

УДК 621.79 (075.8)

© В.П. Луговой, В.Т. Минченя, И.В. Луговой

ПРОШИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ЮВЕЛИРНЫХ КАМНЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИСТЕМ С КОЛЬЦЕВЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ

Аннотация

Исследован и обоснован новый тип ультразвуковой системы колебаний с концентраторами кольцевого типа, предназначенный для прошивания отверстий в хрупких материалах: стекле и природных камнях. Приведены результаты компьютерного моделирования кольцевых концентраторов при действии ультразвуковых колебаний. Даны результаты сравнительных экспериментальных исследований по оценке производительности прошивания отверстий в природных камнях с использованием различных типов кольцевых концентраторов ультразвуковой системы.

Ключевые слова

прошивание отверстий; ювелирные камни; ультразвуковые системы; кольцевые концентраторы

© V. Lugovoj, V. Minchenya, I. Lugovoj

DRILLING HOLES IN JEWELRY STONES WITH THE USE OF ULTRASONIC SYSTEMS WITH RING CONCENTRATORS

Annotation

The new type of ultrasonic oscillatory system with concentrators of ring type intended for drilling holes in glass and natural stones is investigated. Results of computer modeling of ring concentrators of ultrasonic fluctuations are given. Experimental estimates of productivity of drilling of holes in natural stones with use of various types of ring concentrators are given.

Keywords

drilling holes; jewelry stones; ultrasonic systems; ring concentrators

В настоящее время существуют различные способы обработки отверстий малого диаметра в ювелирных камнях и прочих хрупких материалах (лазерная, ультразвуковая, алмазным сверлом). Наиболее широкое распространение среди них получила ультразвуковая обработка [1,2] с использованием абразивного порошка. За последние десятилетия ультразвуковая техника претерпела существенные изменения: изменилась структура электронной техники и ультразвуковых систем. Одно из новых и перспективных направлений в этой области формируется в области разработки и создания ультразвуковых устройств технологического назначения с упругими элементами в качестве промежуточных волноводов, которое представляет как научный, так и практический интерес. Анализ литературных данных показывает, что данное направление остается до настоящего времени малоизученным, а сведения о применении ультразвуковых систем с упругими элементами ограничены лишь некоторыми разрозненными изобретениями в различных областях техники.

Упругими телами принято называть гибкие детали, способные существенно деформироваться под действием внешних сил и восстанавливать свои размеры [3]. Они широко используются в различных устройствах во многих механизмах и приборах в качестве чувствительных элементов, гибких связей, упругих опор и амортизаторов; для создания силового натяга, аккумуляции энергии и для передачи движения. Конфигурация упругих элементов зависит от назначения и конструкции прибора. По геометрическим признакам упругие элементы разделяются на две основные группы: стержневые, полученные из проволоки или ленты и в виде оболочек, изготовленных из листового материала.

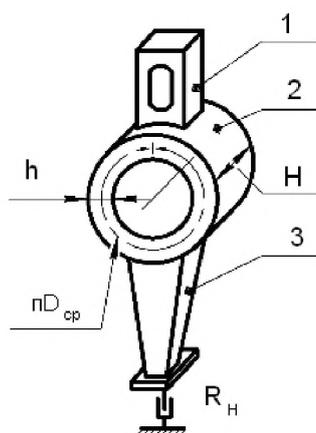


Рисунок 1- Ультразвуковая система с кольцевым резонатором [4]

В большинстве известных ультразвуковых колебательных системах для обработки материалов предложен ряд технических решений, в которых используется преимущественно

способность рабочего инструмента, выполненного в виде упругого тела, аккумулировать и передавать энергию в зону силового контакта. Другое применение упругих тел в ультразвуковой системе заключается в применении в качестве трансформатора и резонатора ультразвуковых колебаний. Таким примером применения кольцевого элемента в ультразвуковой системе является устройство, предложенное в [4], которое предназначено для ударного упрочнения, ультразвукового резания и т.д. Оно состоит из стержневого электромеханического преобразователя 1, промежуточного резонатора 2 в виде упругого цилиндра, конического концентратора 3 с присоединенным к нему рабочим инструментом R_H (рисунок 1). Особенность данной конструкции заключается в том, что ступенчатый резонатор ультразвуковой системы заменен на резонатор кольцевого типа, что, по существу, является новыми оригинальным техническим решением. Однако предложенная конструкция имеет и ряд недостатков, связанных с технологией изготовления и соединения подобного резонатора с кольцевидным преобразователем и волноводом. Существенно увеличиваются габариты конструкции акустической системы.

