

УДК 621.923.1

DOI: 10.12737/article_591947e1e95774.02124789

И.А. Горобец, к.т.н.,
А.Н. Михайлов, д.т.н.,
Н.В. Голубов, старший преподаватель
(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк)
E-mail: tm@fimm.donntu.org

Повышение качества шлифования заготовок из камня

Представлены вопросы планирования и постановки эксперимента, используемых измерительной аппаратуры, инструментов, оборудования. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса шлифования гранита. Предложены метод технологического воздействия при обработке заготовки шлифованием и конструкция адаптивного приспособления.

Ключевые слова: качество; камень; шлифование; эксперимент; исследование; топография; структура.

I.A. Gorobets, Can. Eng.,
A.N. Michailov, D. Eng.,
N.V. Golubov, Senior lecturer
(Donetsk National Technical University, Donetsk)

Quality increase in stone blank grinding

The problems of planning and experiment setting, measuring equipment, tools and equipment used are described. There are shown results of experimental investigations of granite grinding process. A simulator for the assessment of the topography of a surface worked in a blank is developed. A method of technological impact at processing a blank by grinding and a design of an adaptive device are offered. The 3D model of an adaptive device for the flat grinding of a surface in a stone blank is developed. The description of the device components and its operation principles are shown.

Keywords: quality; stone; experiment; investigation; topography; structure.

Геологические запасы природного камня промышленного назначения (гранит, габбро, лабрадорит), расположенные в Донбассе, способствуют расширению бизнеса по его добыче и дальнейшей обработке. Природный камень обладает уникальными физико-механическими и эстетическими свойствами, благодаря чему он широко используется в машиностроении и архитектурно-строительной промышленности. Из гранита изготавливают станины и направляющие станин точного технологического и измерительного оборудования, валки машин для изготовления бумаги.

Современная технология добычи и обработки природного камня включает извлечение из недр земли монолитной заготовки, порезку извлеченной заготовки на мерные плиты. Однако после порезки поверхность плит имеет значительные макронеровности (выпуклость,

вогнутость, волнистость и т.д.) и микронеровности в виде зазубрин, сколов. Величина погрешности поверхности заготовки после распиловки камня достигает 3...5 мм [1]. Для устранения макропогрешности поверхности плит используется их дальнейшая обработка путем многократного шлифования и полирования [1].

Процесс предварительной обработки поверхности камня шлифованием является наиболее затратной, продолжительной и трудоемкой частью производственного процесса [2]. Таким образом, уменьшение макронеровностей поверхности изделий из камня при выполнении предварительной обработки является актуальным вопросом производственного процесса.

Исследованиям вопросов снижения параметров макро- и микронеровностей поверхностного слоя посвящены работы многих иссле-

дователей. В работе [3] авторы обосновывают необходимость учета физико-механических свойств обрабатываемого материала, режимов резания, шероховатости режущих кромок инструмента, жесткости технологической системы, степени износа режущего инструмента при определении микро- и макрогеометрии поверхностного слоя заготовки. Отсутствие учета указанных факторов может привести к существенным ошибкам (до 300 %) при определении параметров шероховатости.

В работе [4] показана зависимость качества поверхностного слоя детали от неуравновешенности, волнистости и износа шлифовального круга. Однако вопросы влияния технологических и динамических параметров системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД) на макронеровности поверхностного слоя заготовки автором не рассматривались.

Влияние динамических характеристик СПИД на качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки на станках шлифовальной группы рассмотрено в работе [5]. В ней автор представил динамическую систему с учетом дополнительной обратной связи с запаздыванием, равным времени одного оборота детали, с учетом износа и инструмента.

Для снижения влияния автоколебательной системы на макронеровности поверхностного слоя заготовки, авторами предложены варианты конструкций на базе динамических гасителей колебаний и упруго-демпфирующих элементов. В работе предложены и методы автоматизации процессов шлифования заготовок посредством реализации адаптивных систем управления. Вместе с тем, авторами не приведен анализ происходящих в СПИД вынужденных колебаний, их связи со степенью устойчивости динамической системы станка и влияниями на получаемую точность поверхности заготовки.

