

ЭНЕРГЕТИКА

МРНТИ 44.31.31.

А.А. Генбач¹, Д.Ю. Бондарцев¹, И.К. Илиев²

¹Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан

² Университет Русэ, кафедра теплотехники, гидравлики и экологии,
г. Русэ, Болгария

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Аннотация. Исследовано моделирование плохотеплопроводных малопористых капиллярно-пористых покрытий и металлических (медь, нержавеющая сталь) поверхностей (подложка). Описана динамика паровых пузырей и их термогидравлические характеристики, наблюдаемые оптическими методами исследования. «Рождение» и «гибель» паровых пузырей протекали взрывообразно в центрах генерации, которые рассматривались как источники возникновения усталостных трещин. Решение задачи термоупругости позволило выявить влияние удельного теплового потока и термических напряжений сжатия и растяжения в зависимости от времени подачи и размеров отрывающихся частиц в момент предельного состояния системы: «пористое покрытие – подложка». Теория подтверждена экспериментом, полученным в результате наблюдения камерой СКС-1М. При малом времени $\sim 10^{-2}$ с подачи тепла возникают только напряжения сжатия, а затем они переходят в напряжения растяжения по глубине покрытия. Удельная энергия разрушения имеет выраженный минимум и с ростом размера частиц смещается в сторону снижения теплового потока.

Ключевые слова: капиллярно-пористые покрытия, термоупругость, напряжения сжатия, напряжения растяжения, модель, теплоэнергоустановки.

Түйіндеме. Жылуды нашар еткізетін, тесіктері аз капиллярлы кеуекті жабындарды және металл (мыс, тот баспайтын болат) беттерін (субстратты) модельдеу зерттелді. Оптикалық зерттеу әдістерімен бақыланған будың көпіршіктері мен олардың термо-гидравликалық сипаттамаларының динамикасы сипатталған. Будың «туылу» және «өлім» көпіршіктері генерациялау орталықтарында жарылғыш болды, олар шаршаған жарық көзі ретінде қарастырылды. Термосерпімділік мәселесін шешу жүйенің шектік күйінде үзіліп жатқан бөлшектердің берілу уақыты мен көлеміне байланысты қысу мен созылудың салыстырмалы жылу ағыны мен жылу кернеуінің өсерін анықтауға мүмкіндік берді: «кеуекті жабынды – тесем». Теория SKS-1M камерасының бақылануы нәтижесінде алынған экспериментпен расталады. $\sim 10^{-2}$ шамасында аз уақыт ішінде жылумен жабдықтаудан тек компрессиялық кернеулер пайда болады, содан кейін олар қаптаманың тереңдігі бойында

өозылу кернеулеріне айналады. Қоқыстың нақты энергиясы анықталған минимумға ие және белшектердің мөлшерінің есуі теменгі жылу ағынына ауысады.

Түйінді сөздер: капиллярлы-кеуекті қаптамалар, термосерпімділік, қысу кернеулері, созылу кернеуі, модель, жылу электр станциясы.

• • •

Abstract. Modeling of low-porous capillary-porous coatings with poor thermal conductivity and metal (copper, stainless steel) surfaces (substrate) is studied. Dynamics of steam bubbles and their thermohydraulic characteristics observed by optical methods of research are described. "Birth" and "death" of steam bubbles proceeded explosively in the centers of generation, which were considered as sources of fatigue cracks. The solution of the problem of thermoelasticity allowed to reveal the influence of specific heat flux and thermal stress of compression and stretching depending on the time of supply and the size of detachable particles at the moment of the limiting state of the system: "porous coating - substrate". The theory is confirmed by the experimentation received through observation by with the SCS-1M camera. At a short time ~10⁻² with heat supply only compression stresses appear, and then they pass into tensile stresses at the depth of coating. The specific energy of fracture has a pronounced minimum and with the growth of the particle size shifts in the direction of decreasing heat flow.

Keywords: capillary porous coatings, thermoelasticity, compression voltages, tensile stresses, model, heat and power plants.

Введение. Актуальной задачей в силовых энергетических установках (турбомашинах, летательных аппаратах, газотурбинных двигателях) является создание системы охлаждения высокотемпературных деталей и узлов. Представляет интерес провести исследования пористой системы охлаждения горелок ракетного типа [1-4]. При термическом воздействии на минеральное плохотеплопроводное пористое покрытие горелкой через некоторое время часть поверхности нагревается до определенной температуры, в других же частях покрытия сохраняется начальная температура. Поэтому внутри пористого покрытия возникает градиент температуры, вследствие чего оно расширяется неравномерно. Окружающие ненагретые слои оказывают сопротивление этому расширению. В результате возникают термические напряжения как в нагретой части, так и в окружающем ненагретом массиве, в том числе подложке. Эти напряжения могут достигать разрушающих значений.

