## Особенности моделирования и аналогии процессов разрушения хрупких капиллярно-пористых покрытий в случае облучения их факелом горелки

## Генбач А.А., Белоев Хр. Ив., Онгар Б.,

Аннотация. Показана правомерность в проведении аналогий в поведении хрупких капиллярно-пористых покрытий и пластических материалов в координатах q-t для предельного состояния среды и металла. Дана оценка энергоемкости разрушения и вычислены размеры отореавшихся в момент разрушения частиц, а также глубина проникновения температурной волны в толщу покрытия и металла. Моделирование пористых структур систем охлаждения с помощью хрупких покрытий удешевляет условия проведения эксперимента. Обнаружен ряд особенностей в поведении хрупких тел при подводе теплоты от сверхзвукового высокотемпературного факела горелки ракетного типа.

Разработка и исследование капиллярно-пористых систем охлаждения активно проводятся более пятидесяти лет. Исследования и внедрения начинались в ракетнокосмической технике. В 70-х годах 20 века системы охлаждения начинают использоваться в тепловых энергоустановках, в машиностроении, теплоэнергетике и в других отраслях народного хозяйства.

Для интенсификации процессов теплопередачи разрабатываются системы, в которых используется для транспорта тепло-холодоносителя совместное действие капиллярных и массовых сил [1-9]. Исследуется возможность управления теплообменом и гидродинамикой [4,6], а также управление внутренними (термогидравлическими) характеристиками кипения жидкости внутри пористых структур [5].

Для разработки механизма процесса разрушения теплообменных поверхностей, покрытых пористыми покрытиями [1-3, 9], полезно моделировать капиллярно-пористыми металлические материалы ХОЛЦКИМИ покрытиями. изготовленными из естественных минеральных сред (горных пород) [1]. В механизме разрушения проводится аналогия процессов, протекающих в пластических и хрупких телах, для выяснения вклада вида термомеханических напряжений (сжатия, растяжения, сдвига, среза, смятия, изгиба). Имеются особенности, когда тепловой поток к пористым покрытиям подводится с помощью сверхзвукового высокотемпературного факела горелки ракетного типа [1,3].

Для выяснения механизма процессов разрушения использовалась визуализация предельного состояния поверхности нагрева с помощью голографии и фотоупругости [1]. Теория термоупругости [2,3] также подтверждалась скоростной киносъемкой, с помощью которой определялись размеры частиц, оторвавшихся от разрушаемой поверхности нагрева (охлаждения) [3].

Необходимо проанализировать критерии терморазрушаемости хрупких плохотеплопроводных тел, облучаемых факелом горелки. Условиями термического разрушения являются

$$\frac{P_2}{LG} < \frac{P_1}{I_xE},$$

где P<sub>2</sub> и P<sub>1</sub> - пределы прочности на сдвиг и растяжение; L - радиус пятна растекания струи; G - модуль сдвига; E - модуль упругости; I<sub>x</sub> - единица длины покрытия.

Действительно, величина L представляет собой расстояние от центра облучаемой площадки до места, где происходит разрыв породы под действием деформации сдвига. Если, однако, на этом расстоянии где-то образуется вертикальная трещина (под действием деформации растяжения), то в области трещины напряжение сдвига резко упадет, и шелушение породы станет невозможным. Такая щель, перпендикулярная к облучаемой поверхности, становится началом отсчета величины L во втором условии разрушения. Если первое условие всегда будет выполняться ранее, чем второе, то порода не будет шелушиться под действием горелки.

Для количественной оценки введен критерий термобуримости

$$B = \frac{P_1}{2I_X(1+\mu)} - \frac{P_2}{L}.$$

Здесь учтена связь

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

где µ- коэффициент Пуассона (поперечного сжатия).

Поскольку L не может быть больше расстояния между соседними трещинами, т.е. L<sup>-1</sup>- мера трещиноватости породы.

Предложен критерий термобуримости, определяемый физическими свойствами породы

$$\Pi = \frac{\alpha E}{C^{l}\sigma_{P}\nu},$$

где σ<sub>P</sub>- предел прочности на разрыв; С<sup>I</sup>- объемная теплоемкость породы; νпоказатель пластичности, характеризующий отношение работы разрушения к работе упругой деформации; α-коэффициент линейного расширения.

Скорость продвижения забоя (бурения)

$$\vartheta = \frac{h}{t_P},$$

где h - толщина отделяемой шелушки; t<sub>P</sub> - время ее отделения от забоя.

Величины h и t<sub>P</sub> выражаются через свойства породы и параметры струи

$$\begin{split} h &= \frac{63 \cdot \sigma_{\text{P}} \lambda}{C\beta L \alpha \Delta T_{\text{g}}}\,; \\ t_{\text{P}} &= \frac{670}{ac^2} \bigg( \frac{\sigma_{\text{P}} \lambda}{\beta E \alpha \Delta T_{\text{g}}} \bigg)^2\,, \end{split}$$

где  $\beta$ ,  $\lambda$ , a- коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности и температуропроводности; C- коэффициент, определяющий характер теплоотдачи от газовой струи к породе;  $\Delta T_{\Im} = T_{\Im} - T_{O}$ ;  $T_{\Im}$ - эффективная температура струи;  $T_{O}$ - начальная температура породы

$$\vartheta = 0,0936C\beta\Delta T_{2} \cdot \Pi$$
.

