

УДК 621.923

А. В. Беспалова, канд. техн. наук, В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
О.В. Фроленкова, ассистент, Т.В Чумаченко, канд. техн. наук,
Одесса, Украина

РАЗРЕЗАНИЕ КАМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ АЛМАЗНЫМИ ДИСКАМИ

У процесі ремонту і реставрації будівель часто розрізають керамічні плитки і блоки з Al_2O_3 і ZrO_2 . В даний час для цих цілей широко використовуються алмазні абразивні диски. Процес розрізання супроводжується значним виділенням тепла і нагріванням алмазного диска. При температурі близько 600° міцність диска на розрив зменшується в 2 рази і відбувається графітизація алмазних зерен. Таким чином, при розрізанні алмазним кругом кам'яних і будівельних матеріалів, температура нагріву кола не повинна перевищувати $600^\circ C$. В роботі виконано математичне моделювання процесу нагрівання алмазного відрізного круга на металевій основі при розрізанні керамічних матеріалів для визначення часу безперервної роботи до критичної температури $600^\circ C$. Результати моделювання, представлені на графіках, показали залежність температури нагрівання кола від діаметра останнього, частоти обертання, хвилинної подачі, від зернистості і товщини кола. Показано, що шляхом підбору відповідних характеристик процесу час безперервної роботи може бути близько 10 - 12 хв без застосування примусового охолодження.

Ключові слова: алмазний відрізний диск, температура диска, кераміка ZrO_2

В процессе ремонта и реставрации зданий часто разрезают керамические плитки и блоки из Al_2O_3 и ZrO_2 . В настоящее время для этих целей широко используются алмазные абразивные диски. Процесс разрезания сопровождается значительным тепловыделением и нагревом алмазного диска. При температуре порядка 600° прочность диска на разрыв уменьшается в 2 раза и происходит графитизация алмазных зерен. Таким образом, при разрезании алмазным кругом каменных и строительных материалов, температура нагрева круга не должна превышать $600^\circ C$. В работе выполнено математическое моделирование процесса нагрева алмазного отрезного круга на металлической основе при разрезании керамических материалов для определения времени непрерывной работы до критической температуры $600^\circ C$. Результаты моделирования, представленные на графиках, показали зависимость температуры нагрева круга от диаметра последнего, частоты вращения, минутной подачи, от зернистости и толщины круга. Показано, что путем подбора соответствующих характеристик процесса время непрерывной работы может быть порядка 10 – 12 мин без применения принудительного охлаждения.

Ключевые слова: алмазный отрезной диск, температура диска, керамика ZrO_2

During the repair and restoration of buildings, ceramic tiles and blocks of Al_2O_3 and ZrO_2 are often cut. At present diamond abrasive disks are widely used for these purposes. The cutting process is accompanied by considerable heat release and heating of the diamond disk. At a temperature of about 600° , the tensile strength of a disc is reduced by a factor of 2 and graphitization of diamond grains occurs. Thus, when cutting stone and building materials with a diamond circle, the disk heating temperature should not exceed $600^\circ C$. In the work, mathematical modeling of the heating of a diamond cutting disk on a metal base was performed while cutting ceramic materials to determine the time of continuous operation to a critical temperature of $600^\circ C$. The simulation results presented in the graphs showed the dependence of the heating temperature of the disk on the diameter of the latter, the speed of rotation, the minute feed, the grain size and the thickness of the disk. It is shown that by selecting

appropriate process characteristics the time of continuous operation can be of the order of 10 - 12 min without the use of forced cooling.

Key words: diamond cutting disk, disk temperature, ceramics ZrO_2

В процессе ремонта и реставрации зданий часто прорезать проемы и гнезда, куда заводятся усиливающие элементы.

Такие работы часто выполняются в известняке-ракушечнике, бетоне, граните, базальте, в керамических материалах в частности при разрезании керамической плитки из Al_2O_3 и ZrO_2

В настоящее время для этих целей широко используются алмазные абразивные диски. Алмазные абразивные диски это в сущности алмазные отрезные круги на металлической связке. Алмазный слой напыляется на металлический диск из легированной стали. Алмазные отрезные круги на керамической связке не изготавливаются, поскольку температура спекания таких кругов при изготовлении выше, чем температура графитизации алмаза.

