

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДЕНИЯ В СРЕДАХ НА ОСНОВЕ ГЕОМИНЕРАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

Грабов Л.Н., канд. техн. наук, пр.н.с.,
Москаленко А.А., канд. техн. наук, ст.н.с.,
Грабова Т.Л., канд. техн. наук, ст.н.с.

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

Проведены экспериментальные исследования термокинетических характеристик охлаждения в солевых растворах, на основе которых рассчитаны эффективные коэффициенты теплоотдачи цилиндрического зонда. Сравнение традиционных и сред на основе геоминеральных растворов показывает ряд преимуществ для использования таких сред в качестве закалочных жидкостей.

The experimental studies of continuous cooling transformation characteristics were carried out in salt solutions. The effective heat transfer coefficients of the cylindrical probe were calculated using the obtained data. The media based on geo-mineral solutions have a number of advantages for using such media as quenching bath compared to the traditional quenching media.

Ключевые слова: теплообмен, скорость охлаждения, солевой раствор, кипение

Процесс закалки относится к методам тепловой обработки твердых объектов с целью получения заданных свойств и структуры. Закалка относится к быстрому охлаждению очень горячего твердого объекта в закалочной среде с температурой значительно ниже охлаждаемого объекта. Явления закалки происходят в природе и применяются в промышленности. Например, быстрое замораживание пищи можно осуществлять путем закалки в жидкой двуокиси углерода. Закалка (охлаждение) также играет важную роль в смягчении последствий в условиях термомеханических напряжений при аварии с потерей теплоносителя в ядерных реакторах [1-2].

Широко используют закалку при создании стальных изделий в течение многих столетий. Известно, что сущностью многих видов термической обработки, в т.ч. и закалки, является нагрев стали до сверхкритических температур с образованием аустенита и последующим охлаждением с соответствующей скоростью. Этот процесс осуществляется путем погружения в закалочную среду: воду (жесткая закалка) или масел (медленная закалка).

Выбор закалочной среды зависит от кинетики структурных превращений определенной марки сплава, геометрии, габаритов стальных изделий и должно обеспечивать получение желаемых микроструктур по сечению изделий без закалочных дефектов. Охлаждающие жидкости на основе воды или минеральных масел являются самыми распространенными. Разрыв между чрезвычайно высокой охлаждающей способностью воды и весьма умеренной охлаждающей способностью масел, несмотря на весьма многочисленные попытки многих исследователей, все еще остается незаполненным: тысячи закалочных сред (солевые и щелочные растворы, расплавленные соли и металлы, полимерные среды), предлагающиеся в качестве промежуточных между водой и маслом, по тем или иным причинам не удовлетворяют практику, в том числе с точки зрения экологичности и безопасности использования [2-5]. Таким образом, эта очень актуальная проблема все еще ждет своего решения.

Цель и задачи экспериментальных исследований – разработка эффективных экологичных закалочных сред с высокой охлаждающей способностью.

В последнее время в мире возрастает интерес к проблеме поиска возобновляемых экологичных охлаждающих сред и теплоносителей [3-6].

В ИТТФ НАНУ проведен комплекс работ по разработке новых закалочных сред на основе растительных масел и методов их получения. Экспериментальные исследования показали, что охлаждение в таких средах имеет ряд преимуществ, связанные с отсутствием такового явления как пленочное кипение. Добавление мезо- и наноразмерных твердых частиц позволяет регулировать интенсивность теплоотвода от изделия на разных стадиях процесса охлаждения. Жидкости на основе растительных масел являются альтернативой минеральным маслам [7-8].

Вторая группа охлаждающих сред, представляющая интерес, геоминеральные водные растворы. Авторами исследованы исходные геоминеральные солевые растворы со сложным минеральным и элементарным составом со скважин глубиной 2150-2500 м (Прилукский район, Черниговской области, Украина),

смесь, полученная на основе одного из растворов и традиционные охлаждающие среды, такие как вода и 10% водный раствор хлорида натрия.

