

УДК 66.021.4

ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД

А.А. Долинский, академик НАНУ, А.А. Москаленко, к.т.н., Т.Л. Грабова, к.т.н.,
С.А. Иванов, ведущий инженер

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова 2а, Киев-057, 03057, Украина

Проведена оцінка охолоджуючої здатності геомінеральних розчинів за результатами рішення зворотної задачі теплопровідності, що базуються на температурно-часових залежностях охолодження стандартного циліндричного термозонду зі сплаву Inconel 600. Дослідження показали, що теплофізичні властивості істотно залежать від композиційного складу розчинів. Це впливає відповідно на механізми теплообміну при охолодженні металу в процесах термічної обробки.

Проведена оценка охлаждающей способности геоминеральных растворов по результатам решения обратной задачи теплопроводности, базирующиеся на температурно-временных зависимостях охлаждения стандартного цилиндрического термозонда из сплава Inconel 600. Исследования показали, что теплофизические свойства существенно зависят от композиционного состава растворов. Это оказывает влияние на механизмы теплообмена при охлаждении металла в процессах термической обработки.

The cooling capacity of geo-mineral solutions was researched by solving the inverse problem (IP) based on cooling time–temperature data obtained by using the standard cylindrical probe of alloy Inconel 600. The results obtained showed that the thermophysical characteristics depend essentially on the composition of solutions that affect, respectively, on the mechanisms of heat exchange during the quenching processes.

Ключевые слова: скорость охлаждения, геоминеральный раствор, кипение, теплоотдача, закалка

Библ. 15, табл. 3, рис. 6

Условные обозначения:

a – температуропроводность;
 C – теплоемкость;
 D – диаметр;
 K – форм-фактор Кондратьева;
 L – удельная теплота испарения;
 r, R – радиус;
 S – площадь поверхности;
 T – температура;
 v – объем;
 V – скорость;
 Bi_v – обобщенное число Био,

K_n – число Кондратьева,
 α – коэффициент теплоотдачи;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 τ – время
Верхний индекс:
 \max – максимальное значение;
 cp – среднее значение
Нижний индекс:
 m – среда

Термическая закалка относится к методам тепловой обработки твердых объектов с целью получения заданных свойств и структуры. Закалка заключается в быстром охлаждении нагретого изделия в закалочной среде температура, которой значительно ниже охлаждаемого объекта. Процессы закалки происходят в природных условиях и применяются в промышленности. Например, замораживание пищевых продуктов можно осуществлять путем закалки (быстрого охлаждения) в жидкой двуокиси углерода. Интенсивное охлаждение также играет важную роль в смягчении последствий увеличения термомеханических напряжений, возникающих в ТВЭЛ при аварии с потерей теплоносителя в ядерных реакторах [1-2].

Термическая обработка, в т.ч. и закалка стальных изделий, заключается в нагреве стали до сверхкритических температур ($T = 850 \dots 950 \text{ }^\circ\text{C}$) с образованием аустенита и последующим охлаждением с определенной скоростью. Этот процесс осуществляется путем погружения изделия в закалочную среду: воду (жесткая закалка) или масло (медленная закалка) [3,4].

Выбор закалочной среды зависит от кинетики структурных превращений определенного химического состава металла, геометрии и габаритов стальных изделий. Он должен обеспечивать получение желаемых микроструктур по сечению изделий и исключать образование закалочных внутренних дефектов. Охлаждающие жидкости на основе воды или минеральных масел являются самыми распространенными. Несмотря на многочисленные попытки многих исследователей, разрыв между высокой охлаждающей способностью воды и весьма умеренной охлаждающей способностью масел (рис. 1), все еще остается незаполненным. Разработанные закалочные среды (водные солевые и щелочные растворы, расплавленные соли и металлы, полимерные среды), предлагающиеся в качестве промежуточных между водой и маслом, в полной мере не удовлетворяют современным требованиям и стандартам, в том числе с точки зрения экологии и безопасности использования [2,4-6]. Таким образом, эта актуальная проблема все еще ждет своего решения.