Известны [2] решения задачи о термоупругих напряжениях для идеализированных процессов. Доминирующую роль в процессе разрушения играли нормальные сжимающие напряжения. Разрушение пористого покрытия происходило в результате потери устойчивости в тонком слое, прилежащем к свободной поверхности. Поэтому рассматривалось напряженное состояние верхнего слоя, толщина кото-

рого зависит от коэффициента теплоотдачи, структуры покрытия и подложки (металлической парогенерирующей поверхности). В облучаемом покрытии бурно возрастает плотность вакансий, которые быстро объединяются в полости, т.к. интенсивность процесса объединения вакансий пропорциональна квадрату их плотности. Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то облучаемое покрытие приобретает пластические свойства и не разрушается под действием горелки. Таковы все металлы. Этим свойством обладают также и некоторые минеральные породы (туф, мрамор, известняк).

Если в покрытии дислокации не образуются, то растущие полости вакансий концентрируются на своих краях напряжения и ведут к разрушению в то время, когда термические напряжения в покрытии еще не достигают предела пластической текучести. Происходит хрупкое термическое разрушение. Обзор литературы по охлаждению теплообменных поверхностей элементов энергоустановок вплоть до критических тепловых потоков ($\sim 10^6$ Вт/м²) показал, что имеют место кажущиеся противоречия в построении механизма процесса теплообмена в пористых структурах, когда обсуждается, какая среда находилась у стенки: жидкость, пар или пароводяная смесь [5-15]. В наших работах показано, что все модели не противоречат друг другу, а описают различные режимы кипения [1-4, 16].

Экспериментальное исследование предельного состояния теплообменной поверхности.

Для исследования предельного состояния капиллярно-пористых покрытий, выполненных из естественных минеральных сред (гранитные, кварцевые и тешенитные покрытия) использовалась терморезистивная горелка (рисунок 1). Тепловое воздействие осуществлялось сверхзвуковым (до 2000 м/с) высокотемпературным (до 2500°C) пульсирующим факелом. Результаты разрушения камер сгорания и сверхзвуковых сопел ракетных горелок показаны на рисунке 2.



Рисунок 1 - Общий вид экспериментальной установки, выполненной в виде огнеструйной горелки ракетного типа. Камера сгорания и сверхзвуковое сопло охлаждаются капиллярно-пористой системой.

Результаты предельного термического состояния капиллярно-пористых покрытий камер сгорания и сверхзвуковых сопел ракетных горелок:

а) сопла выполнены без утолщения стенки: 1, 2, 3, 4 – до эксплуатации; 5, 6 – после 40 ч. эксплуатации (разрушены дефлекторные кольца и увеличены сечения сопел); 1, 2, 5, 6 – $\alpha = 0,8$; 3, 4 – $\alpha = 0,6$; 4 – камера сгорания с укороченным соплом (обеспечивала проведение детонационного режима горения);

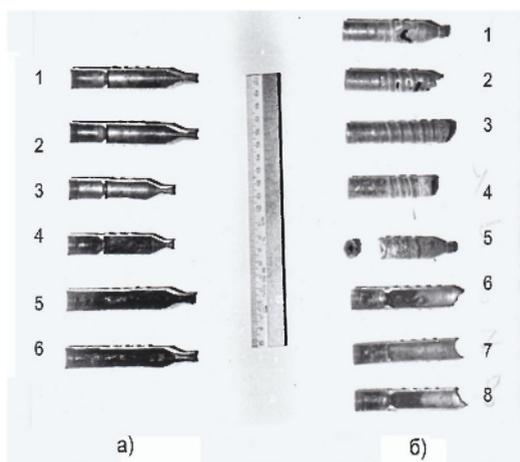


Рисунок 2 – Разрушенные камеры сгорания и сверхзвуковые сопла горелки:

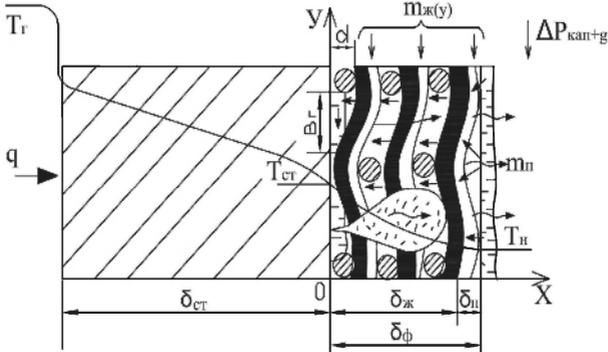
б) сопла выполнены с утолщением стенки: 1-8 – $\alpha = 0,6...0,65$; разрушение произошло в результате прорыва газов в водяную систему охлаждения при разгерметизации уплотнений; 5 – камера сгорания с оплавленным завихрителем. Система охлаждения – капиллярно-пористая ($q_{кр.сеч.} = 1 \times 10^6$ Вт/м²).

