

УДК 621.923.4:621.793.74

А.В. Беспалова<sup>1</sup>, А.И. Кныш<sup>1</sup>, Д.И. Чекулаев<sup>1</sup>, В.П. Приступлюк<sup>1</sup>, Т.В. Чумаченко<sup>2</sup>,  
В.Г. Лебедев

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Одесский национальный политехнический университет

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АЛМАЗНОГО ОТРЕЗНОГО КРУГА ПРИ РАЗРЕЗАНИИ КАМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*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 резания сопровождается значительным тепловыделением и нагревом алмазного диска. При температуре порядка  $600^\circ$  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:** *отрезной диск, температура круга, критическая температура, суммарная силы резания, мощность резания, температура нагрева круга за 1 оборот, зернистость отрезного круга.*

**Постановка проблемы.** При проведении строительных, строительно-ремонтных и строительно-реставрационных работ возникает необходимость использования размерных элементов конструкций из каменных и керамических строительных материалов. Для получения элементов из таких материалов широко применяется резания каменных материалов пилами и отрезными абразивными кругами. Для удовлетворения этих условий резание осуществляется на камнерезных станках дисковыми алмазными кругами диаметром 250...350 мм, скорость вращения которых, а следовательно, и скорость резания составляет 35...80 м / с.

Ввиду высокой интенсивности процесса резания и интенсивного микростружкообразования, процесс резания 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 – 600 °С 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 резания 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.

#### **Анализ литературных данных.**

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 [2] рассматриваются общие вопросы прогресса в абразивной обработке, однако нет данных о температуре нагрева алмазных кругов на металлической связке, как нет и данных по поводу алмазных отрезных дисков.

В работе [3] рассмотрены вопросы износа алмазного отрезного круга, в зависимости от содержания в алмазоносном слое карбидов бора. Вопросы нагрева круга при обработке не рассмотрены.

В работе [4] дается методика определения и повышения жесткости в узлах механизмов с алмазными пилами. Эти материалы также не могут быть использованы в настоящей работе.

В работе [5] 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 [6] рассматривается износ алмазных секторов. Математическими методами авторы предсказывают износ круга в зависимости от количества удаляемой стружки. Тепловые эффекты в работе не рассмотрены.

В работе [7] рассмотрены энергетические характеристики процесса. Силы резания и мощность связываются с количеством удаляемой стружки, что может дать возможность обоснованно назначать режимы разрезания.

В работе [8] рассматривается влияние скорости периферии круга на износ. Эти исследования также дают возможность более обосновано назначать режим разрезания. Тепловые вопросы не рассмотрены.

В работе [9] рассматривается вопрос автоматического управления скоростью пилы и подачи на зуб, что дает возможность повысить эффективность процесса разрезания. Тепловые вопросы также не рассматриваются и, кроме того, результаты исследования процесса разрезания дисковой пилой не могут быть полностью перенесены на процесс разрезания диском.

В работе [10] зависимости удельной энергии разрезания и удельной энергии бурения. Тепловые вопросы не затрагиваются.

В работе [11] рассматриваются вопросы износа алмазной фрезы по измерениям силы резания. 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.

**Постановка задачі.** В данной работе провести математическое моделирование, которое дает возможность определить время безопасной работы до критической температуры, промоделировать некоторые способы повышения ресурса времени. Таким образом, можно создать базу желаемых режимов работы и экспериментально точно уточнить математическую модель.

**Экспериментальные и аналитические исследования.**

В исследованиях для определения единичных сил резания применялась несколько измененная методика, изложенная в работе [12]. Использовалась величина глубины вдавливания алмазной пирамидки, что дало возможность связать составляющую  $P_y$  с величиной углубления зерна в металл [13]:

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

где:  $H_v$  твердость разрезаемого материала по шкале Виккерса,  $h$  – средняя величина углубления зерна в материал. Произведение  $P_z \cdot V_{кр}$  (скорость круга) дает значение тепловой мощности резания отдельным зерном. Для определения последней величины использовалась методика описанная в работе [14]. 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 съем материала на каждом проходе и деля величину этого съема на количество зерен, можно определить среднюю величину углубления зерна в шлифуемый или разрезаемый материал.

