

УДК 621

П. И. Дубинин, к.т.н., доц., **А. П. Дмитрова**, к.т.н., Московский государственный горный университет

E-mail: kaftmr@msmu.ru

Особенности разрушения природного камня различными видами энергии

Рассмотрен процесс хрупкого разрушения природного камня различными видами энергии в зависимости от физико-технических свойств камня, скорости и мощности трансформируемой энергии.

Ключевые слова: природный камень, энергия, разрушение, источник трещин.

P. I. Dubinin, A. P. Dubinina

Features of the Destruction of Natural Stone by Different Kinds of Energy

The process of brittle fracture of natural stone in various kinds of energy depending on the physico-mechanical properties of rock, speed and power of transformed energy.

Keywords: natural stone, energy, destroying the source of cracks.

Процесс разрушения природного камня, происходящий вследствие роста трещин, называется хрупким, а при явно выраженной пластичности камня квазихрупким, и осуществляется по следующей схеме. В зоне энергетического воздействия формируется объем камня с повышенной концентрацией энергии, который при расширении создает в этой зоне камня растягивающие напряжения, под действием которых растут трещины, и разрушается камень. Объем камня, с повышенной концентрацией энергии, вещество или устройство, способные создавать в камне растягивающие напряжения и проращивать трещины, называется источником трещин [7, 10 и др.]. Источник трещин, являясь преобразователем энергии в работу разрушения, формируется по строго определенным законам и должен содержать достаточное количество энергии для их проращивания и разрушения природного камня.

Вид энергии в источнике трещин может быть любым: механическая, электрическая, магнитная, тепловая, химическая и др., или комбинированная, включающая два или более из перечисленных видов энергии. Несмотря на то, что вид энергии трансформируемой в источник трещин может быть любым, процесс хрупкого разрушения природного камня всегда происходит вследствие роста трещин. Источник трещин

трансформирует любой вид энергии в работу, которая затрачивается на образование и развитие трещин: следовательно, источник трещин является преобразователем энергии в работу разрушения природного камня. Чем больше будет накоплено энергии в источнике трещин, тем большую работу он сможет совершить. Поэтому для получения максимальной эффективности обработки природного камня необходимо стремиться к наиболее полному трансформированию энергии в источник трещин, чтобы он совершал максимальную работу разрушения. Определив количество работы, совершаемой источником трещин, можно вычислить величину вновь образованной поверхности, возникающей вследствие роста трещин, или объём камня, отделяемый от заготовки. Источник трещин для различных видов энергии формируется по определенным законам, присущим данному виду энергии. Для трансформирования энергии в источник трещин применимы различные инструменты, приспособления и исполнительные органы, как каналы для передачи энергии источнику трещин: механические, электрические, магнитные, тепловые и др., (рис. 1).

При механических способах обработки в зоне контакта исполнительного органа с обрабатываемым изделием создаётся объём камня, в котором концентрируют энергию, т.е. формируется источник трещин, который в данном случае называется ядром уплотнения [7, 10 и др.]. При достижении в ядре уплотнения количества энергии, достаточной для прорастивания трещин, происходит процесс хрупкого разрушения и отделение некоторого объёма камня от заготовки.

Для обеспечения максимальной производительности обработки природного камня при минимальной энергоёмкости необходимо так трансформировать энергию в источник трещин, чтобы она использовалась полностью, а работа, совершаемая источником трещин, была наибольшей.

Эффективность работы, совершаемой источником трещин, зависит от физико-технических свойств природного камня и способа трансформирования энергии. При механических способах обработки на процесс разрушения наиболее существенное влияние оказывают упругие и прочностные свойства природного камня (модуль Юнга, E ; коэффициент Пуассона, μ ; коэффициент пластичности, $k_{пл}$ и прочность камня, σ).