Модель капиллярно-пористой структуры системы охлаждения. На основе экспериментальных и теоретических исследований строятся динамические модели интенсификации теплоотдачи при кипении на пористой поверхности. Развитые поверхности содержат связанные между собой внутренние полости в виде прямоугольных каналов и маленькие поры, соединяющие каналы с объемом жидкости [9-11].

Отношение потока скрытого тепла $\left(\frac{q_{скр}}{q_{полн}} \right)$ к полному тепловому потоку для развитой поверхности в (2...5) раз могло быть больше, чем для обычной поверхности при удельном тепловом пото-

ке до 1×10^4 Вт/м². При больших тепловых потоках данное отношение снижалось. Отклонение некоторых данных от расчетных достигало 300%. В формуле приняты обозначения: $D_{\text{ср}}$ – средний отрывной диаметр паровых пузырей в пористой структуре; γ – удельная теплота парообразования; ρ_p – плотность пара; \bar{n} – средняя плотность центров ядрообразования; \bar{f} – средняя частота генерации и молчания паровых пузырей. Разработаем физическую модель передачи удельного теплового потока q через парогенерирующую поверхность (стенку или подложку), которая покрывается капиллярно-пористой структурой (рисунок 3). Процессы тепломассопереноса в пористом покрытии

протекают с избытком жидкости $\bar{n} \bar{v} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}}$ за счет действия потенциала давления, создаваемого капиллярными и массовыми силами $\Delta P_{\text{кап+г}}$.



прямые линии – движение жидкости; волнистые линии – движение пара:
 q – удельный тепловой поток, Вт/м²; T_r , $T_{\text{ст}}$, T_n – температуры газов, стенки (подложки) и насыщения, °С; $\delta_{\text{ст}}$, $\delta_{\text{ж}}$, δ_n , $\delta_{\text{ф}}$ – толщины стенки, жидкости, пара, фитиля, м; $m_{\text{ж}(y)}$, $m_{\text{п}}$ – расход жидкости и пара, кг/с; $\Delta P_{\text{кап+г}}$ – действующий движущий капиллярный и массовый напор, Н/м²; d – размер зерна, м; v_r – ширина ячейки пористого материала, м.

Рисунок 3 - Физическая модель процесса тепломассопереноса в реальной пористой структуре покрытий, работающих с избытком жидкости:

Изученные термогидравлические (внутренние) характеристики кипения позволяют раскрыть механизм, описать физическую картину процесса тепломассопереноса в исследованных сетчатых пористых структурах, работающих в поле гравитационных сил, и получить расчетные уравнения по определению отводимого теплового потока.

В исследуемой системе охлаждения при малых тепловых потоках передача теплоты осуществляется за счет кондуктивного теплообмена и ее величина тем выше, чем больше эффективная теплопроводность структуры, смоченной жидкостью, и теплопроводность корпуса. Течение жидкости носит плавный характер, а на поверхности жидкости не наблюдаются паровые пузыри и связанные с ними возмущающие процессы. Жидкость интенсивно испаряется из менисков при малых избытках теплоносителя и с ростом избытка жидкости начинается испарение с поверхности стекающих пленок.

При некотором тепловом потоке, тем меньшем, чем ниже параметр $\bar{m} = \frac{m_{\text{теп}}}{m_{\text{шт}}}$, начинается нарушение плавного волнистого течения пленки жидкости, появляются отдельные паровые пузыри. Постоянно действующими центрами генерации являются несколько активно действующих ячеек структуры. Начало закипания жидкости ($\Delta T_{\text{нз}}$) зависит от многих режимных и конструктивных параметров и определяется уравнением для этого перепада $\Delta T_{\text{нз}}$, которому соответствует тепловой поток $q_{\text{нз}}$. Снижение расхода охлаждающей жидкости $m_{\text{охлажд}}$ либо увеличение притока теплоты q , приводят к бурному росту центров парообразования \bar{n} .

