

$$= \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)} \left(1 + \frac{1}{1-\varepsilon^2} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right) +$$

$$+ \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right).$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)} \left(1 + \frac{1}{1-\varepsilon^2} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right) +$$

$$+ \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right).$$

Если $\varepsilon = 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^2} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{6} \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^2} = \frac{1}{3}.$$

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^3} = \frac{1}{4} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{20} \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^3} = \frac{1}{5}.$$

Доказательство истинности перечисленных интегралов может быть проведено путем непосредственного дифференцирования.

Таким образом, $F_{\cos \varphi}$ непосредственно определяет силу, с которой ферроабразивная «щетка» воздействует на каждый локальный участок обрабатываемой поверхности и ее расчет через геометрические параметры профиля полюсного наконечника и материализация его образа позволяет обеспечить качество обработки раз-

личных деталей сложного профиля.

Наличие изменения материального образа профиля полюсных наконечников позволяет произвести целенаправленную обработку отличающихся по форме ступеней рукояток микрофонов в зависимости от уровня взаимодействия данных рукояток и ферроабразивной «щеткой» при учете ее топологического декремента, связанного с факторами ослабления и увеличения давления на локальные участки обрабатываемой поверхности.

В результате произведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости измерения величины давления ферроабразивной «щеткой» как режущего инструмента от геометрического профилирования полюсных наконечников с целью прогнозирования и высокоэффективной обработки методом MAO сложнопрофильных тонкостенных деталей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зубаирова, Л.Х. Технологическое обеспечение точности формы тонкостенных деталей при плоском торцовом планетарном шлифовании: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Л.Х. Зубаирова. – Пермь, 2014. – 167 с.
2. Ящерицын, П.И. Технологические основы обработки изделия в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Физико-технический институт, 1997. – 416 с.
3. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.
4. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н.С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 200 с.
5. Шаталов, Д.Д. Обеспечение постоянства шероховатости фасонных поверхностей деталей при точении : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Д.Д. Шаталов. – Тула, 2010. – 131 с.
6. Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]; АН БССР, Физ.-техн. ин-т. – Минск : Наука и техника, 1988. – 270 с.
7. Мур, Д. Основы применения трибоники / Д. Мур; пер. с англ. к. ф.-м. н. С.А. Харламова; под ред. д.т.н., проф. И.В. Крагельского и к. т. н. Г.И. Трояновской. – Москва : Мир, 1978. – 483 с.
8. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : в 3 т. / Г.М. Фихтенгольц. – Москва : Физматлит, 2003. – Т. 2. – 864 с.

Материал поступил в редакцию 01.11.2017

AKULOVICH L.M., SERGEEV L.E., TIUNCHUK A.A., SENCHUROV E.V. DUBNOVITSKIY S.K. Modeling of the tool's impact on a difficult-to-profile surface in the case of magnetically abrasive processing of thin-walled parts

The article considers the problem of finishing abrasive machining of thin-walled geometrically-complex parts, which is caused by the uneven pressure of the tool during the cutting process on the processed surface and high temperature in the cutting zone, leading to undesirable structural transformations. The performed theoretical research, we developed a scheme for calculating the geometric and dynamic parameters of the working zone for magnetic-abrasive machining and analytical dependences of the measurement of the pressure ferro tool from the geometrical profiling of the pole pieces.

УДК 677.054.842

Калугин Ю.К., Бакулин Б.А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТКАЦКИХ СТАНКОВ

Введение. Среди многочисленных методов повышения износостойкости деталей, работающих в диапазонах высоких скоростей и пыли, без изменения размеров можно отметить, кроме широко применяемой объемной закалки, магнитно-импульсное поверхностное упрочнение и упрочнение лазерным лучом. Одним из общих факто-

ров для этих видов обработки являются структурные изменения в поверхностном слое, вызванные воздействием полей, нагревом и остыванием материала. Каждый из методов обработки обладает определенными достоинствами и недостатками.

Процесс лазерной обработки является многофакторным. К ос-

Калугин Юрий Константинович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

Бакулин Борис Александрович, главный конструктор ООО «ДИПРИЗ».

Беларусь, Брестская область, Барановичи, 225320, д. Узноги.

