

Я. ТЕХВЕР, Х. СУИ

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ

(Представил И. Эник)

Кипение жидкостей как высокоинтенсивный процесс теплопередачи широко применяется в различных областях техники. При этом от него обычно требуются: высокая интенсивность теплоотдачи и стабильность теплообменных характеристик устройства. Первое требование удовлетворяется выбором плотности теплового потока таким образом, чтобы кипение происходило в пузырьковом режиме. Добавочно используются различные способы интенсификации теплоотдачи, наиболее эффективным из которых представляется нанесение на греющую поверхность пористого покрытия. Подобное покрытие позволяет повысить коэффициент теплоотдачи до одного порядка, а также увеличить критические плотности теплового потока.

Однако применение пористых покрытий может усилить гистерезисные явления, наблюдающиеся при кипении [1], нарушив, таким образом, требование стабильности теплообмена. Нами исследовался гистерезис кипения трифтортрихлорэтана (Ф-113) на тонких плазменно-напыленных покрытиях из алюминия, меди и бронзы при атмосферном давлении. Рассматривалось влияние толщины покрытия, пористости его и размера пор на гистерезис при граничных условиях II рода ( $q=f(\tau)$ ).

Применялась опытная установка, описанная в [2], с тем различием, что плотность теплового потока и температура греющей поверхности измерялись с помощью дифференциальных ХК-термопар, исходя из одномерного температурного поля в опытном образце. Добавочно тепловой поток проверялся по балансу водяного конденсатора. Кривые кипения выполнены в координатах  $q=f(\Delta T)$  на графопостроителе Н-306.

Случайные ошибки измерительной системы оценивались средним квадратичным отклонением измеренного в ходе экспериментов значения коэффициента теплопроводности опытного образца. Для алюминиевых образцов эта величина составляла 7,1 Вт/м·К, а для медных образцов — 14,6 Вт/м·К, т. е. соответственно 4,8 и 5,3% от значения коэффициента теплопроводности.

Опытный образец представлял собой алюминиевый или медный стержень диаметром 22 и длиной 40 мм, на торцевую поверхность которого было нанесено пористое покрытие.

Кривые кипения были получены как при повышении, так и при понижении плотности теплового потока в области пузырькового кипения. В переходных режимах на полученных графиках  $q=f(\Delta T)$  наблюдались отклонения кривых кипения от положения для установившегося состояния. Однако эти отклонения при умеренном темпе изменения тепловой нагрузки были небольшими и не превышали 0,2 К при изменении плотности теплового потока со скоростью менее 10 кВт/м<sup>2</sup> в минуту.

После тепловых испытаний из исследованных образцов были изготовлены микрошлифы, по которым была определена средняя толщина покрытия и методом линейного анализа также пористость и средний радиус пор. Всего было исследовано 60 образцов со следующими пределами изменения параметров покрытия: толщин от 0,03 до 0,6 мм, пористости от 5 до 50%, среднего радиуса пор от 1,0 до 11,0 мкм.

Перед началом измерений исследуемая поверхность была дегазирована в результате кипения на ней жидкости при плотности теплового потока  $100 \text{ кВт/м}^2$  в течение 1 ч. Затем был отключен основной нагреватель опытного образца до полного прекращения пузыреобразования, в то же время жидкость в большом объеме поддерживалась при температуре насыщения. Кривая кипения была вычерчена при изменении плотности теплового потока ступенями  $\Delta q = 20\text{--}50 \text{ кВт/м}^2$ .

Результаты экспериментов показали, что вскипание на дегазированной пористой поверхности происходит при перегреве  $10\text{--}15 \text{ К}$  относительно температуры насыщения. Этот перегрев мало зависит от параметров пористого покрытия и приблизительно равняется перегреву вскипания на поверхности без покрытия (рис. 1). Среднее значение перегрева вскипания для 60 образцов составляло  $12,1 \text{ К}$  со средним квадратичным отклонением  $2,7 \text{ К}$ .