Интенсивность работы каждого центра в начальном режиме кипения неодинакова, некоторые зоны поверхности нагрева едва затронуты пробуждающимися только начинающими работать центрами. В случае увеличения расхода циркулирующего теплоносителя $m_{\text{цир}}$ время «жизни» отдельных паровых пузырей возрастает, а ряд активных пор прекращает свою работу, имеют место длительные паузы между зарождением пузырей, вплоть до исключения данного центра из активно генерирующего. Увеличение избытка жидкости \bar{m} приводит другие активно работающие центры генерации к вялым и нежизнеспособным. Зона переходного участка к развитому пузырьковому кипению невелика вследствие высокой скорости нарастания активно действующих центров парогенерации \bar{n} . Дальнейший рост тепловой нагрузки q приводит к устойчивой работе большого количества активных центров образования пузырей, равномерному их распределению по всей парогенерирующей поверхности. Однако при некоторых критических условиях наступает кризис кипения и пережог поверхности. Поэтому проведение аналогии в процессах преднамеренного разрушения хрупких материалов и кризиса кипения позволяет их смоделировать и выявить механизм таких процессов.

Для познания механизма процесса разрушения проведены опыты с применением методов фотоупругости и голографии [16]. Оценка напряженного состояния моделей в сходственные моменты времени производилась путем фотографической регистрации картин изохром и подсчета порядка полос n в различных точках исследуемых направлений. Решение задачи термоупругости позволяет определить предельное состояние среды для пористого покрытия и металлической парогенерирующей поверхности.

Модель капиллярно-пористого покрытия для предельного состояния поверхности нагрева. При термическом разрушении плохотеплопроводных малопористых покрытий и металлической стенки (подложки) требуется выяснить влияние величины удельного теплового потока q , подводимого к поверхности, и времени его воздействия t на создание разрушающих напряжений σ , гранулометрический состав шелухи (размер отрывающихся частиц), а для металла – глубину проникновения температурного возмущения δ .

При возрастании величины q за очень короткий промежуток времени t динамические эффекты становятся весьма значительными, напряжения сжатия $\sigma_{сж.}$ достигают больших значений, часто в несколько раз превышающих предел прочности материала на сжатие. Поэтому необходимо учесть эти напряжения в механизме термического разрушения материала. Требуется выяснить, какой вид напряжений σ достигает раньше своих предельных значений.

Рассмотрим пластину толщиной $2h$. К поверхности $z=+h$, начиная с момента времени $t=0$, подводится постоянный удельный тепловой поток q . Нижняя поверхность $z=-h$ и боковые края пластины - теплоизолированы.

Уравнения теплопроводности с граничными и начальными условиями запишется в виде:

$$\alpha_{cm} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad T = 0; \quad t < 0; \quad (1)$$

$$\lambda_{cm} \frac{\partial T}{\partial z} = q, \quad z = +h;$$

$$\lambda_{cm} \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad z = -h,$$

где α_{cm} , λ_{cm} – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности стенки (подложки).

Распределение температуры по толщине зависит от теплофизических свойств материала, величины теплового потока и времени его подачи [4]:

$$T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) = q \left\{ \frac{M}{2(c\rho\lambda)_{ст}} \tau + \frac{zz^2 + \frac{z^2}{h}}{12M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\rho\lambda)_{ст}} \tau\right] \cos\left[\frac{n\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + 1\right)\right] \right\}, \quad (2)$$

где $M = \frac{\lambda \tau}{h}$; n – целые положительные числа; c – теплоемкость ρ – плотность стенки.

Зная распределение температуры в пластине, можно вычислить термические напряжения растяжения и сжатия, возникающие в некоторый момент времени t на различной глубине от поверхности $\delta_1 (h=z)$ при данном значении теплового потока q , поскольку пластина с переменной по толщине температурой находится в плоско напряженном состоянии.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\alpha E}{(1-\nu)} T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) + \frac{1}{(1-\nu)2h} \int_{-h}^{+h} \alpha E T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) dz, \quad (3)$$

где первый член – составляющая напряжения сжатия, а второй – растяжения: α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости (Юнга); ν – коэффициент поперечного сжатия (Пуассона).

Решение системы уравнений (1). Задаваясь предельными значениями напряжения сжатия $\sigma_{пр.сж.}$ и растяжения $\sigma_{пр.раст.}$ для покрытия и металла, получаем функциональную зависимость теплового потока q , требуемого для разрушения, от времени подачи t и глубины проникновения δ . Кроме того, приравнявая температуры на поверхности пластины к температуре плавления $T_{пл}$ покрытия и металла, находим значения удельных тепловых потоков, необходимых для расплавления поверхностного слоя за различный промежуток времени их действия q_1 , т.е. в каждом конкретном случае имеем функциональные зависимости теплового потока от времени воздействия его на покрытие и металлическую поверхность:

- плавление поверхности:

$$q_1 = \frac{T_{пл}}{\frac{M}{2(c\rho\lambda)_{ст}} \tau + \frac{z}{2M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\rho\lambda)_{ст}} \tau\right] \cos n\pi}; \quad (4)$$