Основное преимущество алмазных инструментов это прежде всего возможность получения высокой производительности обработки и размерной стойкости, превышающих аналогичные показатели традиционных инструментов на основе карборунда.

Например, если производительность окантовки твердых пород камня карборундовыми кругами составляла в среднем $100\text{--}150\text{ см}^3/\text{мин}$, то алмазными — $400\text{--}600\text{ см}^3/\text{мин}$.

Значительно повышается при этом точность выполнения операций и качество обработанной поверхности. При алмазной обработке весьма существенным с точки зрения современных требований является возможность осуществления механизации трудоемких процессов и автоматизации основных операционных циклов.

Разрезание твердых строительных материалов осуществляется дисковыми алмазными кругами скорость вращения, которых, а, следовательно, и скорость резания составляет $35\text{--}50\text{ м/с}$. Ввиду высокой интенсивности процесса резания и интенсивного микростружкообразования, процесс разрезания сопровождается значительным тепловыделением.

Следует отметить, что диск алмазного круга, на который наносится алмазное абразивное покрытие изготавливается из обычной малолегированной стали типа Сталь 9ХФМ, (0,9% углерода и до 1% хрома, ванадия и молибдена). Эти стали обладают достаточно высокой прочностью на разрыв, чтобы противостоять большим центробежным силам, но невысокой теплостойкостью. Прочностные характеристики этих сталей при нагреве до температур $500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ уменьшаются практически в 2 раза, что может вызвать заклинивание или даже поломку и разрыв инструмента при работе.

Кроме того, графитизация алмазных режущих зерен, т.е. превращение тетрагонального углерода в гексагональный также происходит при

температуре порядка 600 °С. Следовательно работа при такой температуре круга может привести к потере алмазоносного слоя.

Таким образом при разрезании алмазным кругом каменных и строительных материалов, температура нагрева круга не должна превышать 600 °С. Следовательно время работоспособности алмазного отрезного круга — это время за которое он нагревается при непрерывной работе до температуры 600 °С. Чем больше это время – тем выше работоспособность алмазного круга.

В настоящее время нет базы данных по назначению режимов разрезания кругами из СА, которые бы определяли закономерности нагрева и охлаждения алмазного отрезного круга во время работы.

Нет методики определения времени работы до критической температуры и не рассмотрены вопросы увеличения ресурса времени работы до критической температуры.

Алмазные круги выпускаются различных размеров и разной зернистости, поэтому экспериментальное исследование этого вопроса очень трудоемкое и длительное. Кроме того, нет надежной методики, которая позволяла бы осуществить эти измерения. В настоящей работе проведено математическое моделирование, которое дает возможность определить время безопасной работы до критической температуры. Кроме того, промоделированы некоторые способы повышения ресурса времени. Таким образом можно создать базу предпочтительных режимов работы и экспериментально точно уточнить математическую модель.

Цель работы – математическое моделирование процесса нагрева алмазного отрезного круга на металлической основе при разрезании каменных и керамических материалов для определения времени непрерывной работы до критической температуры.

Объект исследования – процесс разрезания каменных и керамических строительных материалов отрезными кругами из синтетических сверхтвердых материалов.

Предмет исследования – разрезание керамических строительных материалов из ZrO_2 .

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Определить сил резания единичным зерном во время процесса разрезания

2. Определить тепловую мощность, развиваемая единичным зерном при резании керамического материала.

3. Определить форму пятна контакта круга с изделием, определить количество зерен действующих в пятне контакта и величина суммарного теплового потока при разрезании.

5. Разработать блок-схему и программа расчетов (в среде MathCad),

которая дает возможность определить суммарные силы резания, контактную температуру разрезания, схему нагрева круга этой температурой.

