

# **Создание и применение прогрессивных технологий в машиностроении**

УДК 681.3.049

## **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ**

**Горобец И.А., Михайлов А.Н.**  
*(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

### **1. Введение**

Современная строительная индустрия и другие отрасли промышленности в настоящее время являются потребителями изделий из природного и синтетического камня. Он используется как основной материал для инженерных сооружений, средство облицовки фасадов сооружений, в монументальном строительстве, как художественно-прикладной материал. К таким материалам относятся гранит, керамический гранит, базальт, габбро, поделочные камни и т.д. Каменные материалы добываются в Украине [1], либо импортируются из других стран мира. Качество добываемых в Украине минералов и сырья отвечает лучшим мировым стандартам. Приведенные в [1] экспертные оценки дают заключения о том, что Украина может в 1,5-2 раза увеличить экспорт продукции минерально-сырьевого комплекса, доходы от которого могут составлять до 20 млрд. гривен в год [1]. Вместе с тем, одним из актуальных вопросов является снижение стоимости готовых изделий из камня, что может быть достигнуто снижением стоимости их обработки.

### **2. Особенности обработки поверхностей заготовок из камня**

Изделие из камня проходит ряд стадий обработки, к ним относится порезка на мерные плиты, многократное шлифование поверхности, полирование. Одним из трудоемких процессов обработки камня является шлифование, состоящие из десятков проходов [2], после чего обработанную поверхность камня подвергают полированию. Операция шлифования поверхности камня является продолжительной по времени в общем цикле обработки изделия. В настоящее время широко используется шлифование торцом круга [3-5].

При таком способе обработки поверхности камня главным движением является вращение шлифовального круга. Для осуществления процесса резания кроме главного движения резания необходимо наличие и продольной подачи обрабатываемой заготовки относительно инструмента.

Поверхность заготовки камня после предварительной обработки (порезки на мерные плиты) имеет неровности поверхности, связанные не только с шероховатостью, но и с волнистостью, макрогеометрией формы поверхности (выпуклостью, вогнутостью и т.д.) [6]. Величина волнистости на пиленном блоке природного камня достигает 3-5 мм [3,4]. Величина и характер изменения неровностей обрабатываемой поверхности заготовки оказывает влияние на:

- производительность процесса механической обработки,
- стоимость обработки поверхности материала,
- динамические характеристики технологического процесса обработки (шлифования, полирования),

- интенсивность износа дорогостоящего режущего инструмента,
- выбор параметров и режимов обработки (скорости резания, подачи, припуска на обработку, количество проходов и т.п.),
- качество обработанной поверхности материала.

Особенностью формирования величины снимаемого хрупкого и хрупко-пластического слоя материала из камня является и появление при обработке дефектного слоя, состоящего из микротрещин поверхности [7]. Такие микротрещины 4 при обработке большинством из активных зерен 2 алмазного круга 3 распространяются как в сторону вектора скорости главного движения, что способствует отделению слоя материала, так и вглубь заготовки 1 (рис. 1). Последний факт распространения микротрещин формирует дополнительно к макро и микронеровностям дефектный слой. Это обстоятельство снижает эксплуатационные и потребительские свойства изделий из камня, вследствие снижения их долговечности, ухудшения внешнего вида (из-за появления разрастающихся со временем трещин, выколов материала и пр.).

Поэтому, для снижения стоимости изготовления изделий, повышения производительности обработки, целесообразно рассмотреть возможные способы управления качеством обработки поверхности каменных изделий шлифованием.

Рис. 1. Расположение микротрещин при шлифовании поверхности заготовки из камня

### **3. Критический анализ последних исследований и публикаций**

Вопросам снижения стоимости изготовления изделий шлифованием посвящены работы [8-10]. Учет затрат при изготовлении изделия приведен в [8], однако эта методика не учитывает особенности обработки поверхностного слоя хрупкого материала абразивным инструментом. В работе [9] приведена методика определения технологической себестоимости шлифования изделий, включающая затраты на инструмент и оплату труда. Однако данная методика не учитывает затраты, связанные с амортизацией оборудования, стоимостью энергии и пр. расходы. В работе [10] учтены недостатки методик [8, 9], но не выделены затраты по оплате труда персонала. Обобщение подходов, изложенных в [8-10], позволит изыскать направления снижения технологической себестоимости изготовления изделий из хрупкого материала.

