

**Тураков И. А., Янченко А. В.**  
**I. A. Turakov, A. V. Yanchenko**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШТАМПОВКЕ**

## **EXPERIMENTAL SETUP FOR RESEARCH OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CONDUCTIVE PARTS DURING STAMPING**

**Тураков Игорь Андреевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: turakov.2017@gmail.com.

**Igor A. Turakov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: turakov.2017@gmail.com.

**Янченко Андрей Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Andrey V. Yanchenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В работе рассмотрена экспериментальная установка для проведения измерений коэффициента теплоотдачи плоских деталей и токопроводящих пластин с максимальным размером до двух метров. Разработана методика измерений и обработки данных на базе теории планирования эксперимента, выбраны измерительные приборы и необходимое электрооборудование для реализации проекта.

**Summary.** The paper discusses an experimental setup for measuring the heat transfer coefficient of flat parts and conductive plates with a maximum size of up to two meters. A measurement and data processing technique was developed based on the theory of experimental planning; measuring instruments and the necessary electrical equipment were selected for the implementation of the project.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, коэффициент теплоотдачи, токопроводящие детали, штамповка.

**Key words:** experimental setup, heat transfer coefficient, heat transfer coefficient, stamping.

УДК 621.365.3

**Введение.** В современном промышленном производстве штамповка является одним из важнейших процессов получения металлических изделий. При этом важным аспектом этого процесса является контроль температуры металла во время штамповки. При токовом нагреве важно понимать, как энергия передаётся и распределяется внутри токопроводящих деталей. Для изучения этих процессов предлагается специальная экспериментальная установка, разработанная для исследования коэффициентов теплоотдачи токопроводящих деталей при штамповке. Одной из главных проблем при расчёте тепловых процессов токоведущих элементов является трудность теоретического определения коэффициентов теплоотдачи на базе критериальных уравнений, допускающих некоторую неоднозначность в исходных данных, что особенно важно при нагреве до температур, близких к температуре плавления и пластической деформации металлов [1–7]. Поэтому для проверки адекватности теоретических расчётов необходимо проведение экспериментальных исследований для конкретных температур и материалов токоведущих элементов.

Целью предлагаемой установки является определение коэффициента теплоотдачи, который представляет собой меру эффективности передачи тепла между поверхностью детали и окружающей средой [8–10]. Он зависит от различных факторов, таких как свойства материала, состояние поверхности и характер процесса теплопередачи. Зная этот коэффициент, можно оптимизировать процесс штамповки, улучшить его энергетическую эффективность и качество получаемых изде-

лий. Экспериментальная установка состоит из нескольких основных компонентов (см. рис. 1). Токпроводящая деталь – это образец, который будет исследоваться. Обычно это металлические формы или пластины, соответствующие реальным деталям, используемым в производстве. Система управления (СУ) – это компонент, который отвечает за управление экспериментом, а также сбор и анализ данных. В измерительной системе (ИС) собираются данные от амперметра, вольтметра, пирометра и термопары [12; 13]. Трансформатор (Т1) является источником-преобразователем подаваемой энергии, участвует в контроле процесса нагрева заготовок, может быть использован для регулирования напряжения и тока, подаваемых на нагревательные элементы. Система управления, подключаемая к трансформатору, позволяет контролировать нагрев токпроводящей детали, менять частоту и амплитуду тока через заготовку, что открывает возможность изучения различных условий нагрева и их влияния на коэффициент теплоотдачи. Тиристорный регулятор напряжения (ТР) – это устройство, которое используется для изменения амплитуды и фазы напряжения в электрической цепи. Комбинация тиристорного преобразователя и трансформатора позволяет эффективно формировать и контролировать напряжение и ток, подаваемые на деталь.