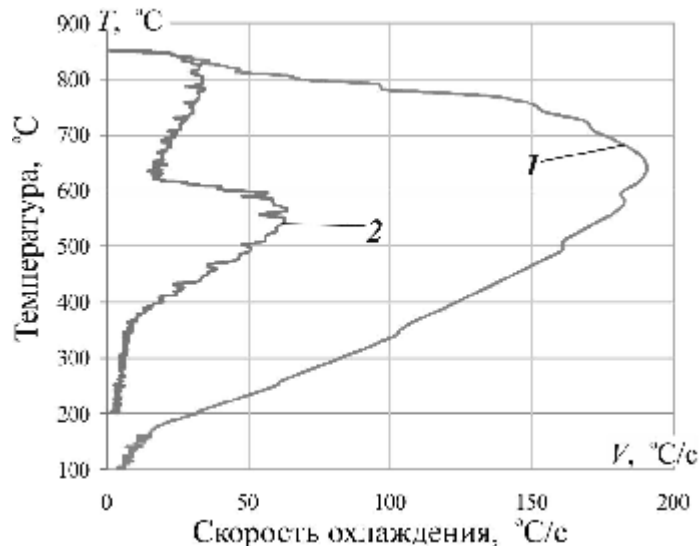


Рис. 1. Кривые скорости охлаждения в:
1 – воде; 2 – индустриальном масле И-20
при $T_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Цель дальнейших экспериментальных исследований – создание экологически чистых и безопасных закалочных сред с высокой охлаждающей способностью.

В последнее время в мире возрастает интерес к проблеме поиска возобновляемых экологически безопасных охлаждающих сред и теплоносителей [4,6,7].

В ИТТФ НАНУ проведен комплекс работ по созданию новых закалочных сред на основе растительных масел и разработке методов их получения. Экспериментальные исследования показали, что охлаждение в таких средах имеет ряд преимуществ, связанные с сокращением продолжительности или устранением низкоэффективного режима пленочного кипения. Добавление в жидкую среду мезо- и наноразмерных твердых частиц позволяет регулировать интенсивность теплоотвода от изделия на разных стадиях процесса охлаждения. Жидкости на основе растительных масел являются перспективной альтернативой минеральным закалочным маслам [8,9].

Вторая группа охлаждающих сред, представляющая интерес, геоминеральные водные растворы. Авторами исследованы исходные солевые растворы со сложным минеральным и элементным составом (табл. 1) со скважин глубиной 2150-2500 м (Прилукский район, Черниговской области, Украина) и смесь, полученную на основе одного из растворов.

Для нормализации коррозионной агрессивности природной среды в геоминеральный раствор №1 вводится 1% ингибитора коррозии. Смесь получают за один проход через проточный дисково-цилиндрический аппарат, в котором реализуется метод дискретно-импульсного ввода энергии в гетерогенную среду [9].

Табл. 1. Основной композиционный состав геоминеральных растворов

Показатель	Геоминеральный раствор №1 (натриевый р-р)	Геоминеральный раствор №2 «Бишофит» (магниевый р-р)
Общая минерализация, г/дм ³	300	322
Хлориды, г/дм ³	167,15	187,05
Бромиды, г/дм ³	–	1,75
Сульфаты, г/дм ³	1,75	0,71
Кальций, г/дм ³	6,03	1,93
Магний, г/дм ³	0,57	128,20
Калий, г/дм ³	0,43	1,72
Натрий, г/дм ³	122,00	1,94
Плотность при 20°С, кг/м ³	1192	1250

Экспериментальные исследования термокинетических характеристик охлаждения проведены на разработанной и созданной в ИТТФ НАНУ автоматической установке для диагностики охлаждения изделий и тестирования закалочных сред с помощью стандартного образца – термозонда. Термозонд (рис. 2) выполнен в виде цилиндра из жаропрочного сплава Inconel 600 с термопарой типа К, вмонтированной в центре зонда. Зонд нагревается в печи до 850 °С и погружается в емкость с исследуемой средой объемом 2 л. Температура зонда фиксируется с дискретностью 0,1 секунда. Информа-

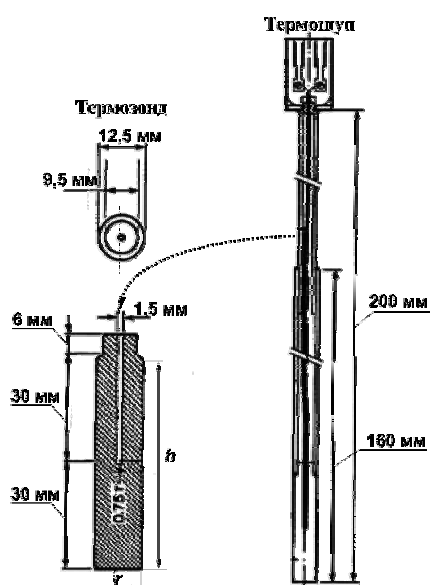


Рис. 2. Термозонд для изучения термокинетических параметров охлаждения.

ция передается в ПК для последующей обработки, хранения результатов в виде базы данных и построения зависимостей в координатах: температура – время; скорость охлаждения – время (или температура). Методика проведения исследований и оценка термокинетических свойств охлаждающих сред проводится в соответствии с требованиями международных стандартов ISO и ASTM [10-14].