Таблица 1 – Основной композиционный состав геоминеральных растворов

Показатель	Геоминеральный раствор №1	Геоминеральный раствор №2 «Бишофит»
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°C, кг/м ³	1192	1250

Для уменьшения коррозионной активности в геоминеральный раствор №1 вводится 1% ингибитора коррозии. Смесь получена за 1 проход в проточном дисково-цилиндрическом аппарате, в котором реализуется метод дискретно-импульсного ввода энергии в гетерогенную среду [8,9].

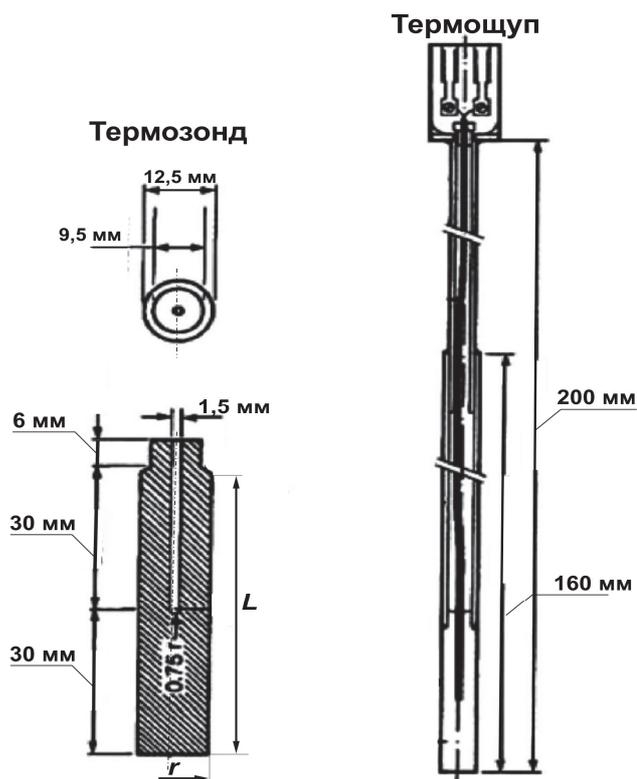


Рис. 1 – Цилиндрический зонд для исследования термокинетических свойств охлаждающих сред

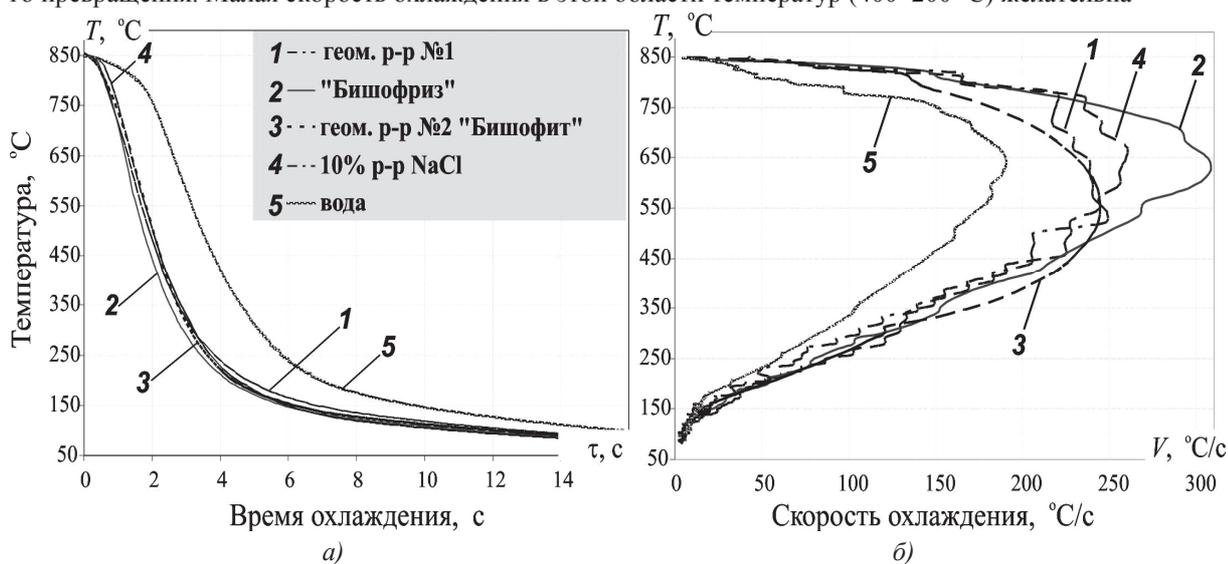
Экспериментальные исследования термокинетических характеристик охлаждения проведены на автоматической установке для диагностики охлаждения изделий и тестирования закалочных сред. Термозонд выполнен в виде цилиндра из жаропрочного сплава Inconel 600 с термопарой типа К, вмонтированной в центре зонда. 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. Измеренная информация 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 [10-13].