В работах [6 – 7] предлагается учитывать параметры качества поверхности заготовки с помощью комплексного параметра свойств поверхностного слоя. Комплексный параметр свойств поверхностного слоя детали Π , определяющий ее несущую способность (контактную жесткость), рассчитывается по формуле

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

где Wp , Hp – высота сглаживания волнистости и макроотношения поверхности детали соответственно; Rp – расстояние от средней линии профиля до линии выступов неровностей поверхности; ν – параметр экстраполяции начального участка кривой относительных опорных длин профиля шероховатости поверхности ($\nu \approx 2$ [6–7]); k – отношение микротвердости поверхности после шлифования и исходной микротвердости поверхности.

Цель исследований – повышение качества обработки заготовок из камня за счет снижения макро- и микрогеометрических параметров неровности поверхности. Поставленная цель может быть достигнута как за счет совершенствования технологического процесса шлифования, так и за счет применения специальных адаптивных станочных приспособлений.

Задачами исследований являются:

- определение наследственности при многократном шлифовании поверхности заготовки из камня различными видами инструмента;
- разработка математической модели процесса шлифования;
- разработка схемы конструкции специального адаптивного приспособления для снижения макронеровностей поверхности в процессе шлифования.

Для решения первых двух задач необходимо проведение экспериментальных исследований процесса шлифования природного камня.

Особенности влияния технологии шлифования и конструктивных параметров технологической оснастки на характеристики неровности поверхности изделий из камня требовали подготовки и проведения ряда специальных экспериментов.

Целью экспериментов являлось выявление зависимости технологических режимов обработки и конструктивных параметров технологической оснастки на топографию поверхности изделий из природного камня.

Для достижения поставленной цели необходимо решение трех задач:

1. Выявление корреляции топографии поверхности заготовки до и после шлифования;
2. Получение необходимых данных для вывода математической модели топографии обработанной поверхности;
3. Синтез конструкции специального адаптивного станочного приспособления для шлифования заготовок из камня.

В соответствии с поставленными задачами,

выявилась необходимость проведения экспериментальных исследований процесса шлифования природного камня. В качестве контролируемых величин процесса шлифования (рис. 1) были приняты:

– входные величины: режимы резания, характеризующиеся скоростью подачи v_n , усилием прижима инструмента P_0 , припуском обработки Z .

– выходные величины: усилие подачи P_x , величина съема материала h по поверхности заготовки.

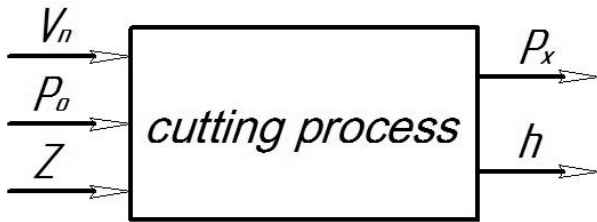


Рис. 1. Схема параметров исследования процесса шлифования

В качестве материала заготовок при проведении экспериментов был принят гранит Янцевского месторождения (прочность при сжатии равна примерно 210 МПа, плотность материала – 2,62...2,82 г/см³).

При планировании экспериментов принято проведение экспериментальных исследований с двумя типами инструментов:

– базовый (серийно выпускаемые ИСМ НАНУ шлифовальные круги марки АГШГ Д160 мм АС50 400/315 М6-14.50% ТУ 88 Украина 90. 513-81);

– модернизированный (конструкция инструмента разработана авторами [2], см. особенности конструкции на рис. 2, 3).

