



Э. Е. Бейгельзимер /к. т. н./

ООО «ОМД-инжиниринг», г. Днепро, Украина
email: omd.engineering@gmail.com

Влияние окалины на вид кривой кипения при струйном охлаждении

E. Yu. Beygelzimer /Cand. Sci. (Tech.)/

LLC «OMD-engineering», Dnipro, Ukraine
email: omd.engineering@gmail.com

Effect of scale on the shape of the boiling curve during jet-impingement cooling

Цель. Классифицировать типы кривых кипения при струйном охлаждении металлических поверхностей, изначально покрытых окалиной.

Методика. Систематизация возможных сочетаний растрескивания окалины и режимов кипения жидкости при струйном охлаждении металлической поверхности.

Результаты. Приведен пример использования предложенной классификации для выявления опорных точек на реальной кривой кипения охлаждающей воды на металлической поверхности, покрытой окалиной.

Научная новизна. Результаты работы объясняют существенно разный вид экспериментальных кривых кипения при струйном охлаждении металлических поверхностей.

Практическая значимость. С использованием результатов работы создано математическое обеспечение АСУ роликовых закалочных машин, успешно введенных в промышленную эксплуатацию на металлургическом комбинате «Северсталь» (Россия) и заводе «HSW-Huta-Stali» (Польша). (Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: струйное охлаждение, металл, кривая кипения, окалина

В работе [1] изложен общий подход к моделированию процессов струйного охлаждения на основе кривой кипения, построенной по «опорным точкам». При этом сама кривая кипения и ее опорные точки рассмотрены для случая, когда на охлаждаемой металлической поверхности нет окалины или ее толщиной можно пренебречь. Материалы, изложенные в данной статье, позволяют распространить такой подход на случай охлаждения поверхности с окалиной, который реализуется в производственных условиях.

Под кривой кипения мы понимаем график зависимости плотности теплового потока от температуры поверхности [2, с. 7], то есть температуры у металлической основы, а не наружного слоя окалины. Во-первых, это согласуется с контактным методом измерения температуры поверхности в большинстве экспериментов, а во-вторых, при моделировании производственных процессов основное значение имеет именно температура металла, а не окалины.

На рис. 1а схематично изображены две кривые кипения: одна – для чистой поверхности (без окалины), вторая – для поверхности с прочным слоем окалины, который сохраняется до конца охлаждения. Перегибы каждой кривой отвечают критическим состояниям системы «поверх-

ность – двухфазный слой жидкости», в которых происходят изменения режимов кипения при охлаждении: от пленочного через переходное к пузырьковому. Кривая кипения для поверхности с окалиной расположена правее кривой для чистой поверхности. Это связано с двумя факторами:

1) окалина имеет меньшую тепловую активность по сравнению с чистым металлом (характеризуется произведением коэффициента теплопроводности, плотности и удельной теплоемкости [5, с. 367]);

2) по толщине слоя окалины имеется перепад температуры, который определяется соотношением:

$$\Delta t_{\text{oxd}} = q \frac{h_{\text{oxd}}}{\lambda_{\text{oxd}}} \quad (1)$$

где Δt_{oxd} – перепад температуры по толщине оксидного слоя (от англ. *oxide*); q – плотность теплового потока; h_{oxd} – толщина окалины; λ_{oxd} – коэффициент теплопроводности окалины.

Таким образом, при наличии окалины критические состояния наблюдаются при более высокой температуре металлической основы. При этом максимальный сдвиг между двумя рассматриваемыми кривыми кипения (без окалины и с окалиной) имеет место в области первого критического состояния (область В на рис. 1а), поскольку