К недостаткам данного критерия относится, прежде всего, неучет зависимости физических свойств горных пород от температуры, минералогического состава, а также возможных фазовых преврещений в породе, когда ряд свойств меняется скачком и порода «перерождается».

Экспериментально получено, что для температурного интервала 200-450 0С величина  $\frac{\alpha E}{C}$  мало зависит от температуры, но для более широкого интервала

температур это условие не выполняется.

Критерием устойчивости хрупкого разрушения горных пород при термобурении является постоянство разности между температурой на поверхности породы в момент ее разрушения и начальной температурой Т<sub>о</sub>. Данная разность является функцией лишь физических свойств буримой горной породы

$$\Delta T = T_{\Pi} - T_{O} = 29.2 \frac{\sigma_{P} \nu}{\alpha E} \,.$$

Процесс бурения будет крайне неустойчив, если температура поверхности разрушаемого слоя выше температурного эффекта (плавление, разложение) горной породы или ее составляющих.

Анализ показывает, что горные породы, имеющие низкую температуру хрупкого разрушения и сравнительно высокие температурные эффекты, разрушаются быстрее. Сюда относится группа кварцитов.

Температура разрушения пород группы гранитоидов близка к температурным эффектам составляющих их элементов. Эффективность хрупкого разрушения горных пород данной группы зависит от содержания в них минералов с низким температурным эффектом (в основном темноцветные). Поэтому гранитоиды очень чувствительны по разрушению к тепловой энергии и характеру ее подвода. Очевидно, в таких породах перспективны тепловые потоки с пониженной температурой и высоким коэффициентом теплоотдачи, что реализуется в предложенном нами циклонном способе разрушения [1].

В породах третьей группы (диабазы, доломиты) температура поверхности близка, а иногда и превышает температурные эффекты ряда составляющих их минералов. Поэтому устойчивого хрупкого разрушения ожидать трудно. Нужно, например, предварительно охлаждать поверхностный слой (уменьшать T<sub>o</sub>), что приведет к повышенной его хрупкости и, следовательно, к более низким значениям температуры поверхности.

В настоящее время неясно, какой из механизмов разрушения ближе к действительности. поэтому совершенствование термического И И термомеханического способа разрушения, расширение диапазона термобуримых основном лишь направлении совершенствования пород ведется в в породразрушающего инструмента, а не путем создания новых способов термомеханического разрушения. Поэтому нами разработан способ циклонного разрушения [1].

Температура забоя растет от начального значения образца до какого-то предела, различного для всех образцов и режимов бурения, а затем остается постоянной в процессе всего времени бурения, причем легкобуримые породы быстрее выходят на свой температурный режим. С увеличением мощности горелки, т.е мощности теплового потока, температура забоя уменьшается.

Исследования показали, что распределение температуры на забое неравномерное, мозаичное, участки с повышенной температурой поверхности хаотически возникают на разрушаемой поверхности, создавая локальные напряжения, приводящие к разрушению. В результате измерений средней температуры забоя получены данные 345-563 0С в зависимости от типа пород, режима работы горелки, расстояния до забоя и времени воздействия теплового потока на породу.

Приведенная температура забоя

 $T_{\Pi} = T_{\Omega} \exp(ah^2 t) \operatorname{erfc}(h\sqrt{at}),$ 

где h- коэффициент относительной теплоотдачи от образца к среде; t- время действия теплового потока.

Согласно расчетам, в контактном слое породы температура в 570 0С достигается через 0,09 с, причем на глубине 0,2\*10-3 м она снижается до нормальной.

Температура же плавления кварца в 1700 0С устанавливается на поверхности породы через 0,8 с.

Таким образом, как показывает обзор работ, для выяснения механизма процессов разрушения плохотеплопроводных хрупких малопористых капиллярно-

пористых покрытий требуется провести дополнительные исследования на основа теории моделирования и аналогии с металлическими материалами. Для определения предельного состояния среды рассмотрим решение задачи термоупурости [1-3].

На рис.1 показана зависмости тепловых потоков q, вызывающих напряжения сжатью III покрытия из гранта, в зависимости от времени t подачи для различной толщины  $\delta_i$  отрывающихся частиц. Сравнение показано с напряжениями растяжения I, достаточными для разрушения. В качестве аналогии проводится сравнение с медью и нержавеющей сталью толщиной 0,1\*10-3 м (II и III), а также показана кривая, отвечающая оплавлению поверхности II (для мери и нержавеющей стали имеем III и IIII соответственно,  $h = 0,1*10^{-3}$  м).