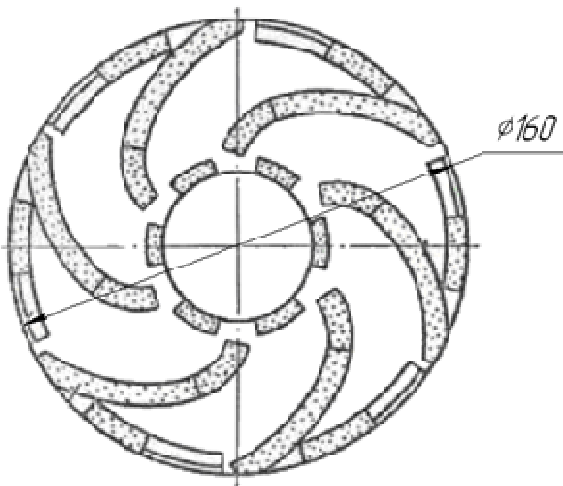
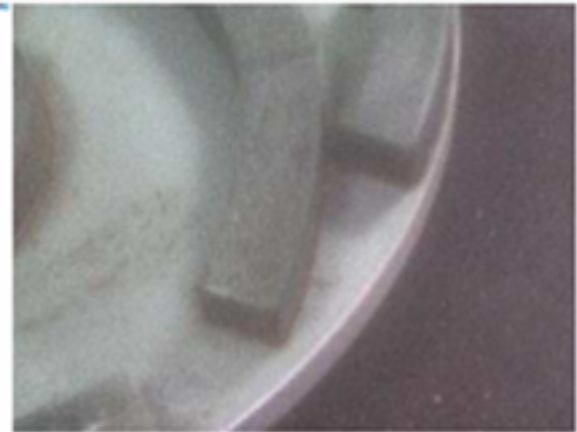
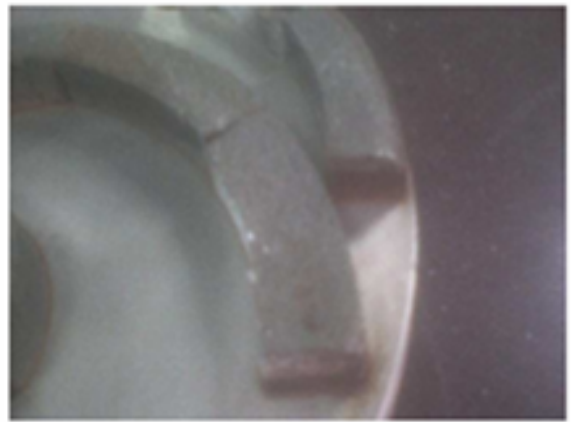


Рис. 2. Схема конструкции инструмента



a)



b)

Рис. 3. Вид режущей части базового (a) и модернизированного (b) шлифовальных кругов

Планирование проведения экспериментальных исследований базировалось на постановке полного факторного эксперимента со следующими параметрами:

1) скорость шлифования – 8,8 м/с (частота вращения инструмента $n = 1600$ об/мин);

2) подача дискретно изменялась в пределах от 400 до 800 мм/мин;

3) припуск на обработку составлял 200...1000 мкм.

Уровни варьирования факторов определялись следующими показателями: x_1 – подача: 400-630-800 мм/мин; x_2 – величина удаляемого припуска: 200-400-600-800-1000 мкм.

Измеряемый параметр в процессе эксперимента – величина съема материала u , мкм.

Измерения величины съема производились в 25 точках поверхности заготовки с интервалом в 30 мм.

Перед реализацией каждой точки плана эксперимента производилось предварительное измерение высоты площадки шлифования.

Для проведения экспериментальных исследований была выполнена рандомизация точек плана эксперимента. При эксперименте планировалось проведение 3-х параллельных опытов для каждой точки факторного пространства.

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

Для проведения экспериментальных исследований авторами была подготовлена экспериментальная установка, состоящая из модернизированного вертикально-фрезерного станка мод. 6М13П (рис. 4), измерительных приборов, специальной оснастки, а также вспомогательных устройств [8].



Рис. 4. Вид экспериментальной установки

Особенности процесса шлифования заготовок из камня потребовали модернизацию станка, заключающуюся в установке в шпинделе специально спроектированной авторами головки для крепления торцевого шлифовального инструмента и подачи охлаждающей жидкости через центральное отверстие шлифовального круга (рис. 5).

При проведении экспериментальных исследований в качестве режущего инструмента использовались базовый алмазный шлифовальный круг АГШГ Д160 мм АС50 400/315 М6-14.50% ТУ 88 Украина 90. 513-81 производства ИСМ НАНУ и модернизированный круг (см. рис. 2, 3).

В качестве измерительного средства использовался разработанный авторами прибор с индикатором часового типа (рис. 6) [2].



Рис. 5. Вид специальной головки



Рис. 6. Устройство для измерения величины съема поверхностного слоя

Точное определение усилий шлифования потребовало разработки и изготовления специального тензометрического стола. Для этого, авторами была разработана конструкция тензометрического приспособления, позволяющего проводить замеры величин и характер изменений сил резания (рис.7).

Сигналы, пропорциональные силам резания, снимаемые датчиками тензостола, усиливались тензоусилителем мод. ТА-5 и преобразовывались из аналогового в цифровой вид при помощи аналогово-цифрового преобразователя Pico ADC-16. Усиленный и преобразованный сигнал передавался на персональный компьютер, где велась его запись и статистическая обработка.