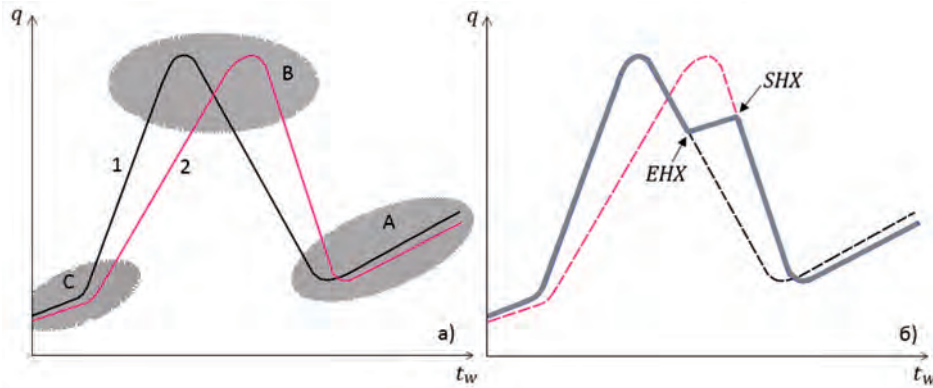


Рис. 1. Схема формирования кривой кипения при струйном охлаждении поверхности с окалиной; q – плотность теплового потока, t_w – температура металлической поверхности; а) модельные кривые кипения: 1 – на чистом металле, 2 – на поверхности с прочной окалиной; А, В, С – области пленочного кипения, развитого пузырькового кипения и однофазной конвекции соответственно; б) – кривая кипения при растрескивании окалины на поверхности; SHX и ENH – опорные точки, связанные с окалиной

ку при максимальном тепловом потоке перепад температуры по толщине окалины наибольший (см. (1)). В областях пленочного кипения (А на рис. 1а) и окончания пузырькового кипения (С на рис. 1а) сдвиг между двумя кривыми кипения небольшой из-за относительно малых тепловых потоков и, соответственно, перепадов температуры по толщине окалины.

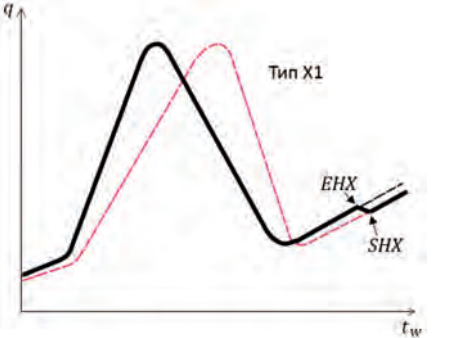
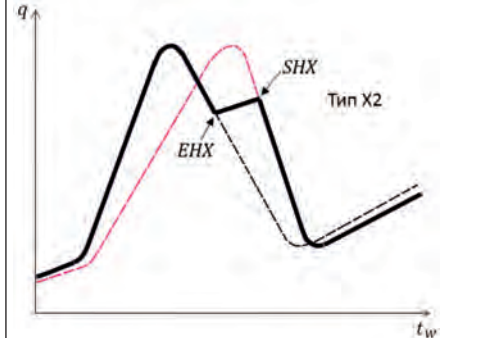
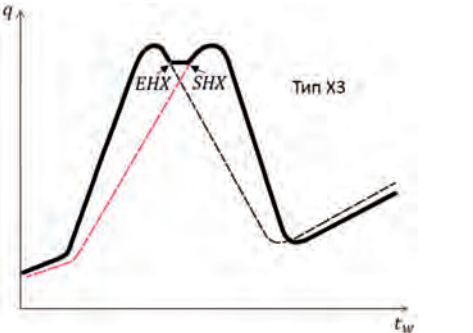
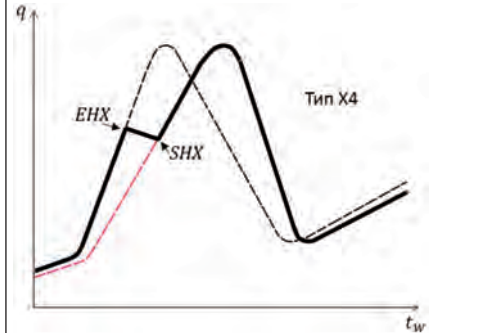
В реальных условиях окалина при струйном охлаждении растрескивается из-за различий в коэффициентах линейного расширения окалины и чистого металла. Например, для стали эти коэффициенты отличаются примерно в два раза [4, с. 67]. В местах нарушения сплошности окалины охлаждающая жидкость получает доступ к металлической основе. Поэтому реальная кривая кипения при охлаждении поверхности с окалиной является некоторой комбинацией двух рассмотренных выше кривых (рис. 1б). На начальной стадии охлаждения, при высокой температуре поверхности, реальная кривая кипения идет по кривой для окалины, а затем сдвигается в кривую, характерную для чистого металла. Конечно, такое представление не отражает в полной мере течение жидкости и теплообмен на поверхности металла, покрытого растрескавшейся окалиной. Однако является вполне достаточным для практического использования при расчетах систем струйного охлаждения и позволяет объяснить особенности и классифицировать кривые кипения на поверхностях, покрытых окалиной.