6. На основании полученных данных определить температура нагрева участка круга, находящегося в контакте с изделием, температура по радиусу круга, охлаждение нагретого круга воздушным потоком и приrost температуры круга на каждый оборот.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Не смотря на большое количество литературы по разрезанию каменных и керамических материалов алмазными кругами практически нет сведений о параметрах процесса разрезания, которые позволяют управлять температурой круга во время работы. Это не дает возможности разрабатывать оптимальную технологию разрезания, определять время работы круга до критической температуры нагрева, а также не дает возможности разработать эффективную методику охлаждения круга.

Большое количество работ посвящено энергетике процесса разрезания, износу отрезных кругов и способам поддержания энергетических характеристик процесса в определенных параметрах.

В работе [1] автор подробно рассматривает процесс разрезания природных камней алмазным дисковым инструментом. Автор весьма квалифицированно определяет характеристики алмазных зерен, количество реально режущих зерен в пятне контакта круга с изделием. На этой базе автор определяет единичные и суммарные силы резания. Однако нет тепловых расчетов ни по отношению к обрабатываемой детали, ни по отношению нагрева алмазного круга на металлической основе. Следует также отметить, что все материалы относятся к 1979 году и естественно нуждаются в обновлении и пересмотре. В работе [6] рассматриваются общие вопросы прогресса в абразивной обработки, однако нет данных о температуре нагрева алмазных кругов на металлической связке как нет и данных по поводу алмазных отрезных дисков. В работе [7] рассмотрены вопросы износа алмазного отрезного круга, в зависимости от содержания в алмазоносном слое карбидов бора. Вопросы нагрева круга при обработке не рассмотрены. В работе [8] дается методика определения и повышения жесткости в узлах механизмов с алмазными пилами. Эти материалы также не могут быть использованы в настоящей работе. В работе [9] исследуются вопросы – энергетического характера – зависимость сил резания и мощности резания от конкретных условий и режимов обработки. Однако вопрос энергетических затрат на нагрев круга не рассмотрен. В работе [10] рассматривается износ алмазных секторов. Математическими методами авторы предсказывают износ круга в зависимости от количества удаляемой стружки. Тепловые эффекты в работе не рассмотрены. В работе [11] рассмотрены энергетические характеристики процесса. Силы резания и мощность связываются с количеством удаляемой стружки, что может дать возможность обоснованно

назначать режимы резрезания. В работе [12] рассматривается влияние скорости периферии круга на износ. Эти исследования также дают возможность более обосновано назначать режим резрезания. Тепловые вопросы не рассмотрены. В работе [13] рассматривается вопрос автоматического управления скоростью пилы и подачи на зуб, что дает возможность повысить эффективность процесса резрезания. Тепловые вопросы также не рассматриваются и кроме того, результаты исследования процесса резрезания дисковой пилой не могут быть полностью перенесены на процесс резрезания диском. В работе [14] зависимости удельной энергии резрезания и удельной энергии бурения. Тепловые вопросы не затрагиваются. В работе [15] рассматриваются вопросы износа алмазной фрезы по измерениям силы резрезания. Несмотря на тщательность эксперимента, проведенного на современном оборудовании результаты, не могут быть приложены к теме настоящей работы.

Можно сделать вывод, что в настоящее время в литературе нет данных о нагреве алмазного круга на металлической основе во время работы

Материалы и методы исследования. Исследования проведены с применением математического моделирования и прямых экспериментов. В качестве материала используется плитка и брикеты из оксида циркония, в качестве режущего инструмента шлифовальные круги из синтетических алмазов на металлической основе.

Экспериментальные и аналитические исследования.

В работе [1] для определения единичных сил резрезания применялась несколько измененная методика, изложенная в работе [3]. В настоящей работе также была использована методика работы [3] с некоторыми изменениями. Использовалась величина глубины вдавливания алмазной пирамидки, что дало возможность связать составляющую P_u с величиной углубления зерна в металл.

$$P_z = 7,15 \times H_v \times h^2, \quad (1)$$

где: H_v твердость резрезаемого материала по шкале Виккерса, h – средняя величина углубления зерна в материал. Произведение $P_z \cdot V_{кр}$ (скорость круга) дает значение тепловой мощности резрезания отдельным зерном. Для определения последней величины использовалась методика описанная в работе [2]. Использование этой методики дает возможность по тепловому импульсу от микротермопары определить количество реально режущих зерен в дуге контакта круга с изделием, расстояние между режущими зернами, удельное количество режущих зерен и измеряя реальный сьем материала на каждом проходе и деля величину этого съема на количество зерен, можно определить среднюю величину углубления зерна в шлифуемый или резрезаемый материал. Рис.1.

