

А. А. Серболіна<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА.

**Аннотация.** Термообработка включает в себя ряд процедур, таких как нагрев, выдержка и охлаждение металлов и металлических сплавов. Среди различных видов термообработки закалка значительно улучшает механические свойства, такие как прочность и твердость. Закалка материала происходит быстро и интенсивно, что в свою очередь приводит к образованию температурного напряжения, превышающего его предел. Это может привести к неоднородности пластических деформаций заготовок.

Согласно современным представлениям, определение коэффициента теплоотдачи является важным элементом в изучении процесса образования и снижения напряжений во время закалки. Существует несколько методов определения коэффициента теплоотдачи, однако все они имеют определенные недостатки, такие как высокая точность измерения и ограниченный выбор скорости перемещения изотерм в пространстве.

Вопрос об актуальности точности и надежности полученных значений коэффициента теплоотдачи остается открытым. Для достижения данной цели исследования было поставлено задачей улучшение методов и устройств определения коэффициента теплоотдачи с целью повышения точности.

**Ключевые слова:** коэффициент теплоотдачи, устройство для определения коэффициента теплоотдачи, математическое моделирование, расчет погрешности определения коэффициента теплоотдачи, MSC Patran, MSC Sinda.

А. А. Serbolina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

## CREATION OF A DEVICE FOR CALCULATING THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT USING MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES.

**Abstract.** Heat treatment includes a number of procedures such as heating, holding and cooling of metals and metal alloys. Among various types of heat treatments, hardening significantly improves mechanical properties such as strength and hardness. Hardening of the material occurs quickly and intensively, which in turn leads to the formation of temperature stress that exceeds its limit. This can lead to non-uniform plastic deformations of the workpieces.

According to modern concepts, determining the heat transfer coefficient is an important element in studying the process of formation and reduction of stresses during hardening. There are several methods for determining the heat transfer coefficient, but they all have certain disadvantages, such as high measurement accuracy and a limited choice of the speed at which isotherms move in space.

The question of the relevance of the accuracy and reliability of the obtained values of the heat transfer coefficient remains open. To achieve this research goal, the task was to improve methods and devices for determining the heat transfer coefficient in order to increase accuracy.

**Key words:** heat transfer coefficient, device for determining heat transfer coefficient, mathematical modeling, calculation of the error of the heat transfer coefficient, MSC Patran, MSC Sinda.

### Введение

Термическая обработка включает в себя процессы нагрева, выдержки и охлаждения металлов и сплавов с целью изменения их структуры и свойств. Этот метод используется для целенаправленного изменения фазового состава, размеров кристаллических зерен, дефектов и других параметров материала, что позволяет получить желаемые свойства. В зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения существуют различные виды термической обработки. Среди них можно выделить такие процессы, как закалка, отпуск, отжиг, старение, нормализация и криогенная обработка. Например, закалка предполагает нагрев материала выше определенной критической температуры с последующим быстрым

охлаждением для создания неустойчивых структур. Этот процесс может вызвать термические напряжения и деформации, которые могут привести к негативным последствиям, таким как коробление материала и трещины на его поверхности [7].

Для уменьшения остаточных напряжений следует изучать процесс их формирования в сочетании с анализом теплообмена и определением температурного поля заготовки во время проведения процедуры закалки. Процесс теплообмена между изучаемым объектом и охлаждающей средой во время закалки описывается уравнением Фурье-Кирхгофа с граничными условиями третьего рода (1):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ где } 0 < x < L \quad (1)$$

начальные условия: при  $t=0, 0 \leq x \leq L: T=T_0$ ;

граничные условия: при  $x = 0: \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha_1 (T - T^{e1})$ , где  $t > 0, \alpha_1 > 0$ ;

при  $x = L: \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha_2 (T - T^{e2})$ , где  $t > 0, \alpha_2 > 0$ .

Исходя из формулы, один из главных факторов, влияющих на изменение температуры объекта во время закалки – это коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . Этот коэффициент зависит от нескольких параметров, таких как шероховатость поверхности, толщина окисленного слоя, режимы кипения жидкости, местоположение и состояние поверхности, обменивающей тепло [11]. В связи с этим, экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи является более предпочтительным.