Отсутствие в литературе сведений об исследованиях и разработках по применению упругих элементов в качестве концентраторов ультразвуковых систем позволяет считать проблему малоизученной. В связи с этим, в данной работе исследуется возможность применения упругих элементов в качестве концентраторов кольцевого типа с целью повышения эффективности работы технологических ультразвуковых систем на примере прошивания отверстий в ювелирных камнях и других хрупких материалах. Для достижения поставленной цели были проведен анализ, обоснование и исследования по разработке кольцевых концентраторов ультразвуковых систем, а также сравнительные эксперименты по оценке производительности прошивания отверстий в хрупких материалах: в камнях и стекле. В основе конструктивных вариантов кольцевых концентраторов были положены различные типы кольцевых концентраторов, приведенных на рисунке 2: в виде колец с плоскопараллельными сторонами с постоянным и переменным сечением; концентрических колец с постоянным и переменным сечением.

Сравнительный анализ упругих и акустических характеристик показал, что наибольшей эффективностью обладают кольцевые концентраторы с переменной жесткостью, обеспечивающие наибольшую концентрацию энергии в рабочей зоне (рисунок 3), которые оказались универсальными и хорошо согласовывались с системами, содержащими традиционные волноводы продольного типа.

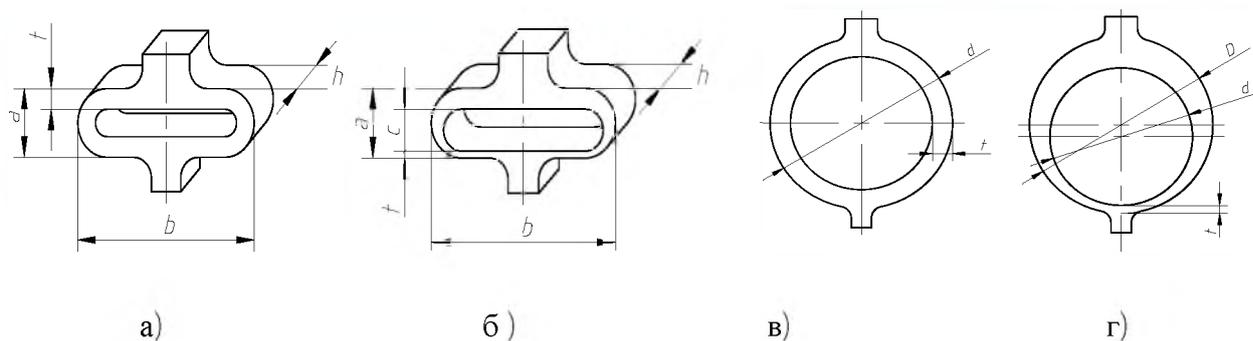
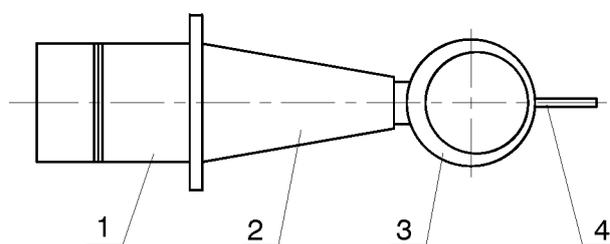


Рисунок 2 - Формы исследуемых кольцевых концентраторов



а)



б)

Рисунок 3 - Ультразвуковая система с кольцевым концентратором: а) - общий вид; б) - схема : 1 – пьезокерамический преобразователь, 2 – резонатор, 3 – кольцевой концентратор; 4 – стержневой рабочий инструмент для прошивания отверстий

Был проведен анализ методом компьютерного моделирования на базе программного обеспечения «ANSIS» напряженного состояния и волновых процессов работы кольцевых концентраторов при действии вынужденных ультразвуковых колебаний и исследование моды собственных колебаний, возникающих в них. Результаты расчетов и моделирования представлены на рисунке 4. Синий цвет на рисунках обозначает расположение узловых линий изгибных колебаний по периметру кольцевого концентратора. На рисунке показан также рост численного значения амплитуды ультразвуковых колебаний по периметру кольцевых концентраторов, а также вдоль рабочего инструмента, предназначенного для прошивания отверстий.

