

УДК 622.923

**И. А. Горобец**, канд. техн. наук, проф., **Н. В. Голубов**, старший преподаватель  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ДНР  
E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

## УПРАВЛЕНИЕ МАКРОГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ

*Дано описание и пример реализации способа повышения точности шлифования изделий из природного камня. Решена задача структурного синтеза системы. Обоснован выбор структурной схемы адаптивного приспособления. Разработаны схема конструкции и 3D-модель специального адаптивного приспособления. Приведены расчёты точности приспособления и динамический анализ конструкции р приспособления. Даны рекомендации по выбору типа регулирования адаптивным устройством.*

**Ключевые слова:** гранит, деталь, форма, управление, приспособление, пьезодвигатель, точность

**I. Gorobets, N. Goloobov**

## CONTROL OF SURFACE MACROGEOMETRY AT GRINDING OF PARTS FROM NATURAL STONE

*A description and an example of the implementation of a method for increasing the accuracy of grinding products from natural stone are given. The problem of structural synthesis of the system has been solved. The choice of the structural diagram of the adaptive adaptation has been substantiated. The design and 3D-model of a special adaptive device have been developed. The calculations of the accuracy of the device and the dynamic analysis of the structure of the device are given. Recommendations are given on the choice of the type of regulation by an adaptive device.*

**Keywords:** granite, detail, form, control, fixture, piezomotor, precision

### 1. Введение

Развитие современной науки и технологий привели к появлению новых задач, от решения которых зависят направления дальнейшего развития промышленного сектора экономики. Одной из таких задач является использование неметаллических материалов в конструкциях изделий машино- и приборостроения с целью повышения точности, расширения технологических возможностей, дальнейшего использования средств производства в новых условиях, в том числе и агрессивных средах. Одним из таких неметаллических материалов является природный гранит. Важной характеристикой гранита является практически полное отсутствие у него теплового расширения. Гранит обладает уникальными природными качествами: высокой твёрдостью, термостойкостью, стойкостью к внешним воздействиям, сохранением своих свойств при различных физических и химических воздействиях, в том числе, резком перепаде температур. Благодаря этим качествам, изделия из гранита могут быть использованы в качестве станин, направляющих прецизионных станков для обработки высокоточных поверхностей деталей, валков бумагоделательных машин, станин контрольно-измерительных приборов, ванн для металлургического и химического производств.

Технологический процесс изготовления изделия из природного камня включает порезку добытого из карьера монолита природного камня на мерные плиты и дальнейшую обработку заготовки до необходимого условия качества (точности, шероховатости, трещиноватости, макронеровности и пр.). Такая обработка является преимущественно, механической и заключается в многократном и многоуровневом шлифовании и полировании поверхности заготовки. При этом, значительные затраты времени (40-60%) механической обработки заготовки приходится именно на выполнение шлифо-

© Горобец И. А., Голубов Н. В.; 2021.

вальных работ [1,2]. Поскольку отклонения формы при резке камня могут достигать 3-5 мм [1,2], то шлифовальные работы включают в себя ряд операций: предварительную, черновую, получистовую, чистовую и финишную (лощение). Каждая из таких операций включает многократные проходы абразивного инструмента.

Поскольку заготовка из природного гранита обладает значительной твёрдостью, то в качестве абразивного материала шлифовального инструмента часто используют искусственные алмазные зерна. Применение алмазных шлифовальных головок позволяет значительно повысить производительность процесса механической обработки заготовок из гранита. Алмазные шлифовальные круги для торцевого шлифования имеют специфическую конструкцию, включающую бруски с алмазными зёрнами, рис.1, основание, на котором крепятся абразивные бруски и элементы крепления шлифовального круга к шлифовальной головке.



Рисунок 1. Варианты конструкций торцевых алмазных шлифовальных кругов.

Одним из специфических условий шлифования природного камня является подвижное соединение шлифовальной головки со шпинделем технологического оборудования, рис. 2-4, которое позволяет реализовать максимальную площадь контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Однако, как показали результаты наших экспериментальных исследований [3-5], каждая последующая обработка изделия из гранита наследовала макронеровности поверхности заготовки до её обработки, рис. 5, 6. Таким образом, при обработке гранитной заготовки шлифованием происходит копирование топографии поверхности заготовки.



Рисунок 2. Вид маятниковой шлифовальной головки



Рисунок 3. Вид основания шлифовального круга



Рисунок 4. Конструкция шарнирных опор шлифовальных головок

При этом, параметр высоты произвольной точки обрабатываемой поверхности заготовки можно описать выражением:

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

где  $A_i, A_{i-1}$  - высота макронеровностей до и после шлифования;  $k_i$  – коэффициент уточнения.

$$k_i = \frac{\int \int_{b l} f(x, y) dx dy}{A_i - A_{i-1}}, \quad (2)$$

где  $f(x, y)$  - функция высоты профиля вдоль и поперёк поверхности заготовки.