новным факторам можно отнести: энергию лазерного луча, частоту импульсов, длительность импульса, диаметр пятна фокусирования и др. Эти факторы и, при необходимости, дополнительные, учитывают при разработке конкретного технологического процесса [1].

В результате лазерного упрочнения и, как следствие, нагрева поверхности стали, в твердом состоянии происходит образование фаз, аналогичных возникающим при объемной закалке: мартенсит, цементит, остаточный аустенит. Вследствие высоких скоростей охлаждения упрочненная поверхность имеет неоднородную структуру [2, 3].

Структура упрочненного лазерным излучением слоя имеет высокую дисперсность, сравнительно большую твердость. Износостойкость упрочненных лазером деталей значительно выше, чем после других методов упрочнения, таких как объемная закалка, химико-термическая обработка и обработка высокочастотными электрическими токами [2].

Основными факторами, определяющими воздействие магнитно-импульсной обработки (МИО) на поверхность деталей из стали, являются магнитное воздействие, проводимость, индукция магнитного поля; выделение тепла. Сущность МИО заключается в том, что металлорежущий инструмент перед обработкой помещают в полость магнита, соединенного с возбудителем импульсов. Под действием магнитных импульсов поверхность металла изменяет свои физические и механические свойства.

Улучшение свойств поверхностей, упрочненных с помощью этого метода, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала [2].

Перечисленные факторы послужили основанием для практического использования данных технологий, повышающих износостойкость узлов трения, в частности в таких механизмах ткацкого станка, как батанный, зевообразовательный, предохранительный и др.

Целью данной работы является сопоставительный анализ физико-механических характеристик деталей, поверхность которых упрочнялась указанными выше методами, для изучения возможности их совместного использования.

Методы и материалы. В соответствии с требованиями к конструкциям деталей ткацкого станка, материал пар трения должен иметь хорошее сопротивление износу и коррозии, обеспечивать малый шум и вибрацию. Неточности механической обработки и некачественная сборка трущейся пары вызывают остаточные напряжения усталостного износа, что ускоряет разрушение соответствующих деталей. Для выбора материалов, наиболее устойчивых к воздействию абразивного износа, и дальнейшего определения влияния физико-механических свойств образцов деталей на их изнашиваемость в процессе эксплуатации проведены лабораторные исследования соответствующих деталей, изготовленных различными производителями. Для исследования была выбрана деталь «нитепрокладчик» (сталь 40X) – наиболее подверженная износу.

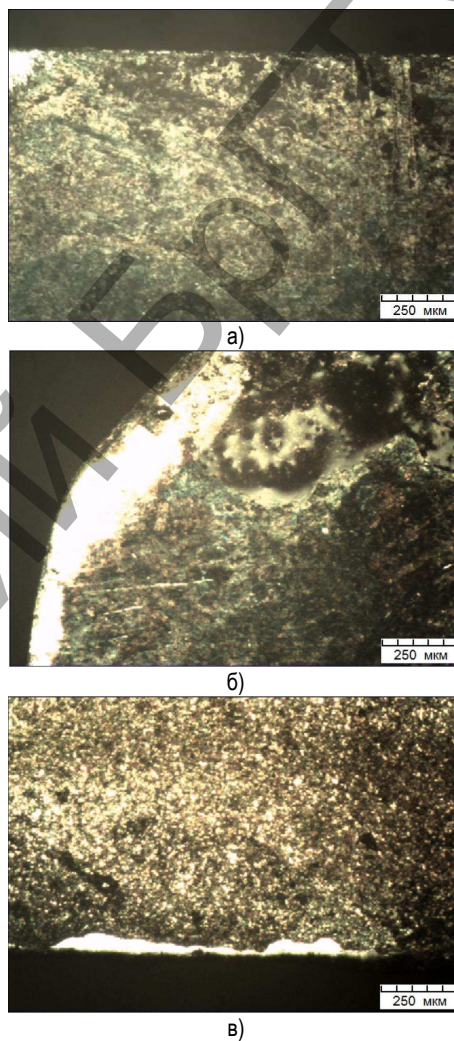
Исследование микротвердости стальных образцов, модифицированных лазерным излучением с различной энергией импульса, проводилось с использованием автоматического микротвердомера НВММТ-Х7 (Япония), оснащенного оптической видеокамерой uEye-1540-с с разрешением 1280x1024 pixel.