Рис.1. Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия III покрытия из гранита, в зависимости от времени действия для различной толшины отрывающихся частии:

I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I<sup>1</sup>, I<sup>II</sup> - медь и нержавеющая сталь, h=0.1x10<sup>-3</sup>м); II - оплавление поверхности (II<sup>1</sup>, II<sup>II</sup> - медь и нержавеющая сталь, h=0.1x10<sup>-3</sup>м)

Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с толщинами  $\delta_i > (0,25 \div 0,3) \cdot 10^{-2}$  м для больших q и малых t, экранируются кривой плавления II, а в случае малых q и значительных t-кривой растяжения III.

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения представляет собой эпюры напряжений внутри гранитной пластины. При малых t, порядке (0,1÷0,4) с, возникают только напряжения сжатия. При больших t, в некоторой области  $\Delta$  ( $Z_i - h$ ) (до 0,3\*10<sup>-2</sup> м) напряжение сжатия переходит в напряжение растяжения (рис.2).



Рис.2. Эпюры напряжений по толщине покрытия из пластины при различных тепловых потоках и времени их действия:

 $q_1 = 0,142 \cdot 10^7 \frac{B_T}{M^2}; q_2 = 0,042 \cdot 10^7 \frac{B_T}{M^2}; q_3 = 0,075 \cdot 10^7 \frac{B_T}{M^2}$  – предельные тепловые потоки, вызывающие плавление поверхности, напряжения сжатия и растяжения,  $(117)^{-117}$  – предел прочности на растяжение;  $\sigma_1 \times 10^5, \frac{H}{M^2}; E_1 \times 10^5, \frac{H}{M^2}$ .

На рис. (3-5) с целью уточнения наиболее вероятной толщины отрываемых частиц  $\delta_i$  в зависимости от q и t произведена оценка теплоты, необходимой для разрушения единицы объема покрытия (энергоемкости разрушения). Кривые имеют минимумы для гранита и тешенита. Для тешенита расчеты произведены для отношения  $\frac{\sigma_{\rm пр.сж}}{\sigma_{\rm пр.раст}} = 2$ . Минимальная энергоемкость составляет для покрытия из

тешенита (рис. 5). Энергоемкость разрушения определялась как

$$Q = \frac{q \cdot t}{\delta}$$

Рис. (3-5) также показывают, что разрушение покрытия начинает происходить, начиная при малых значениях q, причем будут отрываться частицы с минимальными значениями  $\delta_i$ . Этому состоянию будут отвечать наименьшие величины энергоемкости разрушения.

Таким образом, особенностью в поведении предельного состояния минеральных сред и металла является возможность в проведении аналогии при выяснении механизма процесса разрушения тел за счет термонапряжений сжатия и растяжения. Оценка энергоемкости разрушения материалов позволяет определять размеры частиц оторвавшегся хрупкого покрытия и глубины проникновения температурной волны в теплообменную поверхность металлического ограждения. Моделирование сложных и дорогостоящих пористых структур хрупкими покрытиями удешевляет и упрощает условия проведения эксперимента, причем также обнаруживаются ряд особенностей в процессах теплопередачи при подводе теплоты к капиллярно-пористим покрытиям через нагреваемую (охлаждаемую) поверхность и непосредственно от сверхзвукового высокотемпературного факела горелки ракетного типа.



Рис. 3. Изменение удельной энергии разрушения покрытия из гранита в зависимости от t для различных  $\delta$ .



Рис. 4. Изменение удельной энергии разрушения покрытия из гранита Q в зависимости от q для различных δ.



Рис. 5. Изменение удельной энергии разрушения покрытия из тешенита Q в зависимости от  $\delta$  для различных t при  $\frac{\sigma_{\text{пр.сж}}}{\sigma_{\text{пр.раст}}} = 2$ .

## Литература

- [1]. Polyaev V., Genbatch A.N., Genbatch A.A. An experimental study of thermal in porous materials by methods of holography and photoclasticity// Experimental thermal and fluid science, avenue of the Americas, New York, volum5, number 6, November. – 1992. – P. 697-702.
- [2]. Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстане, №2(65). 2011. С. 91-93.
- [3]. Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т.29, №5. – С.923-934.
- [4]. Polyaev V., Genbatch A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System // Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – 1991. – Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June. – P. 639-644.
- [5]. Поляев В.М., Генбач А.А. Управление внутренними характеристиками кипения в пористой системе// Криогенная техника и кондиционирование: Сб. трудов МГТУ. – 1991. – С. 224-237.

- [6]. Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменом в пористых структурах // Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт. – 1992. Т.38, №6. – С. 105-110.
- [7]. Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил // Теплоэнергетика, №7. – 1993. – С. 55-58.
- [8]. Поляев В.М., Генбач А.А. Интенсивность теплообмена пористой системы в гравитационном поле // Известия вузов. Энергетика. 1993. №1-2. С.91-95.
- [9]. Поляев В.М., Генбач А.А. Предельные тепловые нагрузки в пористых структурах // Известия вузов. Авиационная техника. 1991. №1. С.33-37.

## About the authors:

Генбач А. А., доктор технических наук, профессор, АУЭС

Христо Иванов Белоев, доктор технических наук, профессор, Русенский университет имени Ангела Кынчева

Онгар Б., докторант, АУЭС

This paper has been reviewed.