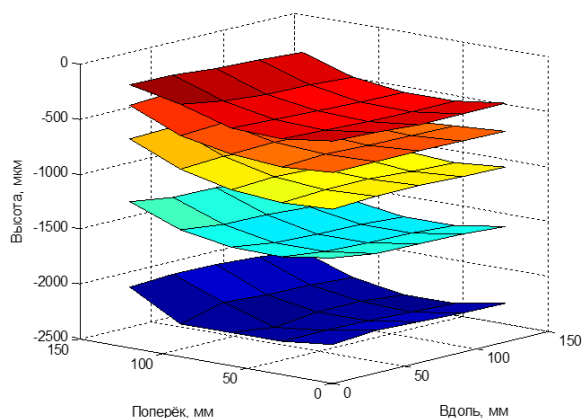


Рисунок 5. 3D - поверхность съёма слоя материала при шлифовании заготовки из гранита при подаче  $S=400$ мм/мин

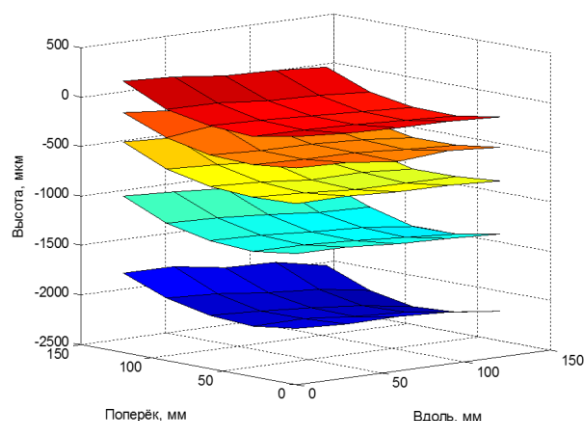


Рисунок 6. 3D - поверхность съёма слоя материала при шлифовании заготовки из гранита при подаче  $S=800$ мм/мин

Следовательно, в связи с перечисленными особенностями: процесса шлифования заготовки из камня; схем конструкций шлифовальных головок; условий закрепления шлифовальных головок к шпинделю технологического оборудования, актуальным является вопрос повышения точности обработки за счёт снижения объёмных макронеровностей обрабатываемой поверхности изделия из гранита.

**Целью исследований** является разработка принципов и синтез основ конструкции специального адаптивного приспособления, позволяющих повысить качество изготовления изделий из природного камня путём управления макрогеометрическими параметрами поверхности заготовки при её обработке.

## 2. Основное содержание и результаты

Способы повышения качества обрабатываемой поверхности заготовки исследованы в работе [6]. Одним из способов повышения шлифования природного камня является управление мгновенным положением заготовки при её обработке. Такой менеджмент 3D-положения заготовки позволит изменять условия контакта шлифовального круга и топографических неровностей поверхности изделия, что приведёт к управлению изменениями макронеровностей поверхности обрабатываемой заготовки.

Поскольку изменение положения шлифовального круга реализовать конструктивно затруднительно, то целесообразно изменять мгновенное положение заготовки по отношению к обрабатываемому инструменту. Это может быть реализовано при помощи специального приспособления.

Разработаем структурную схему такого приспособления. Предположим, что конструкция такого приспособления должна состоять из двух систем: установки обрабатываемой заготовки и микроперемещений подвижной плиты, совместно с заготовкой, позволяющих реализовать 3 движения микроперемещений: вертикального поступательного и двух поворотных, см. рис. 7.

Простейшая система микроперемещений обрабатываемой заготовки для реализации описанных движений, должна состоять из неподвижного основания, подвижных звеньев и подвижной плиты. Однако, для определения количества подвижных звеньев, их пространственного расположения между неподвижным основанием и подвижной плитой, без избыточных связей и лишних подвижностей при минимальном количестве подвижных звеньев, необходимо решить задачу структурного синтеза конструкции специального приспособления.