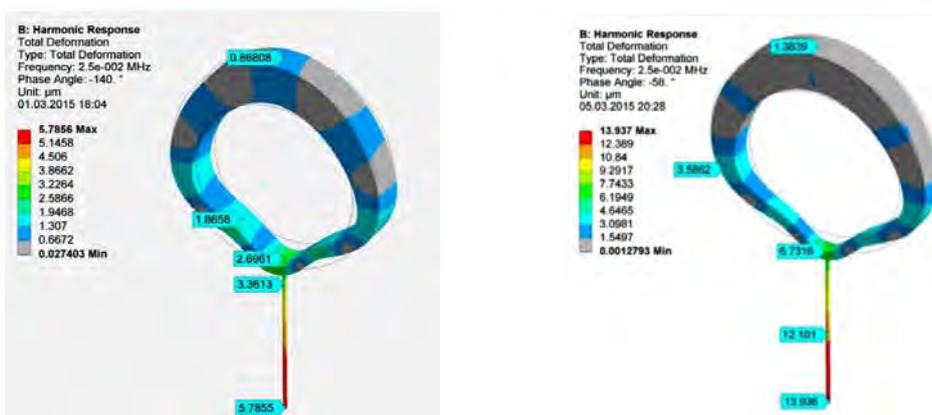


Рисунок 4 - Компьютерные модели кольцевых концентраторов переменной жесткости с различной формой поперечного сечения, с прикрепленным рабочим инструментом

На рисунке 5 показаны различные компьютерные модели форм колебаний кольцевых концентраторов при действии ультразвуковых колебаний различных частот.

