

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПЛАЗМЕННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

А. И. Веремейчик¹, С. Р. Онысько², М. И. Сазонов³, В. М. Хвйсевиц⁴

¹ К. физ.-мат. н., доцент, старший научный сотрудник испытательного центра УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

² Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: osr@tut.by.

³ Д. т. н., профессор, профессор кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@mail.ru.

⁴ К. т. н., доцент, профессор кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisevich@bstu.by

Реферат

Разработана и реализована методика определения температурных полей в приповерхностной зоне деталей при плазменно-механической обработке, основанная на решении обратной задачи теплопроводности, использующая результаты модельных экспериментов в лабораторных условиях. Разработанная методика позволяет определить оптимальные параметры нагрева в зависимости от режимов механической обработки, материала обрабатываемой детали и состояния поверхности.

Ключевые слова: температурные поля, приповерхностная зона детали, плазменно-механическая обработка, теплопроводность, параметры нагрева.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE FIELDS DURING PLASMA-MECHANICAL PROCESSING OF LARGE-SIZED PARTS

A. I. Veremeichik, S. R. Onysko, M. I. Sazonov, V. M. Khvisevich

Abstract

A method for determining temperature fields in the near-surface zone of parts during plasma-mechanical processing based on solving the inverse problem of thermal conductivity, using the results of model experiments in laboratory conditions, has been developed and implemented. The developed method makes it possible to determine the optimal heating parameters depending on the modes of machining, the material of the workpiece and the surface condition.

Keywords: temperature fields, near-surface zone of part, plasma-mechanical treatment, thermal conductivity, heating parameters.

Введение

В последнее время в машиностроении широкое распространение получили стали и сплавы, обладающие высокими прочностными характеристиками и особыми физическими свойствами. Применение таких материалов вызывает существенные технологические трудности, связанные со сложностью их обработки резанием. Известно много технических решений, позволяющих повысить эффективность процесса обработки. Особое место среди этих способов занимает применение предварительного нагрева обрабатываемых материалов [1, 2], оказывающего комплекс физико-химических воздействий на материал и обеспечивающего такое изменение механических свойств материала, при котором улучшается его обрабатываемость. Среди различных способов нагрева особо выделяется плазменно-дуговой, обеспечивающий высокую локализацию тепла, стабильность работы, большую скорость нагрева и простоту управления. Такой метод отличается универсальностью и обеспечивает высокую эффективность плазменно-механической обработки (ПМО) материалов. Сжатая плазменная дуга может оказывать на металл воздействие двух видов: тепловое (передача тепла потоком заряженных частиц и нагретого газа) и механическое (удаление части нагретого и расплавленного металла с поверхности и образование на ней канавки).

Применение ПМО требует решения целого комплекса задач, связанных с изучением воздействия плазменной дуги с поверхностью металла при различных режимах источника и геометрии тел, расчетом температурных полей в нагреваемых телах с учетом зависимости теплофизических характеристик материала от температуры, выяснением характера изменения механических и физико-химических характеристик обрабатываемых материалов в зоне нагрева и влияния этих характеристик на обрабатываемость материала, и с учетом этого разработка новых, наиболее подходящих для ПМО плазматронов, конструкций станков и т.д.

Анализ литературных источников [1–23] показывает, что основной физической характеристикой плазменного нагрева является температурное поле, значение которого позволяет оценить темпера-

туру в разных точках зоны термического воздействия в различные моменты времени, скорость нагрева и охлаждения, а также структурное состояние и фазовый состав поверхностного слоя. Важным этапом в разработке технологии процесса ПМО является создание методики расчета полей температур в обрабатываемой детали от движущегося источника тепла с учетом температурных зависимостей физико-механических свойств обрабатываемого материала [13–17]. Знание полей температур позволит определить оптимальные режимы процесса ПМО: скорость обработки, температуру нагрева, глубину резания, подачу, выбор плазматрона и его расположение по отношению к обрабатываемой детали и т.д. Актуальной является задача определения температурных полей при ПМО чугунов, особенностью обработки которых является склонность к трещинообразованию при определенных градиентах температурных полей и скоростях их изменения, что требует обеспечения движения кромки обрабатывающего инструмента по строго определенной для соответствующего материала изотерме.