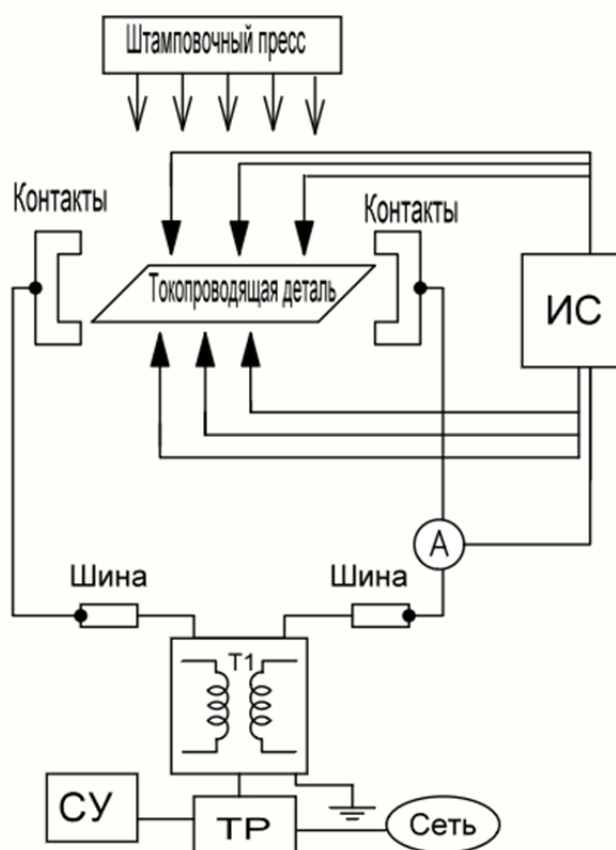


Рис. 1. Структурная схема системы

Экспериментальная установка предусматривает контроль потерь в шинопроводе между трансформатором и деталью, а также в контактах крепления детали, кроме этого, должна обеспечивать возможность изменять размеры и форму деталей в процессе исследования [14]. Это может быть достигнуто путём пропускания электрического тока через специально разработанные конструкции шинопроводов и контактов, к которым подключается нагреваемая и штампуемая деталь. Контакты и шины – важнейшие электропроводящие элементы, которые могут быть изготовлены из меди или других металлов с высокой электропроводностью. Они размещаются по контуру токпроводящей детали, обеспечивая минимизацию переходного контактного сопротивления. При расчётах нагрева необходимо учитывать теплоёмкость не только самой детали, но и примы-

кающих контактов и массивных токопроводов. Это может быть заложено в измерительную систему установки.

Известно, что количество теплоты, которое отводится с поверхности электрического аппарата в окружающую среду, определяется по Закону Ньютона:

$$P = K_T * F * (\theta - \theta_0),$$

где  $K_T$  – коэффициент теплоотдачи токопроводящих деталей, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $F$  – охлаждающая поверхность, м<sup>2</sup>;  $\theta$  и  $\theta_0$  – температуры поверхности и окружающей среды, °С.

Основная проблема заключается в определении значения  $K_T$  для различных условий охлаждающей среды, размеров и формы токопроводящей детали.

Для приближённых расчётов коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирическим формулам:

- для горизонтальных цилиндрических проводников, окрашенных краской и расположенных горизонтально в воздухе:

$$K_T = 10 * k_1 * (1 + k_2 * 10^{-2} * (\theta - \theta_0)),$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от диаметра проводника;

- для окрашенной краской прямоугольной шины, находящейся в воздухе, где большая сторона сечения расположена вертикально:

$$K_T = 9,2 * (1 + 0,9 * 10^{-2} * (\theta - \theta_0));$$

- для цилиндрических катушек:

$$K_T = 2,1 * [1 + 0,005(\theta - \theta_0)] / \sqrt[3]{F}.$$

Теоретически  $K_T$  можно рассчитать с использованием известного критерия Нуссельта по формуле

$$N_u = K_T * \frac{L}{\lambda},$$

где  $L$  – определяющая размер нагреваемой детали, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·К.

Критерий  $N_u$  является функцией других критериев, в общем виде:

$$N_u = f(G_r, P_r, R_e, F_o),$$

где  $N_u, G_r, P_r, R_e, F_o$  – соответственно критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса, Фурье.

Для свободной конвекции в неограниченном пространстве справедливо выражение

$$N_{um} = C * [G_r * P_r]_m^n * \left(\frac{P_{rm}}{P_{rc}}\right)^{0.25}, \quad (1)$$

где  $C$  и  $n$  – это коэффициенты, зависящие от произведения  $[G_r * P_r]$ ;  $m$  – индекс температуры среды.

Для воздуха  $P_{rm} \cong P_{rc}$ , и поэтому выражение (1) можно упростить:

$$N_{um} = C * [G_r * P_r]_m^n.$$

Однако неоднозначность характерного размера детали и изменчивость параметров охлаждающей среды ведёт к относительной точности расчёта  $K_T$  по уравнению (1). Поэтому адекватность расчёта следует уточнять с помощью натуральных экспериментов. Согласно теории планирования эксперимента, необходимо выбрать вид регрессионной модели зависимости  $K_T$  от основных влияющих независимых факторов.