Наложение кривых охлаждения на диаграммы структурной трансформации для различных марок стали позволяет оценить пригодность охлаждающей среды для заковки стали определенной марки. Структурные трансформации в стали зависят от скорости охлаждения и температуры протекания этих превращений оказывает основополагающее влияние на эксплуатационные свойства изделий после термообработки.

Термокинетические кривые (рис. 2) получены в исследуемых средах с температурой 18-20 °С.

В процессе погружной закалки основополагающее значение в механизме теплообмена имеют процессы кипения. Типичен трехстадийный ход теплообмена при охлаждении в средах с температурой кипения ниже температуры закаляемой детали: пленочное кипение, пузырьковое кипение и конвективное охлаждение. Каждый этап характеризуется различными скоростями охлаждения зонда и тестируется по параметрам, приведенным ниже [2, 4].

Необходимо обеспечить максимально возможную скорость охлаждения при 700 °С, чтобы избежать перлитной области трансформации стали. Параметры V^{max} и T^{max} – пиковая скорость охлаждения и температура, при которой она достигается. При разработке закалочных сред следует максимизировать эти параметры. Скорости охлаждения при температурах 200 °С и 300 °С является важным параметром, так как они связаны с возможностью образования трещин и искажений в стали связаны в области мартен ситного превращения. Малая скорость охлаждения в этой области температур (400–200 °С) желательна



1 – геоминеральный раствор №1; 2 – охлаждающая среда на основ геоминерального р-ра №1;
3 – геоминеральный раствор №2 «Бишофит»; 4 – 10% водный раствор NaCl; 5 – вода;
а) температурно-временные кривые; б) кривые скорости охлаждения

Рис. 2 – Термокинетические кривые охлаждения цилиндрического зонда

потому, что приводит к небольшому температурному градиенту, что благоприятствует практически однородному протеканию процесса структурной трансформации по всему объему изделия и тем самым уменьшает структурные напряжения [4,14].

Для анализа интенсивности охлаждения зонда в исследуемых средах, весь диапазон был разделен на три температурных интервала: высококих температур (850–600 °С), средних температур (600–400 °С) и низких (400–100 °С). Результаты исследований представлены в таблице 2.

При охлаждении в воде (поз. 5, рис. 2) образуется неустойчивая паровая пленка в диапазоне температур 850-790 °С. Интенсивность охлаждения в средах на геоминеральной основе (поз. 1-3, рис. 2 и табл. 2) выше, чем в воде в 1,3...3,4 раза во всем температурном диапазоне. Несколько другая картина при сравнении интенсивности охлаждения геоминеральных растворов с раствором хлорида натрия (поз.4, рис.2): наблюдается увеличение скорости охлаждения в среде «Бишофриз» (поз. 2, рис. 2) в диапазоне высоких и средних температур, а в диапазоне низких температур уменьшение скорости охлаждения в 1,1...1,8 раз для всех сред на геоминеральной основе.

