

УДК 621.1: 679.8

© В. П. Луговой, Н. М. Волк

## ШЛИФОВАНИЕ ШАРИКОВ ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

### Аннотация

Исследована и обоснована возможность применения ультразвуковых колебаний при шлифовании шариков из природного камня. Экспериментально исследовано влияние ультразвуковых колебаний на съем материала, разноразмерность и точность формы образцов шариков из природных камней. Показано перспективность и преимущества предложенной технологии для шлифования твердых камней в сравнении с традиционной.

### Ключевые слова

шарики; натуральный камень; шлифование; ультразвуковые колебания

© V. Lugovoi, N. Volk

## GRINDING OF BALLS FROM THE NATURAL STONE WITH USE OF ULTRASONIC FLUCTUATIONS

### Annotation

Possibility of application of ultrasonic fluctuations when grinding balls from a natural stone is investigated and proved. Influence of ultrasonic fluctuations is experimentally investigated on will eat material and accuracy of a form of samples of balls from natural stones. It is shown prospects and advantages of the offered technology to grinding of firm stones in comparison with traditional.

### Keywords

balls; natural stone; grinding; ultrasonic fluctuations

В ювелирных изделиях широко используются шарики из различных видов природно-

го камня диаметром от 4 до 12 мм и более с допуском на диаметр 0,05 – 0,1 мм [1]. В основе механизма формообразования сферической поверхности лежит процесс резания при относительном проскальзывании шариков между рабочими инструментами. При этом съем припуска в единицу времени пропорционален скорости проскальзывания и давлению в зонах контакта. Технология изготовления шариков из природного камня состоит из следующих этапов: распиловки природного сырья на кубики; предварительного формообразования шлифованием; чистового шлифования для достижения требуемой точности и шероховатости и полирование для достижения блеска поверхности. Предварительное формообразование кубиков до шарообразной формы выполняется методом галтовки на станках для грубого шлифования шариков.

Вторым, важнейшим этапом в технологии изготовления шариков из природного камня, определяющим их основные характеристики, является шлифование, которое выполняется обкатыванием шариков в концентрических канавках между двумя рабочими дисками при подаче абразивной суспензии. Специфической особенностью шлифования сферических поверхностей как вида абразивной обработки, определяющей сложность данного процесса, трудоемкость и невысокую производительность, является отсутствие фиксированной технологической базы на заготовке.

В процессе перекатывания между двумя дисками по криволинейному желобу (рисунок 1. а) шарики совершают вращение вокруг трех осей  $X$ ,  $Z$ ,  $Y$  соответственно на углы  $360:8:1^\circ$ . Превалирующее вращение шарика возникает вокруг оси  $OX$  от действия сил трения между двумя дисками сверху в точке  $A$  и снизу в точках  $B$  и  $C$ . Проскальзывание шарика вокруг оси  $OY$  происходит в точках  $B$  и  $C$  в криволинейном желобе из-за разности скоростей, так как окружная скорость на периферийной части желоба в точке  $B$  больше, чем скорость на внутренней дорожке в точке  $C$ . В этих точках возникает пара сил  $F_1$  и  $F_2$ , которая стремится повернуть шарик относительно оси  $OZ$ . Поворот шарика вокруг третьей оси  $OX$  возможен только в том случае, когда гироскопический момент больше момента сил трения, препятствующего этому повороту. Таким образом, результирующее вращение шарика происходит вокруг оси, наклоненной к горизонтальной плоскости под углом  $\alpha$ .



II. кинематическим и динамическим (геометрия профиля дорожек, отношение скоростей проскальзывания в зонах контакта шариков с дисками, соотношение угловых скоростей шарика в рабочей зоне и т.д.).

Вторая группа факторов оказывает влияние в результате изменения конструкции рабочих инструментов или технологического оборудования.

Управление этими факторами позволяет изменить условия обработки шариков путем разработки новых и модернизации существующих способов технологии обработки, оборудования и инструментов в результате:

1. создания новых конструкций станков и устройств;
2. модернизации оборудования и инструментов:
  - оснащением средствами автоматического контроля;
  - повышением точности станков;
  - оптимизацией конструкций и материалов инструментов;
  - повышением динамической устойчивости технологической системы.
3. совершенствования технологии обработки шариков:
  - разработкой новых способов обработки;
  - изменением кинематическим соотношением скоростей вращения инструментов;
4. оптимизацией условий и режимов обработки шариков:
  - разработкой новых составов абразивных паст и суспензий;
  - возбуждением в инструменте колебаний.