В результате обработки полученных данных процесса шлифования заготовки из гранита были установлены характер изменения

макронеровности поверхности и численные её значения. Было выяснено, что топографические характеристики поверхностных слоев в процессе обработки, являются практически

эквидистантными (рис. 8). Исходя из анализа изменений макрогеометрии слоев поверхности обрабатываемой заготовки из камня, можно сделать вывод об их наследственности.

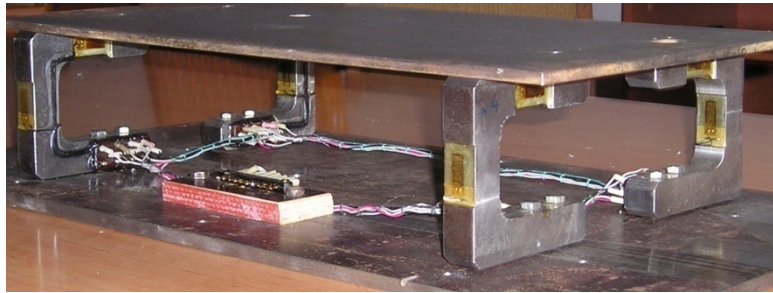


Рис.7. Вид тензометрического стола

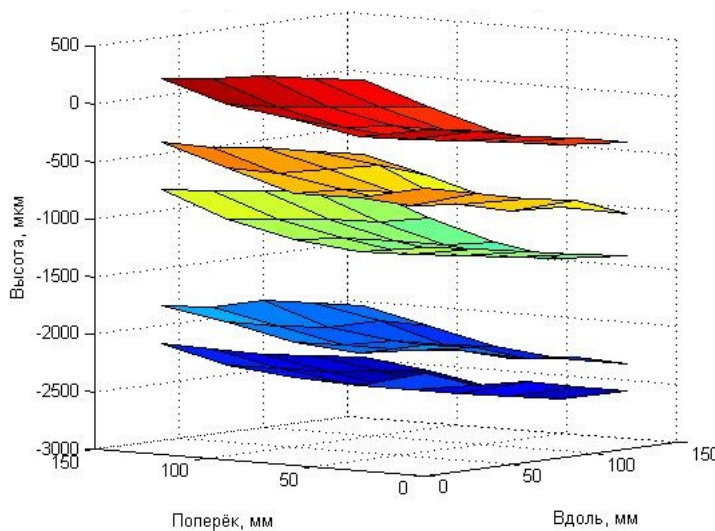


Рис. 8. Характер изменений макрогеометрии поверхности при шлифовании заготовки гранита

Наследственность при многослойной обработке заготовки обусловлена наличием упругой деформации элементов системы СПИД под действием сил шлифования. Так, при обработке выпуклой части заготовки силы шлифования увеличиваются и, соответственно, увеличивается отжим заготовки от шлифовального круга. При обработке вогнутости заготовки силы шлифования уменьшаются, соответственно, уменьшается и отжим заготовки от инструмента. Таким образом, при шлифовании неровной поверхности природного камня работает механизм копирования макронеровностей.

Следовательно, параметр высоты мгновенной точки поверхностного слоя заготовки с учетом наследственности при обработке, можно описать зависимостью

$$A_i = A_{i-1} \cdot k_i, \quad (2)$$

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

$$k_i = \iint_{b \ l} f(x, y) dx dy, \quad (3)$$

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

По результатам статистической обработки экспериментальных исследований составлена математическая модель оценки макронеровностей поверхности заготовки гранита при шлифовании:

$$h_{i+1} = a + bS + ct + dh_i + eS^2 + ft^2 + gh_i^2 + hSt + iSh_i + jth_i, \quad (4)$$

где $a...j$ – коэффициенты; S – подача; t – припуск; h_i – средняя величина неровностей по-

верхности на i -проходе; h_{i+1} – средняя величина неровностей поверхности на $i+1$ -проходе.

Полученная математическая модель позволяет при известной первоначальной величине макронеровностей поверхности получить прогнозируемую величину макронеровностей обрабатываемой поверхности.

Анализируя результаты проведенного натурного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1) после четырех двойных проходов модернизированного круга с 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 исходной: максимальной – 320 мкм, средней – 117 мкм.