Снижение затрат в процессе изготовления изделия может быть также достигнуто удалением минимального слоя припуска поверхностного слоя материала. Исследованиям удаления минимального припуска при обработке материалов посвящено ряд работ, последними из которых являются [11, 12]. В известной ме-

тодике проф. В.М.Кована [11] заложен принцип удаления минимального поврежденного и измененного слоя материала, включающего, в частности для случая односторонней обработки (например, торцовым шлифованием):

$$Z_{i\min} = (R_z + h)_{i-1} + \Delta_{\Sigma i-1} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где  $R_{z,i-1}$  – высота неровностей профиля на предшествующем переходе,  $h_{i-1}$  – глубина дефектного поверхностного слоя на предшествующем переходе,  $\Delta_{\Sigma i-1}$  – суммарные отклонения расположения поверхности на предшествующем переходе,  $\varepsilon_i$  – погрешность установки заготовки на выполняемом переходе.

Однако, такой подход не учитывает особенностей затрат на обработку поверхностного слоя дорогостоящих или хрупких изделий с использованием дорогостоящего инструмента, уровня дефектности поверхностного слоя изделия после механического воздействия на него режущего инструмента. Это не позволяет свести к минимуму величину снимаемого слоя поверхности материала, а, следовательно, и трудоемкость обработки изделия.

В работе [12] предлагается уточнить методику [11] путем учета величины вносимого дефекта при шлифовании хрупкого материала и внесенного дефекта на предыдущей операции, что позволит уменьшить величину припуска на обработку.

Дальнейшее уточнение методик [11, 12] с учетом особенностей обработки шлифованием поверхностного слоя изделий из камня позволит уменьшить величину припуска на обработку при достижении заданного уровня качества.

#### 4. Цель исследований

Целью исследований является снижение стоимости обработки заготовок из камня шлифованием за счет снижения трудоемкости обработки. Это может быть достигнуто путем управления качеством обработки поверхности каменных изделий [13].

#### 5. Направления снижения трудоемкости обработки камня

Стоимость изделия из камня во многом определяется трудоемкостью обработки. Так, для процесса торцового шлифования поверхности изделия, технологическую себестоимость обработки, с учетом методик [8-10], можно оценить соотношением:

$$C_T = \sum_{j=1}^{j=n} \left[ C_{cmj} \sum_{i=1}^k (t_{mji} + t_{xji}) + \frac{C_{npj}}{T_{uj}} \sum_{i=1}^{i=k} t_{Mji} t_{npj} + \frac{C_{uj}}{h_{kpj}} \sum_{i=1}^{i=k} \left[ I_{ji} t_{mji} + I_{npj} t_{npj} \left( \frac{t_{mji}}{T_{uj}} \right) \right] + \frac{C_{pj}}{T_{uj}} \sum_{i=1}^{i=k} t_{Mji} (T_{uj} + t_{npj}) \right], \quad (2)$$

где  $C_T$  – технологическая себестоимость обработки изделия абразивным инструментом,  $C_{cmj}$ ,  $C_{npj}$ ,  $C_{pj}$  – стоимость минуты: эксплуатации станка, правки круга, минутная тарифная ставка рабочего, соответственно, для  $j$ -операции и  $i$ -го перехода;  $t_{xji}$ ,  $t_{mji}$ ,  $t_{npj}$  – продолжительность вспомогательного времени, машинное время обработки заготовки, время правки круга, соответственно для  $j$ -й операции об-

работки детали;  $C_{ij}$ ,  $T_{ij}$  – соответственно, стоимость и стойкость круга для  $j$ -й операции;  $I_{ji}$ ,  $I_{npj}$  – соответственно линейный износ круга, отнесенный к одной детали, при обработке заготовки и правке инструмента;  $h_{kpj}$  – высота активной части абразивного инструмента.