Образец закреплялся в специальном зажимном устройстве микротвердомера, при этом контролировалась параллельность рабочей поверхности образца и опорной поверхности зажимного устройства, что обеспечивает перпендикулярность перемещения индентора к поверхности образца. Деформирование осуществлялось при комнатной температуре путем вдавливания алмазной пирамидки Викерса под нагрузкой 100 г., со скоростью 50 мкм/с и выдержкой под нагрузкой 10 с.

Методика проведения эксперимента включала следующие этапы:

- определение центра области воздействия лазерного излучения и позиционирование измерительной системы в эту область;
- производилось фиксирование состояния поверхности образца и отпечаток индентора на поверхности. Определение размеров отпечатков индентора осуществлялось в программе «Промеры», входящей в состав программного комплекса «MetalTest». Вычисление величины микротвердости производилось в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Магнитно-импульсное упрочнение. Для упрочнения использовали модернизированную магнитно-импульсную установку МИУ, изготовленную в лаборатории механики формирования гетерогенных систем (МФГС) Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, которая позволяет получать энергию импульса до 15 кДж. Для определения прочностных свойств и твердости материалов, проведены лабораторные исследования соответствующих деталей подвергнутых различным режимам МИО. На основании обширного опыта теоретических исследований были выбраны оптимальные режимы МИО. Структура материала до и после магнитно-импульсной обработки отображена на снимках (рисунок 1).



а) до обработки; б), в) после обработки в магнитном поле (E=8 кДж, 8 импульсов)

Рисунок 1 – Структура поверхностного слоя детали «нитепрокладчик»

После воздействия МИО по плоскостям деталей образуется мелкодисперсный слой глубиной 260 мкм, по торцам - более крупные светлые образования глубиной 100 мкм. Средние значения микротвердости на поверхности деталей «нитепрокладчик» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения твердости различных режимов

№	Название детали	Энергия, E кДж·п импульсов	Твердость, HV
1	Корпус нитепрокладчика	Без МИО	442
2	Корпус нитепрокладчика	8·3	472
3	Корпус нитепрокладчика	8·6	511

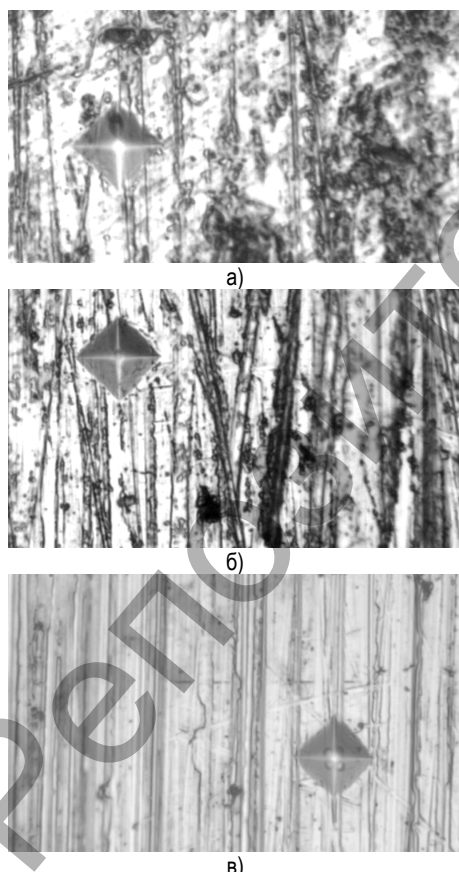
Таблица 2 – Средние значения микротвердости для различных режимов лазерной обработки

Параметры обработки	Номера образцов				
	Образец 1 без упрочнения	Образец 2 (E=20 мДж)	Образец 3 (E= 58 мДж)	Образец 3 (E=117 мДж)	Образец 4 (E=141 мДж)
Среднее значение микротвердости, HV	441	514	499	534	540

При магнитном воздействии металл изменяет свои физические и механические свойства: устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла. Улучшение свойств у образца, прошедшего МИО, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, из-за чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала [2].