Если остановиться на примере разрезания пирога с  $ZrO_2$  вертикальной подачей, как показано на рис.1, то можно ввести следующие обозначения [15, 16]:

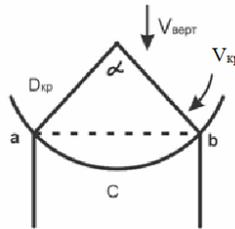


Рис.1. Схема разрезания образца из керамики  $ZrO_2$  алмазным разрезным кругом на металлической основе.

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

Для ориентировочного расчета определим площадь контакта режущей кромки круга с изделием. Она, очевидно, будет равна  $F_{конт} = L_{конт} \cdot S$  и при проекции на плоскость будет представлять из себя вытянутый прямоугольник. Если взять промежуток времени от точки  $a$  до точки  $b$ , то время теплового воздействия от точки  $a$  до точки  $b$  может рассматриваться как некоторый короткий промежуток времени равный  $\tau = L_{конт} / V_k$ . 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 отрезной круг состоит из пограничного слоя воздуха, который существует около круга независимо от его структуры и пористости. [16]. Это в свою очередь означает, что воздух при разрезании интенсивно обдувает круг 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 обдуваемой поверхностью (стенкой).

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

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

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{жс}$ ,  $t_{ст}$  – средние температуры жидкости и стенки, °С;  $F$  – поверхность стенки, м<sup>2</sup>;  $Q$  – тепловой поток (количество теплоты), Вт (Дж);  $\tau$  – время, с.

Коефіцієнт теплоотдачи  $\alpha$  – характеризує інтенсивність теплообміну між поверхністю тіла і оточуючим середовищем. Коефіцієнт  $\alpha$  показує, яке кількість тепла передається від одиниці поверхності стінки до рідини в одиницю часу при різниці температур між стінкою і рідиною в 1 градус (К),

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

Визначення  $\alpha$  є основною задачею розрахунку теплообмінних апаратів. Зазвичай коефіцієнт теплоотдачи визначають з критеріальних рівнянь, отриманих перетворенням диференціальних рівнянь гідродинаміки і конвективного теплообміну методами теорії подібності. Проще всього коефіцієнт теплообміну визначити через критерій Нуссельта за вираженнями:

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

і

$$Nu = 0.008 \times Re^{0.9} \times Pr^{0.43}, \quad (6)$$

де

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

критерій Рейнольдса, який характеризує гідродинамічний режим потоку при вимушеному русі і є мірою співвідношення сил інерції і в'язкого тертя;

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

критерій Прандтля, який характеризує фізико-хімічні властивості теплоносія і є мірою подібності температурних і швидкісних полів в потоці;  $l$  – визначаючий розмір, м;  $\rho$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta t = t_{cm} - t_{жс}$  – температурний напір між стінкою і теплоносієм, °С;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/(м·К);  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;  $c$  – теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К);  $\tau$  – час процесу, с,  $\omega$  – швидкість руху теплоносія м/с.

Розрахунок критерію  $Nu$  для швидкості повітряного потоку 30 – 50 м/с і для нормальної температури повітря в цеху 20 °С=293 °К, за наведеними формулами, становить 51,34. Відповідно коефіцієнт теплообміну  $\alpha$  буде, згідно (3),  $\alpha = 445$  Вт/м<sup>2</sup> °К.

Для того, щоб визначити кількість теплоти, яку вносить з поверхності плями контакту диска з деталлю, необхідно помножити довжину дуги контакту диска з деталлю і величину поперечної подачі.