Учитывая сказанное, к шести «опорным точкам» кривой кипения, описанным в работе [1], при наличии окалины на охлаждаемой поверхности в общем случае следует добавить еще две (рис. 1б): SHX – начало сдвига кривой из-за оксидного слоя (от англ. *Start sHift due to oXide layer*) и ENH – окончание сдвига кривой из-за оксидного слоя (*End sHift due to oXide layer*).

Конкретный вид такой кривой кипения может очень сильно зависеть от начальной температуры охлаждения и момента начала интенсивного растрескивания окалины. В свою очередь, момент начала растрескивания и развитие этого процесса определяются соотношением линейных расширений окалины и основного металла, плотностью теплового потока, направлением струи охладителя и другими факторами. В табл. 1 приведены основные типы участка сдвига кривой кипения с учетом окалины, имеющие практическое значение. Этим участкам присвоены обозначения: X1 – растрескивание окалины происходит в режиме пленочного кипения, X2 – в режиме переходного кипения, X3 – в начале режима пузырькового кипения (в области первого критического состояния), X4 – в середине или в конце режима пузырькового кипения. В целях общности предусмотрено также обозначение X0 для случая, когда сплошной слой окалины без растрескивания сохраняется до конца охлаждения (в таблице не показан).

В качестве примера на рис. 2а показано применение предложенного подхода к реальной кривой кипения, построенной автором путем обработки данных работы [6, с. 109]. На рис. 2б приведен график второй производной плотности теплового потока по температуре поверхности. В соответствии с предложенной классификацией рассматриваемую кривую кипения следует отнести к типу X2F1T1. Действительно, участок пленочного кипения имеет нисходящий отрезок выхода (обозначение F1), участок переходного кипения имеет отрезок выхода (T1), сдвиг кривой кипения из-за растрескивания окалины наблюдается на участке переходного кипения (X2). «Опорные точки» идентифицируются по кривой кипения и графику второй производной: выход из режима пленочного кипения (DFB) – при температуре

Типы участка сдвига кривой кипения из-за растрескивания окалины

Типы участка сдвига кривой кипения из-за окалины		
Точка SHX	Первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный максимум	Первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный минимум
Точка EHX	первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный минимум	первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный максимум
Типы участка сдвига кривой кипения из-за окалины		
Точка SHX	Первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный максимум	Первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный максимум
Точка EHX	Первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный максимум	Первая производная равна 0 и/или вторая производная имеет локальный минимум

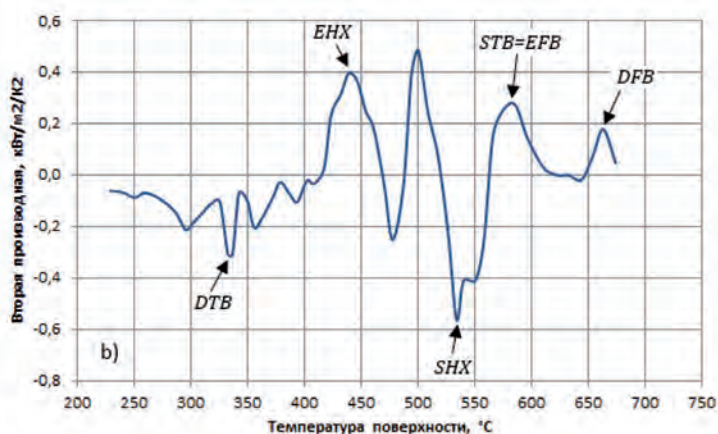


Рис. 2. Пример кривой кипения на поверхности с окалиной (авторская обработка данных [6, с. 109])

665 °C; окончание режима пленочного кипения (EFB, она же STB – начало режима переходного кипения) – 585 °C; начало сдвига из-за оксидного слоя (SHX) – 535 °C; окончание сдвига из-за оксидного слоя (EHX) – 440 °C; выход из режима переходного кипения (DTB) – 330 °C; окончание режима переходного кипения (ETB, она же SNB – начало режима пузырькового кипения) – 305 °C.