Наложение полученных при тестировании кривых охлаждения на термокинетические диаграммы структурной трансформации для различных марок стали позволяет прогнозировать возможность применения конкретной охлаждающей среды для закалки стали определенной марки. Структурные трансформации в стали зависят от скорости охлаждения и температуры протекания этих превращений, что оказывает определяющее влияние на эксплуатационные свойства изделий после термообра-

ботки.

Кривые охлаждения термозонда получены в исследуемых средах с температурой $T_m = 18-20\text{ }^\circ\text{C}$.

При погружной закалке в средах с изменением агрегатного состояния интенсивность теплообмена зависят преимущественно от механизма процесса кипения. Типичен трехстадийный ход теплообмена при охлаждении в средах с температурой кипения ниже начальной температуры закаливаемой детали: пленочное кипение, пузырьковое кипение и конвективное охлаждение. Каждый этап характеризуется различными скоростями охлаждения и оценивается по стандартным параметрам, приведенным ниже.

Во избежание перлитной области трансформации структуры стали, необходимо обеспечить максимально возможную скорость охлаждения в зоне $T=700\text{ }^\circ\text{C}$ (V^{700}). Параметры V^{\max} и T^{\max} – пиковая скорость охлаждения и температура, при которой она достигается. При разработке закалочных сред следует стремиться максимизировать эти параметры. Скорости охлаждения при температурах $200\text{ }^\circ\text{C}$ и $300\text{ }^\circ\text{C}$ является важным параметром, так как они связаны с ростом внутренних напряжений и опасностью образования трещин и деформации изделия. Необходима минимизация скорости охлаждения в области мартенситного превращения ($400\dots200\text{ }^\circ\text{C}$), что приводит к небольшому температурному градиенту и способствует практически однородному протеканию процесса структурной трансформации по всему объему изделия и тем самым уменьшает межструктурных напряжений [3,7,10].

Для анализа интенсивности охлаждения зонда в исследуемых средах, весь диапазон был разделен на три температурных интервала: высоких температур ($850\dots600\text{ }^\circ\text{C}$), средних температур ($600\dots400\text{ }^\circ\text{C}$) и низких ($400\dots100\text{ }^\circ\text{C}$). Результаты исследований представлены на рис. 3 и в табл. 2.

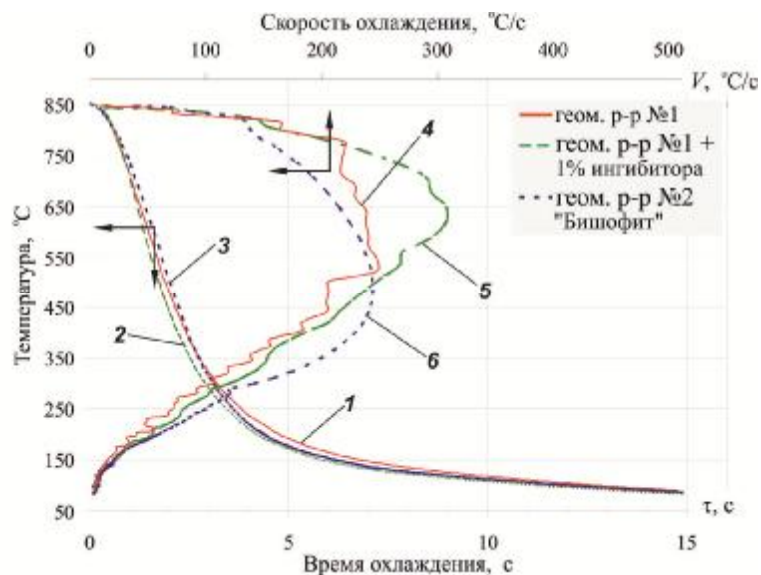


Рис. 3. Кривые охлаждения термозонда:

1,2,3 – температурно-временные зависимости охлаждения в геоминеральном растворе №1, в геоминеральном р-ре №1 + 1% ингибитора, геоминеральном растворе №2 «Бишофит»; 4,5,6 – кривые скорости охлаждения, соответственно.

Сравнительный анализ сред на геоминеральной основе (рис. 3) показывает, что за счет введения 1% ингибитора коррозии в раствор №1 увеличивается скорость охлаждения в 1,1...1,3 раза прак-

тически во всем диапазоне температур за исключением начального участка (850...780 °С). Сравнение 2-х исходных геоминеральных растворов показывает, что состав влияет на интенсивность охлаждения. Так, в натриевом растворе №1 скорость охлаждения выше в диапазоне высоких температур и ниже в диапазоне средних и низких.

