхностного слоя обрабатываемой заготовки* / И. А. Горобець, А. Н. Михайлов // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – Донецьк : ДонНТУ, 2004. – Вип. 71. – С. 164–174. – (Серія «Машинобудування і машинознавство»).
13. *Die Parameter der Adaptronsysteme der Drehmaschinen – Modern Technologies, Quality and Restructuring International Conference N.C.M.R / I. Gorobez, I. Navka, I. Lapajeva, K. Schaban // Bulletin of the Politechnic institute of Jassy*. – Iassy, Romania 23-25 of May 2002, Vol. XLVIII. – S. 100–104.
14. Паліс Ф. *Нетрадиційні електромеханічні актуатори та їх застосування* / Ф. Паліс. – Донецьк, ДонНТУ, 2002. – 29 с.
15. *Gorobez I. Adaptronsystem in der Werkzeugmaschine für die spanabhebende Formung – Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau / I. Gorobez, N. Golubov // 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage*. – Berlin, Logos-Verl., 2001. – S. 45–51.
16. *Die Parameter der Adaptronsysteme der Drehmaschinen – Modern Technologies, Quality and Restructuring International Conference N.C.M.R / I. Gorobez, I. Navka, I. Lapajeva, K. Schaban // Bulletin of the Politechnic institute of Jassy : Iassy, Romania 23-25 of May 2002*. – Vol. XLVIII. – S. 100–104.
17. Горобець І. А. *Параметры регулирования адаптронных систем токарных станков*. В 2-х кн. Кн. 2 / И. А. Горобець, К. Шабан // *Материалы Третьего Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития институционального партнерства»*. – Таганрог, ТРТУ, 2002. – № 2. – С. 47–52.