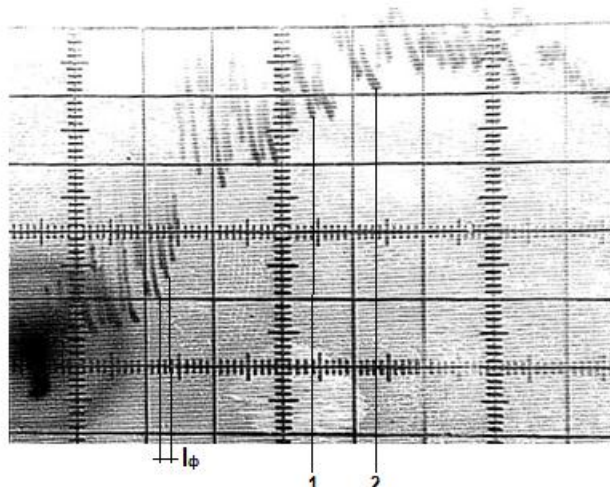


Рисунок 1. Характерный тепловой импульс на котором видны температурные всплески от каждого реально режущего зерна. I_ϕ -фактический временной интервал между соседними режущими зернами. 1, 2- характерные импульсы от каждого режущего зерна. Скорость развертки 2,2 мс/клетка. Вертикальный масштаб- 150°C/клетка. Осциллограф С8-9А

Если остановится на примере разрезания брикета из ZrO_2 вертикальной подачей как показано на рис.2, то можно ввести следующие обозначения.

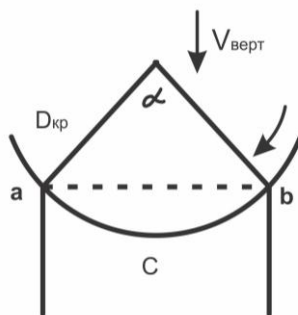


Рис.2. Схема разрезания образца из керамики ZrO_2 алмазным разрезным кругом на металлической основе

S- ширина круга, D- диаметр круга, $V_{кр}$ -скорость круга, $V_{верт}$ -скорость вертикальной подачи, n-частота вращения. Хорда сектора части круга, находящейся в данный момент в пределах образца, $ab=C$. α – угол сектора, L-длина дуги контакта равная

$$L_{\text{конт}} = 2 \arcsin \frac{c}{D} \cdot R, \quad (2)$$

Для ориентировочного расчета определим площадь контакта режущей кромки круга с изделием. Она очевидно будут равна $F_{\text{конт}} = L_{\text{конт}} \cdot S$ и при проекции на плоскость будет представлять из себя вытянутый прямоугольник. Если взять промежуток времени от точки а до точки б, то время теплового воздействия от точки а до точки б может рассматриваться как некоторый короткий промежуток времени равный $\tau = L_{\text{конт}} / V_k$. Таким образом сведем задачу к мгновенному плоскому источнику. Погрешности, возникающие от использования этой модели, могут быть определены в будущем при экспериментальных измерениях.

Атмосфера, в которой работает шлифовальный круг состоит из пограничного слоя воздуха, который существует около круга независимо от его структуры и пористости. [Леб Чум]. Это в свою очередь означает, что воздух при шлифовании интенсивно обдувает шлифуемую поверхность и можно ожидать существенного снижения температуры, тем более, что сброс тепла в пределах одного оборота круга осуществляется с большей части его поверхности. Для определения количества тепла уносимого с поверхности круга определим коэффициент теплоотдачи для данных условий.

Для оценки этого количества необходимо найти коэффициент конвективного теплообмена между движущейся средой и шлифуемой поверхностью (стенкой).