Табл. 2. Результаты исследования охлаждающей способности исследуемых сред

Исследуемая среда	Время охлаждения в темп. интервале			Средняя скорость охлаждения в темп. интервале			Максимальная скорость охлаждения	Температура при макс. скорости охлаждения	Скорость охл. при 700 °С	Скорость охл. при 300 °С	Скорость охл. при 200 °С
	850...600 °С	600...400 °С	400...200 °С	850...600 °С	600...400 °С	400...200 °С					
	τ, с			V^{cp} , °С/с							
Геоминеральный раствор №1	1,09	0,95	10,34	202,2	218,7	74,5	249,4	553	222,2	102,8	38,9
Геоминеральный р-р № 1 + 1% ингибитора	1,39	0,86	9,04	241,1	244,7	86,0	309,7	640	287,7	118,7	48,9
Геоминеральный раствор №2 «Бишофит»	1,61	0,87	9,41	182,4	234,1	91,0	244,7	548	212,8	127,5	47
Вода	2,63	1,28	11,75	139,0	158,8	58,6	190,9	641	174,8	83,7	30,9

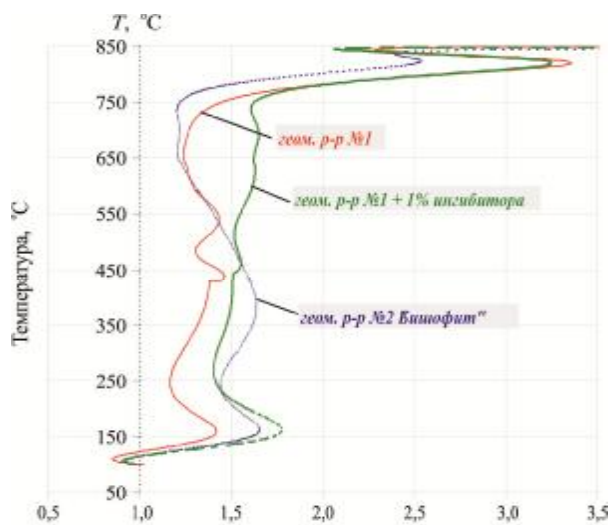


Рис. 4. Интенсивность охлаждения в средах на геоминеральной основе по отношению к воде.

Скорость охлаждения в средах на геоминеральной основе (рис. 4 и табл. 2) выше, чем в воде в 1,3...3,4 раза во всем температурном диапазоне. Увеличение скорости охлаждения в области высоких температур по сравнению с водой связано с тем, что при охлаждении в воде (поз. 1, рис. 1) образуется нестабильная паровая пленка в диапазоне температур 850-790 °С. Если увеличение скорости охлаждения в области высоких температур является положительным результатом, то в области низких температур – наоборот.

Для анализа интенсивности теплообмена в исследуемых средах проведен расчет средних эффективных коэффициентов теплоотдачи α . Значения α были рассчитаны путем решения обратной задачи теплопроводности с использованием нелинейного уравнения теплопроводности (1) с граничным условием (2) и начальным условием (3) [7,14]:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(l \text{ grad} T) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{a}{l} (T - T_m) \dot{u} = 0 \quad (2)$$

$$T(r,0) = T_0 \quad (3)$$

Для расчета α из (1-3) на основе регулярной теории теплового состояния [15] получены уравнения (4-8):

$$V = \frac{aKn}{K}(T - T_m) \quad (4)$$

$$K = \frac{l}{\frac{J_0^2}{R^2} + \frac{p^2}{h^2}} \quad (5)$$

$$Kn = \frac{Bi_V}{(Bi_V^2 + 1,437Bi_V + 1)^{0,5}} \quad (6)$$

$$Bi_V = \frac{a}{l} K \frac{S}{v} \quad (7)$$

$$a_{conv} = \frac{J_0^2 l Bi_V}{D} \quad (8)$$

где: V – скорость охлаждения ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$), a – температуропроводность материала термозонда ($\text{м}^2/\text{с}$), Kn – число Кондратьева [15], K – форм-фактор Кондратьева (м^2), T – температура термозонда ($^{\circ}\text{C}$), T_m – температура среды ($^{\circ}\text{C}$), Bi_V – обобщенное число Био, l – коэффициент теплопроводности материала зонда ($\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$), S – площадь поверхности (м^2), v – объем термозонда (м^3), D – диаметр термозонда (м), α – эффективный коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$). Для стандартного цилиндрического термозонда ($h^3 4D$) соотношение $v/S \gg 2$ и $K = R^2/5,784$.