Наиболее эффективными способами повышения производительности и качества обработки являются меры, направленные на разработку и внедрение принципиально новых способов обработки шариков, в том числе способов, с использованием дополнительных видов энергии помимо используемой механической энергии. Качественно новый этап развития процесса обработки шариков связан в частности с использованием энергии ультразвуковых колебаний. Начало этому этапу положили работы М.Идо в Японии по использованию ультразвуковых колебаний (УЗО) в процессе обработки металлических шариков для шарикоподшипников [3]. Дальнейшие исследования в этом направлении были проведены в СССР [4,5], результаты которых свидетельствуют о том, что использование энергии ультразвуковых ко-

лебаний при шлифовании металлических шариков открывает новые возможности по управлению процессом обработки, изменяя динамику и кинематику движения шариков в зоне обработки и тем самым обеспечивая повышение производительности, точности размеров и формы, а также качества поверхности обработанных заготовок [6]. Был предложен ряд технических решений для шлифования шариков, в которых используются ультразвуковые колебания. Проведенные исследования показали, что основными факторами, влияющими на производительность и точность обработки, являются амплитуда ультразвуковых колебаний и статическая нагрузка. Было установлено, что повышение амплитуды колебаний способствует интенсификации процесса, что объясняется изменением динамического и кинематического характера взаимодействия инструмента и шариков, более интенсивным движением шариков в зоне обработки. Динамическая сила  $R$ , вызванная действием колебаний в инструменте, создает дополнительное принудительное вращение шариков вокруг оси  $OУ$ , и в контактных зонах А, В и С имеет место чистое скольжение поверхности шариков относительно дисков (рисунки 1, б). Изменяется также и соотношение между скольжением при качении и вращении.

Однако до настоящего времени исследования по оценке влияния ультразвуковых колебаний на процесс шлифования шариков из хрупких материалов, в том числе из природных и искусственных камней не проводились, хотя и представляют как научный, так и практический интерес.

В связи с этим, в настоящей работе была поставлена задача исследовать влияние ультразвуковых колебаний на производительность обработки и точность геометрической формы шариков из природного камня. Общий вид и схема акустической системы для ультразвуковой обработки шариков приведены на рисунке 2.

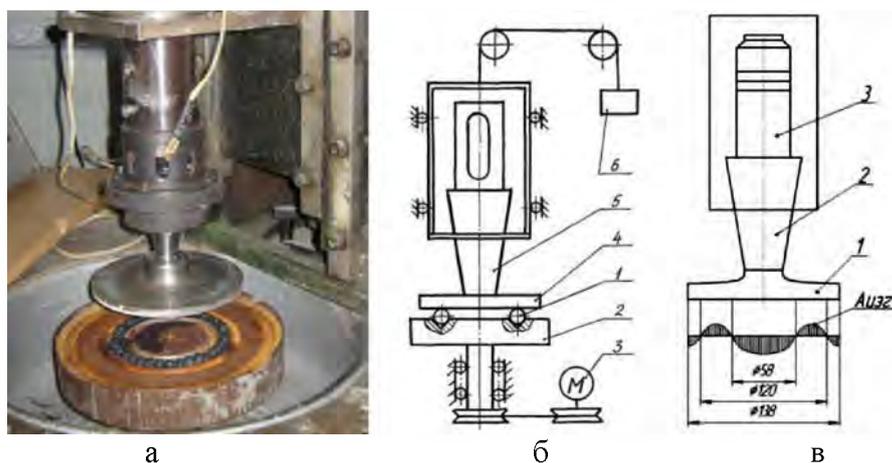
Диаметр диска, в котором возникает резонанс, был рассчитан из известного уравнения:

$$D = \frac{x_{1n} C_p}{\pi f_p},$$

где  $f_p$  - частота колебаний преобразователя;  $C_p$  - скорость распространения радиальных колебаний;  $x_{1n}$  - корень уравнения, которое имеет вид:

$$xI_0(x) - \frac{1 - 2\mu_n}{1 - \mu_n} I_1(x) = 0,$$

где  $I_0(x)$  и  $I_1(x)$  - Бесселевы функции нулевого и первого порядка;  $\mu_n$  - коэффициент Пуассона.