Влияние времени нагружения на прочность упруго-пластичного твердого тела описывает кинетическая теория прочности академика С.Н.Журкова [4].

$$\sigma_p = \frac{[\varepsilon]E}{D} - \frac{aET \ln \tau / \tau_o}{3D} . \quad (2)$$

Ионы твердого тела колеблются около положения равновесия, отклоняясь на некоторое расстояние Δx . Вследствие тепловых флуктуаций в какой-то момент времени ионы расходятся на величину больше Δx . Если в твердом теле действуют растягивающие напряжения σ_p , то они фиксируют

расхождение ионов, и они не возвращаются положение равновесия. Таким образом, возникает точечный дефект, вокруг которого концентрируются напряжения, и формируется источник трещин. Этот дефект под действием растягивающих напряжений σ_p и тепловых флуктуаций - развивается, превращаясь в трещину. При температуре твердого тела T , средняя энергия иона равна kT , где k — постоянная Больцмана. Среднее значение частоты колебаний ионов определяется из уравнения:

$$f = \frac{kT}{h}, \quad (3)$$

где h — постоянная Планка.

Время отклонения ионов от положения равновесия оценивается как отклонение ионов от положения равновесия, которое определяется: $\tau = 1/2f$. Вследствие флуктуации, энергия данного иона увеличивается на dQ , а время его отклонения от положения равновесия на $d\tau$. Время отклонения определяется из выражения:

$$\partial\tau = \tau\beta\partial Q. \quad (4)$$

Решая уравнение (4) методом разделения переменных:

$$\frac{\partial\tau}{\tau} = \beta\partial Q, \quad (5)$$

с последующим интегрированием получим:

$$\ln \tau = \beta Q + C, \quad (6)$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая из начального условия: $Q=0$, при $\tau=\tau_0$, следовательно, $\ln\tau_0 = C$, поэтому вместо (6) получим:

$$\ln \tau = \beta Q + \ln \tau_0. \quad (7)$$

Из рассмотренной выше кинетики процесса следует, что $Q = U - \gamma_1\sigma_p$; $\beta = 1/kT$, поэтому из (7) определим время, в течение которого твердое тело выдерживает нагрузку до разрушения

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U - \gamma_1\sigma_p}{kT}, \quad (8)$$

где U — энергия сублимации данного твердого тела; γ_1 — коэффициент, учитывающий распределение энергии в данном теле; $\tau_0 = 1/f$ - период колебаний ионов, определяется из (3) и равный $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с;

$\exp\left(\frac{U - \gamma_1\sigma_p}{kT}\right)$ учитывает распределение энергии между ионами в твердом

теле и определяет число ионов, имеющих энергию выше средней kT , то есть число ионов находящихся в состоянии флуктуации. Величину U можно выразить так:

$$U = \frac{3[\varepsilon]k}{\alpha}, \quad (9)$$

где $[\varepsilon]$ — критическая относительная деформация, при достижении которой твердое вещество разрушается; α — коэффициент теплового расширения; $\gamma_1 = 3kD/Ea$, где D — коэффициент концентрации напряжений,

E - модуль Юнга. Подставляя значения U и γ_l в (8) и решая это уравнение относительно σ - предела прочности твердого тела при растяжении, получим:

$$\sigma_p = \frac{[\varepsilon]E}{D} - \frac{aET \ln \tau/\tau_0}{3D}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при $\tau \rightarrow \tau_0$, то есть при малом времени нагружения, что характерно для динамических процессов, $\sigma_p \rightarrow [\varepsilon]E/D$ — при малом времени нагружения прочность твердого тела стремится к максимальной, идеальной прочности твердого тела $[\varepsilon]E$, деленной на коэффициент концентрации напряжений D . Если $\tau \rightarrow \infty$, то $\sigma_p \rightarrow 0$ а это значит, что при увеличении времени нагружения τ прочность твердого тела уменьшается. Подставив в (10) $\sigma_p = 0$, получим значение времени, при котором твердое тело разрушается при бесконечно малом растягивающем напряжении:

$$\tau_{\max} = \tau_0 \exp \frac{3[\varepsilon]}{aT}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что при одном и том же времени воздействия, увеличение температуры природного камня в зоне воздействия, снижает его прочность. Для природного камня эта закономерность в целом подтверждается, но в деталях встречаются отклонения, связанные со структурными изменениями в нём, в том числе и испарением воды, содержащейся в порах и трещинах.