Количество теплоты, переданное в процессе теплоотдачи, определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha (t_{cm} - t_{жс}) F, \quad (3)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $t_{жс}$, t_{cm} – средние температуры жидкости и стенки, °С; F – поверхность стенки, м²; Q – тепловой поток (количество теплоты), Вт (Дж); τ – время, с. Коэффициент теплоотдачи α – характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Коэффициент α показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 градус (К),

$$[\alpha] = \left[\frac{Q}{F(t_{cm} - t_{жс})} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \times \text{с} \times \text{К}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}} \right] \quad (4)$$

Определение α является основной задачей расчета теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют из критериальных уравнений, полученных преобразованием дифференциальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена методами теории подобия. Проще всего коэффициент теплообмена определить через критерий Нуссельта по выражениям:

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{\ell} \quad (5)$$

и

$$Nu = 0.008 \times Re^{0.9} \times Pr^{0.8} \quad (6)$$

где,

$$Re = \frac{\omega \ell}{\nu} = \frac{\omega \ell \rho}{\mu}, \quad (7)$$

критерий Рейнольдса, который характеризует гидродинамический режим потока при вынужденном движении и является мерой соотношения сил инерции и вязкого трения;

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c \mu}{\lambda}, \quad (8)$$

критерий Прандтля, который характеризует физико-химические свойства теплоносителя и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке;

где ℓ – определяющий размер, м; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; $\Delta t = t_{ст} - t_{ж}$ – температурный напор между стенкой и теплоносителем, °C; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·K); μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; c – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·K); τ – время процесса, с, ω – скорость движения теплоносителя м/с.

Расчет критерия Nu для скорости воздушного потока 30 – 50 м/с и для нормальной температуры воздуха в цехе 20 °C = 293 °K, по приведенным формулам, составляет 51,34. Соответственно коэффициент теплообмена α будет, согласно формуле 3, $\alpha = 445$ Вт/м²·°K.

Для того, чтобы определить количество теплоты уносимой с поверхности пятна контакта круга с деталью необходимо перемножить длину дуги контакта круга с изделием и величину поперечной подачи.

Блок-схема программы расчетов показана на рис.3. Расчеты проводились при изменении параметров в следующих пределах: (см. программу MathCad).

Результаты расчетов показаны на рис. 4 – 8.

Результаты моделирования показали, величина зернистости отрезного круга значительно влияет на важные параметры работы. Суммарная сила резания снижается несмотря на то, что единичная сила резания возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении зернистости резко уменьшается количество одновременно работающих зерен. Потому если нет особых требований по шероховатости поверхности выгоднее работать более крупнозернистым кругом, несмотря на его более высокую стоимость. Согласно изменению суммарной силы резания, законы изменения мощности резания и температуры нагрева круга за 1 минуту работы, подчиняются той же закономерности. Температура круга за один оборот медленно снижается, зато совершенно естественно увеличивается время работы до критической температуры.