- создание предельных напряжений сжатия:

$$q_2 = \frac{\frac{(1-\nu)\sigma_{\text{пр.сж.}}}{\alpha E}}{\frac{M}{2(c\lambda\rho)_{\text{ст}}^t} + \frac{3z^2 - 6z}{h^2 - 1} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\lambda\rho)_{\text{ст}}^t}\right] \cos\left[\frac{n\pi(z+1)}{h}\right]}}; \quad (5)$$

- создания предельных напряжений растяжения:

$$q_3 = \frac{\frac{(1-\nu)\sigma_{\text{пр.рст.}}}{\alpha E}}{\frac{M}{2(c\lambda\rho)_{\text{ст}}^t}} \quad (6)$$

Для пластин, выполненных из кварцевых, гранитных, тешенитных покрытий, меди и нержавеющей стали функциональные зависимости q_1 , q_2 , q_3 рассчитывались на ПК.

Расчет предельного состояния поверхности теплообмена. Анализ экспериментальных результатов. В случае кварцевой пластины (покрытия) тепловые потоки подсчитаны для широкого интервала времени – $10^{-8} \dots 10^3$ с. Нижний предел этого интервала (10^{-8} с)

– время релаксации. Для интервалов времени $10^{-8} \dots 10^{-3}$ с соотношения для величины q_1 и q_2 теряют физический смысл. Поскольку терморазрушение – макропроцесс, принимаем его протекающим за время $5 \times 10^{-3} \dots 10^3$ с. Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с толщинами $\delta > 0,3 \times 10^{-2}$ м для больших величин q и малых t , экранируются кривой плавления, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения. Кривая плавления поверхности кварцевого покрытия проходит значительно выше, чем у тешенитного покрытия, что объясняет его устойчивое хрупкое разрушение.

Причины разрушения котлотурбинных деталей зависят от предыстории развития трещин в концентраторе напряжения (релаксационная зона) [12-15]. Отсчет необходимо вести от времени взрывообразного возникновения парового зародыша (интервал времени от 10^{-8} с до 10^{-3} с). Энергия спонтанного появления парового пузыря является величиной, близкой к постоянной (инвариантной) по времени его роста. Она затрачивается на поддержание зародыша радиусом $R_{\text{н}}$ и предотвращает его схлопывание (q достигают до 10^6 Вт/м²). В данный промежуток времени устанавливается термодинамическое равновесие для перехода от микропроцесса (микрочастиц и кластеров с размерами $(10^{-7} \div 10^{-8})$ м (наночастицы) отдельных (единичных) индивидуальных пузырей к процессам, описываемым поведением большого количества пузырей, т.е. с помощью интегральных характеристик

$(\bar{q}, \bar{\alpha}, \bar{\Delta T}, \bar{\Delta P}, \bar{w})$, где $\bar{\alpha}, \bar{\Delta T}, \bar{\Delta P}, \bar{w}$ - средние значения коэффициентов теплопередачи, температурного и гидро-газодинамического напоров и скорости потока. Наличие концентраторов напряжений, в которых зарождается активная паровая фаза, значительно снижает отношение $\sigma_{\text{пр.ск.}} / \sigma_{\text{пр.раст.}}$ и эта величина может быть равна $(1 \div 2)$, в том числе для энергосталей. Необходимо также учитывать наличие других концентраторов напряжений, цикличность нагрузок при пуско-остановочных режимах работы оборудования, приводящих к усталостным трещинам (напряжениям) [12-14].

Например, для турбинных сталей предел прочности на растяжение $\sigma_{\text{в}} \approx (400 \div 1000)$ МПа. Предел текучести при рабочей температуре – $(400 \div 550)$ °С понижается до $(200 \div 900)$ МПа при деформации 0,2%. Пределы длительной прочности снижаются до $(70 \div 260)$ МПа при деформации в $(10 \div 20)\%$. Величина временного термонапряжения уменьшается до $(40 \div 120)$ МПа, т.е. на порядок. Основные оценочные напряжения усталости составляют всего до 0,45 от $\sigma_{\text{в}}$.

Следовательно, велика вероятность, что $\sigma_{\text{пр.раст.}} \approx \sigma_{\text{пр.ск.}}$, а $\sigma_{\text{пр.раст.}}$ доходят до 10 МПа и становятся одного порядка для пористых покрытий. Процессы гибели как и зарождения пузырей также носят взрывной характер ($\tau = 10^{-8} \div 10^{-6}$ с), что приводит к возникновению кумулятивных явлений, которые наряду с коррозионными и электрическими процессами разрушают концентраторы напряжения (активный центр генерации) за счет процессов эрозии, доводя его размер до критической трещины. В случае мгновенной конденсации пара в выемке (лунке), его объём мгновенно исчезает и образуется мощный кумулятивный эффект (кавитация). При этом ударные волны распространяются вглубь деталей, развиваются трещины, по которым поступает кислород.