Кинетическая теория С.Н. Журкова даёт ответ на важный практический вопрос. Природный камень лучше разрушать статической нагрузкой — только при этом условии прочность твердого тела будет меньшей и, следовательно, энергоёмкость процесса минимальной. Однако процесс разрушения статической нагрузкой требует больших затрат времени, что приводит к снижению производительности обработки, и применению более массивного оборудования. Поэтому при разработке технологических процессов художественной обработки природного камня целесообразно комплексно учитывать совокупность физико-технических свойств обрабатываемого материала, требований к изделию, вида энергии и режимов энергетического воздействия.

В работе [10], Протасов Ю.И, предложил обобщить формулу (10) на любые виды энергии, добавив параметр $\gamma_Q Q$:

$$\sigma_p = \frac{[\varepsilon]E}{D} - \frac{(aT + \gamma_Q Q)E \ln \tau/\tau_0}{3D}, \quad (12)$$

где γ_Q - коэффициент энергетического расширения твердого тела, 1/Дж;
 Q – энергия, трансформируемая в обрабатываемый материал, Дж.

В общем случае любое энергетическое воздействие вызывает в твердом теле появление растягивающих напряжений (σ_p), генерирует и

фиксирует дефекты, что в конечном итоге может привести к зарождению трещин и разрушению.

Рассмотрим общие характеристики основных видов энергии, применяемых при художественной обработке природного камня.

Механическая энергия. Передача механической энергии при обработке природного камня осуществляется через промежуточный исполнительный орган – инструмент, исполненный в различном состоянии (твердом, жидком или газообразном). Ввод механической энергии всегда осуществляется с поверхности камня с помощью инструмента, который в процессе передачи энергии деформируется, что приводит к потере энергии. Механическая энергия передаётся в обрабатываемый материал в виде энергии упругой деформации природного камня в процессе деформации его:

$$Q = F\Delta h, \quad (13)$$

где F – сила, приложенная к природному камню инструментом, Н;
 Δh – деформация ядра уплотнения природного камня, т.е. глубина внедрения инструмента в камень перед его разрушением, м.

На поверхности природного камня площадь сечения с одинаковой величиной напряжений равна площади контакта инструмента с камнем, а с увеличением расстояния от поверхности камня площадь этого сечения возрастает, а величина напряжений при этом убывает [1]:

$$\sigma_x = \frac{kFx^3}{l^5}, \quad (14)$$

где k - численный эмпирический коэффициент;

x - расстояние от точки приложения силы F до данной точки по линии действия этой силы, м;

l - расстояние до данной точки от линия действия силы, м.

Величина силы F в природном камне убывает пропорционально x^2 . Если выделить в камне поверхность с одинаковой величиной напряжений σ_x , то она будет иметь форму конуса с вершиной в точке приложения силы F , а при воздействии инструментом в нем образуется усеченный конус или усеченная пирамида с вершиной, опирающейся на поверхность контакта. При этом площадь сечения возрастает с увеличением расстояния от поверхности камня, а энергия упругой деформации, вызываемая силой F , затухает в этом усеченном конусе или усеченной пирамиде. Напряжения, возникающие под действием силы F , принимают максимальные значения вблизи линии её действия, но убывают с увеличением расстояния от линии её действия. Если выделить поверхность, на которой действуют напряжения равные объёмной прочности камня σ_0 , то получится поверхность в форме конуса или пирамиды, обращённых вершиной от поверхности вглубь камня, и основанием, совпадающим с поверхностью контакта с инструментом. В этом конусе или пирамиде природный камень находится при всестороннем сжатии: по основанию действует сила F , а по