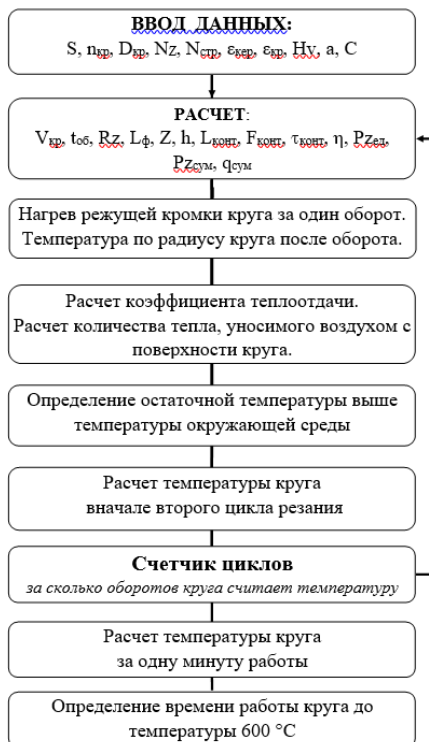


Рис.3. Блок-схема программы расчетов

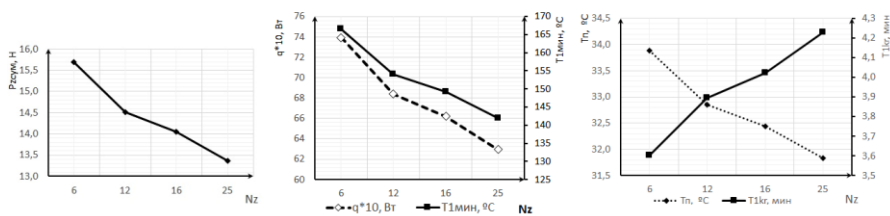


Рис.4. Зависимость параметров разрезания от изменения зернистости круга

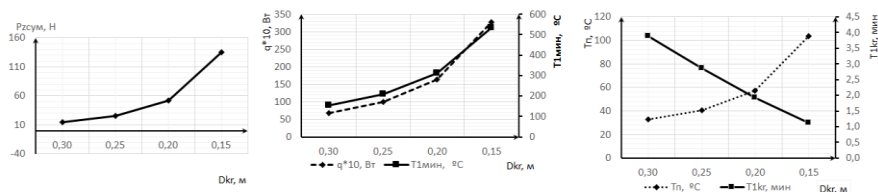


Рис.5. Зависимость параметров резания от изменения диаметра отрезного круга

Суммарная сила резания, мощность и нагрев круга за 1 мин. возрастают. Температура нагрева круга за 1 оборот возрастает. Время работы до критической температуры значительно снижается.

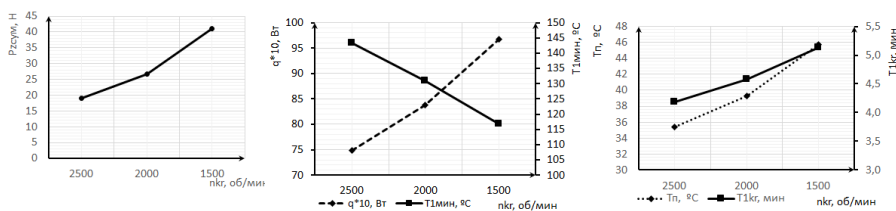


Рис.6. Зависимость параметров резания от изменения частоты вращения отрезного круга

Уменьшение частоты вращения вызывает увеличение суммарной силы резания, мощности резания, температуры нагрева круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно увеличивается.

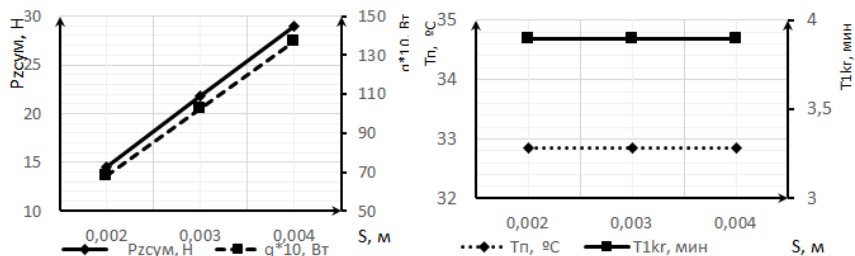


Рис.7. Зависимость параметров резания от изменения толщины отрезного круга

При увеличении толщины отрезного круга как и ожидалось возрастает суммарная сила P_z и мощность резания. Все остальные параметры остаются без изменения. Причина этого в том, что остается неизменной интенсивность теплового потока.

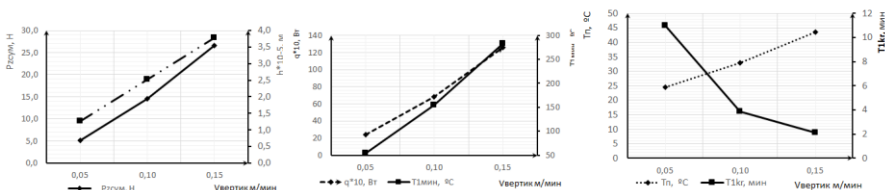


Рис.8. Зависимость параметров разрезания от изменения величины вертикальной подачи отрезного круга

При увеличении вертикальной подачи возрастает суммарная сила резания. Нагрузка на режущее зерно увеличивается за счет увеличения средней величины внедрения зерна в материал. Мощность резания и температура нагрева круга за 1 минуту возрастает. Также возрастает нагрев круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно уменьшается.