В момент «рождения» пузыря или капли величина α составляет до 1×10^5 Вт/м²К при температуре пара $(500 \div 565)$ °С, величина ΔT доходит до 500 °С, а q , действующие в основании пузыря (зоне «сухого» пятна) – до 5×10^7 Вт/м². Если учесть, что индивидуальный паровой пузырь генерирует q в 10 раз более, чем его интегральное значение [2], то итоговый q составляет 5×10^8 Вт/м² что и представлено на рисунках $q=q(\tau, \delta)$. Чем больше глубина проникновения тепловой волны (или δ отрывающейся частицы от пористого покрытия), тем потребуется больше времени для разрушения деталей по напряжениям (рисунки 4-6).

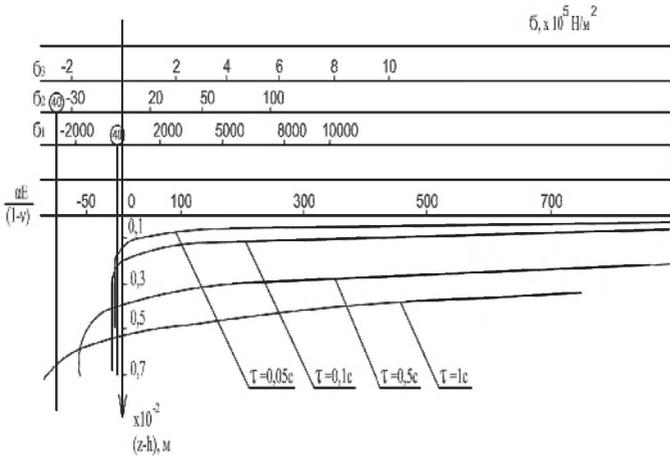


Рисунок 4 - Эпюры напряжений σ_i по толщине кварцевой пластины (покрытия) при различных тепловых потоках q_i и времени их действия t : $q_1 = 8,8 \times 10^7$ Вт/м²; $q_2 = 0,12 \times 10^7$ Вт/м²; $q_3 = 0,008 \times 10^7$ Вт/м²; 40 – предел прочности на растяжение

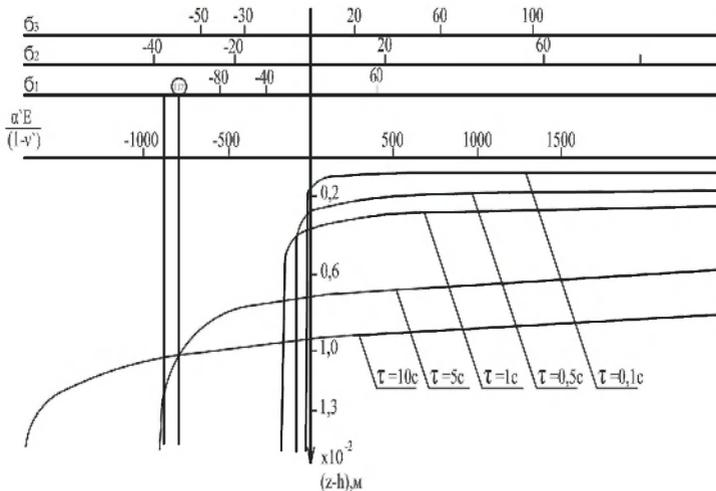


Рисунок 5 - Эпюры напряжений по толщине гранитного покрытия при различных тепловых потоках q_i и времени t их действия: $q_1 = 0,142 \times 10^7$ Вт/м²; $q_2 = 0,042 \times 10^7$ Вт/м²; $q_3 = 0,0075 \times 10^7$ Вт/м²; 117 – предел прочности на растяжение: σ_i , $\times 10^5$, Н/м²; E , $\times 10^5$, Н/м²

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения можно проследить на рисунках 4-6, которые представляют собой эпюры напряжений внутри пластины (покрытия) для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса. При малых величинах t , порядка 10^{-2} с, возникают только напряжения сжатия. Начиная с $t \sim 10^{-1}$ с, в некоторой области $\Delta(h-z)$ напряжение сжатия переходит в напряжение растяжения, причем для различных интервалов времени они находятся на различной глубине от поверхности пластины.