Методика исследований

Экспериментальное определение температурных полей при ПМО связано с необходимостью определения этих полей в тонких приповерхностных слоях обрабатываемых деталей, что при любой методике приводит к неизбежному их искажению, а также с необходимостью работать при достаточно высоких температурах. Методики, основанные на измерениях плотности тепловых потоков, встречают те же трудности. Попытки теоретического расчета температурных полей на основе непосредственного решения прямых задач теплопроводности представляется малоперспективным по следующим причинам: во-первых, необходимы исследования взаимодействия плазменной струи с поверхностью; во-вторых, сама постановка прямых задач теплопроводности при ПМО внутренне противоречива: задание граничных условий в очень сильной степени определяет температурные поля в приповерхностном слое, а само это задание может быть осуществлено очень приближенно; в-третьих, во многих случаях при ПМО осу-

существляется движение обрабатываемой детали, что усугубляет трудности, связанные с задачами взаимодействия плазменной дуги с поверхностью и заданием граничных условий.

Перспективным подходом, позволяющим преодолеть указанные трудности, является метод, основанный на применении обратных задач теплопроводности [5, 6, 9, 10, 23]. Для проведения таких исследований сначала проводится эксперимент по определению температуры либо плотности теплового потока как функции времени в точках, достаточно удаленных от приповерхностного слоя, при известных граничных условиях на всех поверхностях обрабатываемой детали (кроме той поверхности, которая подвергается воздействию плазменной дуги). Это устраняет трудности, связанные с неизбежным искажением температурных полей и необходимостью работы при высоких температурах. На основе решения обратной задачи теплопроводности восстанавливаются характеристики теплового нагружения (поле температур или плотность теплового потока) на поверхности обрабатываемой детали. Затем на основе решения прямой задачи теплопроводности находится температурное поле в приповерхностном слое. Следует отметить, что некоторые методики решения обратной задачи теплопроводности позволяют уже на этом этапе определить температурное поле в приповерхностном слое. Тогда в качестве истинного температурного поля можно принять поле, получающееся усреднением температурных полей, получаемых при решении обратной задачи теплопроводности и последующего решения прямой задачи. Вопросы точности восстановления характеристик теплового воздействия при различных подходах к решению обратных задач недостаточно изучены. В основном указанная точность устанавливается эмпирически в модельных экспериментах следующим образом. Сначала решается прямая задача теплопроводности для некоторой модели теплового нагружения на поверхности тела при известных граничных условиях на остальных поверхностях. Получающиеся значения температуры как функции времени в некотором числе внутренних точек или точек, лежащих на поверхностях, не подверженных температурному воздействию, являются исходными для решения обратной задачи, решив которую, восстанавливают условия теплового нагружения на поверхности и сравнивают с заданным в модели. Сравнение позволяет выявить точность восстановления.

Рассмотрим задачу определения температурного поля в приповерхностном слое пластины с размерами a, b, c , нагреваемой в плоскости $y = b$ плазматроном, движущимся со скоростью V вдоль оси X (рисунок 1). Такая задача возникает, например, при оптимизации процесса строгания с предварительным плазменным подогревом. При достаточно больших скоростях движения плазматрона, имеющих место в реальных условиях, с достаточной степенью точности можно пренебречь распространением тепла в направлении оси Ox .

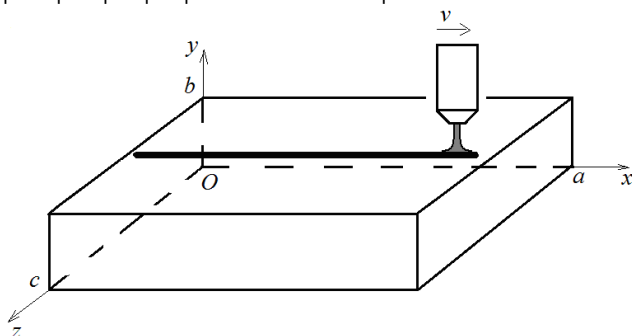


Рисунок 1 – Схема температурного нагружения пластины

Полагая, что нижняя поверхность адиабатически изолирована и что при экспериментальных исследованиях определяется температура на грани $y = 0$, получаем двумерную нестационарную обратную задачу теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad 0 < y < b, \quad 0 < z < c, \\ 0 < \tau \leq \tau_m, \quad T(x, y, z, 0) = \varepsilon(x, y, z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, y, c, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0,$$