Обсуждение

Математическое моделирование показало, что металлический диск – основа алмазного круга во время работы существенно нагревается.

Практически все элементы режимов разрезания влияют на температуру круга, хотя и в разной мере. Наибольшее влияние оказывает величина вертикальной подачи.

Частота вращения круга и изменение его диаметра влияют практически одинаково, поскольку скорость резания зависит как от частоты вращения, так и от диаметра круга.

Изменение зернистости отрезного круга значительно влияет на его нагрев. Зависимость здесь достаточно сложная поскольку увеличение размера зерна увеличивает единичную силу резания и тепловую мощность от каждого отдельного зерна. Однако при этом уменьшается количество зерен одновременно участвующих в работе. В нашем случае в теплообразовании принимает участие меньшее количество более мощных тепловых источников. Однако увеличение мощности каждого единичного источника не может компенсировать уменьшение их количества. Это явление необходимо проверить на других кругах например на керамической связке.

По результатам моделирования можно сказать, что для обеспечения максимальной тепловой стойкости круга следует выбирать круги зернистости не менее 25 и работать при скорости вертикальной подачи не более 0,05 м/мин.

Заключение.

В результате проведенного математического моделирования решены следующие вопросы:

1. Определена сила резания единичным зерном во время процесса

разрезания

2. Определена тепловая мощность, развиваемая единичным зерном при резании

керамического материала.

3. Определена форму пятна контакта круга с изделием, определено количество зерен действующих в пятне контакта и величина суммарного теплового потока при разрезании.

5. Разработана блок-схема и программа расчетов (в среде MathCad), которая дает возможность определить суммарные силы резания, контактную температуру разрезания, схему нагрева круга этой температурой.

6. На основании полученных данных определена температура нагрева участка круга, находящегося в контакте с изделием, температура по радиусу круга, охлаждение нагретого круга воздушным потоком и приrost температуры круга на каждый оборот.

Список использованных источников: 1. В. А. Александров. Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом. Киев, Наукова Думка, 1979. 2. Н.Н. Клименк В.Г. Лебедев, и др. Методика измерения температур шлифования термopамми при обработке наплавленных и напыленных поверхностей машиностроительных деталей. Физические и компьютерные технологии (Труды 20-й Международной научно-практической конференции, 23-24 декабря 2014). Д: ЛИРА. – Харків, 2015. – С. 34-38. 3. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г. Редько. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1986. – 231 с. 4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с. 5. Горелов В.А., Алексеев С.В. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов М.: «Известия МГТУ МАМИ» № 2(14), 2012, т. 2. С. 64 – 67. 6. Dongming Guo. Advances in abrasive technology IX. Trans Tech Publication. Ueticon-Zuerich, 2006. 7. Islak S. Kastamonu, Turkey Çelik H. Firat. Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. Science of Sintering. 2015; 47(2):131 – 143. 8. Linh Vo Tung, Yong Zang Calculation of the Stiffness in the Roll Tensioning of the Circular Saw Blade MATEC Web of Conferences. 2016;51:01007 DOI 10.1051/mateconf/20165101007. 9. S. Turchetta Cutting Force in Stone Machining by Diamond Disk Advances in Materials Science and Engineering. 2010;2010 DOI 10.1155/2010/631437. 10. Qin Sun, Jinsheng Zhang, Jibo Hu China FAHP and TOPSIS Prediction of Diamond Segments Wear When Using Frame Saw to Cut Granites. Mathematical Problems in Engineering. 2017;2017 DOI 10.1155/2017/4031917. 11. S. Turchetta.W. Polini, I. S. Buyuksagis Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy Advances in Mechanical Engineering. 2009;1DOI 10.1155/2009/175817. 12. Siniša Dunda Zagreb, Croatia. Influence of the circular saw disc peripheral velocity on diamond tool consumption during dimension stone cutting. 13. Ugur Simsir Torque-Controlled Adaptive Speed Control on a CNC Marble Saw Machine Advances in Mechanical Engineering. 2015;7(2) DOI 10.1155/2014/839827. 14. Davor Antoljak, Trpimir Kujundžić, Tomislav Korman, Dalibor Kuhinek Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. Rudarsko-geološko-naftni Zbornik. 2018;33(3):23-32. 15. W. Polini, S. Turchetta Monitoring of Diamond Mill Wear in Time Domain during Stone Cutting Using Cutting Force Measurements. Advances in Mechanical Engineering. 2009;1 DOI 10.1155/2009/353504. 16. Т.В. Чуmachenko, В.Г. Лебедев. С.В. Марчук Охлаждение воздушной и воздушнокапельной струей при шлифовании керамических покрытий.// Наукові нотатки. Науковий збірник ЛНТУ, Випуск 41, Луцьк. 2013.