Существуют разные способы и устройства для измерения коэффициента теплоотдачи, однако они обладают некоторыми недостатками, такими как низкая точность измерений и невозможность точного определения скорости перемещения изотерм. Вопрос об актуальности точности и надежности полученных значений коэффициента теплоотдачи остается открытым.

Для достижения данной цели исследования было поставлено задачей улучшение методов и устройств определения коэффициента теплоотдачи с целью повышения точности. Для достижения этой цели предполагается выполнение следующих задач:

1. Изучение существующих методов и устройств для расчета коэффициента теплоотдачи;

2. Поиск способов устранения недостатков имеющихся разработок.

#### **Анализ существующих способов и устройств.**

С прогрессом технологий и ростом производительности отдельных механизмов усиливается значимость теплообменных процессов в разнообразных тепловых установках и механизмах. В середине 19-го века ученые и специалисты начали уделять повышенное внимание изучению теплообмена. В научной литературе можно найти множество трудов, посвященных изучению распространения и передачи тепла, и многие из них по-прежнему актуальны, однако вопрос точности и надежности измерений коэффициента теплоотдачи по-прежнему остается открытым.

Для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи существует метод, основанный на измерении изменений температуры в элементе, который принимает тепло от окружающей среды, и учете закономерностей регулируемого теплового режима. Для этого измеряется скорость перемещения изотермы от поверхности, обменивающей тепло, путем измерения температуры тела на определенном расстоянии от нее и вычисления коэффициента с применением соответствующей формулы. В связи с нелинейными изменениями коэффициента теплоотдачи в процессе охлаждения, скорость перемещения изотермы также претерпевает нелинейные изменения. В данном контексте, получение точного определения скорости перемещения изотермы от поверхности к центру элемента, ответственного за передачу тепла, при использовании двух термодпар является сложной задачей [10].

Кроме того, существует техника, используемая для определения соотношения теплового выхода из твердых объектов, которая использует последовательный тепловой

поток. Этот подход предполагает передачу заранее определенного теплового потока через определенную часть поверхности образца (например, трубы или плиты), измерение температуры границы образца и окружающей среды, а затем вычисление соотношения теплового выхода с использованием закона Ньютона-Рихмана. Этот коэффициент может быть, как локальным, так и усредненным по всему образцу. Основной неточностью данного метода является необходимость затратить значительное количество времени на подготовку необходимого теплового режима и проведение самого эксперимента. [2].

Существует метод определения коэффициента теплоотдачи материалов, который включает использование модели Архимедова цилиндра (рис.1) и двух термопар. Однако этот подход имеет недостаточную точность измерений из-за недостаточного учета внутренних температурных градиентов в образце и определения среднего значения коэффициента теплоотдачи за полный период измерений. В конструкции нового устройства, термопары размещены на двух однородных поверхностях, которые при этом сохраняют одинаковую температуру. Одна из этих поверхностей находится на средней температуре по всей поверхности теплоприемника, в то время как вторая поверхность соответствует средней температуре по массе. Это расположение термопар позволяет точнее определить коэффициент теплоотдачи [3].

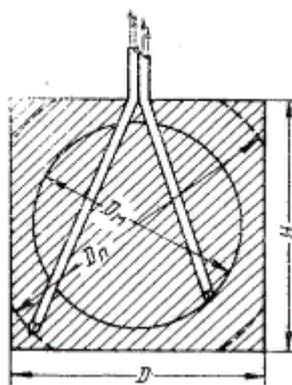


Рис. 1 – Архимедов цилиндр с двумя термопарами

Методика монтажа термопары с применением пробкового метода широко используется в процессе теплоизоляционных исследований [4]. Основная идея этой техники заключается в том, что необходимо прорезать цилиндрическое отверстие необходимой глубины в испытуемом материале, после чего в него должна быть аккуратно вставлена пробка, изготовленная из того же материала, в которую предварительно была помещена термопара. Термопара располагается в специально профилированных каналах на верхней поверхности и боковых сторонах пробки, как указано на рисунке 2.