боковым поверхностям – реакция камня P . В процессах механического разрушения объём природного камня, расположенный в конусе или пирамиде при всестороннем сжатии, назван «ядром уплотнения» [7, 10 и др.]. При этом камень в «ядре уплотнения», находящийся под действием вышеупомянутых сил, в конечном итоге переизмельчается, что приводит к повышению энергоёмкости процесса разрушения. Количество работы по разрушению камня, совершаемой «ядром уплотнения», напрямую зависит от его объёма и концентрации энергии, трансформируемой в этот объём, а также от мощности энергетического воздействия. При воздействии твердым инструментом трудно обеспечить плотный контакт с камнем на большой поверхности, поэтому величина объёма «ядра уплотнения» может возрасти за счёт расстояния, на котором затухает действие силы F . При передаче энергии природному камню посредством струи жидкости или газа, имеется возможность увеличения объёма «ядра уплотнения» за счёт повышения площади, по которой сила F действует на камень.

Тепловая энергия. Передача тепловой энергии природному камню можно осуществлять двумя способами - конвекцией и кондукцией. Формирование источника трещин в камне осуществляется в кондукцией. Для конвективной передачи тепловой энергии применяется жидкий и газообразный теплоноситель, нагретый до высокой температуры ($>1000^{\circ}\text{C}$). Особенностью конвективной передачи энергии является то, что она осуществляется по большой поверхности камня, а размер источника по глубине при этом получается небольшим, что сказывается на времени передачи энергии и, соответственно, на мощности энергетического воздействия. В то же время большая площадь источника трещин даёт возможность использовать масштабный эффект при разрушении камня и снизить энергоёмкость обработки. Количество тепловой энергии, трансформируемой в природный камень при конвективной передаче, определяется разностью температур теплоносителя и поверхности камня, поэтому, при нагревании, ему передаётся от теплоносителя меньше тепла. Следовательно, для осуществления обработки природного камня конвективным теплообменом, необходимо нагревать теплоноситель до максимально возможной температуры и перемещать его по поверхности камня с большой скоростью. Количество тепловой энергии передаваемой камню при конвективном теплообмене определяется выражением:

$$Q = \beta(T - T_k), \quad (15)$$

где β – коэффициент теплопередачи;

T – температура теплоносителя;

T_k – температура камня на поверхности теплообмена.

При этом за счёт кондукции в камень уходит тепла:

$$Q = \lambda S \tau (\partial T / \partial x), \quad (16)$$

где λ – теплопроводность камня;

S – площадь поверхности камня, на которой происходит теплообмен;

τ – время теплопередачи;

$\partial T/\partial x$ – градиент температуры в камне.

Закон сохранения энергии для конвективной передачи:

$$\beta(\partial T/\partial \tau) = \lambda S(\partial T/\partial x). \quad (17)$$

Выразим температуру теплоносителя через энергию:

$$T = Q/c\rho V, \quad (18)$$

или:

$$T = Q/c\rho S_m Z, \quad (19)$$

где c – удельная теплоёмкость теплоносителя;

ρ – плотность теплоносителя;

S_m – площадь сечения потока теплоносителя;

Z – размер площади S_m по поверхности S в направлении перемещения потока теплоносителя.

Введем значение температуры (19) в выражение (17), с учётом скорости перемещения теплоносителя $v_\tau = \partial Z/\partial \tau$, после преобразований определим необходимую скорость перемещения потока теплоносителя по обрабатываемой поверхности камня:

$$v_m = \frac{c\rho\lambda}{\beta Q} \times \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (20)$$

Вследствие того, что слишком большой поток тепловой энергии природный камень не может трансформировать в источник трещин, происходит плавление камня. Расплав камня является жидким теплоносителем и, хотя его температура ограничена температурой кипения расплава, он имеет хороший контакт с природным камнем и передаёт тепло с высоким к.п.д. Размеры источника трещин по площади равны площади поверхности, на которой происходит теплообмен, а по глубине определяются временем теплового воздействия на камень, и может быть оценен по формуле [10]:

$$h = \sqrt{\pi\tau\lambda_k}, \quad (21)$$

где λ_k – температуропроводность природного камня.