Из (2) можно сделать вывод, что снижение стоимости обработки возможно за счет снижения времени обработки поверхности заготовки  $t_M$ , вспомогательного времени  $t_x$  и правки шлифовального круга  $t_{np}$  на  $i$  переходах  $j$  операций, а также уменьшения числа операций и переходов абразивной обработки.

То есть, выполняется условие

$$\begin{aligned}
 & (C_T \rightarrow C_{\min}) \forall (t \rightarrow t_{\min} \wedge i \rightarrow i_{\min} \wedge j \rightarrow j_{\min}) \vee (t \rightarrow t_{\min} \wedge \overline{j \rightarrow j_{\min}} \wedge \overline{i \rightarrow i_{\min}}) \vee \\
 & \vee (i \rightarrow i_{\min} \wedge \overline{j \rightarrow j_{\min}} \wedge \overline{t \rightarrow t_{\min}}) \vee (j \rightarrow j_{\min} \wedge i \rightarrow i_{\min} \wedge \overline{t \rightarrow t_{\min}}) \vee \\
 & \vee (t \rightarrow t_{\min} \wedge j \rightarrow j_{\min} \wedge \overline{i \rightarrow i_{\min}}) \vee (t \rightarrow t_{\min} \wedge i \rightarrow i_{\min} \wedge \overline{j \rightarrow j_{\min}}) \vee \\
 & \vee (j \rightarrow j_{\min} \wedge i \rightarrow i_{\min} \wedge \overline{t \rightarrow t_{\min}})
 \end{aligned} \tag{3}$$

Поскольку ограничениями реализации технологического процесса изготовления детали являются выполнение требований качества поверхности заготовки, а также конструктивные параметры абразивного инструмента, то выполняется условие:

$$(\forall i \in [1, k] \exists i \geq 1) \wedge (\forall j \in [1, n] \exists j \geq 1), \tag{4}$$

Следовательно, технологический процесс обработки поверхности заготовки состоит из ряда последовательных операций  $j$  и переходов  $i$  послойного шлифования, причем:

$$(J \in [1, n]) \wedge (i \in [1, k]), \tag{5}$$

где  $n$ ,  $k$  – соответственно, количество операций и переходов шлифования, необходимых для обработки поверхности заготовки с заданным уровнем качества поверхностного слоя.

В таком случае, для выполнения условий (3) и (4) необходимо решение задачи минимизации количества проходов инструмента. Одним из методов решения задачи снижения трудоемкости изготовления изделия, является использование нового подхода в назначении припусков на послойную обработку поверхности материала [13, 14, 15].

## 6. Назначение припусков на обработку материала

Используем методику назначения минимального удаляемого припуска при шлифовании поверхности заготовки изделия из камня (равно как и при механической обработке дорогостоящих, хрупких или труднообрабатываемых материалов) [13, 14, 15]. К удаляемому припуску относят слой макро- и микро- неровностей поверхности заготовки, микротрещины, полученные на предыдущей операции ме-

ханической обработки. Причем слой макро- и микронеровностей, микротрещин поверхности заготовки удаляется лишь до величины предельно допустимых значений  $\Delta \delta$ , входящих в общую величину глубины дефектного слоя  $A$  (рис. 2).

Рис. 2. Схема определения рациональных припусков на обработку

Рассмотрим  $s$ -й участок обрабатываемой поверхности заготовки на  $J$ -й операции обработки (рис. 3), где имеют место макро- и микронеровности в виде гребней 1 и впадин 2, микротрещин 3 (дефектный слой). При определении минимального припуска на обработку  $Z_{i \min}$  очередного слоя материала (количество слоев обработки может достигать 75 при удалении шлифованием поверхностного слоя толщиной 3,5 мм [16]) исходим из необходимости удаления дефектного слоя.