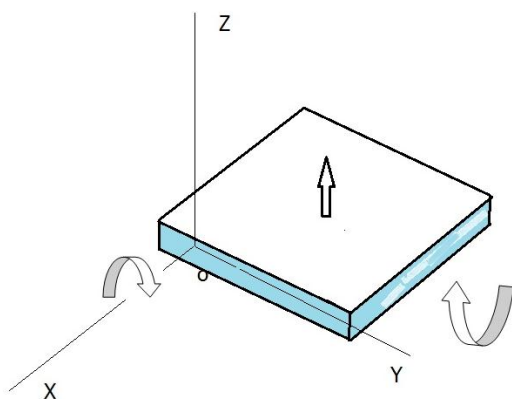


Рисунок 7. Схема возможных перемещений верхней плиты устройства

В качестве критерия эффективности соотношения длин звеньев использовался критерий минимизации суммарной работы  $A(l)$ , которая выполняется при обработке технологических траекторий [7]

$$A(l) = \sum_{j=1}^n \left( \int_0^l |P_j(t)| dt \right) \rightarrow \min, \tag{3}$$

где  $P$  – мощность привода,  $l$  - перемещение.

Задачу структурного синтеза можно сформулировать в виде системы уравнений [7]

$$\begin{cases} W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ \Sigma p_i = p_5 + p_4 + p_3, \\ k = \Sigma p_i - n, \\ f_{\Sigma} = p_5 + 2p_4 + 3p_3, \end{cases} \tag{4}$$

где  $W$  – степень свободы пространственного механизма,  $n$  – число подвижных звеньев;  $p_i$  – число кинематических пар  $i$ -го класса;  $k$  – число независимых контуров Гохмана;  $f_{\Sigma}$  – сумма подвижностей кинематических пар в механизме.

Таким образом, с учётом перечисленных критериев, целесообразно в качестве структурной схемы использовать схему с четырьмя звеньями V порядка (с одной степенью подвижности) 3 и 4 неподвижного основания и подвижной верхней плиты 2, рис. 8.

Степень свободы пространственного механизма определим по формуле Сомова-Мальшева [8]:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \tag{5}$$

где  $P_5 - P_1$  – кинематические пары, соответственно, V, IV, III, II и I порядка. Поскольку  $P_5 = 4, P_4 = 0, P_3 = 0, P_2 = 0, P_1 = 0$ , то

$$W = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 4 = 4$$

Таким образом, схема конструкции специального приспособления должно состоять из основания 1, рис. 9, на котором установлены привода микроперемещений 2,

соединённые с подвижно плитой 3. На плите 3 закреплена обрабатываемая заготовка 4, взаимодействующая с абразивным инструментом 5.

Для разработанной структуры адаптивного приспособления, необходимой для реализации высокودинамичного технологического процесса обработки заготовки из камня шлифованием, в качестве движителей микроперемещений выбраны пьезодвижители.

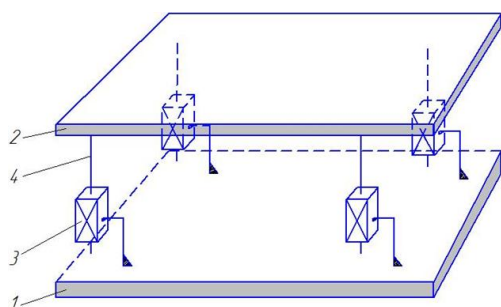


Рисунок 8. Структурная схема специального приспособления

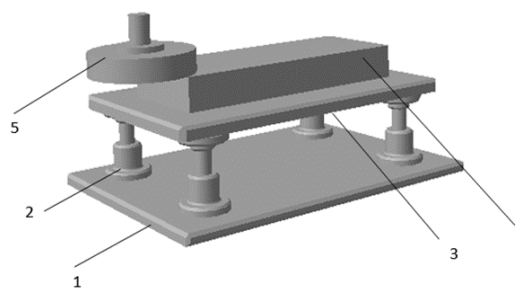


Рисунок 9. Схема конструкции адаптивного приспособления

Система установки обрабатываемой заготовки в приспособлении основана на выбранной схеме базирования и закрепления изделия. Поскольку изделия производства имеют призматическую форму, и обрабатывается только верхняя плоскость заготовки, то крепление объекта для обработки его верхней поверхности возможно лишь по боковым поверхностям или нижней части. Воспользовавшись принятой схемой базирования заготовки, путём лишения её 6-ти степеней свободы, особенностями формы и материала заготовки, в качестве схемы закрепления предполагается использование системы с движущимся рычагом, одна часть которого воздействует на заготовку, а вторая – соединена с движителем поступательного движения.

На основании разработанной структурной схемы адаптивного приспособления, рис. 8, принятых схем базирования и закрепления заготовки, разработана конструкция специальной технологической оснастки и её 3D-модель. Приспособление, рис. 10, состоит из основания 1, на котором установлены движители микроперемещений 4, соединённые с плитой 2. Плита 2 предназначена для установки обрабатываемой заготовки.