Лазерное упрочнение. Упрочнение поверхностного слоя проводилось на установке YAG лазера с модулированной добротностью резонатора фирмы «LOTIS TII» на базе «Гродненского государственного университета имени Янки Купалы».

Упрочнение поверхности деталей проводилось с помощью неодимового лазера LS-2147 с длиной волны, 532 нм, 355 нм. Для формирования заданных характеристик лазерного излучения на основной частоте использовался светофильтр СЗС-23 при работе на второй гармонике излучения. Частота импульсов была выбрана в соответствии с требованиями эксперимента. Энергия в импульсе варьировалась от 15 до 140 мДж при длительности импульсов 32 нс (16 нс на полувысоте импульса).



а), б) после обработки в магнитном поле (E=8 кДж, 8 импульсов); в) до обработки

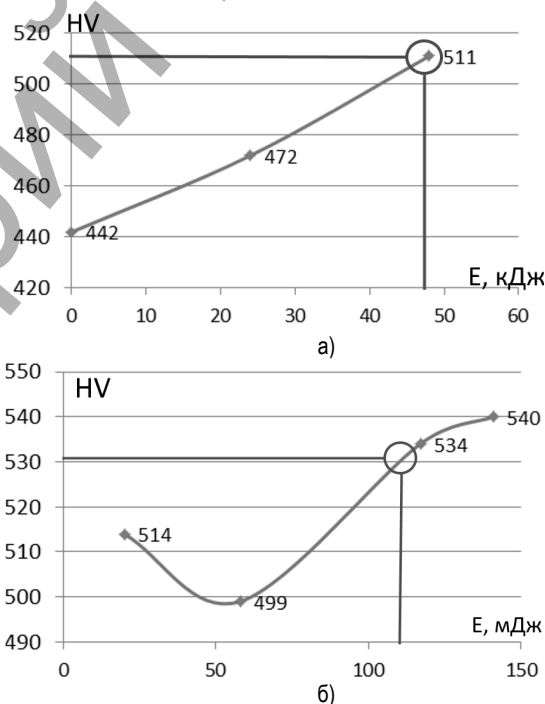
Рисунок 2 – Структура поверхностного слоя детали «нитепрокладчик» после проведения лазерной обработки

После лазерной обработки с заданными параметрами происходят изменения структуры поверхностного слоя, связанные с преобразованиями перлита и мартенсита, и микротвердость поверхности

увеличилась на 20...22 %. Толщина слоя с изменениями структуры составила в среднем 2...5 мкм. Средние значения микротвердости для выбранного метода упрочнения на поверхности деталей «нитепрокладчик» приведены в таблице 2.

В результате лазерного упрочнения происходят изменения структуры поверхностного слоя, связанные с преобразованиями перлита и мартенсита, и микротвердость поверхности увеличивается на 20...22 %. Установлено, что оптимальным режимом промежуточной лазерной обработки без оплавления поверхностного слоя детали «нитепрокладчик» можно считать упрочнение с энергией луча E= 100...120 мДж, позволяющей получить модифицированный слой на образцах максимальной микротвердости (530...535 HV).

Сравнительный анализ методов поверхностного упрочнения. Для сопоставления методов представлены диаграммы, характеризующие изменение микротвердости поверхностного слоя обработанных различными методами деталей при разных значениях энергии импульсов (рисунок 3).



а) магнитно-импульсная обработка; б) лазерная обработка

Рисунок 3 – Сравнительные диаграммы влияния энергетических параметров обработки поверхности различными методами на микротвердость поверхности

На диаграммах выделены окружностью наиболее оптимальные значения параметров для каждого метода обработки. Магнитно-импульсная обработка проводилась при сравнительно больших значениях энергии поля. Эти показатели (эквивалентная энергия серии импульсов составляет 30-48 кДж) несколько завышены, т. к. обработка проводилась в универсальном индукторе. При этом образец был помещен внутрь индуктора, т. е. упрочнение проводилось для всех поверхностей детали. Толщина упрочненного слоя по данным исследования микрогеометрии составила ≈200 мкм. В соответствии с теоретическими исследованиями, основным преимуществом этого вида обработки, при условии применения специально разработанно-