Рис. 3. Фрагмент удаляемого слоя поверхности заготовки

С целью снижения количества переходов при обработке поверхности заготовки на этапах предварительной обработки, целесообразно удалять не минимальный припуск, а слой материала, включающий сумму величины дефектного слоя, полученного на предыдущей обработке  $\Delta_{i-1}$ , и дополнительный слой материала  $H_i$  (рис. 4).

Рис. 4. Фрагмент  $i$ -го слоя материала, подлежащего удалению

Таким образом,

$$Z_i = \Delta_{i-1} + H_i, \quad (6)$$

где 
$$H_i \in [0; (A - \Delta_0 - \Delta_1)]. \quad (7)$$

Но 
$$\forall \Delta_i \equiv \{((R_{i\max} \geq h_i) \rightarrow R_{i\max}) \vee ((R_{i\max} \leq h_i) \rightarrow h_i)\} \quad (8)$$

где  $R_{i\max}, h_i$  – максимальная величина микронеровности поверхности и трещины (выкола)  $i$ -го слоя поверхности заготовки, соответственно.

Однако, максимальный слой удаляемого шлифованием материала заготовки обусловлен конструктивными характеристиками абразивного инструмента, параметрами технологического процесса и характеристиками обрабатываемого материала. Тогда,

$$Z_i \leq L^n P_o S B^{-1} k_\Sigma, \quad (9)$$

где  $L$  – высота зерна абразива инструмента,  $P_o$  – давление инструмента на обрабатываемую заготовку,  $S$  – площадь рабочей поверхности инструмента,  $B$  – ширина обрабатываемой поверхности заготовки,  $K_\Sigma$  – коэффициент уточнения,  $n$  – показатель степени [16].

$$K_\Sigma = K_c K_k K_3 K_v, \quad (10)$$

где  $K_c$  – коэффициент, учитывающий свойства связки,  $K_k$  – коэффициент, учитывающий концентрацию алмазов,  $K_3$  – коэффициент, учитывающий свойства заготовки,  $K_v$  – коэффициент, учитывающий соотношение скоростей главного движения и движения подачи.

$$K_v = \frac{V}{V_n}, \quad (11)$$

где  $V$  – скорость главного движения,  $V_n$  – скорость подачи.

Вместе с тем, увеличение удаляемого слоя материала приведет к увеличению сил резания и, как следствие, к увеличению глубины микротрещин обрабатываемого поверхностного слоя материала. Поэтому при определении величины  $H_i$  и  $Z_i$  необходимо решить задачу нахождения рационального построения технологического процесса и оптимизации удаляемого припуска, удовлетворяющих требованию (3).

Общий припуск на обработку поверхности заготовки из камня определим исходя из анализа дефектного слоя (см. рис. 2-4).

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=k} Z_i \equiv \sum_{i=1}^{i=k} (\Delta_{i-1} + H_i) \equiv A - \Delta_{\partial}, \quad (12)$$

где  $Z_i$  – припуск на обработку  $i$ -го слоя поверхности заготовки,  $A$  – величина макронеровности поверхности заготовки,  $\Delta_{\partial}$  – предельно допустимое значение состояния дефектного слоя.

Таким образом, при обработке поверхности заготовки из камня, возможно снижение общего припуска на обработку, что позволит снизить количество проходов, а, следовательно, трудоёмкость и стоимость обработки.

### **7. Управление технологическим процессом и качеством обрабатываемой поверхности заготовки**

Для повышения эффективности реализации технологического процесса, управления качеством обрабатываемой поверхности изделий из камня необходимо точно менять взаимное положение поверхности заготовки и рабочего инструмента (в пределах 0,01-0,06мм), как при выполнении очередного прохода, так и при осуществлении процесса обработки в пределах одного прохода [13]. Последнее обстоятельство должно учитывать и отжим инструмента при упругом закреплении шлифовального круга, что при изменениях топографии поверхности обработки приводит к наследственной повторяемости макрогеометрических неровностей поверхности заготовки.