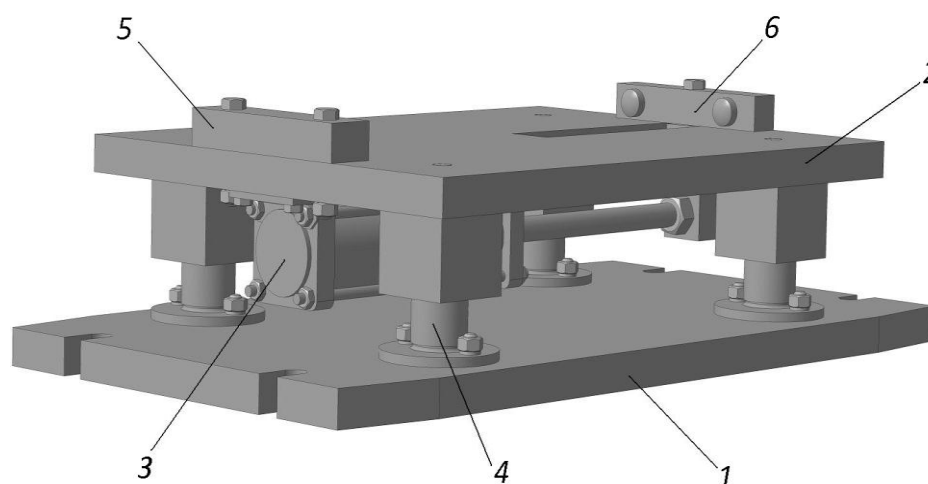


Рисунок 10. 3D - модель специального адаптивного приспособления:

На нижней части плиты 2 установлен пневмоцилиндр 3, шток которого соединён с зажимным элементом 6. Зажимной элемент 6 перемещается по пазу в плите 2. Для базирования и закрепления заготовки на верхней грани плиты 2 размещена опора 5. Приспособление крепится к столу станка при помощи станочных болтов, для которых в основании 1 выполнены пазы. Для управления вертикальным положением пьезодвигателей 4 необходимо использовать управляющий сигнал, системы адаптивного управления [9,10].

Приспособление работает следующим образом. На плиту 2 устанавливается заготовка в нужном положении, с упором в опору 5. После этого подаётся сжатый воздух в штоковую полость пневмоцилиндра 3. Зажимной элемент 6, прикрепленный к штоку пневмоцилиндра, перемещается и закрепляет заготовку. После закрепления заготовки реализуется процесс её 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 подаётся на пьезодвигатели. Они приподымают стол и заготовку на величину, соответствующую приросту осевой силы.

Поскольку точность изготовления изделия коррелируется с точностью приспособления, то в процессе проводимых исследований появилась необходимость в определении величины деформации подвижной плиты технологической оснастки под воздействием вертикальной (осевой) составляющей усилия шлифования. Расчёт деформаций приспособления был проведен в программной среде «ANSYS» [11]. Для проведения расчётов трёхмерная модель верхней плиты разработанного приспособления подвергалась разбиению на конечные элементы, после чего были заданы исходными данными. Результаты моделирования деформаций верхней плиты приспособления представлены на рис. 11.

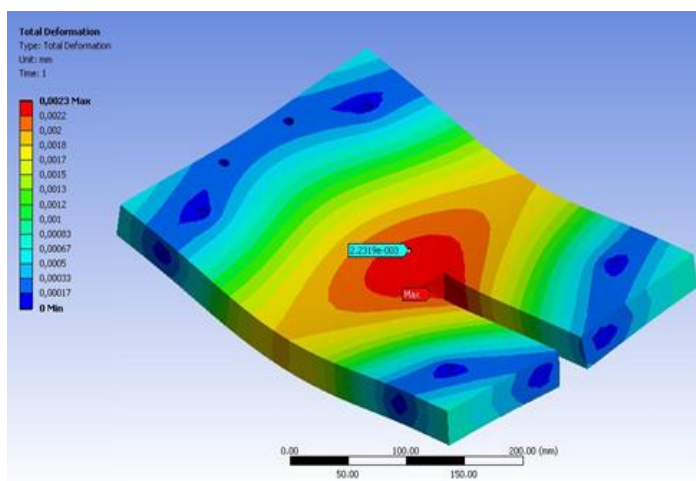


Рисунок 11. Результаты моделирования деформации подвижной плиты приспособления под действием вертикальной составляющей силы шлифования

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP
1	1206.2	1	1
2	1595.5	1	2
3	2042.7	1	3
4	2638.1	1	4
5	2642.0	1	5
6	3178.6	1	6
7	3388.9	1	7
8	3531.4	1	8
9	3781.0	1	9
10	4748.6	1	10
11	4797.2	1	11
12	5058.9	1	12

Рисунок 12. Состав собственных частот разработанной конструкции адаптивного приспособления

Из анализа результатов моделирования деформаций верхней плиты приспособления под действием вертикальной силы шлифования в 2000 Н будет иметь максимальный прогиб, равный 0,0023мм, в центре плиты. Такая величина деформации верхней плиты приспособления является предельной ошибкой в форме впадины, величиной

в 2,3 мкм, что является допустимым для осуществления процесса шлифования заготовки из камня.