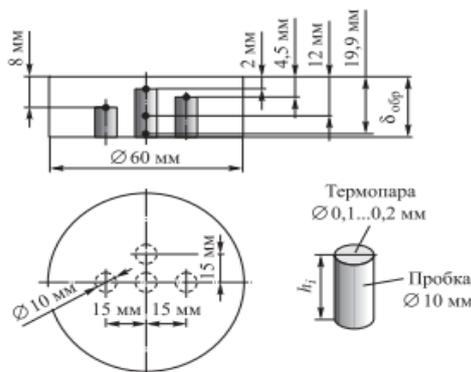
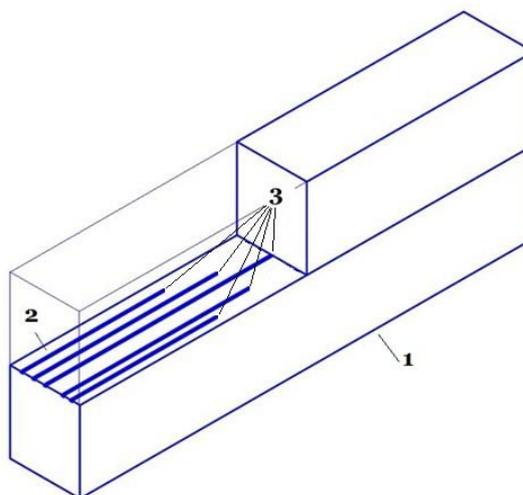


Рис. 2 – Установка термопар в образец при помощи пробки

Для расчёта коэффициента теплопроводности используется метод с использованием четырёхугольной призмы, разделённой на две части и оснащённой термопарами. Путём

измерения температурных показаний термопар во время охлаждения призмы можно определить коэффициент теплопроводности материала. Процедура определения коэффициента теплопроводности включает в себя нагревание (или охлаждение) образца в определенном диапазоне температур, запись данных термопар по времени и толщине, построение кривых охлаждения и их разделение на участки с линейным изменением для определения коэффициента передачи тепла на каждом участке и по всему образцу [6].



1 – опытный образец; 2 – пазы для установки термопар; 3 – термопары.

Рис. 3 – Опытный образец

Путем применения прибора для измерения коэффициента теплоотдачи не учитывается влияние внутренних полостей, где находятся термопары, на кривые охлаждения или нагревания. Это приводит к еще одному недостатку в процессе. В рамках исследования поставлена задача изучить, как размер отверстий для установки термопар влияет на точность определения коэффициента теплоотдачи [5]. При помощи компьютерного моделирования в программе MSC Patran и MSC Sinda была проведена оценка влияния размеров отверстия на отклонения кривых охлаждения, результаты которого показываются в графике.

#### Результаты исследования погрешности определения кривых охлаждения

Графики (рис.5), показывающие отклонение кривых охлаждения, из-за расположенных термопар.

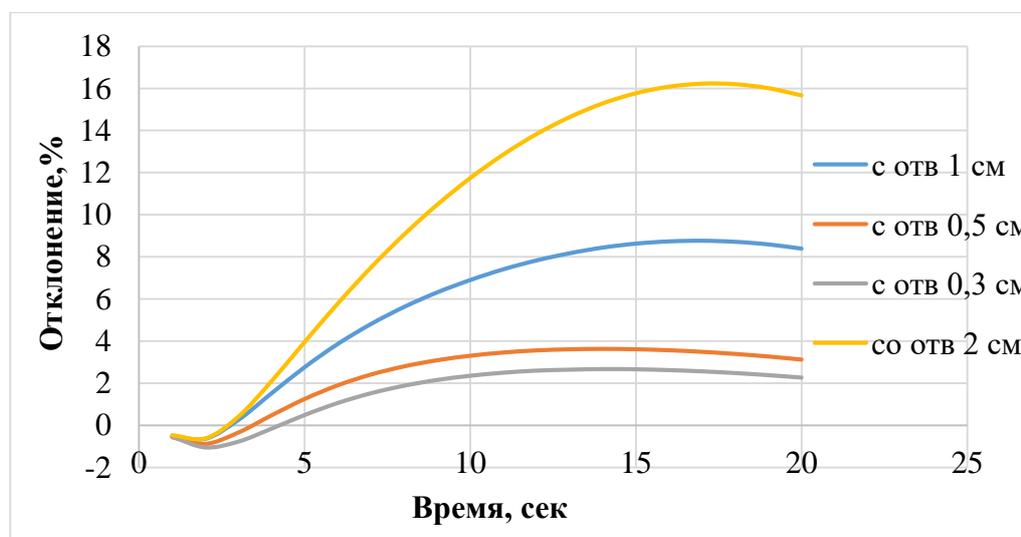
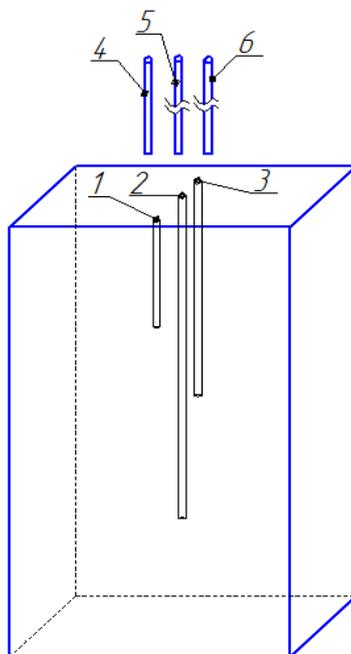