2) 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 исходной: максимальной – 530 мкм, средней – 226 мкм.

3) уменьшение макронеровностей обработанной поверхности заготовки традиционным технологическим способом – путем многопроходного удаления припуска, не удалось даже при использовании модернизированного круга.

Таким образом, результаты анализа экспериментальных исследований процесса шлифования гранита показывают наличие макронеровностей обработанной поверхности и корреляцию топографии поверхности до и после обработки заготовки.

Одним из способов снижения показателей макрогеометрии поверхности при обработке заготовки является управление относительным мгновенным положением инструмента и заготовки в ходе её шлифования. Такое управление качеством обрабатываемой поверхности заготовки может быть достигнуто усовершенствованием технологии обработки за счет использования мехатронных приспособлений [10]. Снижение макронеровностей поверхности 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 инструменту.

Эффективным направлением корректиров-

ки 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 привода микроперемещений целесообразно использовать движители на основе обратного пьезоэффекта, реализуемого пьезодвигателем, или магнито-стрикционного 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.

Авторами разработана схема конструкции и 3D-модель адаптивного приспособления (рис. 9). Приспособление состоит из основания 1, на котором установлены движители микроперемещений 4, работающие на принципах магнито-стрикционного, либо обратного пьезоэффекта. 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 перемещается по пазу в плите 2. Для ориентирования 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 движителей микроперемещений необходимо использовать управляющий сигнал, системы адаптивного управления.

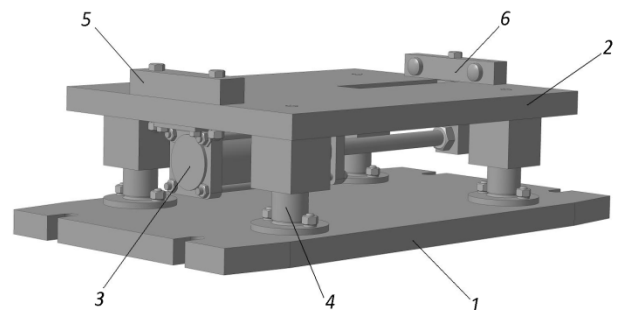


Рис. 9. 3D-модель адаптивного приспособления:

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

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 разработанным методикам.

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 движители микроперемещений. Они приподнимают стол и заготовку на величину, соответствующую приросту осевой силы.

Количество движителей 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 движителя микроперемещений, расположенных по краям приспособления.

Таким образом, анализ результатов проведенных авторами экспериментальных исследований показал наличие наследственности изменений макронеровностей слоев обрабатываемой заготовки. На основе экспериментальных данных определена математическая модель, которая позволяет прогнозировать топографию обработанной поверхности заготовки из камня. Выявлена невозможность уменьшения макронеровностей обработанной поверхности заготовки традиционным технологическим способом – путем многопроходного удаления припуска. Для уменьшения макрогеометрии поверхности заготовки предложена концепция технологических воздействий за счет управления мгновенным положением заготовки в процессе её обработки.

Разработана схема конструкции и 3D-модель специального адаптивного приспособления с приводами малых перемещений. Спе-

циальное приспособление позволяет осуществлять управление макрогеометрией поверхности обрабатываемой заготовки.

Разработанное приспособление может использоваться в новых и при модернизации существующих конструкций обрабатывающего 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 из камня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добыча и обработка природного камня: справочник/ под общ. ред. А.Г. Смирнова. – М.: Недра, 1990. – 445 с.
2. Горобец, И.А., Михайлов, А.Н., Голубов, Н.В. Исследование влияния формы режущей кромки шлифовального круга на производительность обработки изделий из природного камня / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. Наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2008, Вип.35, С. 49–58.
3. Хусу, А.П., Витенберг, Ю.Р., Пальмов, В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). – М.: Наука, 1975. – 344с.
4. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: монография. – М.:Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
5. Управление процессом шлифования/ А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свиршев, В.П. Ларшин – К.: Техника, 1983. – 184 с.
6. Качество машин: справочник. В 2 т. Т.1. / А.Г. Суслев, Ю.В. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
7. Суслев, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
8. Михайлов, А.Н., Горобец, И.А., Байков, А.В., Голубов, Н.В., Ищенко, А.Л. Экспериментальная установка для исследования процессов шлифования изделий из природного камня /Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип. 92. – Донецьк, ДонНТУ 2005. С. 164 – 174
9. Горобец, И.А., Михайлов, А.Н. Управление качеством поверхностного слоя обрабатываемой заготовки./ Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип.71. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 164 – 174.
10. Gorobez I., Navka I., Lapajeva I., Schaban K. Die Parameter der Adaptronsysteme der Drehmaschinen – Modern Technologies, Quality and Restructuring International Conference N.C.M.R – Bulletin of the Politechnic institute of Jassy,

Iassy, Romania 23-25 of May 2002 , Vol. XLVIII. – T.1. S.100–104.