Исследование динамических характеристик разработанной конструкции приспособления путём расчётов в программной среде «ANSYS» выявило 12 гармоник собственных частот колебаний с первой гармоникой на частоте, равной 1206,2 Гц, рис. 12. Из проведённого анализа динамической нагруженности конструкции приспособления можно сделать вывод о рекомендуемом рабочем диапазоне колебаний внешней нагрузки, который может находиться в пределах 0 – 1000 Гц.

Поскольку разработанная конструкция специального приспособления должна обладать адаптивными характеристиками и реагировать на мгновенные изменения внешних факторов, то такая технологическая оснастка должна иметь соответствующее автоматическое управление. При выборе метода автоматического управления работой разработанной конструкции адаптивного приспособления воспользуемся особенностями и характеристикой процесса обработки заготовки из камня:

- Стохастический характер процесса шлифования;
- Отсутствие адекватной математической модели процесса обработки изделия;
- Нелинейная зависимость регулируемой величины от переменного параметра припуска шлифования заготовки.

Тогда, зная характеристики процесса обработки изделия шлифованием, тип регулирования объектом производства можно выбрать по данным рис. 13.



Рисунок 13. Основные методы регулирования

### Заключение.

Дано описание и принцип реализации способа повышения точности шлифования изделий из природного камня. Решена задача структурного синтеза системы, обоснован выбор структурной схемы адаптивного приспособления, рассчитана степень свободы подвижной плиты устройства. Разработаны схема конструкции и 3D-модель специального адаптивного приспособления. Проведены расчёты точности приспособления, дан динамический анализ конструкции устройств и обоснован рабочий интервал частот ди-

намических нагрузок при обработке гранитного изделия на разработанном приспособлении. Приведены рекомендации по выбору метода регулирования разработанным адаптивным устройством. Разработка может использоваться для повышения точности и производительности обработки изделий из природного камня.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Добыча и обработка природного камня: Справочник / Под общ. Ред. А. Г. Смирнова – М.: Недра, 1990 – 445с.
2. Карюк, Г. Г. Обработка камня инструментом из синтетических алмазов / Г. Г. Карюк, Б. Л. Оситинский – Киев: УкрНИИТИ, 1968 – 23с.
3. Горобец, И. А. Особенности экспериментальных исследований сил шлифования природного камня / И. А. Горобец, А. Н. Михайлов, Н. В. Голубов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Вып. 28. – С. 36-46.
4. Горобец, И. А. Управление качеством поверхностного слоя обрабатываемой заготовки / И. А. Горобец, А. Н. Михайлов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Вип. 71. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 164-174.
5. Горобец, И. А. Повышение качества шлифования заготовок из природного камня / И. А. Горобец, Н. В. Голубов, И. А. Чвала // «Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии». – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (6Е). – С. 29-37.
6. Горобец, И. А. Повышение эффективности обработки заготовок из камня / И. А. Горобец, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – Вып. 24. – С. 36-40.
7. Несмиянов, И. А. Структурный и параметрический синтез и оптимизация программных движений манипуляторов на основе трипода: дис. ... д-ра техн. наук / И. А. Несмиянов. – Волгоград: ВГАУ, 2017. – 349 с.
8. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учебник для вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
9. Горобец, И. А. Параметры регулирования адаптронных систем токарных станков / И. А. Горобец, К. Шабан // Материалы Третьего Международного научно-практического семинара “Практика и перспективы развития институционального партнёрства”; в 2-х кн. – Таганрог: ТРТУ, 2002. – №2. – С.47-52.
10. Gorobez, I. Adaptronsystem in der Werkzeugmaschine für die spanabhebende Formung / I Gorobez, N.Golubov // Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage. – Berlin: Logos-Verl., 2001. – S.45-51.
11. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / Под общей ред. Д. Г. Красовского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с., ил.
12. Гладчук, Е. А. Параметрическое моделирование технической системы нестабильной структуры / Е. А. Гладчук // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – № 3(54) – С.25-29.

Поступила в редколлегию 30.03.2021 г.