Дальнейший ход кривой кипения при повышении плотности теплового потока зависит в основном от размера пор в покрытии. При среднем радиусе пор менее  $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  наблюдается устойчивая гистерезисная петля кривой кипения и после вскипания жидкости. Визуальные наблю-

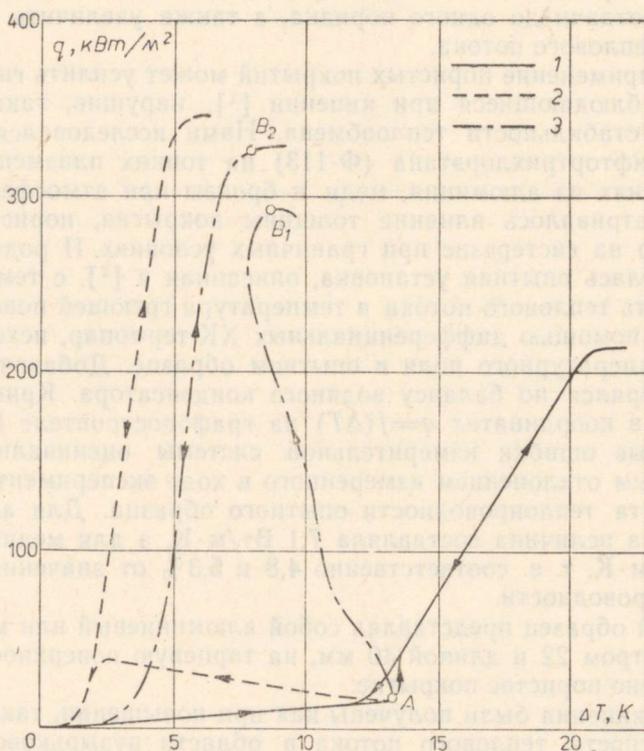


Рис. 1. Кривые кипения  $\Phi$ -113 на алюминиевой поверхности с бронзовым покрытием. 1 — беспористое покрытие, отшлифованное порошком корунда размером фракции 32 мкм, толщина  $L=0,1 \text{ мм}$ , 2 — пористое покрытие: пористость  $\varepsilon=50\%$ ,  $L=0,16 \text{ мм}$ , средний радиус пор  $\bar{a}=6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , 3 —  $\varepsilon=29\%$ ,  $L=0,06 \text{ мм}$ ,  $\bar{a}=2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

дения за кипением при низких плотностях теплового потока показали, что вскипание на поверхности с пористым покрытием при  $\bar{a} > 4$  мкм происходит внезапным включением всей поверхности в режиме парообразования с одновременным понижением перегрева поверхности до левой ветви кривой кипения (рис. 1). В случае более мелких пор включение центров парообразования происходит постепенно в отдельных местах поверхности. При постоянной плотности теплового потока эти центры функционируют достаточно стабильно, и для включения новых активных центров требуется повышение тепловой нагрузки. По-видимому, при малых плотностях теплового потока перегревы под пористым покрытием и на наружной его поверхности отличаются мало, а с уменьшением размера пор возрастает вероятность вскипания на наружной поверхности пористого слоя. С повышением тепловой нагрузки процесс парообразования постепенно проникает в пористое покрытие.

Зависимость существования устойчивой гистерезисной петли от пористости и толщины покрытия выражается менее отчетливо. При этом увеличение вероятности образования гистерезиса при меньших пористостях, по-видимому, обусловлено технологией нанесения покрытия (плазменное напыление), так как с уменьшением пористости покрытия здесь одновременно уменьшаются и размеры пор.

Установлено существование гистерезиса критической плотности теплового потока при кипении на некоторых пористых покрытиях. Самая низкая величина  $q_{кр1}$  (критическая плотность теплового потока) получена при увеличении тепловой нагрузки дегазированной поверхности ( $B_1$  на рис. 1). Критическая плотность теплового потока заметно воз-