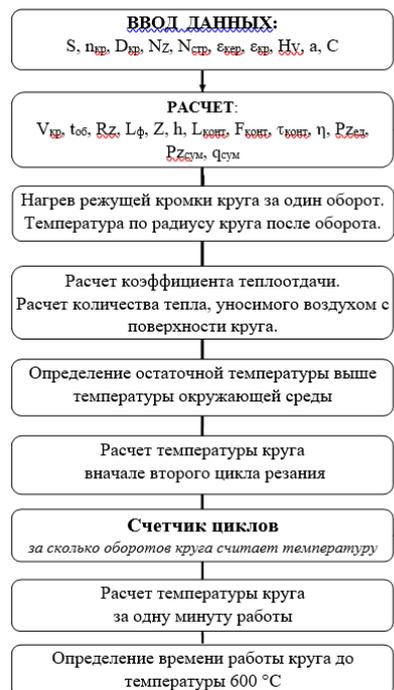


Рис.2. Блок-схема программы расчетов

Блок-схема программы расчетов показана на рис.2. Расчеты проводились при изменении параметров в следующих пределах: (см. программу MathCad). На рис. 2  $S$  - ширина круга,  $D_{кр}$  - 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,  $ab=C$ .  $\alpha$  - угол сектора,  $L$  - длина дуги контакта равная. Результаты расчетов показаны на рис. 3 – 7.

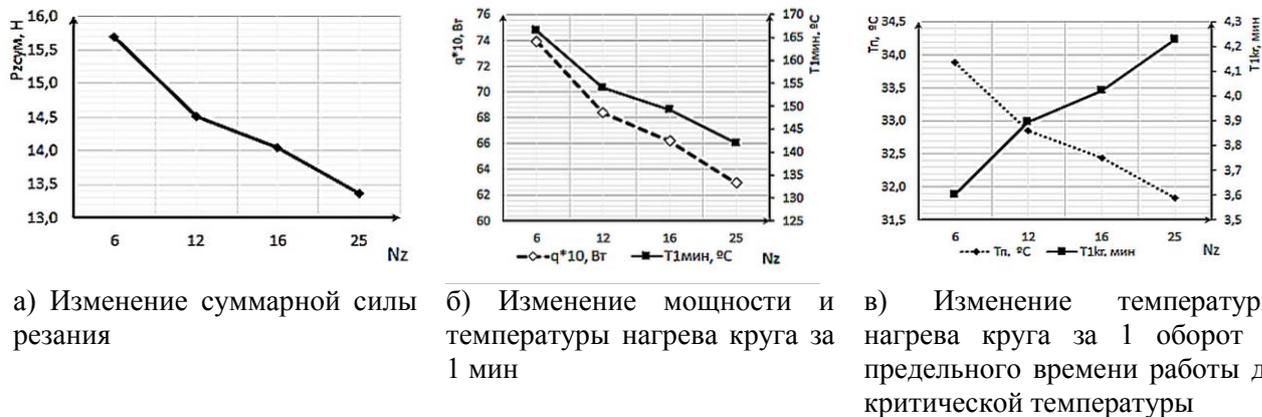


Рис. 3. Зависимость параметров резания от изменения зернистости круга

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. Поэтому 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.

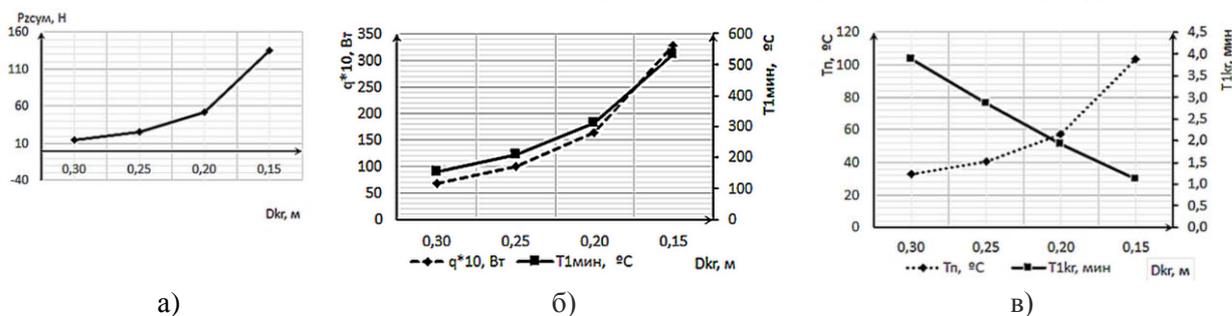


Рис. 4. Зависимость параметров резания от изменения диаметра отрезного круга

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.