Для плоских шин и пластин (см. рис. 2) такими факторами могут являться: температура  $\theta$ , площадь теплоотдачи  $S$ , соотношение сторон листа  $a/b$  и угол наклона листа относительно гори-

зонтали  $\varphi$ . При отсутствии априорной информации о линейности однофакторных зависимостей следует воспользоваться мультипликативной моделью:

$$K_T = b_0 * \theta^{b_1} * S^{b_2} * \varphi^{b_3} * \left(\frac{a}{b}\right)^{b_4}. \quad (2)$$

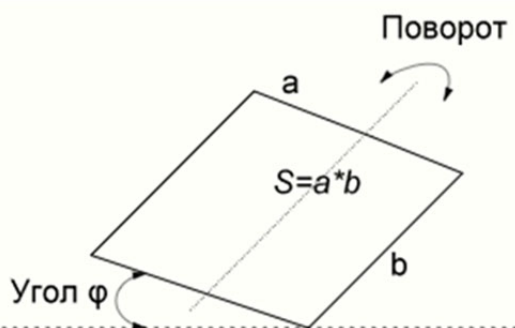


Рис. 2. Эскиз токопроводящего листа

Такая модель может отражать нелинейные зависимости и при поиске коэффициентов легко переводится в линейный вид. Далее необходимо задать диапазоны изменения каждого фактора. По техническим условиям производства штампованных деталей из титановых пластин назначаем следующие диапазоны значений:

- изменение температуры листа от 20 °С до 700 °С;
- площадь листа от 0,25 до 1,5 м<sup>2</sup>;
- угол наклона от 0° до 90°;
- соотношение сторон  $a/b$  от 0,25 до 0,5.

Мультипликативная модель может быть преобразована в линейную модель путём замены переменных в форму:

$$Y = B_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4,$$

где  $Y = \lg K_T$ ;  $B_0 = \lg b_0$ ;  $X_1 = \lg \theta$ ;  $X_2 = \lg S$ ;  $X_3 = \lg \varphi$ ;  $X_4 = \lg \frac{a}{b}$ .

Для обратного перехода к форме (2) необходимо изменить только один коэффициент  $b_0 = \exp(B_0)$ . План эксперимента для линейной модели представлен в табл. 1.

Таблица 1

Дробнофакторный план эксперимента (полуреплика)

Номер опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y$
1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	-1	+1	+1	-1	$Y_2$
3	+1	+1	-1	+1	-1	$Y_3$
4	+1	-1	-1	+1	+1	$Y_4$
5	+1	+1	+1	-1	+1	$Y_5$
6	+1	-1	+1	-1	-1	$Y_6$
7	+1	+1	-1	-1	-1	$Y_7$
8	+1	-1	-1	-1	+1	$Y_8$

После проведения эксперимента коэффициенты модели вычисляются по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N};$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i * x_{ji}}{N},$$

где  $i$  – номер опыта;  $j$  – номер фактора;  $N$  – количество опытов плана.

Таким образом, может быть получена четырёхфакторная модель для оценки коэффициента теплоотдачи. Подставляя его в уравнения нагрева и охлаждения токоведущей пластины, можно получить семейство кривых для различных условий теплоотдачи и мощностей нагрева (см. рис. 3):

$$\vartheta = \vartheta_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \vartheta_n * e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $\vartheta_{уст}$ ,  $\vartheta_H$  – установившееся и начальное значения температуры.

Сравнивая полученные кривые с реальными графиками нагрева, можно уточнять значения  $K_T$  и прогнозировать температуры нагрева новых заготовок. Следует отметить, что условия теплоотдачи влияют на постоянную времени нагрева только в условиях продолжительного увеличения температуры. В режимах короткого замыкания на скорость нагревания в основном влияет собственная теплоёмкость детали. Это соответствует начальным прямолинейным участкам кривых нагрева.