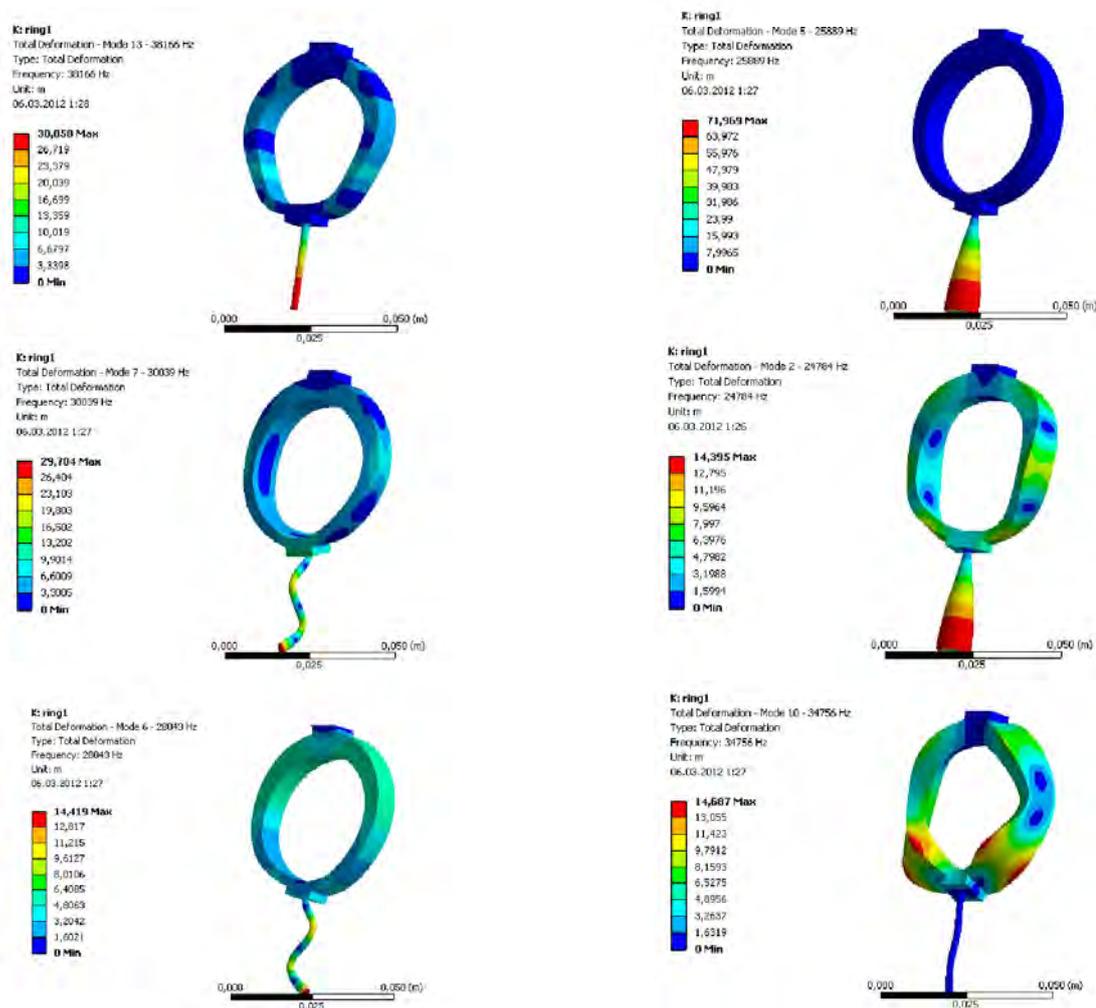


Рисунок 5 - Формы колебаний кольцевого концентратора с переменным сечением

На основании компьютерного моделирования акустической системы, состоящей из кольцевого инструмента и стержневого рабочего инструмента, выполненного в системе конечно-элементного анализа ANSYS, установлено, что величина амплитуды и мода колебаний в элементах акустической системы зависят от их геометрической формы, размеров и частоты ультразвуковых колебаний. Анализ представленных графических изображений свидетельствует о том, что кольцевые концентраторы могут работать в качестве трансформаторов колебаний в широких пределах вынужденных колебаний акустической системы. При изменении частот этих колебаний наблюдается изменение числа узловых точек по периметру колец с четным или нечетным числом узлов $n=2\div 6$. Видно, что упругодеформированное кольцо при различных частотах колебаний может принимать овальную или сложно изогнутую форму. При определенных частотах кольцо может излучать волны симметричной или несимметричной формы, а в рабочем инструменте для прошивания могут возникать изгибные или продольные колебания. Причем продольная волна в рабочем инструменте возбуждалась только в случае осесимметричной формы колебаний упругого элемента. Моделирование колебаний в кольцевых концентраторах показало, что в них формируются изгибные колебания, которые достигают наибольшей амплитуды в сечении с наименьшей жесткостью, т.е. в точке прикрепления к рабочему инструменту. Таким образом, полученные результаты моделирования подтвердили гипотезу об эффективности применения колец с переменным сечением в качестве ультразвуковых концентраторов колебаний.

Анализ линейчатого спектра собственных частот колебаний модели кольца кольцевого концентратора показал, что при действии вынужденных колебаний в пределах до 40 кГц существуют несколько пиков резонансных частот, отличающихся между собой величиной коэффициента усиления, что позволяет использовать подобные конструкции в широком диапазоне частот вынужденных колебаний. Полученные результаты демонстрируют возможность достижения большого коэффициента усиления с помощью кольцевых концентраторов ультразвуковых колебательных систем без стержневых концентраторов поршневого типа, что в свою очередь позволит конструктивно упростить колебательную систему.

При разработке и изготовлении конструкций кольцевых концентраторов учитывались требования, предъявляемые к элементам акустической системы: обладать упругими характеристиками, способностью передачи механических колебаний в пределах ультразвуковых частот, прочностью и надежностью, технологичностью и экономичностью. Были испытаны упругие концентраторы из стали 45 и титанового сплава ВК1, которые в полной мере соот-

ветствовали перечисленным требованиям.

Теоретические положения было подтверждены результатами экспериментальных исследований. В частности была исследована форма распределения амплитуды ультразвуковых колебаний по периметру кольца. Полученные эпюры распределения амплитуды колебаний по периметру кольцевых концентраторов позволили обосновать наиболее рациональную форму и размеры кольцевых концентраторов, обеспечивающих наилучшую эффективность работы ультразвуковой системы.