1 – обрабатываемые шарики; 2 – нижний диск; 3 – электродвигатель; 4 – верхний диск; 5 – концентратор ультразвукового преобразователя; 6 – противовес

Рисунок 2 - Общий вид и схема акустической системы для ультразвуковой обработки шариков: а - общий вид;

б - принципиальная схема экспериментальной установки для обработки шариков;

в - эпюра поперечных колебаний  $A_{и}$ , возбуждаемых на дисковом инструменте

Для возбуждения ультразвуковых колебаний в рабочем диске диаметром 138 мм была использована ультразвуковая аппаратура, включающая ультразвуковой генератор с выходной мощностью 200 Вт и пьезокерамический преобразователь номинальной частотой 21 кГц. Обрабатываемые шарики 1, уложенные в V-образные желоба нижнего диска 2, прижимались верхним диском 4. Вращение нижнему диску 2, установленному на шаровой опоре, сообщается через клиноременную передачу от электродвигателя 3. Шаровая опора обеспечивала плавающее положение и равномерный прижим по всей поверхности диска. Верхний диск 4, изготовленный из стали, присоединялся к концентратору ультразвуковых колебаний навинчиванием по резьбе. Привод станка позволял получить ступенчатое регулирование частоты вращения шпинделя в диапазоне 6-64 об/мин.

Исходными заготовками для проведения экспериментов служили шарики диаметром 10-12 мм из природного камня (серпентинита и мрамора). Серпентинит (змеевик) представляет интерес как природный камень с неоднородным строением и наличием большого количества включений различной твердости с волокнистой или листоватой структурой. Это плотная горная порода, которая образуется в результате изменения (серпентинизации) гипербазитов при метаморфизме магматических пород группы перидотита и пикрита, иногда также доломитов и доломитовых известняков. Серпентин объединяет группу минералов, состав которых можно выразить формулой  $(Mg, Fe, Ni)_6Si_4O_{10}(OH)_8$ , где магний, железо и никель могут присутствовать в различном соотношении. От минерального состава напрямую

зависит твердость породы, которая может меняться от 2,5 до 5 по шкале Мооса по мере того, какие минералы преобладают в составе – твердые, как амфиболы, или мягкие, как тальк и серпентины. *Мрамор* с равномерно белой окраской был выбран в качестве хрупкого материала с изотропной структурой, равномерной зернистостью мягкого минерала и с малым количеством включений. Он представляет собой кристаллическую горную породу, состоящую в основном из минералов кальцита или доломита, образующийся из известняка и других карбонатных пород под действием высоких температур и давления в результате регионального и контактного метаморфизма. Структура пород мрамора чаще всего гранобластовая мелко-, средне- и крупнозернистой разновидности, среди которых наибольшей прочностью, износостойкостью и долговечностью обладают мелкозернистые разновидности мрамора. Породы мрамора бывают полностью раскристаллизованы (собственно мрамор) или частично раскристаллизованы (мраморовидные известняки).

Шарики были изготовлены из кубиков размеров 14 мм, которые скруглялись на галтовочном станке модели СГС-1 (рисунок 3). Полученные шарики имели значительную разноразмерность - до 1,3 мм и отклонением от сферической формы - до 1,5 мм.



Рисунок 3 - Заготовки шариков из серпентинита и мрамора

В исследовании применялись различные суспензии шлифпорошков (электрокорунд N10) и микропорошков (карбид кремния M40 и M28) с водой в соотношении 1:3.

Алгоритм исследований приведен на рисунке 4.

Экспериментальные исследования черновой обработки шариков показали, что введение в зону обработки ультразвуковых колебаний обеспечивает повышение производительности шлифования и точности, а также уменьшение разноразмерности шариков (рисунок 5. а, б). Эксперименты проводились при следующих условиях: нижний диск из серого чугуна выполнен с соосными канавками; частота вращения нижнего диска - 64 об/мин; абразивный материал: шлифпорошок из электрокорунда зернистостью №10.