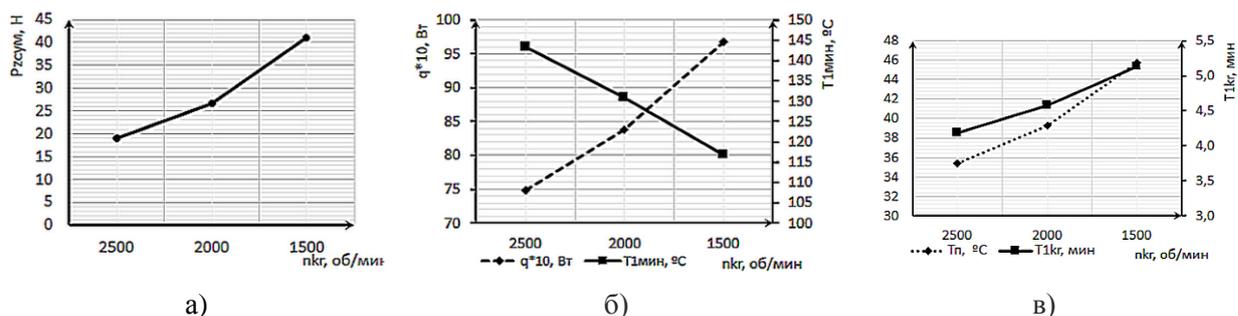


Рис. 5. Зависимость параметров резания от изменения частоты вращения отрезного круга  
Уменьшение частоты вращения вызывает увеличение суммарной силы резания,

мощности резания, температуры нагрева круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно увеличивается.

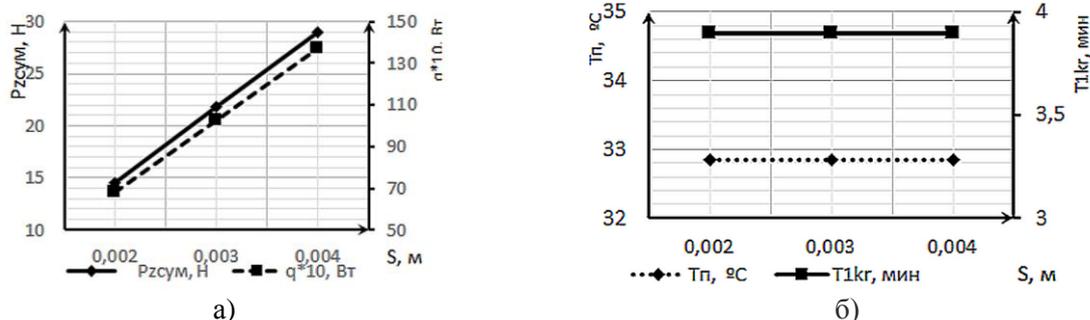
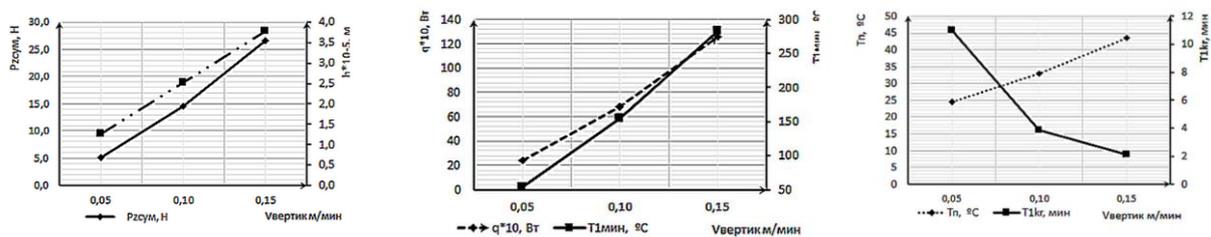


Рис. 6. Зависимость параметров разрезания от изменения частоты вращения отрезного

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



а) Зависимость параметров разрезания от изменения толщины отрезного круга  
 б) Мощность и температура нагрева круга за 1 мин  
 в) Температура нагрева круга за 1 оборот и предельное время работы до критической температуры

Рис. 7. 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.

### Выводы

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.