На рисунке 5 приведена фотография рассеивания мелких абразивных частиц, при воздействии ультразвуковых волн, излучаемых кольцевым концентратором. Акустические волны, излучаемые концентратором, демонстрируют наличие узловых линий изгибных колебаний. Результаты измерений амплитуды колебаний по периметру концентратора, показанные в виде эпюры, свидетельствуют о концентрации энергии в наименее узкой части кольца. Сравнение различных форм рассматриваемых концентраторов позволило установить, что наиболее эффективным из них является кольцевой концентратор с переменной жесткостью, обеспечивающей усиление колебаний до 5 раз.

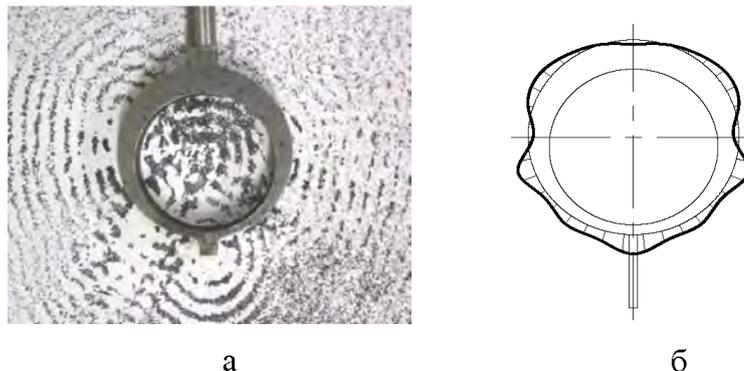


Рисунок 5 - а) - Фото акустических волн вокруг концентратора; б) - эпюра распределения амплитуды колебаний по периметру кольцевого концентратора

Дальнейшие исследования были посвящены оценке эффективности работы исследуемой ультразвуковой системы с прикрепленным стержнем (рабочим инструментом) при прошивании отверстий в ювелирных камнях и стекле. Рабочим инструментом служила длинномерная игла диаметром 0,6 и 1 мм, изготовленная из пружинной стали 65Г, обладающая необходимыми для этого качествами: прочностью, жесткостью, упругостью, износостойкостью и экономичностью. Испытуемым материалом для ультразвукового прошивания служили хрупкие материалы с различной твердостью: листовое стекло марки М7 ГОСТ111-

2001 (с твердостью по шкале Мооса 6,0) толщиной $8 \pm 0,1$ мм, а также образцы природных камней с различной твердостью (по шкале Мооса): лиственит - 3,0; аметист - 6,0; стекло - 6,0. халцедон - 7,0. В качестве водно-абразивной суспензии использовалась механическая взвесь, состоящая из 40 % абразивного порошка из карбида кремния черного, зернистостью 80-Н, ГОСТ3647-80 и 60% технической воды, рекомендованной для работы в промышленных ультразвуковых установках.

Линейную производительность прошивания отверстий при проведении экспериментальных исследований оценивали линейным перемещением инструмента в единицу времени.

Было установлено, что решающим фактором, влияющим на производительность обработки, является амплитуда колебаний. Вторым по значимости фактором является статическая нагрузка, оказывающая влияние на характер виброударного режима работы рабочего инструмента. По результатам исследований предложены новые технические решения, предназначенные для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах с использованием упругих элементов [5].

Сравнительная оценка производительности обработки отверстий в оптическом стекле с использованием кольцевых концентраторов показала, что исследуемая акустическая система позволяет повысить линейную производительность обработки по сравнению с традиционным волноводом продольного типа до 2,4 раз. Сравнительный анализ исследуемых кольцевых концентраторов показал, что наибольшая эффективность работы ультразвуковой системы достигается при прошивании отверстий с использованием кольцевых концентраторов переменного сечения, а меньшая - при работе с кольцевыми волноводами постоянного сечения (рисунок 6), а самые низкие показатели производительности были получены при обработке отверстий с использованием концентраторов с плоскопараллельными сторонами.