Средние эффективные коэффициенты теплопроводности оценены на основе решения обратной задачи теплопроводности для второго режима теплопередачи [7,16] по экспериментальным данным скорости охлаждения, полученные с помощью стандартного термозонда с термопарой в центре. Оценка погрешности расчета подробно рассмотрена в работе [7] и составляет $\gg 10\%$. Результаты расчетов α для всех испытанных сред представлены на рис. 5.

Расчеты показали, что пиковое значение коэффициентов теплоотдачи a_3^{\max} у раствора №2 с преобладанием хлорида магния. Однако, значение a_3^{\max} лежит на границе средних и низких температур, что свидетельствует о том, что стадия интенсивного охлаждения находится в области мартенситного превращения. Как видно на рис. 5 (поз. 1,2), для сред на основе раствора №1 с преобладанием солей натрия имеется по 2 значения a^{\max} , что свидетельствует о том, что процесс пузырькового кипения имеет неустойчивый характер. Наиболее интенсивно процесс теплоотдачи происходит в области высоких и средних температур при охлаждении в натриевом растворе №1 с ингибитором (поз. 2, рис. 5).

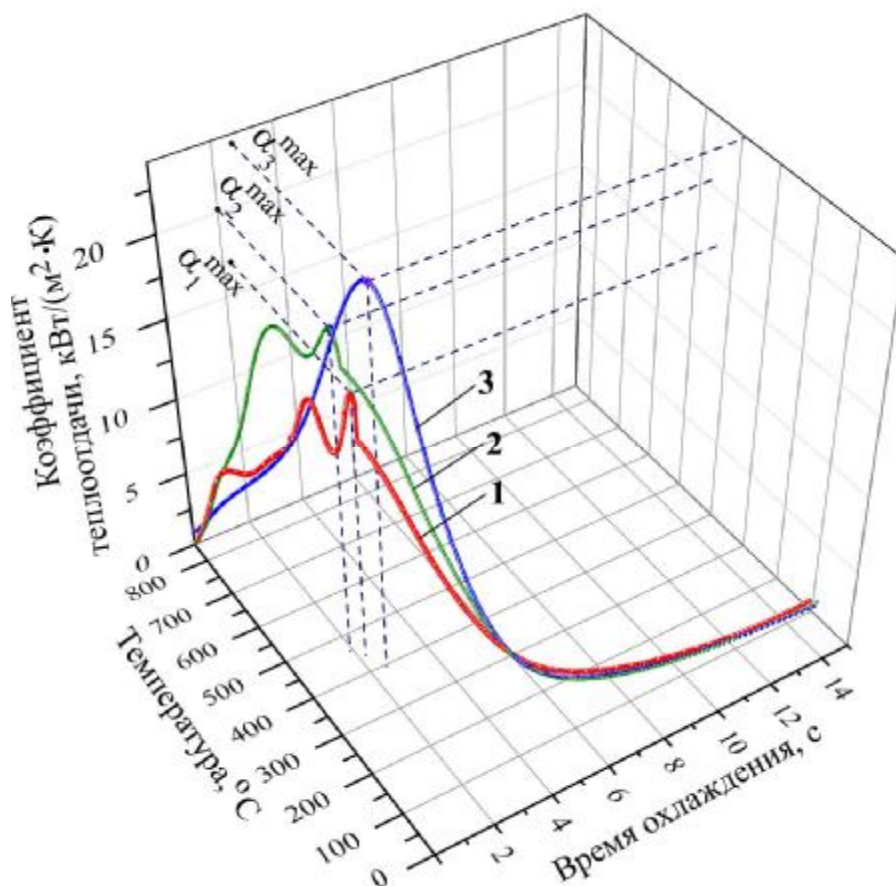


Рис. 5. Зависимость средних коэффициентов теплоотдачи в зависимости от температуры термозонда и времени охлаждения в: 1 – геоминеральном р-ре №1; 2 – геом. р-р №1+ 1% ингибитора; 3 – геом. р-ре №2 «Бишофит».

Охлаждающая способность закалочных сред, и соответствующая металлургическая трансформация металла при закалке, зависят от комплекса теплофизических и физико-химических свойств жидкости: плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность, температуры кипения, теплоты испарения, свойств смачивания [2,5]. Наиболее характерными свойствами геоминеральных растворов как охлаждающих сред являются высокие значения теплоты испарения и достаточно большие значения теплоемкости. Для исследуемых сред температура кипения выше, чем у воды и достигает 106...116 °С.