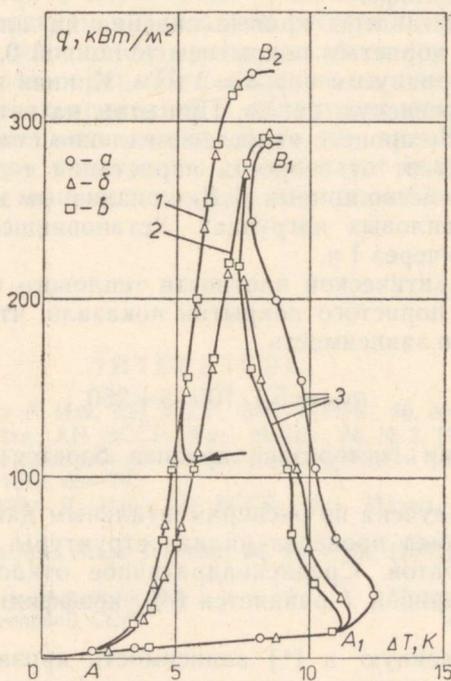


Рис. 2. Гистерезисные явления при кипении  $\Phi$ -113 на алюминиевой поверхности с бронзовым пористым покрытием ( $\epsilon = 29\%$ ,  $L = 0,12$  мм,  $\bar{a} = 3 \cdot 10^{-6}$  м). Положение кривой кипения 1 — после возвращения из пленочного режима кипения, 2 — на дегазированной поверхности при понижении и 3 — при повышении тепловой нагрузки при времени стабилизации: а — 1 мин, б — 5 мин, в — 30 мин.

растает при повторном увеличении тепловой нагрузки после возвращения из кризиса  $B_2$ . Одновременно с ростом  $q_{кр1}$  уменьшается  $\Delta T$ .

По-видимому, в данном случае теплоотдача ограничивается проницаемостью покрытия для пара, а благодаря наличию в покрытии газа (или пара после возвращения из пленочного режима кипения) увеличивается число открытых паровых пор и создаются более благоприятные условия для отвода пара. Увеличение  $q_{кр1}$  с ростом числа открытых паровых пор подтверждает сделанное в [3] предположение о роли расстояния между паровыми струями при кризисе кипения на пористых поверхностях. Абсолютная величина гистерезиса кризиса теплоотдачи не коррелирует с измеренными характеристиками пористого покрытия ( $\epsilon, \bar{a}, L$ ). Необходимым условием существования гистерезиса кризиса кипения служит  $\bar{a} < 4 \cdot 10^{-6}$  м, однако оно не является достаточным. По-видимому, достаточным условием является сохранение гистерезиса теплоотдачи до появления кризиса ее.

Ширина гистерезисной петли зависит как от параметров покрытия, так и от плотности теплового потока и от предыстории процесса кипения. При этом ширина петли  $\Delta T$  при данной плотности теплового потока с характеристиками покрытия  $\epsilon, \bar{a}$  и  $L$  коррелирует слабо. Можно предположить, что основную роль в образовании гистерезисной петли играет изменение радиуса поры по толщине покрытия, т. е. неравномерность его живого сечения [1].

На значительную неравномерность проходного сечения пор по толщине покрытия указывают и результаты измерения размера наибольших пор в отделенном от поверхности образца покрытия, смоченном в Ф-113, методом продувки азотом. Для бронзовых покрытий было получено  $a_{\max} \approx \bar{a}$ , где  $\bar{a}$  — средний радиус пор, определенный линейным анализом на микрошлифе.

На рис. 2 представлены кривые кипения на алюминиевой поверхности с бронзовым пористым покрытием толщиной 0,12 мм, пористостью  $\epsilon = 0,29$  и средним радиусом пор  $\bar{a} = 3$  мкм. Кривая кипения имеет ярко выраженную гистерезисную петлю. При этом на ветви повышения тепловой нагрузки  $A_1B_1$  процесс является медленно стабилизирующимся и положение его зависит от скорости нарастания теплового потока. На рис. 2 нанесено семейство кривых  $A_1B_1$  с различным временем выдержки при неизменных тепловых нагрузках. Установившееся положение достигается примерно через 1 ч.

Исследование критической плотности теплового потока в зависимости от параметров пористого покрытия показало, что его можно выразить через линейную зависимость

$$q_{кр1} = 5,1 \cdot 10^7 \epsilon \cdot \bar{a} + 250, \quad (1)$$

причем при наличии гистерезиса кризиса берется его максимальная величина.

Формула (1) получена по экспериментальным данным для 46 образцов, для которых был проведен анализ структуры покрытия, методом наименьших квадратов. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от кривой 1 равняется 5%, коэффициент корреляции — 0,89 (рис. 3).

Учитывая выявленную в [4] зависимость кризиса теплоотдачи от толщины покрытия, можно заключить, что влияние пористости и размера пор превалирует над влиянием толщины покрытия на кризис. Поэтому зависимость  $q_{кр1} = f(L)$  наблюдается только при  $\epsilon = \text{const}$  и  $\bar{a} = \text{const}$ .