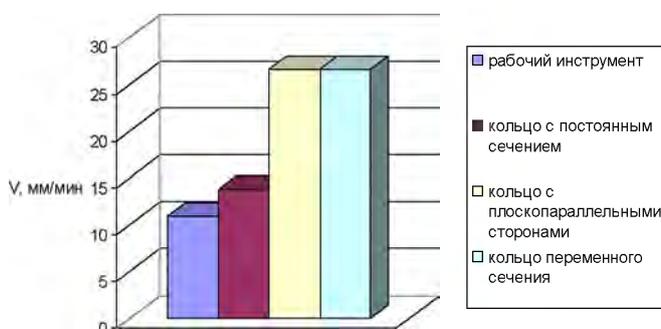


Рисунок 6 - Сравнительная оценка производительности прошивания отверстий

Исследования показали, что точность полученных отверстий при ультразвуковом прошивании зависит от акустических и технологических факторов. Точность обработки оценивалась по отклонениям размера входного и выходного отверстий от номинального, а также по точности формы по конусности и эллипсности отверстия. Было установлено, что 98% отклонений размера на выходе отверстия составляют 0,02мм, конусность при этом не превышает 5°, эллипсность – менее 0,01мм, искривление оси – менее 0.1мм.

Измерение шероховатости производились для образцов, обработанных при режимах, соответствующих максимальной производительности. Установлено, что наибольшие значения шероховатости R_a находятся в пределах до 0,1 мкм и зависят в основном от размера зерен абразивного порошка.

Таким образом, на основании комплексных исследований сделан вывод о том, что новый тип кольцевых концентраторов ультразвуковых систем, являющийся накопителем потенциальной энергии, обеспечивает передачу и усиление ультразвуковых колебаний рабочему инструменту и может быть использован в ультразвуковых системах технологического назначения.

Библиографический список

1. Амитан, Г.Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон // Л.: Машиностроение, 1988. – 719с.
2. Волосатов, В.А. Ультразвуковая обработка / В.А. Волосатов // Лениздат, 1973. – 247 с.
3. Андреева, Л.Е. Упругие элементы приборов / Л.Е. Андреева // М.: Мишиностроение, 1981. – 392 с.
4. Ультразвуковая колебательная система с промежуточным резонатором: Пат. 2106205 СССР, МКИ В 06 В3/00 / В.Н Аленичев, Л.О. Макаров, А.А. Рухман; № 96115571/28; заявл 25.07.1996; опубл. 10.03.1998.
5. Ультразвуковой инструмент для обработки или измерения детали: Пат. на изобретение РБ № 19219, МПК В 06В 1/00 / И.В. Луговой, В.Т. Минченя., В.П. Луговой; № а20120353; заявл 12.03.12; опубл.30.06.2015 // Бюллетень № 3, с.65.

Сведения об авторах

Луговой Вячеслав Петрович

Место работы и должность: Белорусский национальный технический университет (БНТУ), кафедра конструирования и производства приборов, доцент

Ученое звание, степень: доцент, кандидат технических наук

Рабочий адрес и тел.: 220000, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65, БНТУ, тел.: 375-17-292-40-81

E-mail: Lyhavyvp@mail.ru

Минченя Владимир Тимофеевич

Место работы и должность: Белорусский национальный технический университет (БНТУ), кафедра конструирования и производства приборов, профессор

Ученое звание, степень: профессор, кандидат технических наук

Рабочий адрес и тел.: 220000, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65, БНТУ, тел.: 375-17-292-40-81

Луговой Игорь Вячеславович

Место работы и должность: Белорусский национальный технический университет (БНТУ), кафедра конструирования и производства приборов, аспирант

Рабочий адрес и тел.: 220000, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65, БНТУ, тел.: 375-17-292-40-81

Author's details

Lugovoi Vyacheslav

Place of work and position: Belarusian National Technical University (BNTU), Chair of Designing and Production of Devices, Associate Professor

Academic status, degree: Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

Working address and phone: 220000, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65, BNTU, ph.: 375-17-292-40-81

E-mail: Lyhavyvp@mail.ru

Minchenya Vladimir

Place of work and position: Belarusian National Technical University (BNTU), Chair of Designing and Production of Devices, Professor

Academic status, degree: Professor, Candidate of Technical Sciences

Working address and phone: 220000, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65, BNTU, ph.: 375-17-292-40-81

Lugovoj Igor

Place of work and position: Belarusian National Technical University (BNTU), Chair of Designing and Production of Devices, graduate student

Working address and phone: 220000, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65, BNTU, ph.: 375-17-292-40-81