Bibliography (transliterated): 1. V. A. Aleksandrov. Obrabotka prirodnogo kamnya almaznym diskovym instrumentom. Kiev, Naukova Dumka, 1979. 2. N.N. Klimenk V.G. Lebedev, i dr. Metodika

izmereniya temperatur shlifovaniya termoparami pri obrabotke naplavlennyh i napylnykh poverhnostej mashinostroitelnyh detalej. Fizicheskie i kompyuternye tehnologii (Trudy 20-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 23-24 dekabrya 2014). D: LIRA. – Harkiv, 2015. – S. 34-38. 3. *Redko S.G.* Processy teploobrazovaniya pri shlifovanii metallov / *S.G. Redko*. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1986. – 231 s. 4. *Maslov E.N.* Teoriya shlifovaniya materialov / *E.N. Maslov*. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 320 s. 5. *Gorelov V.A., Alekseev S.V.* Osobennosti mehanicheskoy obrabotki detalej iz keramicheskikh materialov M.: «Izvestiya MGTU MAM» № 2(14), 2012, t. 2. S. 64 – 67. 6. *Dongming Guo.* Advances in abrasive technology IX. Trans Tech Publication. Ueticon-Zuerich, 2006. 7. *Islak S. Kastamonu, Turkey Celik H. Firat.* Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. Science of Sintering. 2015; 47(2):131 – 143. 8. *Linh Vo Tung, Yong Zang* Calculation of the Stiffness in the Roll Tensioning of the Circular Saw Blade MATEC Web of Conferences. 2016;51:01007 DOI 10.1051/mateconf/20165101007. 9. *S. Turchetta* Cutting Force in Stone Machining by Diamond Disk Advances in Materials Science and Engineering. 2010;2010 DOI 10.1155/2010/631437. 10. *Qin Sun, Jinsheng Zhang, Jibo Hu* China FAHP and TOPSIS Prediction of Diamond Segments Wear When Using Frame Saw to Cut Granites. Mathematical Problems in Engineering. 2017;2017 DOI 10.1155/2017/4031917. 11. *S. Turchetta, W. Polini, I. S. Buyuksagis* Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy Advances in Mechanical Engineering. 2009;1DOI 10.1155/2009/175817. 12. *Sinisa Dunda* Zagreb, Croatia. Influence of the circular saw disc peripheral velocity on diamond tool consumption during dimension stone cutting. 13. *Ugur Simsir* Torque-Controlled Adaptive Speed Control on a CNC Marble Saw Machine Advances in Mechanical Engineering. 2015;7(2) DOI 10.1155/2014/839827. 14. *Davor Antoljak, Trpimir Kujundzic, Tomislav Korman, Dalibor Kuhinek* Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. Rudarsko-geolosko-naftni Zbornik. 2018;33(3):23-32. 15. *W. Polini, S. Turchetta* Monitoring of Diamond Mill Wear in Time Domain during Stone Cutting Using Cutting Force Measurements. Advances in Mechanical Engineering. 2009;1 DOI 10.1155/2009/353504. 16. *T.V. Chumachenko, V.G. Lebedev, S.V. Marchuk* Ohlazhdenie vozduшной i vozdushnokapelnoy struej pri shlifovanii keramicheskikh pokrytij.// Naukovi notatki. Naukovij zbirnik LNTU, Vipusk 41, Luck .2013.

Надійшла до редколегії 25.06.2018