В заключение отметим, что подобные приведенным здесь гистерезисным петлям кривые кипения наблюдались при кипении на гладкой по-

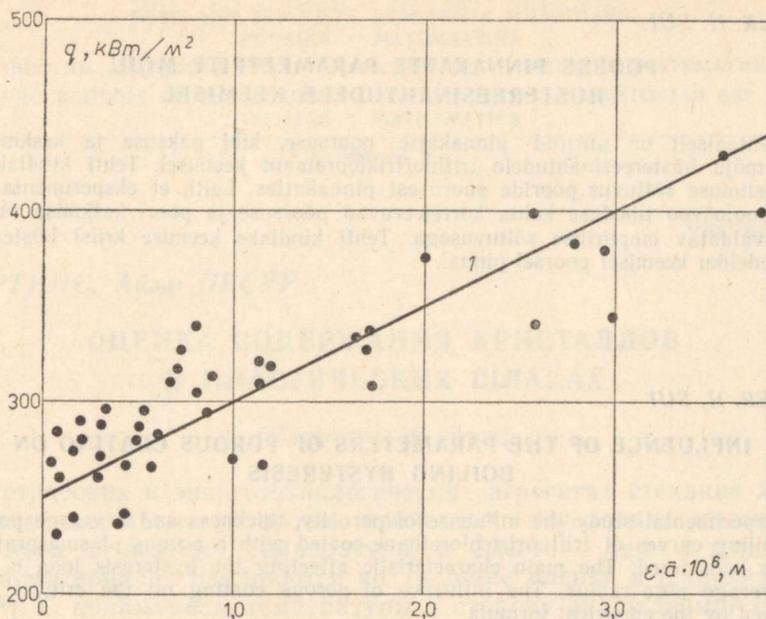


Рис. 3. Зависимость критической плотности теплового потока от параметров пористого покрытия.

верхности без покрытия в переходных режимах кипения [5]. Можно предположить, что механизм образования гистерезисной петли в обоих случаях единый, а именно, наблюдается задержка при включении в работу центров парообразования. При кипении на гладкой поверхности задержка является кратковременной и обнаруживается только при быстром нарастании теплового потока. В то же время неоднородность проходного сечения пор в покрытии способствует сохранению гистерезисных явлений и в установившемся режиме кипения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Техвер Я., Суй Х., Ляне Р. Изв. АН ЭССР. Физ. Матем., 30, № 4, 376—380 (1981).
2. Техвер Я., Туник А. Изв. АН ЭССР. Физ. Матем., 26, № 2, 194—198 (1977).
3. Ковалев С. А. В кн.: Конвективный теплообмен. Методы и результаты исследований. М., «Наука», 1982, 68—79.
4. Ляне Р., Суй Х., Техвер Я. Изв. АН ЭССР. Физ. Матем., 30, № 3, 276—280 (1981).
5. Serisawa, A. Int. J. Heat and Mass Transfer, 26, 921—932 (1983).

Институт термодинамики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
10/V 1984

### POORSE PINNAKATTE PARAMEETRITE MÕJU HÜSTEREESINÄHTUDELE KEEMISEL

Eksperimentaalselt on uuritud pinnakatte poorsuse, kihi paksuse ja keskmise poori raadiuse mõju hüstereesinähtudele trifluortriklooretaani keemisel. Tehti kindlaks püsiva hüstereesilõhmu sõltuvus pooride suurusest pinnakattes. Leiti, et eksperimentaalandmed kriitilise soojusvoo tiheduse kohta korreleeruvad poorsuse ja poori keskmise raadiusega, mis on avaldatav empiirilise sõltuvusega. Tehti kindlaks keemise kriisi hüstereesi olemasolu vedeliku keemisel poorsel pinnal.

### INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF POROUS COATING ON BOILING HYSTERESIS

In this experimental study the influence of porosity, thickness and a verage pore radius on the boiling curves of trifluortrichlorethane coated with a porous plasmasprayed metal surface is considered. The main characteristic affecting the hysteresis loop is found to be an average pore radius. The influence of porous coating on the critical heat flux is presented by the empirical formula

$$q_{\text{KPI}} = 5,1 \cdot 10^7 \varepsilon \cdot \bar{a} + 250.$$

The critical heat flux is also found to have hysteresis in some cases.