Распределение тепла в природном камне определяется из решения уравнения теплопроводности с граничными условиями, соответствующими условиями теплового воздействия на камень при обработке. Температура в природном камне от поверхности нагревания уменьшается экспоненциально. Для хрупкого разрушения природного камня необходима определенная граничная температура, определяемая из условия, при котором единичный объём нагретого до граничной температуры камня разрушает единичный объём камня:

$$\frac{1}{z} \lambda_r^2 T_r^2 E = \frac{\sigma^2 k_{nl}}{E}. \quad (22)$$

Откуда граничная температура равна:

$$T_{\Gamma} = \frac{\sigma \sqrt{zk_{nl}}}{\lambda_{\Gamma} E}. \quad (23)$$

Если температура природного камня в источнике трещин, ниже граничной температуры, то она не имеет значения для его разрушения, а соответствующая ей энергия рассеивается и в результате кондукции расходуется на нагревание всего объёма камня.

Применив значение граничной температуры T_{Γ} из распределения температуры, можно определить глубину распространения источника трещин в камне (24) и, соответственно, толщину разрушаемого слоя.

Электромагнитная энергия. Энергия электромагнитной волны затухает в природном камне экспоненциально по ходу волны и трансформируется, в конечном счёте, не только в тепло, но и оказывает специфическое воздействие – деформацию вещества в электрическом и магнитном поле при поляризации и намагничивании (электромагнитострикция), вследствие которой в камне формируется источник трещин. Для формирования источника трещин могут быть применены различные частоты электромагнитного поля – от частот близких к нулю до светового излучения. На низких частотах электромагнитного поля (до 1МГц) источник трещин формируется за счет кондуктивного распространения тепла в камне и подчиняется закономерностям формирования источника трещин тепловой энергией. При высоких частотах решающую роль играет волновой процесс: по площади размеры источника трещин определяются площадью сечения потока электромагнитной энергии, а по глубине – расстоянием, на котором происходит затухание электромагнитных волн в камне. Затухание электромагнитной волны зависит от электромагнитных свойств природного камня и подчиняется закону [10]:

$$E = E_0 e^{-\alpha_3 x}, \quad (24)$$

где E_0 – напряженность электромагнитного поля электромагнитной волны на поверхности природного камня;

E – напряженность электромагнитного поля электромагнитной волны в камне на расстоянии x от его поверхности;

α_3 – коэффициент затухания.

Расстояние затухания электромагнитной волны в природном камне определяется выражением:

$$x = \frac{l \left[z N \alpha_3 / (S g E_0^2) \right]^{-1}}{z \alpha_3}, \quad (25)$$

где N – мощность энергии, трансформированная в природный камень;

S – площадь сечения потока электромагнитной энергии;

g – электропроводность камня.

Коэффициент затухания равен:

$$\alpha_3 = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu_m}{z \left(\sqrt{1 + \left(\frac{g}{\omega E_0} \right)^2} - 1 \right)}}, \quad (26)$$

где ω – частота электромагнитного поля;
 ε – диэлектрическая проницаемость камня;
 μ_m – магнитная проницаемость камня.