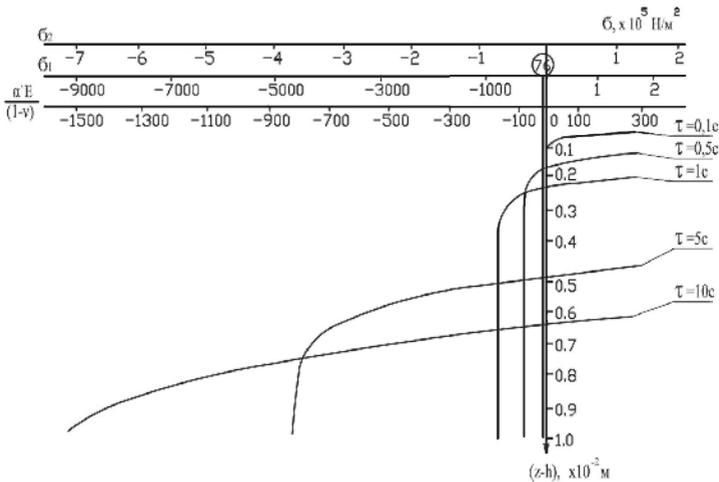
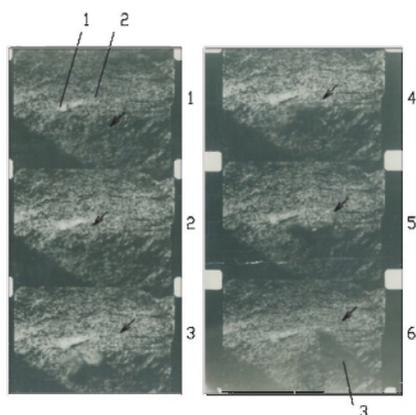


Рисунок 6 - Эпюры напряжений по толщине тешенитовой пластины (покрытия) при различных величинах q_1 и t : $q_1 = 6,6 \times 10^6$ Вт/м²; $q_2 = 1 \times 10^4$ Вт/м²; 76 – предел прочности на растяжение.

Разрушение покрытия и металла под действием сил сжатия наступает во времени значительно раньше, чем силы растяжения. Интервалы теплового потока, в пределах которых происходит такое разрушение, составляют: для покрытий из кварца – $q_{\max} = 7 \times 10^7$ Вт/м², $q_{\min} = 8 \times 10^4$ Вт/м², для гранитного покрытия - $q_{\max} = 1 \times 10^7$ Вт/м², $q_{\min} = 21 \times 10^4$ Вт/м², для металла (подложки) - $q_{\max} = 2 \times 10^6$ Вт/м² (кризис кипения в пористой системе) [9-11], $q_{\min} = 1 \times 10^4$ Вт/м² (без охлаждения). С увеличением величины q в нагреваемом слое, и, следовательно, уменьшением времени нагрева t , растет роль напряжения сжатия. Несмотря на высокую сопротивляемость сжатию, разрушение от сжимающих термонапряжений происходит в более благоприятных условиях мгновенного и в малых объемах.

Для парогенерирующих поверхностей нагрева в результате смены режима кипения устанавливался пленочный режим и резко возрастала температура поверхности до величины $T_{пл}$ [5-8]. При условии разрушения покрытия только сжатием получен ряд кривых, каждая из которых соответствует определенной толщине отрывающейся частицы, которые для тешенита составляют $(0,25...0,3) \times 10^{-2}$ м, что подтверждается экспериментом, полученным в результате скоростной кино съемки камерой СКС-1М (рисунок 7).



Время образования шелушки размером $2,5 \times 10^{-3}$ м составляет 2,2 с. Линия разрушения «равных возможностей»: 1 – капиллярно-пористое покрытие; 2 – частица (шелушка), оторванная от покрытия; 3 – линия разрушения «равных возможностей». Кинограмма полета частиц во времени:
 τ_1 до τ_6 : 1 = 0 с; 2 = 5/1500 с; 3 = 10/1500 с; 4 = 15/1500 с; 5 = 20/1500 с; 6 = 25/1500 с.

Рисунок 7 - Фрагмент скоростной кино съемки процесса разрушения тешенита огнеструйной горелкой ракетного типа при удельном тепловом потоке, равным $1,2 \times 10^6$ Вт/м².

Производился расчет удельной энергии Q разрушения единицы объема кварцевого, гранитного и тешенитного покрытий. В зависимости от толщины δ отрываемых частиц вычислялась энергия Q . Кривые имеют явно выраженные минимумы.

Для кварцевого покрытия минимальная энергоёмкость разрушения равна $Q \approx 0,5 \times 10^9$ Дж/м³ для $\tau = (0,1 \div 1)$ с, $\delta_i = (0,1 \div 0,25) \times 10^{-2}$ м. Для гранитного покрытия: $Q \approx 2,5 \times 10^9$ Дж/м³ для $\tau = (0,1 \div 5)$ с, $\delta_i = (0,1 \div 0,3) \times 10^{-2}$ м. Для $q \approx 0,1 \times 10^7$ Вт/м² и $\delta = (0,2 \div 1,5) \times 10^{-2}$ м, $Q = 2,5 \times 10^9$ Дж/м³.