REFERENCES

1. *Natural Stone Extraction and Processing*: Reference Book/ under the general editorship of A.G. Smirnov. – M.: Entrails, 1990. – pp. 445.

2. Gorobets, I.A., Mikhailov, A.N., Golubov, N.V. Analysis of cutting edge form impact in grinding disk upon efficiency in natural stone product treatment / *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems: the Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2008, Edition.35, pp. 49–58.

3. Husu, A.P., Witenberg, Yu.R., Palmov, V.A. *Surface Roughness (Theoretical Probabilistic Approach)*. – M.: Science, 1975. – pp. 344.

4. Bishutin, S.G. *Assurance of Quality Parameter Required Integrity for Surface Layers in Parts at Grinding*: monograph. – M.:Mechanical Engineering-1, 2004. – pp. 144.

5. *Grinding Control*/ A.V. Yakimov, A.N. Parshakov, V.I. Svirshchev, V.P. – K.: Techniques, 1983. – pp. 184.

6. *Machine Quality*: reference book. In 2 Vol.. Vol.1. /

A.G. Suslov, Yu.V. Brown, N.A. Vitkevich et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.

7. Suslov, A.G. *Quality of Machine Surface Layers*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.

8. Mikhailov, A.N., Gorobets, I.A., Baikov, A.V., Golubov, N.V., Ishchenko, A.L. Experimental plant for researches of processes in natural stone product grinding /*Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: Mechanical Engineering and Machine Science*. Edition 92. – Donetsk, DonNTU 2005. pp. 164 – 174.

9. Gorobets, I.A., Mikhailov, A.N. Quality control of surface layer in blank worked./ *Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: Mechanical Engineering and Machine Science*. Edition71. – Donetsk: DonNTU, 2004. – pp. 164 – 174.

10. Gorobez I., Navka I., Lapajeva I., Schaban K. Die Parameter der Adaptronsysteme der Drehmaschinen – Modern Technologies, Quality and Restructuring International Conference N.C.M.R – Bulletin of the Politechnic institute of Jassy, Iassy, Romania 23-25 of May 2002 , Vol. XLVIII. – T.1. S.100–104.

Рецензент д.т.н. А.М. Козлов

УДК 534.833: 621

DOI: 10.12737/article_591947e1f38fc8.78525943

А.Ф. Денисенко, д.т.н.

(Самарский государственный технический университет, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

E-mail: ask@samgtu.ru

Динамические характеристики токарного станка среднего типоразмера, установленного на резинометаллических виброизолирующих опорах

На основе нелинейной динамической модели виброзащитной системы при силовом возбуждении построены амплитудно-частотные характеристики станка, установленного на резинометаллических виброизолирующих опорах, и определена область эффективной виброизоляции. Упругая характеристика модели представлена в виде аппроксимирующей зависимости, полученной на основе экспериментальной зависимости изменения упругой деформации опоры от нагрузки.

Ключевые слова: виброизоляция; резинометаллическая опора; упругая характеристика; аппроксимирующая зависимость; амплитудно-частотная характеристика; область эффективной виброизоляции.

A.F. Denisenko, D. Eng.

(Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443100)

Dynamic characteristics of mean type dimension lathe installed on rubber-metal anti-vibration supports

On the basis of a nonlinear dynamic model of a vibration-proof system at power excitation there are formed amplitude-frequency characteristics of a lathe installed on rubber-metal anti-vibration supports, and an area of efficient vibration isolation is defined. An elastic characteristic of the model is presented as an approximating dependence obtained on the basis of the experimental dependence of support elastic deformation changes upon loading.

Keywords: vibration isolation; rubber-metal support; elastic characteristic; approximating dependence; amplitude-frequency characteristic; effective vibration isolation area.