Результаты работы объясняют изменение вида экспериментальных кривых кипения при струйном охлаждении металлических поверхностей [6–8].

Выводы

Представленная работа позволяет распространить использование «опорных точек» кривой ки-

пения на случаи, при которых на охлаждаемой поверхности изначально присутствует окалина. В результате предложена общая классификация кривых кипения как инструмент для обработки и анализа широкого класса экспериментальных данных по охлаждению металлических поверхностей струями жидкости.

Библиографический список / References

1. Бейгельзимер Э. Е. Подход к моделированию струйного охлаждения на основе опорных точек кривой кипения / Э. Е. Бейгельзимер // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 5.

Beugelzimer E. Ye. *Podhod k modelirovaniyu struynogo ohlazhdeniya na osnove opornykh tochek krivoy kipeniya*. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost, 2017, no. 5.

2. Григорьев В. А. Кипение криогенных жидкостей / В. А. Григорьев, Ю. М. Павлов, Е. В. Аметистов. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.

Grigoriyev V. A., Pavlov Yu. M., Ametistov Ye. V. *Kipeniye kriogennykh zhydkostey*. Moscow, Energiya, 1977, 288 p.

3. Калинин Э. К. Кризисы теплообмена при кипении – частный случай плавной смены пузырькового и пленочного режимов кипения / Э. К. Калинин // *Инженерно-физический журнал*. – 1990. – Т. 59, № 3. – С. 437–445.

Kalinin E. K. *Krizisy teploobmena pri kipeniyi – chastnyi sluchay plavnoy smeny puzyrkovogo i plyonochnogo rezhimov kipeniya*. Inzhenerno-phizicheskiy zhurnal, 1990, vol. 59, no. 3, pp. 437–445.

4. Северденко В. П. Окалина при горячей обработке металлов давлением / В. П. Северденко, Е. М. Макушок, А. Н. Равин. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.

Severdenko V. P., Makushok Ye. M., Ravin A. N. *Okalina pri goryachey obrabotke metallov davleniyem*. Moscow, Metallurgiya, 1977, 208 p.

5. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti*. Moscow, Vyshaya shkola, 1967, 599 p.

6. Višćorová R. *Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung: Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors*

der Ingenieurwissenschaften / R. Višćorová; Institut für Metallurgie. – Ostrava, 2007. – 135 s.

Višćorová R. *Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung: Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften*. Ostrava, Institut für Metallurgie, 2007, 135 p.

7. Wilmotte S. Régime thermique du brin métallique coulé en continu / S. Wilmotte, M. Economopoulos // *Rapport final. Convention CCE/CRM. 6210-CA 2/203*. – Liege, 1979. – 146 p.

Wilmotte S. Economopoulos M. *Régime thermique du brin métallique coulé en continu*. Rapport final. Convention CCE/CRM. 6210-CA 2/203. Liege, 1979, 146 p.

8. Raudenský M. Impact of oxide scale on heat treatment of steels / M. Raudenský, M. Chabičovský, J. Hrabovský // *Metal*. – 2014, May 21st – 23rd 2014, Brno, Czech Republic, EU. – 7 p.

Raudenský M., Chabičovský M., Hrabovský J. *Impact of oxide scale on heat treatment of steels*. Metal. 2014, May 21st - 23rd 2014, Brno, Czech Republic, EU, 7 p.

Purpose. Classify the types of boiling curves for jet-impingement cooling of metal surfaces originally coated with scale.

Methodology. Systematization of possible combinations of scale cracking and boiling regimes of liquid during jet-impingement cooling of a metal surface.

Findings. An example of using the proposed classification for identifying reference points on the real boiling curve of cooling water on a metal surface coated with scale is given.

Originality. The results explain the essentially different of experimental boiling curves for jet-impingement cooling of metal surfaces.

Practical value. With the use of the results of the work, the type software was provided to the automated control systems for roller hardening machines successfully put into commercial operation at the Severstal metallurgical plant (Russia) and the HSW-Huta-Stali plant (Poland).

Key words: jet-impingement cooling, metal, boiling curve, scale.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским**

Поступила 25.12.2017