$$T(x, 0, z, \tau) = f(x, z, \tau),$$

где T – температура, a – коэффициент температуропроводности,

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad \lambda - \text{коэффициент теплопроводности, } c - \text{удельная массовая теплоемкость, } \gamma - \text{плотность тела, } \varepsilon, f - \text{известные функции.}$$

Необходимо найти функцию $q(x, z, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(x, b, z, \tau)}{\partial y}$,

$$q(x, z, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(x, b, z, \tau)}{\partial y},$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Таким образом, для определения плотности теплового потока проводятся экспериментальные исследования по определению поля температур на адиабатически изолированной нижней грани пластины при движении плазматрона вдоль верхней грани. Если при этом использовать пластину с большими размерами b и c , то отпадает необходимость адиабатической изоляции боковых граней. В соответствии с [5] одним из перспективных направлений в решении обратных задач является использование экстремальных постановок с привлечением градиентных методов минимизации функционала невязки. На их основе достаточно просто строятся регуляризирующие алгоритмы решения некорректно поставленных задач [6]. Кроме того, как показано в [7], при использовании методов скоростного спуска и сопряженных градиентов не требуется задание близкого начального приближения, ибо они устойчивы к ошибкам аппроксимации, округления и сглаживания.

Рассмотрим обратную задачу теплопроводности (1) как задачу

$$\text{отыскания функции } \Phi(x, z, \tau) = -\frac{q(x, z, \tau)}{\lambda}, \text{ минимизирующей}$$

$$\text{функционал } I(\Phi) = \int_0^{\tau_m} d\tau \int_0^c (T(0, z, \tau) - f(z, \tau))^2 dz \text{ при краевых}$$

условиях (1). Градиент функционала может быть получен при рассмотрении сопряженной задачи:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = -a \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right), \quad 0 < y < b, \quad 0 < z < c, \\ 0 < \tau \leq \tau_m, \quad \psi(y, z, \tau_m) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \psi(y, 0, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial \psi(y, c, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial \psi(b, z, \tau)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \psi(0, z, \tau)}{\partial y} = 2 \cdot [T(0, z, \tau) - f(z, \tau)].$$

Минимизацию функционала производим с помощью метода сопряженных градиентов [8]. Построим итерационную последовательность вида $P^{k+1}(z, \tau) = P^k(z, \tau) - \beta_k \xi^k(z, \tau)$, где $\xi^k(z, \tau)$ – функции, определяющие направление спуска, β_k – коэффициенты, определяющие глубину спуска при переходе к следующему приближению, находятся из условия $\frac{\partial J[P^{k+1}(z, \tau)]}{\partial \beta} = 0$ и определяют-

$$\text{ся выражением:}$$

$$\beta_k = \frac{\int_0^{\tau_m} d\tau \int_0^c (T(0, z, \tau) - f(z, \tau)) \Delta T(\xi(z, \tau), z, \tau) dz}{\int_0^{\tau_m} d\tau \int_0^c (\Delta T(\xi(z, \tau), z, \tau))^2 dz}, \quad (3)$$

где приращение температуры $\Delta T(\xi(z, \tau), z, \tau)$ определяется из решения следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} \right), \quad 0 < y < b, \quad 0 < z < c, \\ 0 < \tau \leq \tau_m, \quad \Delta T(y, z, 0) = 0, \\ \frac{\partial \Delta T(y, 0, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial \Delta T(y, c, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial \Delta T(0, z, \tau)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \Delta T(b, z, \tau)}{\partial y} = \Delta P(z, \tau).$$

Зависимость $q(x, z, \tau)$ представляется в виде:

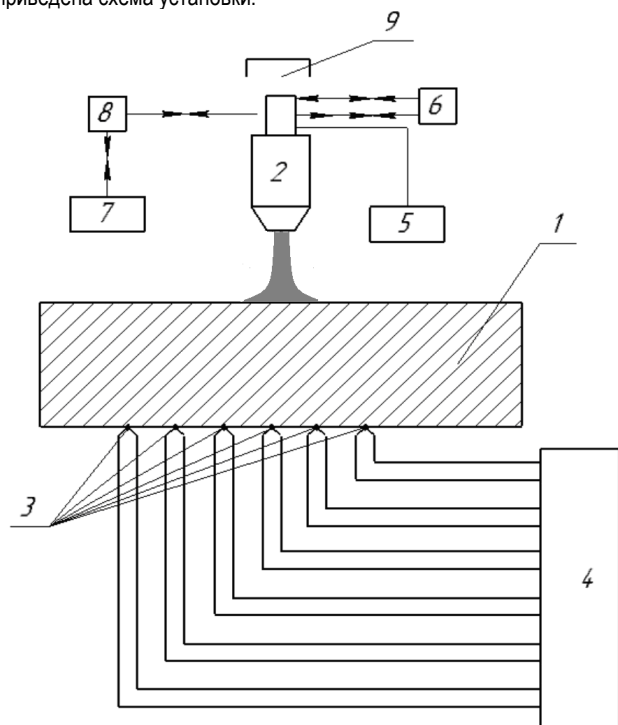
$$q(x, z, \tau) = q(x_0 + v\Delta\tau, z, \tau + \Delta\tau). \quad (5)$$

Полученные результаты для каждого значения z аппроксимировались при помощи суммы двух нормальных распределений, одно из которых приближенно описывает тепловой поток от струи, второе – тепловой поток от дуги, пространственные размеры которой меньше, т. е. поверхностная плотность теплового потока гораздо выше:

$$q(x, \tau) = q_{струя} + q_{дуга} = \frac{q_{01}}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{q_{02}}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (6)$$

Найденные значения $q(x, z, \tau)$ являются исходными данными для решения прямой краевой задачи по определению полей температур в пластине при реальных условиях наличия теплообмена на боковых и нижней гранях. Если пренебречь краевыми эффектами, возникающими при прохождении плазматрона вблизи боковых граней, то граничные условия теплообмена на боковых и нижней гранях в реальных условиях обработки детали могут быть поставлены либо в форме, учитывающей теплообмен по закону Ньютона [11, 23], либо в форме задания их температур в зависимости от условий закрепления детали.

Эксперименты по измерению полей температур проводились на прямоугольных пластинах с размерами 95×65×5 мм. На рисунке 2 приведена схема установки.



1 – сечение пластины, 2 – плазматрон, 3 – температурные датчики (термопары), 4 – измерительный прибор, 5 – источник электропитания плазматрона, 6 – система охлаждения плазматрона, 7 – воздушный компрессор, 8 – расходомер, 9 – система вентиляции

Рисунок 2 – Схема установки для измерения температурных полей в пластине

На нижней грани обрабатываемой пластины 1 заделаны термопары 2, от которых сигнал поступает на измерительный прибор 4. Вдоль верхней грани пластины в горизонтальном направлении перемещается плазматрон 2, снабженный механизмом перемещения, имеющим две степени свободы. Энергопитание плазматрона осуществляется от источника постоянного тока 5, который позволяет менять ток плазменной дуги от 50 А до 350 А. Плазмообразующий газ подается из компрессора 7, а его расход контролируется расходомером 8. Для защиты основных узлов плазматрона от перегрева к нему подведена система охлаждения 6. Удаление пыли, паров, аэрозолей и других вредных веществ осуществляется вытяжной системой вентиляции 9. Управление перемещением плазматрона во время его работы осуществляется дистанционно.

Следует отметить, что изложенный подход может быть распространен на другие условия проведения исследований, например, на случай другой геометрии обрабатываемой детали или на исследование по известной плотности теплового потока на нижней грани.