Рис. 5 – Отклонения кривых охлаждения со значением коэффициента теплоотдачи 55000 Вт/м<sup>2</sup>\*К

Из рассмотренного выше литературно – патентного обзора установки термопары в опытный образец делаем вывод, что не один из представленных выше способов нам не подходит и, отталкиваясь от способа установки термопар в опытный образец при помощи пробок, предлагаем свой способ.

В опытном образце создают круглое отверстие определенной глубины и вставляют в него пробку из аналогичного материала. Термопару закрепляют на дне пробки, а на боковой стороне делается выемка, чтобы избежать изгиба термопары. Подробности представлены на иллюстрации 6.



1,2,3 – Отверстия под пробку с термопарой; 4,5,6 – Пробки с термопарой.  
Рис. 6 – Способ установки термопары в опытный образец

В рамках проведения компьютерного моделирования была проведена оценка влияния размеров отверстия на отклонения кривых охлаждения от образца без отверстия, отклонения кривых охлаждения при отверстиях, находящихся на разной глубине, отклонения кривых охлаждения при одинаковом диаметре отверстий от образца без отверстия, полученные результаты расчетов помогают сделать вывод, что определенная компоновка в процессе моделирования позволяет получить кривые отклонения с достаточной точностью не больше 5% в диапазоне температур от 500°C до 35°C.

### **Заключение**

Исследования были проведены в области разработки методик и приборов для определения коэффициента теплоотдачи, который описывает процесс передачи тепла между средой закалки и обрабатываемым деталям. При изучении принципа их работы, основанного на измерении кривых охлаждения для мониторинга изменений температуры устройства на определенной глубине, последующее преобразование этих данных в значения коэффициента теплоотдачи выполняется. Однако недоступны доказательства точности получения кривых охлаждения и коэффициента теплоотдачи.

Без компьютерного моделирования решить подобную проблему практически невозможно и учитывая современное развитие программных комплексов, таких как MSC Nastran с применением пре- постпроцессора MSC Sinda.