Рисунок 4 - Алгоритм реализации эксперимента

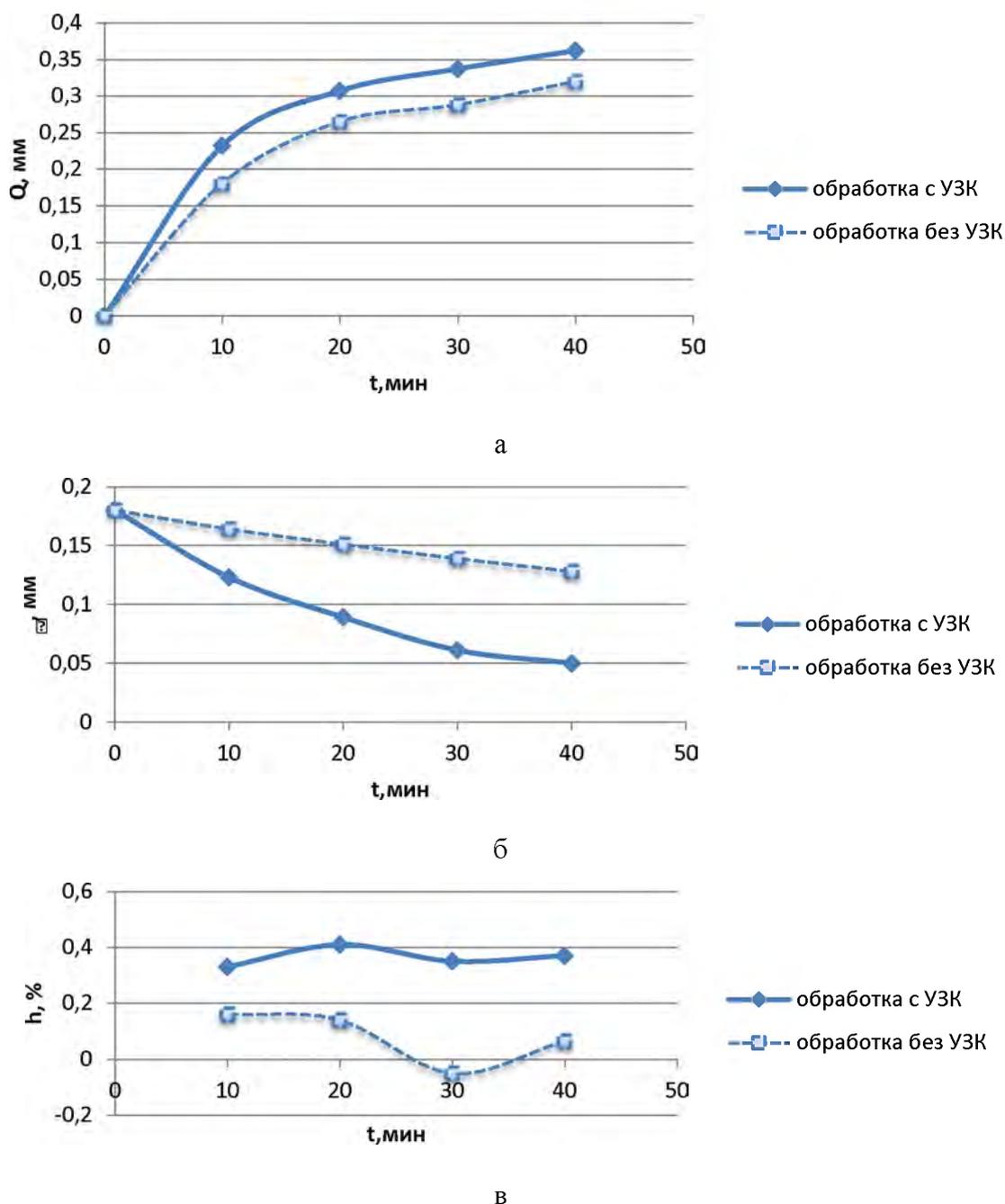


Рисунок 5 -Графики влияния продолжительности обработки на:

а - съём припуска; б - разноразмерность; в -точность геометрической формы шариков

При этом наибольшая интенсивность съёма заготовок происходит в первые 10-20 мин обработки, после чего изменение показателей снижаются в обоих случаях, что можно объяснить постепенным увеличением числа абразивных частиц за счет поступления в абразивную суспензию продуктов съема материала и более интенсивной обработки в первые минуты шариков с наибольшими размерами в партии.