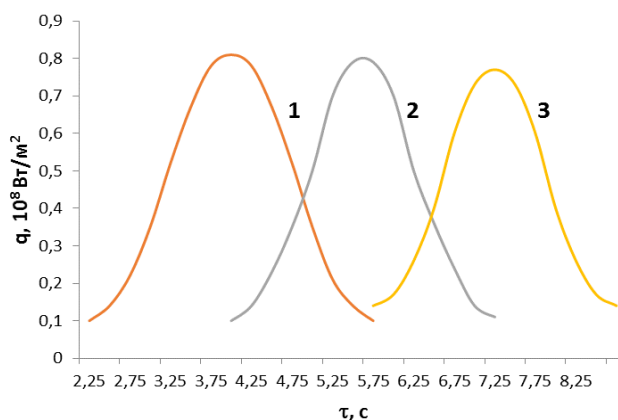
Некоторые результаты и их обсуждение

Для исследований использовались значения коэффициентов теплопроводности λ и теплоемкости C в зависимости от температуры согласно [24, 25].

С помощью описанной выше методики была проведена серия опытов по определению полей температур на нижней грани пластины с целью восстановления методами обратных задач теплообмена температурных полей на верхней поверхности и дальнейшего расчета температурного поля в приповерхностном слое пластины. В качестве основных параметров и диапазонов их варьирования были приняты: ток дуги $I=50-300$ А, расход плазмообразующего газа $G=1,0-3,5$ м³/ч, диаметр канала сопла $d=4-6$ мм, расстояние между срезом сопла и поверхностью детали $H=30-90$ мм, скорость движения плазменной дуги $v=5-40$ мм/с, напряжение дуги не менялось и принималось равным $U=100$ В.

Температура нагрева измерялась одновременно в нескольких точках поверхности пластины термопарами, расположенными вдоль осевой линии перемещения плазменной дуги и на различных расстояниях перпендикулярно к осевой линии. Схема расположения термопар приведена на рисунке 2. Полученные данные были обработаны и использованы для определения оптимальных режимов нагрева.

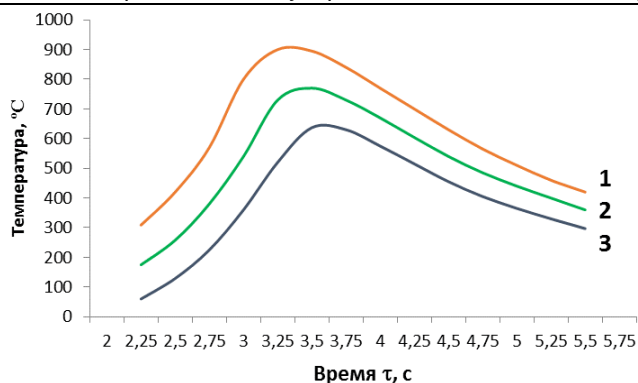
По результатам вычислений получены распределения температуры в приповерхностном слое. На рисунках 3, 4 приведены типичные результаты теоретических исследований температурного поля и теплового потока от времени.



$I=90$ А, $U=110$ В, $z=0,08$ м

1 – $x=0,1$ м, 2 – $x=0,15$ м, 3 – $x=0,2$ м

Рисунок 3 – Результаты расчета функции $q(x, z, \tau)$ при скорости движения плазменной дуги, $v=30$ мм/с



$v=30$ мм/с, $I=90$ А, $U=110$ В, $z=0,08$ м, $x=0,1$ м

1 – на глубине 0,1 мм, 2 – на глубине 0,2 мм, 3 – на глубине 0,3 мм

Рисунок 4 – Типичные расчетные зависимости температуры в приповерхностном слое стального образца от времени

Выполнен микроструктурный анализ стали при ПМО. Металлографический анализ деталей с использованием оптической и электронной микроскопии показал, что зона теплового воздействия плазменной дуги имеет форму сегмента (рисунок 5) и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом [26].