Воздействие на природный камень электромагнитной энергией позволяет поместить источник трещин практически в любом месте обрабатываемого камня и трансформировать в него необходимое количество энергии. В настоящее время разработано несколько способов размещения источника трещин, как поверхностного, так и внутреннего: электромагнитные волны фокусируют на поверхности или на нужной глубине от поверхности в заданном объеме камня; охлаждают поверхностный слой камня, чтобы затухание электромагнитной волны происходило за этим слоем; создают в природном камне стоячую волну. При трансформировании электромагнитной энергии в источник трещин происходит её потеря, вследствие отражения электромагнитной волны от поверхности камня из-за разницы волновых сопротивлений воздуха и камня. В настоящее время разработаны способы согласования волновых сопротивлений, что позволяет исключить потери электромагнитной энергии, связанные с отраженной электромагнитной волной. Потери электромагнитной энергии в природном камне также возникают в том случае, когда электропроводность камня и частота электромагнитной волны малы: при таких условиях волна затухает на большой глубине, а концентрация энергии получается низкой, недостаточной для роста трещин. При частоте инфракрасного излучения и выше, затухание электромагнитной волны происходит в микронном слое природного камня – электромагнитная энергия преобразуется камнем в тепло, и в этом слое повышается температура, что приводит к его расширению, как и при любом способе нагрева, и формированию источника трещин.

При высокой напряженности электромагнитного поля происходит резкое изменение свойств природного камня – из диэлектрика или полупроводника он переходит в проводник, а при большой концентрации энергии переходит в плазму: происходит пробой камня. Пробой камня дает возможность размещать источник трещин в объеме камня, в основном, при малом выходе его на поверхность.

Процесс трансформирования электромагнитной энергии в источник трещин может быть длительной или импульсной. При длительной подаче энергии в источник трещин можно трансформировать неограниченное количество энергии, тогда как при импульсной подаче энергия ограничена той, что запасает генератор импульсов, хотя импульсы можно неоднократно повторять. Применение длительного или импульсного

режима ввода электромагнитной энергии в источник трещин и состояние вещества в нём, зависят от физико-технических свойств природного камня и технологии его обработки.

Химическая энергия. Химическая энергия, используемая при разрушении в процессе художественной обработки, заключена в веществе и может выделяться при его иницировании в виде тепла или прироста объёма, или того и другого вместе, а также в результате химической реакции с природным камнем. Химическая энергия может выделяться, как в длительном режиме, так и в импульсном режиме – виде взрыва. При выделении химической энергии в виде тепла мы переходим к обработке природного камня тепловой энергией, и задача по определению режима обработки сводится к определению параметров теплового воздействия единичного объёма химического вещества. При разрушении природного камня, вследствие расширения химического вещества, мы переходим к его обработке механической энергией, и задача по определению режима обработки сводится к определению количества энергии, выделяемой и трансформируемой этим веществом в источник трещин. При обработке природного камня в результате химической реакции химического вещества с камнем, задача по определению режима обработки сводится к определению скорости химической реакции и количества вещества, необходимого для разрушения единичного объёма камня.

Сравнивая рассмотренные виды энергии, используемые для разрушения природного камня при его обработке, можно выделить достоинства и недостатки каждого вида. В каждом виде энергии есть свои определенные достоинства и недостатки, и, соответственно, способы разрушения природного камня при его обработке, использующие конкретный вид энергии, получают те же достоинства и недостатки. Наиболее существенные недостатки связаны с разнообразием физико-технических и химико-технических свойств природного камня. В отличие от других материалов, природный камень характеризуется широчайшим диапазоном изменения как физико-технических свойств (механических, тепловых, электромагнитных и др.), так и химико-технических свойств. Например: прочностные и упругие свойства изменяются более чем на порядок, тепловые в пределах одного порядка, а электромагнитные могут изменяться в пределах более чем 10 порядков. В принципе разрушение природного камня зависит только от его механических свойств – предела прочности на растяжение, модуля Юнга и пластических свойств. Все другие свойства природного камня нужны для формирования источника трещин и преобразования трансформируемой энергии в работу разрушения. Применение механической энергии при обработке природного камня обуславливает зависимость эффективности способов разрушения только от механических свойств камня и инструмента. Применение тепловой энергии зависит не только от тепловых, но и