$$A_i = A_{i-1} \cdot k_i, \quad (13)$$

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

Уменьшение величины  $k_i$  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 обрабатываемому инструменту. Это может быть реализовано при помощи специальных приспособлений, содержащих привод малых перемещений. Конструкция такого приспособления состоит из основания 1 (рис. 5), на котором установлены привода микроперемещений 2, работающие на принципах магнитострикционного, либо обратного пьезоэффекта (пьезодвижитель) [17]. Привода микроперемещений 2 соединены с плитой 3, на которой закреплена обрабатываемая абразивным инструментом 5 заготовка 4. Для управления вертикальным положением пьезодвижителей необходимо использовать управляющий сигнал, используя систему адаптивного управления [18-20].

В качестве сенсора усилий резания при реализации технологического процесса обработки изделия может быть использован разработанный в [20] кольцевой датчик, устанавливаемый в шпиндельной бабке станка и позволяющий измерять 3 компоненты усилия резания. Параметры режимов резания могут быть определены по методикам [20, 21].

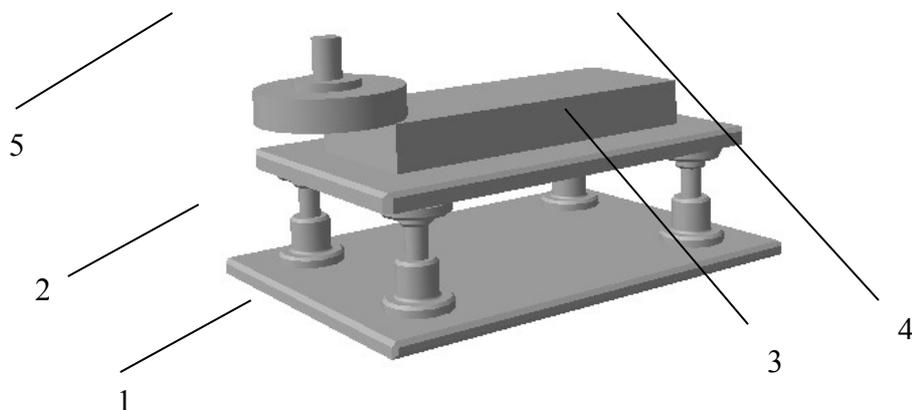


Рис. 5. Схема конструкции специального приспособления

## 8. Выводы и перспективы развития разработанных принципов

Таким образом, приведенная методика удаления припусков позволит снизить трудоемкость и стоимость процесса обработки изделий из природного и синтетического камня. Разработанная схема конструкции специального мехатронного приспособления с приводами малых перемещений позволит осуществить управление качеством поверхности обрабатываемой заготовки и реализовать методику удаления максимально возможного припуска с минимизацией количества необходимых проходов.

Разработки могут использоваться в новых и при модернизации существующих конструкций камнеобрабатывающего оборудования, в новых технологиях обработки хрупких, дорогостоящих и труднообрабатываемых изделий. Это позволяет определить направления и тенденции дальнейшего повышения эффективности технологических процессов механической обработки поверхностей заготовок.

**Список литературы:** 1. Мартыненко И.И. Состояние и перспективы развития геологической отрасли в Украине // Инструментальный світ. – Київ.: ІВЦ НАН України, №2, 2002. – С. 10-12. 2. Михайлов А.Н., Байков А.В., Рыбина С.А. Методика оптимизации припусков при обработке изделий из природного камня. – В сб. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонГТУ, 2002, вып. 21 – С. 120 –126. 3. Добыча и обработка природного камня: Справочник/ Под общ. ред. А.Г.Смирнова – М.: Недра, 1990 – 445с. 4. Карюк Г.Г., Оситинский Б.Л. Обработка камня инструментом из синтетических алмазов – Киев: УкрНИИТИ, 1968 – 23 с. 5. Польшаков В.И., Кузьменко А.В., Захаренко В.С. «Основные пути повышения производительности и качества шлифования труднообрабатываемых материалов» – В сб. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» – Донецк: ДонГТУ, 2000, вып. 13. – С. 98 –102. 6. Горобец И.А., Михайлов А.Н. Исследование топографии поверхности обрабатываемых заготовок из камня// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междуна-