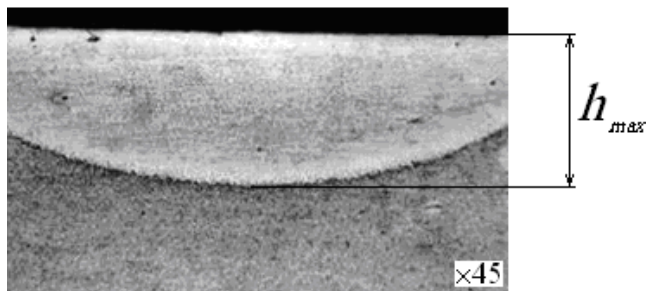


Рисунок 5 – Микроструктура поверхностного слоя стали 45 в зоне влияния плазменной дуги

Заключение

Разработана и реализована методика определения температурно-го поля на поверхности и в приповерхностной зоне образцов в форме параллелепипеда при ПМО, основанная на решении обратной задачи теплопроводности, использующая результаты модельных экспериментов в лабораторных условиях. Полученные результаты экспериментов позволили определить оптимальные режимы обработки.

Исследования и расчет температурных полей, а также изучение микроструктуры, прочностных и пластических свойств металла, подвергаемого плазменному нагреву, показали, что действие плазменной дуги может носить как упрочняющий, так и разупрочняющий характер, что определяется комплексом еще не до конца изученных факторов. Так как скорости плазменного нагрева металла составляют порядка 10^3 – 10^5 град/с [27], то прохождение в нем фронта тепловой волны может привести к изменению его физико-механических свойств. Возникающие в приповерхностном слое нагреваемого материала напряжения могут оказывать влияние на характер стружкообразования и на склонность к трещинообразованию в зоне резания, что приводит к эффекту, сравнимому с опережающим пластическим деформированием [14, 15]. Известно, что резкий плазменный нагрев хрупких материалов может вызвать образование трещин, поэтому в некоторых случаях необходимо уменьшить мощность плазменной дуги или повысить диаметр сопла плазматрона и увеличить скорость термообработки.

Эксперименты показали, что эффективность ПМО достигается в случаях, когда форма режущей части инструмента будет соответствовать форме сегмента (рисунок 5), а размеры его режущей части будут превышать размеры сегмента на 5–30 %. В зависимости от h_{max} определяется рациональная глубина резания.

В дальнейших исследованиях планируется установить оптимальное расстояние от плазматрона до резца, зависящее от режи-

мов механической обработки, материала обрабатываемой детали и состояния поверхности, других факторов.

Данные распределения температурных полей необходимы для оценки напряженно-деформированного состояния тел при воздействии плазменной дуги с целью выявления зон трещинообразования.

Список цитированных источников

1. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. – Минск : Высшая школа, 1988. – 155 с.
2. Кобяков, О. С. Поверхностное упрочнение сталей при микродуговым нагреве металла / О. С. Кобяков, Е. Г. Гинзбург. – Минск : Машиностроение, 1985. – Вып.10. – С. 127–130.
3. Тёмкин, А. Г. Обратные задачи теплопроводности / А. Г. Темкин. – М. : Энергия, 1973. – 464 с.
4. Теоретические исследования температурных полей при воздействии плазменной струи по результатам экспериментальных данных / А. И. Веремейчик [и др.] // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – Вып. 32. – С. 94–99.
5. Пилипенко, Н. В. Методы и приборы нестационарной теплотри на основе решения обратных задач теплопроводности / Н. В. Пилипенко. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. – 180 с.
6. Алифанов, О. М. Регулярирующие градиентные алгоритмы для решения обратных задач теплопроводности / О. М. Алифанов, С. В. Румянцев // ИФЖ. – 1980. – Т. 39. – № 2. – С. 253–258.
7. Алифанов, О. М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / О. М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
8. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – М. : Высш. шк., 1994. – 544 с.
9. Коздоба, Л. А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л. А. Коздоба, П. Г. Круковский. – Киев : Наукова думка, 1982. – 360 с.
10. Керов, Н. В. Решение двухмерной ОЗТ в цилиндрической системе координат / Н. В. Керов // ИФЖ. – Т. 43, № 5. – С. 752–756.
11. Юдаев, Б. Н. Теплопередача. / Б. Н. Юдаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1981. – 319 с.
12. Вереина, Л. И. Конструкции и наладка токарных станков / Л. И. Вереина, М. И. Краснов. – М. : Инфра-М, 2017. – 48 с.
13. Кунин, В. С. Опыт внедрения плазменно-механической обработки / В. С. Кунин. – Л., 1982. – 28 с.
14. Резников, Н. А. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / Н. А. Резников, М. А. Шатерин, В. С. Кунин, Л. А. Резников; под общ. ред. Н. А. Резникова. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.flagman-pro.ru/tech/plasm_mech_process/upmo-419/
16. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / А. Н. Резников, М. А. Шатерин, В. С. Кунин, Л. А. Резников; под общ. ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1986. – 231 с.
17. Анализ теплофизических свойств сталей с целью применения для решения нелинейных задач теории нагрева / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № (2-2). – С. 17–22.
18. Подураев, В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1977. – 303 с.
19. Исследование температурных полей и термонапряжений в стальных деталях при поверхностной плазменной закалке / С. М. Босяков [и др.] // Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Минск, 2008. – С. 115–118.
20. Рыкалин, Н. Н. Тепловой поток в тело, взаимодействующее с плазменной струей / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, И. Д. Кулагин // ТВТ. – 1965. – № 6. – С. 25–27.
21. Определение температурных полей при воздействии высококонцентрированного в телах источника нагрева / А. И. Веремейчик [и др.] // Механика. Научные исследования и учебно-

- методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Белорус, гос. ун-т транспорта. - Гомель, 2009. - Вып. 2. - С. 21-27.
22. Осовец, С. В. Расчет нестационарного теплового состояния плиты при ее нагреве перемещающимся источником / С. В. Осовец [и др.] // Инженерно-физический журнал. - 2000. - Т. 73. - № 4. - С. 757-760.
 23. Беляев, Н. М. Методы теории теплопроводности : в 2-х т. / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. - М.: Высшая школа, 1978. - Т. 1. - 327 с. - Т. 2. - 304 с.
 24. Варгафтик, Н. Б. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Н. Б. Варгафтик. - М. : Госэнергоиздат, 1956. - 340 с.
 25. Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И. К. Кикоина. - М. : Атомиздат, 1976. - 1008 с.
 26. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. - М. : Машиностроение, 1985. - 485 с.
 27. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cyberpedia.su/25xb1a7.html>.
- References**
1. Spiridonov, N. V. Plazmennye i lazernye metody uprochneniya detalej mashin / N. V. Spiridonov, O. S. Kobayakov, I. L. Kupriyanov. - Minsk : Vysshaya shkola, 1988. - 155 s.
 2. Kobayakov, O. S. Poverhnostnoe uprochnenie staley pri mikrodugovom nagreve metalla / O. S. Kobayakov, E. G. Ginzburg. - Minsk : Mashinostroenie, 1985. - Vyp.10. - S. 127-130.
 3. Tyomkin, A. G. Obratnye zadachi teploprovodnosti / A. G. Temkin. - M. : Energiya, 1973. - 464 s.
 4. Teoreticheskie issledovaniya temperaturnyh polej pri vozdeystvii plazmennoj strui po rezul'tatam eksperimental'nyh dannyh / A. I. Veremejchik [i dr.] // Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika. - 2017. - Vyp. 32. - S. 94-99.
 5. Pilipenko, N. V. Metody i pribory nestacionarnej teplometrii na osnove resheniya obratnyh zadach teploprovodnosti / N. V. Pilipenko. - SPb. : SPbGU ITMO, 2011. - 180 s.
 6. Alifanov, O. M. Regularizuyushchie gradientnye algoritmy dlya resheniya obratnyh zadach teploprovodnosti / O. M. Alifanov, S. V. Romyancev // IFZH. - 1980. - Т. 39. - № 2. - S. 253-258.
 7. Alifanov, O. M. Identifikaciya processov teploobmena letatel'nyh apparatov / O. M. Alifanov. - M.: Mashinostroenie, 1979. - 216 s.
 8. Amosov, A.A. Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov: ucheb. posobie / A. A. Amosov, YU. A. Dubinskij, N. V. Kopchenova. - M. : Vyssh. shk., 1994. - 544 s.
 9. Kozdoba, L. A. Metody resheniya obratnyh zadach teploperenosa / L. A. Kozdoba, P. G. Krukovskij. - Kiev : Naukova dumka, 1982. - 360 s.
 10. Kerov, N. V. Reshenie dvuhmernoj OZT v cilindricheskoj sisteme koordinat / N. V. Kerov // IFZH. - Т. 43, № 5. - S. 752-756.
 11. YUdaev, B. N. Teploperedacha. / B. N. YUdaev. - 2-e izd., pererab. i dop. - M. : Vyssh. shkola, 1981. - 319 s.