### Литература

1. Азаров, В.Н. О концентрации и дисперсном составе пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон предприятий стройиндустрии. Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы междунар. конф. Волгоград, 2003. С. 1-7..
2. Dongming Guo. Advances in abrasive technology IX. Trans Tech Publication. Ueticon-Zuerich, 2006.
3. Islak S. Kastamonu, Çelik H. Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. Science of Sintering. 2015. Vol. 47(2). P.131-143.
4. Selvi E, Topaloglu F, Tazegul O. Conventional sintering of diamond cutting tool used in natural stone cutting. AIP Conference Proceedings. 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4849309> (дата звернення 20.05.2015).
5. Turchetta S. Cutting force in stone machining by diamond disk. Advances in Materials Science and Engineering. 2010.
6. Qin Sun, Jinsheng Zhang, Jibo Hu. Fahn and topsis prediction of diamond segments wear when using frame saw to cut granites. Mathematical Problems in Engineering. China, 2017.
7. Turchetta S., Polini W., Buyuksagis I. S. Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy Advances in Mechanical Engineering. 2009.
8. Siniša Dunda. Influence of the circular saw disc peripheral velocity on diamond tool consumption during dimension stone cutting. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Croatia, Zagreb, 1989. Vol. 44, No. 1. P. 135-142.
9. Ugur Simsir. Torque-controlled adaptive speed control on a CNC marble saw machine. Advances in Mechanical Engineering. 2014. Vol. 228. No. 2. P. 230-245.
10. Davor Antoljak, Trpimir Kujundžić, Tomislav Korman, Dalibor Kuhinek. Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. Rudarsko-geološko-naftni Zbornik. 2018. Vol. 33(3). P. 23-32.
11. Polini W., Turchetta S. Monitoring of diamond mill wear in time domain during stone cutting using cutting force measurements. Advances in Mechanical Engineering. 2009. P. 1-5.
12. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. Саратов., 1986. 231 с.
13. Tuncer Sebeci, Douglas E. Abbott. Boundary layers on a rotating disk. AIAA Journal. 1975 Vol. 1(6). P. 561-567.
14. Клименко Н.Н., Лебедев В.Г. и др. Методика измерения температур шлифования термopарамии при обработке наплавленных поверхностей машиностроительных деталей. Материалы 20-й междунар. научно-практ. конф. г. Харьков, 23-24 декабря 2015г. Харьков, 2015. С 34-38.
15. Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В., Луговская Е.А., Беспалова А.В. Фазовые превращения в поверхностном слое шлифуемой детали Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. г.Одеса, 26-29 сентября 2018 г. Одесса, 2018. С. 96-98.
16. Bepalova A., Lebedev V., Frolenkova O., Chumachenko T. Cutting stone and ceramic building materials with diamond discs. Scientific letters of academic society of Michal Baludansky. 2019. Vol. 7.No 2. P. 9-17.

**А.В. Беспалова, А.І. Кныш, Д.І. Чекулаєв, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко**  
 Одеська державна академія будівництва та архітектури  
 Одеський національний політехнічний університет

### ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ АЛМАЗНИХ ВІДРІЗНИХ КРУГІВ ПРИ РОЗРІЗАННІ КАМ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У процесі ремонту і реставрації будівель часто розрізають керамічні плити 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  $600^\circ$  міцність диска на розрив зменшується в 2 рази і відбувається графітізація алмазних зерен. Таким чином, при розрізанні алмазним кругом кам'яних і будівельних матеріалів, температура нагріву кола не повинна перевищувати  $600^\circ C$ . В роботі*

© А.В. Беспалова, А.І. Кныш, Д.І. Чекулаєв, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко,  
 В.Г. Лебедев

*виконано математичне моделювання процесу нагрівання алмазного відрізного круга на металевій основі при розрізанні керамічних матеріалів для визначення часу безперервної роботи до критичної температури 600°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 круга, критична температура, сумарна сили різання, потужність різання, температура нагріву круга за 1 оборот, зернистість відрізного круга.

A. Bespalova, A. Knysh, D. Chekulaev1, V. Pristupljuk, T. Chumachenko  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture  
Odessa National Polytechnic University

#### **WAYS OF REDUCING THE TEMPERATURE OF THE DIAMOND CUTTING WHEEL WHEN CUTTING STONE BUILDING MATERIALS**

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 ° 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 ° 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:** cutting disc, wheel temperature, critical temperature, total cutting forces, cutting power, wheel heating temperature for 1 revolution, cutting wheel grain size.