Однако дальнейшая обработка заготовок из камня приводит к ухудшению точности

обработки, что очевидно связано с образованием большого количества шлама - продуктов износа, которые накапливались в желобах нижнего рабочего диска, повышением вязкости шлифующей суспензии, которые препятствовали равномерному вращению шариков вокруг своих осей в желобах инструмента. По этой причине происходит уменьшение величины снимаемого припуска и ухудшение геометрической формы образцов шариков. Очевидно, что для обеспечения стабильности процесса обработки необходимо обеспечить отвод вязкой суспензии из зоны обработки, дальнейшее обновление абразивной суспензии. Эксперименты по чистовой обработке полученных полуфабрикатов проводились при тех же условиях обработки, но в качестве абразивного материала использовался микропорошок карбид кремния М28. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

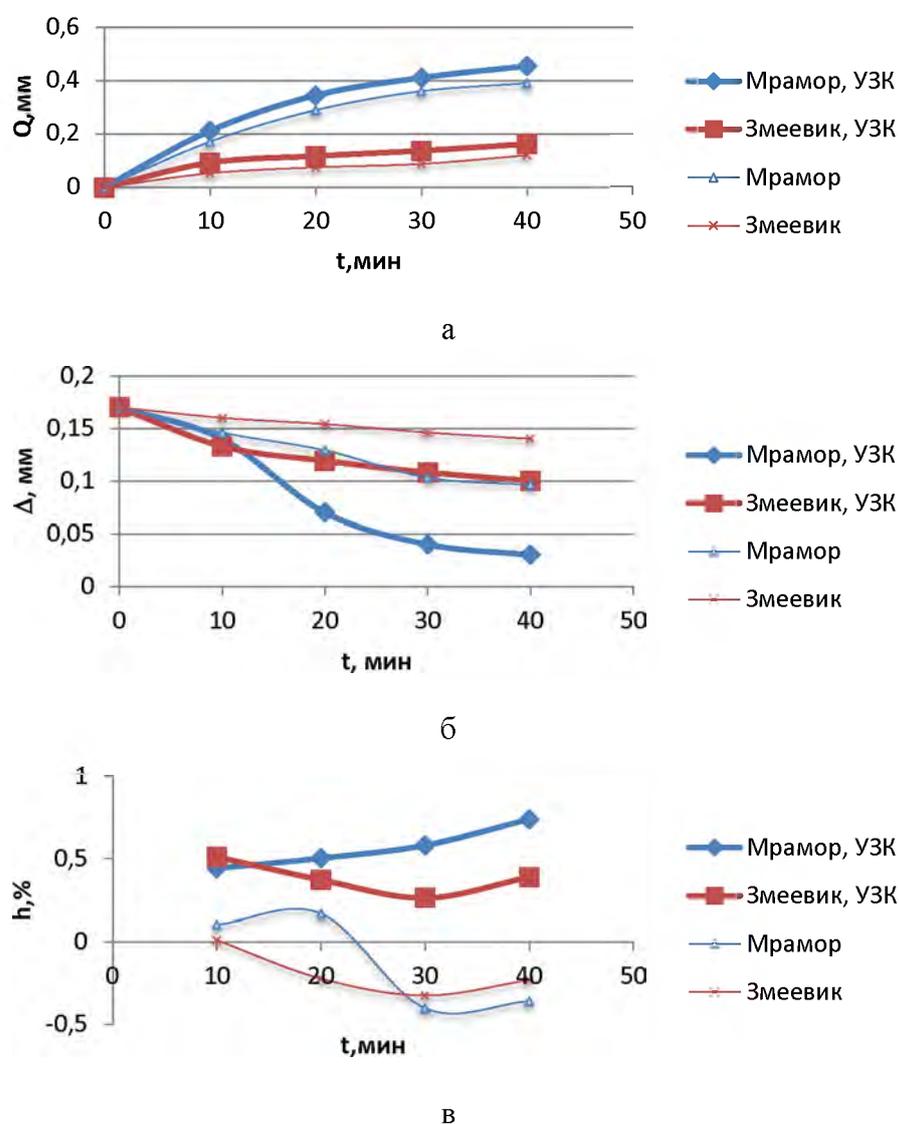


Рисунок 6 - Графики влияния обрабатываемого материала на:

а - съём припуска; б - разноразмерность шариков; в - точность геометрической формы

Полученные зависимости демонстрируют те же закономерности изменения показателей обработки шариков для всех видов материалов, что и при черновом шлифовании. Можно отметить, что использование ультразвуковых колебаний во всех случаях интенсифицирует процесс вне зависимости от используемых материалов камня.