го индуктора, является значительное повышение плотности и прочности поверхностного слоя. Применение дополнительных способов упрочнения поверхности может увеличить эффект повышения износостойкости пар трения. Для выбора обоснованных решений при разработке комплексной упрочняющей технологии была проведена лазерная обработка идентичных по конструкции и материалам деталей. Происходящие в результате лазерного упрочнения изменения структуры поверхностного слоя, связанные с преобразованиями перлита и мартенсита, привели к повышению показателя микротвердости на 20...22 %. Обозначенные на диаграмме окружностью параметры обработки без оплавления с параметрами ($E = 100...120$ мДж; $P = 41 \cdot 10^6$ Вт; $\tau = 16 \cdot 10^{-9}$ с) обеспечивают стабильное повышение микротвердости поверхностного слоя толщиной в пределах 1...5 мкм.

Заключение. Проведенное исследование методов упрочнения поверхностного слоя одинаковых деталей, изготовленных из доэвтектоидной стали способствовало выявлению наиболее рациональных режимов для каждого метода и, в перспективе, при схожем протекании фазовых изменений в поверхностной структуре материала, возможность их совместного использования для увеличения срока службы деталей при воздействии циклических нагрузок и абразивного износа.

Несмотря на незначительное повышение числа микротвердости (магнитно – импульсная обработка – 12...14 %; лазерная обработка – 20...22 %) для деталей выполненных из стали 40Х, показатели структуры поверхностного слоя предполагают значительное повышение прочностных характеристик материала и износостойкости.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц, А.Г. Технические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц [и др.] – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Алифанов, А.В. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвердость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей / А.В. Алифанов, Г.П. Горецкий, А.М. Милюкова, А.А. Лях, В.Н. Шишмолин // Вестник Барановичского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 12.
3. Бакулин, Б.А. Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка / Б.А. Бакулин, Ю.К. Калугин // Вестник БарГУ. – Серия: Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 22–28.

Материал поступил в редакцию 30.11.2017

KALUGIN Yu. K., BAKULIN B.A. Comparative analysis of methods of surface hardening of parts of looms

The results of a comparative analysis of the magnetic-pulsed and laser methods for treating the surface layer of parts of the battery mechanism are presented. In laser processing, surface hardening of parts was carried out using a neodymium laser LS-2147 with a wavelength of 532 nm, 355 nm. The pulse frequency was chosen in accordance with the requirements of the experiment. The energy in the pulse varied from 15 to 140 mJ with a pulse duration of 32 ns (16 ns at half-height of the pulse). For magnetic pulse processing, we used a modernized MIU magnetic pulse device made in the mechanophysics laboratory for the formation of heterogeneous systems of the Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, which allows receiving pulse energy up to 15 kJ. Comparative diagrams with the designation of the most rational modes of hardening treatment.

УДК 620.179.18

Драган А.В., Парфиевич А.Н.

ВЫЯВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МНОГОВАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Введение. В процессе эксплуатации зубчатых передач зубья при каждом вхождении в зацепление постоянно воспринимают:

- ударные взаимодействия, сопровождающие вход зубьев в зацепление из-за погрешностей изготовления и износа, а также вследствие параметрических факторов по причине деформаций зубьев под нагрузкой;
- периодические переменные нагрузки, возникающие из-за непостоянства числа зубьев, принимающих участие в передаче крутящего момента;
- трение контактирующих поверхностей зубьев.

Сочетание данных факторов для нагруженных приводов может приводить к появлению локальных повреждений на рабочих поверхностях зубьев либо к полному разрушению зубьев (рисунок 1). Данный дефект опасен тем, что продукты его образования могут привести к внезапной остановке всего агрегата при непосредственном попадании в зону зацепления. Поэтому его выявление на ранней стадии появления носит стратегический характер, т. к. даёт возможность не допустить развитие дефекта до критических размеров и аварийной остановки.

а)



Драган Александр Вячеславович, к.т.н., декан машиностроительного факультета Брестского государственного технического университета.

Парфиевич Андрей Николаевич, м.т.н., аспирант кафедры технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.