Для тешенитного покрытия: $Q \cong 0,5 \times 10^9$ Дж/м³ для $\tau = (0,1 \div 5)$ с, $\delta_i = (0,1 \div 0,4) \times 10^{-2}$ м, причем отношение предельных нормальных напряжений сжатия и растяжения изменялось от 20 до 30. Наличие микротрещин в монолите покрытия снижает его прочность на сжатие в окрестности данной трещины так, что предел прочности на сжатие может быть лишь в 2 раза больше предела прочности на растяжение. Кривые $Q=f(q)$ своими минимумами с ростом δ_i смещаются в сторону снижения q , причем для термического разрушения хрупких покрытий требуется и меньшая энергоемкость Q .

Заключение. Опасность появления предельных термических напряжений велика в момент пуска и остановки энергооборудования электростанций. Эти напряжения возникают, прежде всего, в местах концентраторов, которыми являются центры зарождения активной паровой фазы, либо центры образования капель конденсата. Капиллярно – пористая структура может быть естественного происхождения (солевые отложения, налеты), так и искусственно создаваемая с хорошо – и плохотеплопроводными материалами в широких пределах пористости и проницаемости от 3% до 90%. Структуры могут выполнять моделирующую роль, так и служить в качестве высокоинтенсивной и форсированной системы охлаждения. Например, моделирующим материалом служат тешенитовые пористые покрытия, имеющие в 5 раз больший коэффициент линейного расширения, в 10 раз – более низкий коэффициент теплопроводности и примерно одинаковую температуру плавления по сравнению с энергетическими сталями. Они являются наиболее вязкими с пористостью до 30%.

Список литературы

1 Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliya K. Iliev. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations, Journal of machine Engineering, 2018, Vol. 18, №2, pp. 106-117. DOI:10.5604/01.3001.0012.0937

2 Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliya K. Iliev. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue G (pp. 133 - 139) 2018

3 Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Experimental method of investigation of the heat transfer crisis in a capillary-porous cooling system. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, V.2, №4(28), 2018, p. 81-88.

4 Genbach A.A., et al., Analogy in the processes of heat exchange

of capillary-porous coatings in energy installations. E3S Web of Conferences 85, 05003 (2019) EENVIRO 2018.

5 Jamialahmadi M., et al., Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures, Intern. J Heat Mass Transfer. 51 (2008), 9-10, pp. 2482-2493

6 Ose Y., Kunugi T., Numerical Study on Subcooled Pool Boiling, Progr. In Nucl. Sci. and Technology 2, (2011), pp. 125-129

7 Krepper E., et al., CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design, Nucl. Eng. and Design, 237 (2007), 7, pp. 716-731

8 Ovsyanik A.V., Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids (in Russian), Gomel State Technical University named after P.O., Sukhoy, Gomel, Belarus, 2012

9 Alekseik, O.S., Kravets V.Yu., Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 64 (2013), 4/8, pp. 26-31

10 Polyayev V.M., Mayorov V.A., Vasilev L.L. 1998, Hydrodynamics and heat exchange in porous structural elements of aircrafts. Mechanical engineering, 168 p. (in Russian)

11 Kovalev S.A., Solovev S.L, 1989, Evaporation and condensation in heat pipes, Science, 112 p. (in Russian)

12 Kupetz M., Jeni Heiew E., Hiss F., 2014, Modernization and extension of the life of steam turbine power plants in Eastern Europe and Russia, Heat power engineering. 6, 35-43. (in Russian)

13 Grin E.A., 2013, The possibilities of fracture mechanics in relation to the problems of strength, resource and justification for the safe operation of thermal mechanical equipment, Heat power engineering, 1. 25-32. (in Russian)

14 Shklover E.G. Experimental Study of Heat Transfer from Porous Surface in Pool and Forced – Convection Boiling at Low Pressures. Phase Change Heat Transfer ASME. 1991. Vol. 159, 75-80

15. Barthau G. Active nucleation site density and pool boiling heat transfer, Int. J. Heat Mass Transfer. 1992. V. 35, 271-278

16 Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Илиев И.К. Исследование разрушения поверхности нагрева, покрытой пористой структурой в элементах теплоэнергоустановок. Новости науки Казахстана, № 2 (136), 2018, С. 42 – 54

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

Бондарцев Д.Ю., докторант PhD

Илиев И.К., PhD, профессор