Некоторые различия в показателях обработки шариков можно объяснить различием твердости серпентинита и мрамора и структурой материалов. Более однородное строение камня облегчает работу абразивных зерен и обеспечивает равномерный съём припуска со всех участков поверхности заготовок.

Как показали дальнейшие исследования, в силу особенностей процесса ультразвукового шлифования, на производительность и точность обработки шариков оказывают влияние: свойства камней, расположение желобов относительно узловых линий ультразвуковых колебаний, соосность инструментов, а также ряд технологических факторов.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование ультразвуковых колебаний позволяет повысить производительность шлифования шариков из природных камней, причем эффективность обработки повышается по мере увеличения твердости заготовок.

### Библиографический список

1. Борисов, Б.П. Схемы шлифования калиброванных шаров из янтаря и анализ их кинематических характеристик / Б. П. Борисов, Ю. Ф. Правдин, А. Н. Козека // Инновации в науке и образовании – 2004: международная научная конференция, посвященная 10-летию образования КГТУ (20-22 окт.): материалы / КГТУ. – Калининград, 2004. – с. 178.
2. Ящерицын, П.И. Доводка шариков / П. И. Ящерицын, Л. А. Олендер, С.Б. Грек - Мн., 1968. - 104 с.
3. Ido, M. Study on Supersonic Lapping of Steel Ball / M. Ido - // Journal of the Japan Society of Prec. Engg., vol. 31, 1965, №10, p. 841.
4. Луговой В.П. Исследование процесса доводки шариков в поле ультразвуковых колебаний : автореф. ... канд. техн. наук. - Мн. : 1981 –19 с
5. Есьман, Г.А. Интенсификация процесса безэлеваторной доводки шариков с помощью ультразвука : автореф. дисс.... канд. техн. наук. - Мн. : 1984 – 23с.
6. А.с. 664824 СССР, МКИ В24В 11/02. Устройство для доводки шариков / М. Г. Кисе-

лев, М. Ю. Пикус, В. П. Луговой, Б. Д. Дисон (СССР) -№ 2500298/25-27 ; заявл. 23.06.77; опубл. 30.05.80, Бюл. № 20. – 3с.; ил.

### Сведения об авторах

#### *Луговой Вячеслав Петрович*

*Место работы и должность:* Белорусский национальный технический университет (БНТУ), кафедра «Конструирование и производство приборов», доцент

*Ученое звание, степень:* доцент, кандидат технических наук

*Рабочий адрес и телефон:* 2200, г. Минск, пр. Независимости, 65, БНТУ,

тел.: +7(375)172939101

*E-mail:* Lyhavyvp@mail.ru

#### *Волк Наталья Михайловна*

*Место работы и должность:* Белорусский национальный технический университет (БНТУ), кафедра «Конструирование и производство приборов», магистрант.

*Рабочий адрес и телефон:* 2200, г. Минск, пр. Независимости, 65, БНТУ,

тел.: +7(375)17399101

### Author's details

#### *Lugovoi Vyacheslav*

*Place of work and position:* Belarusian National Technical University (BNTU), Designing and Production of Devices chair, associate professor.

*Academic status, degree:* associate professor, Candidate of Technical Sciences.

*Working address and phone:* 220013, Minsk, Nezavisi mosti Ave., 65, BNTU,  
ph.: +7 (375)172939101

*E-mail:* Lyhavyvp@mail.ru

#### *Voik Natalya*

*Place of work and position:* Belarusian National Technical University (BNTU), "Designing and Production of Devices" chair, undergraduate.

*Working address and phone:* 220013, Minsk, Nezavisi mosti Ave., 65, BNTU,  
ph.: +7(375)17399101