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

Таблиця 2 – Результати дослідження охолоджуючої здатності досліджуваних серед

Досліджуєма серед	Обозначення	Час охолодження в темп. інтервалі			Середня швидкість охолодження в темп. інтервалі			Максимальна швидкість охолодження	Температура зонда при макс. шк-ти охолодження	Швидкість охл. при 700 °С	Швидкість охл. при 300 °С	Швидкість 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							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Геомінеральний розчин №1	геом. р-р №1	1,09	0,95	10,34	202,2	218,65	74,53	249,35	553	222,17	102,81	38,85
Геомінеральний р-р №1 з інгібітором	«Бішофріз»	1,39	0,86	9,04	241,09	244,72	85,96	309,67	640	287,72	118,72	48,9
Геомінеральний розчин №2	геом. р-р №2 «Бішофіт»	1,61	0,87	9,41	182,35	234,05	91,04	244,71	548	212,84	127,53	46,95
Вода	Вода	2,63	1,28	11,75	139,03	158,81	58,63	190,97	641	174,8	83,68	30,94
Солевої розчин NaCl	10% р-р NaCl	1,64	0,94	8,18	253,88	222,52	86,37	254,74	627	251,31	120,33	52,59

Для аналізу інтенсивності теплообміну в досліджуваних серед проведено розрахунок ефективних коефіцієнтів теплоотдачі α. Значення α були розраховані шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності з використанням нелінійного рівняння теплопровідності (1) з граничним умовою (2) і початковим умовою (3) [6,14]:

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

$$\left[\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} (T - T_m) \right]_{r=R} = 0 \quad (2)$$

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

Для розрахунок α з (1-3) на основі регулярної теорії теплового стану [15] отримані рівняння (4-8):

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

$$K = \frac{1}{\frac{v_0^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{Z^2}} \quad (5)$$

$$Kn = \frac{Bi_V}{(Bi_V^2 + 1.437Bi_V + 1)^{0.5}} \quad (6)$$

$$Bi_V = \frac{\alpha K S}{\lambda V} \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{conv}} = \frac{v_0^2 \lambda Bi_V}{D} \quad (8)$$

де: V – швидкість охолодження (°С/с), a – температуропровідність зонда (м²/с), Kn – число Кондратьєва [15], K – форм-фактор Кондратьєва (м²), T – температура зонда (°С), T_m – температура серед (°С), Bi_V – узагальнене число Био, λ – коефіцієнт теплопровідності матеріала зонда (Вт/м·К), S – площа по-

верхности (m^2), V – объем (m^3), D – диаметр (м), α – эффективный коэффициент теплоотдачи ($Вт/м^2\cdot К$) и $V_0^2 = 5.784$.

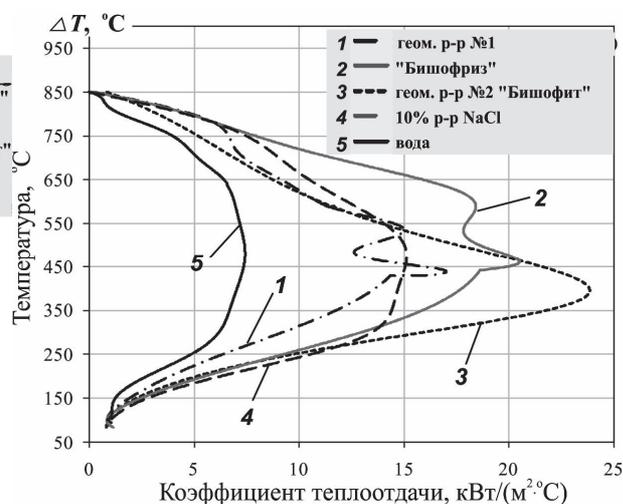
Обоснование выбора математической модели и погрешности расчета рассмотрено в работе [6]. Результаты расчетов α для всех испытанных сред представлены на рис. 4.