механических свойств камня. Использование электромагнитной энергии определяется механическими, тепловыми и электромагнитными свойствами природного камня: электромагнитные свойства обуславливают ввод электромагнитной энергии в камень, тепловые свойства обеспечивают формирование источника трещин и преобразование тепловой энергии в работу разрушения, а механические свойства определяют эффективность процесса её разрушения. Эффективность применения химической энергии, в зависимости от технологии её применения, определяется механическими, тепловыми или химико-техническими свойствами природного камня. Недостатком химической энергии является трудность управления ею в процессах обработки природного камня. Получается, что эффективность обработки природного камня, связанной с его разрушением, определяется различными физико-техническими свойствами камня и соответствующими процессами, каждый из которых характеризуется определенными потерями энергии.

Не смотря на то, что механическая энергия наиболее широко используется в процессах художественной обработки природного камня и связана только с механическими свойствами камня и инструмента, эффективность её применения сильно уменьшается при увеличении прочности камня. При этом сильно возрастает износ инструмента, вследствие чего ухудшаются условия трансформирования энергии в «ядро уплотнения», резко снижаются производительность и качество обработки, а энергоёмкость процесса многократно возрастает. Это обстоятельство вызывает необходимость применения высокопрочного и дорогого алмазного инструмента. По этой причине более целесообразно применение тепловой или электромагнитной энергии, так как исполнительный орган, трансформирующий эту энергию, не зависит от механических свойств камня и позволяет более корректно управлять энергетическим воздействием на обрабатываемый материал. Осуществление процессов художественной обработки комбинированием различных видов энергии дает возможность устранить недостатки комбинируемых видов энергии и сохранить их достоинства, при этом самым главным достоинством становится широкая область применения комбинируемых методов по свойствам природного камня, видам художественных изделий и фактуре обрабатываемых поверхностей.

Список литературы

1. **Безухов Н.И.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М., Высшая школа, 1961. – С. 530.
2. **Вержанский А.П., Дубинин П.И.** Механизм разрушения камня единичным алмазным зерном при круглом шлифовании. – Технология машиностроения, №12, 2009.

3. **Дубинин П.И., Дубинина А.П., Дубинина Л.П.** Пути развития художественной обработки природного камня в России. - Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2006, с. 228 - 234.
4. **Дубинин П.И., Дубинина А.П.** К вопросу классификации обработки природного камня. - М., Горный информационно-аналитический бюллетень, №5, 2006, с.36-48
5. **Журков С.Н.** К вопросу о физической природе прочности. – М.: ФТТ, т. 22, вып. 11, 1980, с. 13-15.
6. **Казарян Ж.А.** Природный камень: добыча, обработка и применение. – М.: ГК Гранит: Петрокомплект, 1997, 252 с.
7. **Крюков Г.М.** Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Ч.1. Основы теорий деформирования и разрушения горных пород при бурении и взрывании. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2002, 134 с.
8. **Морозов В.И., Дубинин П.И., Дубинина А.П.** Тенденции развития художественной обработки природного камня в России. – Труды XI Международного симпозиума «GEOTECHNIKA – GEOTECHNICS 2004», Польша, г.Устронь, 2004, с. 51-58.
9. **Панасюк В.В.** Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наукова думка, 1991, 410 с.
10. **Протасов Ю.И.** Разрушение горных пород. – М.: МГГУ, 2002, 453 с.
11. **Сычев Ю.И., Берлин Ю.Я.** Шлифовально-полировальные и фрезерные работы по камню. – М.: Стройиздат, 1985, 312 с.
12. **Griffith A.A.** The theory of rupture. Proc. First Int. Cong. Appl. Mech. 1924 – p. 55-63.
13. **Irwin G.R.** Analysis of stress and strains near the end crack traversing a plate. J. Appl. Mech. 1957. Vol. 24, № 3 – p. 361-364.