Определение удельной теплоты испарения и теплоемкости геоминеральных растворов проводили с помощью теплотрического прибора синхронного термического анализа ДКМКИ-1М, который разработан и создан в ИТТФ НАНУ [17].

Результаты исследований (табл. 3) показали, что теплоемкость C_{pm} геоминеральных растворов №1 меньше на 20 % по сравнению с теплоемкостью воды. Зависимость C_{pm} от температуры незначительна, а добавление в натриевый раствор №1 ингибитора коррозии приводит к увеличению удельной теплоемкости среды.

Табл. 3. Удельная теплоемкость исследуемых сред

$T_m, ^\circ\text{C}$	геомин. раствор №1		геомин. р-р №1 +1% ингибитора	
	C_{pm} кДж/(кг·К)	$C_{pm}/C_{p\text{вода}}$	C_{pm} кДж/(кг·К)	$C_{pm}/C_{p\text{вода}}$
1	2	3	4	5
32,5	3,261	0,781	3,307	0,792
1	2	3	4	5
37,5	3,260	0,781	3,305	0,791
42,5	3,258	0,780	3,302	0,791
47,5	3,257	0,780	3,299	0,790
52,5	3,255	0,779	3,296	0,789
57,5	3,254	0,778	3,294	0,787
62,5	3,253	0,777	3,291	0,786
67,5	3,251	0,776	3,288	0,785
72,5	3,250	0,774	3,286	0,783
77,5	3,248	0,773	3,283	0,781
82,5	3,247	0,771	3,280	0,779
87,5	3,245	0,770	3,277	0,778
92,5	3,244	0,768	3,275	0,776

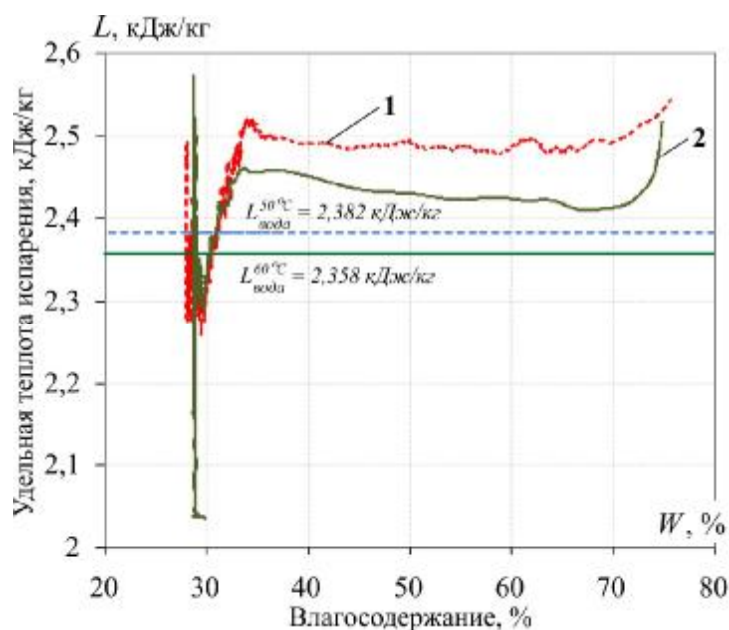


Рис. 6. Зависимость удельной теплоты испарения геомин. р-ра №1 от влагосодержания при температуре: 1 – 50 °С; 2 – 60 °С.

нием температуры наблюдается тенденция к уменьшению значений L_m .

Для детального изучения процессов охлаждения, понимания механизмов теплоотдачи и факторов влияния на охлаждающую способность геоминеральных растворов необходимы дополнительные исследования ряда теплофизических свойств, визуализация процессов кипения и синхронизация результатов и наблюдений с кривыми охлаждения. Авторы планируют на следующем этапе провести

Как видно на рис. 6, удельная теплота испарения L_m исследуемых растворов выше, чем у воды, что объясняет увеличение скорости охлаждения в геоминеральных растворах. Чем выше теплота парообразования, тем больше охлаждающая способность закалочных сред, т.к. закаляемое изделие, отдавая большое количество теплоты на образование пара, будет интенсивно охлаждаться.

Существенное влияние на удельную теплоту испарения L_m оказывает концентрация солей в растворе: при достижении 65% – удельная теплота испарения резко падает. С увеличением

комплекс исследований, который позволит разработать систему целенаправленного регулирования охлаждающих свойств закалочных сред.

Выводы.

1. Исследования показали, что при охлаждении термозондов в геоминеральных растворах отсутствует стадия пленочного кипения, что повышает интенсивность и равномерность охлаждения образцов в области высоких температур.