родный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 24. – С. 31 – 36. **7.** Варданян К.С. Современные камнеобрабатывающие станки и поточные линии. – «Айастан», Ереван, 1975. – 226 с. **8.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.М Дальского, А.Г.Суслова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение -1, 2001. – 944 с. **9.** Рыбицкий В.А. Алмазное шлифование твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1980. – 224 с. **10.** Михайлов А.Н., Калафатова Л.П. Особенности формирования дефектного слоя при абразивной обработке конструкционных изделий из материала на основе стекла// Прогрессивные технологии и системы в машиностроении: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонГТУ. 2000. Вып. 17. – С. 90-93. **11.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М Дальского, А.Г.Суслова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.-М.: Машиностроение -1, 2001. – 912 с. **12.** Калафатова Л.П. Технологические основы повышения эффективности обработки и обеспечения качества изделий из технических стекол и ситаллов. Автореферат дисс. на соискание ученой степени докт. техн. наук – Харьков, 2001. – 37 с. **13.** Горобец И.А., Михайлов А.Н. Повышение эффективности обработки заготовок из камня// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 24. – С. 36 – 40. **14.** Михайлов А.Н., Горобец И.А. Основные принципы нового подхода в назначении припусков на обработку изделий из природного камня – Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Vol.1. – Chisinau, VTM, 2003. – P. 200-204. **15.** Mihajlov A., Gorobets I., Kapljuhin A. Les nouveaux principes de la Destination D'elargissement pour le traitement des produits de la Pierre naturelle – International conference advanced manufacturing technologies – Bucharest, Romania, 3-4 November, 2003. **16.** Орлов А.М. Добыча и обработка природного камня. – М.: Наука, 1977. – 350 с. **17.** Палис Ф. Нетрадиційні електромеханічні актуатори та їх застосування. – Донецьк, ДонНТУ, 2002. – 29 с. **18.** Gorobez I, Golubov N. Adaptronsystem in der Werkzeugmaschine für die spanabhebende Formung – Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage. – Berlin, Logos-Verl.,2001, – S. 45-51. **19.** 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. – S. 100-104. **20.** Горобец И.А., Шабан К. Параметры регулирования адаптронных систем токарных станков// Материалы Третьего Международного научно-практического семинара “Практика и перспективы развития институционального партнерства”. В 2-х кн. – Таганрог, ТРТУ, кн. 2, 2002, №2 – С. 47-52. **21.** Рыбицкий В.А. Алмазное шлифование твердых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1984 – 224 с.

## КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ОБРОБЛЮВАНОЇ ЗАГОТОВКИ

Горобець І.О., Михайлов О.М.

Шліфування каменю є трудомісткою операцією. Обробка поверхні каменю супроводжується утворенням тріщин. Удосконалення процесу обробки дозволить знизити час обробки виробів. Це досягається зменшенням шару обробки. Використання пристосувань із приводом малих переміщень підвищує ефективність обробки.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО  
СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ

Горобец И.А., Михайлов А.Н.

Шлифование камня является трудоемкой операцией. Обработка поверхности камня сопровождается образованием трещин. Совершенствование процесса обработки позволит снизить время обработки изделий. Это достигается уменьшением слоя обработки. Использование приспособлений с приводом малых перемещений повышает эффективность обработки.

QUALITY MANAGEMENT OF SUPERFICIAL  
LAYER OF WORKPIECE BEEN MACHINED

Gorobets I.A., Mihajlov A.N.

Grinding of a stone is toilful operation. Machining of a surface of a stone is accompanied by formation of cracks. Perfection of machining process will allow to lower time of machining of products. It is reached by reduction of machining layer. Use of appliances with a drive of small movement raises the efficiency of machining.