 12. Vereina, L. I. Konstrukcii i naladka tokarnyh stankov / L. I. Vereina, M. I. Krasnov. - M. : Infra-M, 2017. - 48 s.
 13. Kunin, V. S. Opyt vnedreniya plazmenno-mekhanicheskoy obrabotki / V. S. Kunin. - L., 1982. - 28 s.
 14. Reznikov, N. A. Obrabotka metallov rezaniem s plazmennym nagrevom / N. A. Reznikov, M. A. SHaterin, V. S. Kunin, L. A. Reznikov / Pod obshch. red. N. A. Reznikova. - M.: Mashinostroenie, 1986. - 232 s.
 15. [Elektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa : http://www.flagman-mpo.ru/tech/plasm_mech_process/upmo-419.
 16. Obrabotka metallov rezaniem s plazmennym nagrevom / A. N. Reznikov, M. A. SHaterin, V. S. Kunin, L. A. Reznikov; pod obshch. red. A. N. Reznikova. - M. : Mashinostroenie, 1986. - 231 s.
 17. Analiz teplofizicheskikh svojstv staley s cel'yu primeneniya dlya resheniya nelinejnyh zada teorii nagreva / V. I. Timoshpol'skij [i dr.] // Lit'e i metallurgiya. - 2006. - № (2-2). - S.17-22.
 18. Poduraev, V. N. Avtomaticheskii reguliruemye i kombinirovannye processy rezaniya / V. N. Poduraev. - M. : Mashinostroenie, 1977. - 303 s.
 19. Issledovanie temperaturnyh polej i termonapryazhenij v stal'nyh detalyah pri poverhnostnoj plazmennoj zakalke / S. M. Bosyakov [i dr.] // Teoriya i praktika energosberegayushchih termicheskikh processov v mashinostroenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnichejskoj konferencii. - Minsk, 2008. - S. 115-118.
 20. Rykalin, N. N. Teplovoj potok v telo, vzaimodejstvuyushchee s plazmennoj struej / N. N. Rykalin, A. V. Nikolaev, I. D. Kulagin // TVT. - 1965. - № 6. - S. 25-27.
 21. Opredelenie temperaturnyh polej pri vozdeystvii vysokokontcentrirannogo v telah istochnika nagreva / A. I. Veremejchik [i dr.] // Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki : mezhdunar. sb. nauch. tr. / Belorus, gos. un-t transporta. - Gomel', 2009. - Vyp. 2. - S. 21-27.
 22. Osovec, S. V. Raschet nestacionarnogo teplovogo sostoyaniya plity pri ee nagreve peremeshchayushchimsya istochnikom / S. V. Osovec [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2000. - Т. 73. - № 4. - S. 757-760.
 23. Belyaev, N. M. Metody teorii teploprovodnosti : v 2-h t. / N. M. Belyaev, A. A. Ryadno. - M.: Vysshaya shkola, 1978. - Т. 1. - 327 s. - Т. 2. - 304 s.
 24. Vargaftik, N. B. Teplofizicheskie svojstva veshchestv. Spravochnik / N. B. Vargaftik. - M. : Gosenergoizdat, 1956. - 340 s.
 25. Tablicy fizicheskikh velichin : spravochnik / Pod red. I. K. Kikoina. - M. : Atomizdat, 1976. - 1008 s.
 26. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov : spravochnik / N. N. Rykalin [i dr.]. - M. : Mashinostroenie, 1985. - 485 s.
 27. [Elektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa : <https://cyberpedia.su/25xb1a7.html>.

Материал поступил в редакцию 13.11.2020