Определенная компоновка в процессе моделирования позволяет получить кривые отклонения с достаточной точностью не больше 5% в диапазоне температур от 500°C до 35°C.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 146542 (СССР), МПК H05B3/00. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Е. Л. Суханов, Д. В. Будрин; заявл. 06.06.1961; 1962, Бюл. № 8.
2. Калинин В.А. Курепин В.И. Новоселов Р.Ф. /G01N25/18 - определения коэффициента теплопроводности (с помощью калориметрических измерений G01N 25/20; путем измерения сопротивления электрически нагреваемого тела G01N 27/18);
3. Патент 535491 (СССР), МПК G01N 25/00 Способ определения коэффициента конвективной теплоотдачи / Н.М. Цирельман; заявитель и патентообладатель Уфимский авиационный институт им. Орджоникидзе. - №535491; заявл. 21.06.1974; опубл. 15.11.1976.
4. Патент 146542 (СССР), МПК H05B3/00. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Е. Л. Суханов, Д. В. Будрин; заявл. 06.06.1961; 1962, Бюл. № 8.
5. Боровкова Т.В., Товстоног В.А, Елисеев В.Н. - Оценка точности измерения температуры термопарами при различных способах их размещения в объекте испытания. // 06.07.2013.
6. Александров А.А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: Дисс. ... канд. техн. наук / Александров А.А. – Иркутск: - 2015. – 50 с.
7. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. – М: Машиностроение, 1963.
8. Алюминиевые сплавы: структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgia, 1974.
9. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов: Изд-во Metallurgia, 1978. 5с.
10. Зуев В. М. Термическая обработка металлов. М.: Высшая школа, 1976.
11. Самохоцкий А. И., Парфеновская Н. Г. Технология термической обработки металлов. М.: Машиностроение, 1976.
12. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов/А.П. Гуляев. М.: Metallurgia, 2006.
13. М. Е. Блантер. Металловедение и термическая обработка. М.: Машгиз, 1963.
14. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение, 1972.
15. Мальцева Л.А., Гервасьев М.А., Кутыин А.Б. Материаловедение. Учебник. 2007.

## REFERENCES

1. Patent 146542 (USSR), IPC H05B3/00. Device for determining the heat transfer coefficient / E. L. Sukhanov, D. V. Budrin; appl. 06/06/1961; 1962, Bull. No. 8.
2. Kalinin V.A. Kurepin V.I. Novoselov R.F. /G01N25/18 - determination of the thermal conductivity coefficient (using calorimetric measurements G01N 25/20; by measuring the resistance of an electrically heated body G01N 27/18);
3. Patent 535491 (USSR), IPC G01N 25/00 Method for determining the convective heat transfer coefficient / N.M. Tsirelman; applicant and patent holder Ufa Aviation Institute named after. Ordzhonikidze. - No. 535491; appl. 06/21/1974; publ. 11/15/1976.
4. Patent 146542 (USSR), IPC H05B3/00. Device for determining the heat transfer coefficient / E. L. Sukhanov, D. V. Budrin; appl. 06/06/1961; 1962, Bull. No. 8.
5. Borovkova T.V., Tovstonog V.A., Eliseev V.N. - Assessment of the accuracy of temperature measurement by thermocouples for various methods of their placement in the test object. // 07/06/2013.

6. Aleksandrov A.A. Modeling of thermal residual stresses in the production of low-rigid parts: Diss. ...cand. tech. Sciences / Aleksandrov A.A. – Ir-kutsk: - 2015. – 50 p.
7. Abramov V.V. Residual stresses and deformations in metals. – M.: Mechanical Engineering, 1963.
8. Aluminum alloys: structure and properties of semi-finished products from aluminum alloys. – M.: Metallurgy, 1974.
9. Novikov I.I. Theory of heat treatment of metals: Metallurgy Publishing House, 1978. 5 p.
10. Zuev V. M. Thermal treatment of metals. M.: Higher School, 1976.
11. Samokhotsky A.I., Parfenovskaya N.G. Technology of thermal processing of metals. M.: Mechanical Engineering, 1976.
12. Gulyaev A.P. Metallurgy: textbook for universities/A.P. Gulyaev. M.: Metallurgy, 2006.
13. M. E. Blanter. Metallurgy and heat treatment. M.: Mashgiz, 1963.
14. Shepelyakovsky K.Z. Hardening of machine parts by surface hardening during induction heating. M.: Mechanical Engineering, 1972.
15. Maltseva L.A., Gervasyev M.A., Kutin A.B. Materials Science. Textbook. 2007.

#### **Информация об авторах**

*Серболina Александра Алиевна* – магистр, техник I категории кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: [serbolina\\_aa@irgups.ru](mailto:serbolina_aa@irgups.ru)

#### **Information about the authors**

Serbolina Alexandra Alievna master's degree, technician I category of the department of "Electric rolling stock", Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: [serbolina\\_aa@irgups.ru](mailto:serbolina_aa@irgups.ru)