2. Охлаждающая способность растворов на геоминеральной основе выше во всем диапазоне температур, чем у традиционных сред в 1,5...3,5 раза. Охлаждающие среды на геоминеральной основе могут быть рекомендованы для технологий ускоренной термообработки стальных изделий.

3. Результаты исследований подтверждают перспективность данного направления разработки новых охлаждающих сред для промышленной термической закалки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kim, H.* On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-Based Nanofluids with Alumina, Silica and Diamond Nanoparticles / *Kim, H., DeWitt, G., McKrell, T., Buongiorno, J., Hu, L.-W.* // *Int. J. Multiphase Flow.* – 2009. – Vol. 35. – P. 427–438.
2. *Люты В.* Закалочные среды: Справочник / *Люты В.* перевод с польского Г.Н. Мехеда, под ред. Масленникова С.Б. – Челябинск.: Металлургия, 1990 – 192 с.
3. *Петраш Л.В.* Закалочные среды / *Л.В. Петраш.* – М.-Л.: Государственное научно-техническое издание машиностроительной литературы, 1959. – 113 с.
4. *Totten, G.E., Tensi, H.M., Lainer, K.*, "Performance of Vegetable Oils as a Cooling Medium in Comparison to a Standard Mineral Oil", *J. Materials Engineering and Performance*, Vol. 8, No. 4, 1999, pp.409–416.
5. *Ramesh, G., Prabhu, N.K.*, "Review of Thermo-physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment" // *Nanoscale Res. Letter.* –2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 334–349..
6. *Moore, D.*, Safer Liquid Quenchants // *Heat Treating Progress.* – 2001. – Vol. 1. – P. 29–33.
7. *Kobasko, N. I., Batista, A. A., Jr., Canale, L.C.F., Totten, G.E., Dobryvechir, V.V.*, Cooling Capacity of Coconut Oil, Palm Oil, and a Commercial Petroleum Oil by Solving the Heat Conductivity Inverse Problem // *Materials Performance and Characterization.* – 2013. – Vol. 2, No. 1. – P. 1–21.
8. *Dolinsky A.A., Moskalenko A.A., Grabova T.L., Kobasko N.I., Logvinenko P.N.* Cooling Intensity of Micro- and Nanofluids to Be Used as a Quenchant for Hardening of Steel Parts and Tools // *Proceeding of the 4th WSeaS International Conference on Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer (FLUIDSHEAT '13)*, Dubrovnik, Croatia, June 25-27, 2013. – p. 88–93.
9. *Долинский А.А., Грабов Л.Н., Москаленко А.А., Грабова Т.Л., Логвиненко П.Н.* Исследование влияния дискретного энергетического воздействия на охлаждающую способность микро- и наножидкостей // *Промышленная теплотехника.* – 2013. – Т. 35, № 1. – С. 5–12.
10. *Moskalenko, A.A., Kobasko, N.I., Protsenko, L.N., Logvinenko, P.N. et al.*, "Development of Methods and Equipment to Determine the Cooling Capacity of the Quenching Media", *The Tenth Anniversary of the International Industrial Conference "Efficiency of Research, Resources and Industrial Potential in Modern Conditions"* Slavsk, 18-22 Feb., 2010. – P. 209–212.
11. ISO 9950:1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics–Nickel-Alloy Probe Test Method, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
12. ASTM D6200: Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
13. ASTM D6200-01. Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, 2001. – 6 p.
14. *Kobasko, N.I., Souza, E.C., Canale, L.C.F., Totten, G.E.*, Vegetable Oil Quenchants: Calculation and Comparison of the Cooling Properties of a Series of Vegetable Oils // *J. Mechanical Engineering.* – 2010. – Vol. 56, No. 2. – P. 131–142.
15. *Кондратьев Г.М.*, Тепловые измерения. – М.-Л.: Машгиз, 1957. – 240 с.
16. *Liscic, B., Tensi, H. M., Totten, G. E., and Webster, G. M.*, "Non-Lubricating Process Fluids: Steel Quenching Technology," *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance and Testing*, G. E. Totten, S. R. Westbrook, and R. J. Shah, Eds., ASTM International, West Conshocken, PA., 2003. – P. 587–634.

17. Дубовикова Н.С., Снежкин Ю.Ф., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. Теплометрический прибор синхронного термического анализа для определения удельной теплоты испарения // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 2. – С. 87–95.

CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION AND THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF NEW QUENCHING MEDIA

Dolinsky A.A., Moskalenko A.A., Grabova T.L., Ivanov S.A.

Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine, 2a Zhelyabov St., Kyiv-057, 03057, Ukraine

The cooling capacity of geo-mineral solutions was researched by solving the inverse problem (IP) based on cooling time–temperature data obtained by using the standard Inconel 600 probe. The results obtained showed that the thermophysical characteristics depend essentially on the composition of solutions that affect, respectively, on the mechanisms of heat exchange during the quenching processes.

Key words: heat exchange, cooling rate, geo-mineral solution, boiling, quenching

1. Kim, H. *On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-Based Nanofluids with Alumina, Silica and Diamond Nanoparticles* / Kim, H., DeWitt, G., McKrell, T., Buongiorno, J., Hu, L.-W. // *Int. J. Multiphase Flow.* – 2009. – Vol. 35. – P. 427–438.
2. Lyuty V. *Quenching media: Directory* / Lyuty V., translation from Polish by Mekheda G.N., ed. Maslennikov S.B. - Chelyabinsk.: Metallurgy. – 1990 – 192 p. (Rus.)
3. Petrash L.V. *Quenching media* / Petrash L.V. – M.-L.: State scientific and technical publication engineering literature. – 1959. – 113 p. (Rus.)
4. Totten, G.E., Tensi, H.M., Lainer, K., *Performance of Vegetable Oils as a Cooling Medium in Comparison to a Standard Mineral Oil*, *J. Materials Engineering and Performance.* – 1999. – Vol. 8, No. 4. – P.409–416.
5. Ramesh, G., Prabhu, N.K., *Review of Thermo-physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment* // *Nanoscale Res. Letter.* –2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 334–349.
6. Moore, D., *Safer Liquid Quenchants* // *Heat Treating Progress.* – 2001. – Vol. 1. – P. 29–33.
7. Kobasko, N. I., Batista, A. A., Jr., Canale, L.C.F., Totten, G.E., Dobryvechir, V.V., “Cooling Capacity of Coconut Oil, Palm Oil, and a Commercial Petroleum Oil by Solving the Heat Conductivity Inverse Problem”, Kobasko, N. I., Batista, A. A., Jr., Canale, L.C.F., Totten, G.E., Dobryvechir, V.V., *Cooling Capacity of Coconut Oil, Palm Oil, and a Commercial Petroleum Oil by Solving the Heat Conductivity Inverse Problem* // *Materials Performance and Characterization.* – 2013. – Vol. 2, No. 1. – P. 1–21.
8. Dolinsky A.A., Moskalenko A.A., Grabova T.L., Kobasko N.I., Logvinenko P.N. *Cooling Intensity of Micro- and Nanofluids to Be Used as a Quenchant for Hardening of Steel Parts and Tools* // *Proceeding of the 4th WSeaS International Conference on Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer (FLUIDSHEAT '13), Dubrovnik, Croatia, June 25-27, 2013.* – P. 88–93.
9. Dolinsky A.A., Grabov L.N., Moskalenko A.A., Grabova T.L., Logvinenko P.N. *Investigation of the influence of discrete pulse input of energy on cooling capacity of micro- and nanofluids* // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2013. – Vol. 35, № 1. – P. 5–12. (Rus.)
10. Moskalenko, A.A., Kobasko, N.I., Protsenko, L.N., Logvinenko, P.N. et. al., *Development of Methods and Equipment to Determine the Cooling Capacity of the Quenching Media* // *The Tenth Anniversary of the International Industrial Conference "Efficiency of Research, Resources and Industrial Potential in Modern Conditions" Slavsk, 18-22 Feb., 2010.* – P. 209–212.
11. *ISO 9950:1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics–Nickel-Alloy Probe Test Method, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.* – 1995.
12. *ASTM D6200: Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.*
13. *ASTM D6200-01. Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, 2001.* –6 p.
14. Kobasko, N.I., Souza, E.C., Canale, L.C.F., Totten, G.E., *Vegetable Oil Quenchants: Calculation and Comparison of the Cooling Properties of a Series of Vegetable Oils* // *J. Mechanical Engineering.* – 2010. –Vol. 56, No.2. – P. 131–142.
15. Kondratyev G.M., *Thermal Measurements.* – M.-L.: Mashgiz, 1957. –240 p. (Rus.)
16. Liscic, B., Tensi, H. M., Totten, G. E., and Webster, G. M., *Non-Lubricating Process Fluids: Steel Quenching Technology,* *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance and Testing, G. E. Totten, S. R. Westbrook, and R. J. Shah, Eds., ASTM International, West Conshocken, PA..* – 2003. – P. 587–634.
17. Dubovikova N.S., Snezhkin Y.F., Dekusha L.V., Vorobyov L.I., *Simultaneous thermal analysis meter to determine boiling heat* // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2013, Vol. 35, № 2. – P. 87–95. (Rus.)