Расчеты показали, что пиковое значение коэффициентов теплоотдачи α^{max} у раствора №1 с преобладанием хлорида магния. Однако, α^{max} находится на границе средних и низких температур, что свидетельствует о том, что стадия интенсивного охлаждения находится в области мартенситного превращения. Как видно на рис. 4 (поз. 1,2), для сред на основе раствора №1 с преобладанием солей натрия имеется по 2 значения α^{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 растворе «Бишофрит» (поз. 2, рис.4).

Для детального изучения процессов охлаждения, понимания механизмов теплоотдачи и факторов влияния на охлаждающую способность солевых растворов необходимы дополнительные исследования ряда теплофизических свойств (теплоты испарения и теплоемкости), визуализации процессов кипения и согласования с кривыми охлаждения, что планируется авторами в дальнейшем. Такой комплекс исследований позволит разработать механизмы направленного регулирования охлаждающими свойствами закалочных сред.



Рис. 3 – Интенсивность охлаждения в средах на геоминеральной основе



1 – геоминеральный солевой раствор №1; 2 – охлаждающая среда на основе геоминерального р-ра №1; 3 – геоминеральный солевой раствор №2 «Бишофит»; 4 – 10% водный раствор NaCl; 5 – вода

Рис. 4 – Коэффициенты теплоотдачи цилиндрического зонда в охлаждающих средах

Выводы

- Исследования показали, что при охлаждении в солевых растворах не наблюдается стадия пленочного кипения, что повышает равномерность охлаждения образцов. Охлаждающая способность растворов на геоминеральной основе выше, чем у традиционных сред.
- Результаты исследований могут быть положены в основу разработки новых охлаждающих сред для промышленной закалки и эффективных теплоносителей.

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. – pp. 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. 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.

4. 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. Lett.*, Vol. 6, No. 1, 2011, pp. 334–349.
5. Moore, D., “Safer Liquid Quenchants”, *Heat Treating Progress*, Vol. 1, 2001, pp. 29–33.
6. 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*, Vol. 2, No. 1, 2013, pp. 1–21.
7. 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.
8. 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.
9. Долинский А.А. Метод ДИВЭ в инновационных технологиях и теплообменном оборудовании / А.А. Долинский, Л.М. Грабов, Т.Л. Грабова // *Промышленная теплотехника*. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 18–30.
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, pp. 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, p. 6.
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*, Vol. 56, No. 2, 2010, pp. 131–142.
15. Kondratjev, G.M., *Thermal Measurements*, Mashgiz, Moscow, 1957, p. 240.

УДК 532.137: 666.97

ВІБРОЕКСТРУЗІЯ ФІБРОБЕТОННИХ ПЛИТ ПОКРИТТЯ

Воронін Л.Г., канд. техн. наук, Андрєєв І.А., канд. техн. наук,
Шмельова Д.Ю., студентка

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ

Встановлена можливість віброекструзійного виготовлення бетонних плит покриття, армованих базальтовими фібрами. Запропоновано метод розрахунку процесу ізотермічного, ламінарного плинуньютонівської рідини в каналах складних поперечних перерізів. Визначено розміри каналу віброекструдера для формування базальтофіробетонних плит покриття.

The possibility of making concrete slabs vibroextrusion coating reinforced with basalt fiber. A method for calculating the isothermal process, laminar flow of a Newtonian fluid in the channels of complex cross-sections. The sizes of the channel forming vibroextruder basalt fibroconcrete cover plates.

Ключові слова: фіробетон, віброекструдер, бетон, плита покриття, базальтова фібра.

Вступ

Дисперсне армування бетону фібрами покращує його основні фізико-механічні характеристики і зменшує масу виробів порівняно з їх залізобетонними аналогами. Властивості базальтофіробетону дозволяють виготовляти з цього матеріалу різноманітні будівельні конструкції, які в наш час знаходять широке застосування.