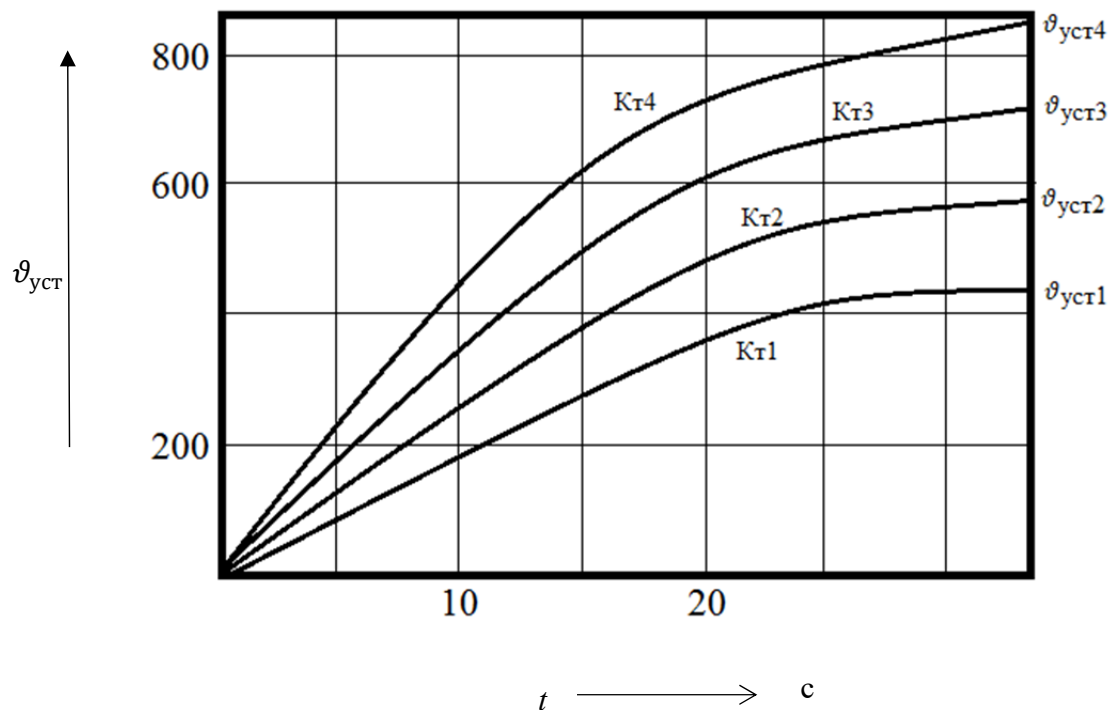


Рис. 3. График нагрева заготовок для разных  $K_T$  и  $\vartheta_{уст}$

При нагреве листовых немагнитных заготовок переменным током следует принимать во внимание проявление поверхностного эффекта. В многослойных конструкциях с параллельными проводниками необходимо учитывать эффект близости. В этом случае в модель  $K_T$  нужно вводить дополнительные факторы толщины листа и расстояния между параллельными листами. Указанные эффекты могут влиять на тепловые потери исследуемых заготовок. Случайные погрешности, возникающие при измерении температур, можно учитывать повторением опытов в каждой точке плана с последующей обработкой.

В заключение отметим, что установка имеет решающее значение для понимания и оптимизации процессов отвода тепла при производстве листовых штампованных деталей. Используя уточнённые коэффициенты теплоотдачи, можно оптимизировать процесс штамповки и повысить эффективность операций нагрева, а также повысить технику безопасности на производстве [11, 15]. Предлагаемая экспериментальная установка может восполнить пробелы в справочных данных для коэффициентов теплоотдачи токоведущих деталей различной формы для конкретного производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов, В. А. Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие / В. А. Рогов, Г. Г. Поздняк. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.
2. Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль [и др.]; под ред. Г. В. Буткеевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.

3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
4. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Михаринский. – Минск: Высш. шк., 1985. – 286 с.
5. Скаков, С. В. Определение коэффициента теплоотдачи при течении воздуха в трубе / С. В. Скаков. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. – 18 с.
6. Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции / под ред. В. И. Субботина, Д. Н. Сорокина, Д. М. Овечкина, А. П. Кудрявцева. – М.: Наука, 1969. – 207 с.
7. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче / Е. А. Краснощеков, А. С. Сухомел. – М.: Высшая школа, 1980. – 288 с.
8. Новиков, Ю. Н. Теория и расчёт электрических аппаратов / Ю. Н. Новиков. – Л.: Энергия, 1970. – 327 с.
9. Смирнов, М. А. Основы термической обработки стали / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлёв. – М.: Наука и технологии, 2002. – 519 с.
10. Ойматова, Х. Х. Определение коэффициента теплопроводности тернарных систем с учётом изменения температуры и коэффициента теплоотдачи / Х. Х. Ойматова // *Universum: технические науки*. – 2022. – № 2-1 (95). – С. 53-56.
11. Попов, Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. – 480 с.
12. Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина [и др.] // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2023. – № I (65). – С. 94-101.
13. Саяпина, П. О. Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина, Р. Ф. Крупский // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2023. – № V (69). – С. 23-29.
14. Учёт осевых нагрузок при проектировании электромеханических приводов / С. Н. Иванов [и др.] // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2022. – № I-1 (57). – С. 63-67.
15. Штамповка деталей с электротермическим воздействием / Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин, М. А. Серафимов [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2008. – № 2. – С. 18-24.