

со стороны деформации, не превышающей 30 % за 10 переходов с промежуточным отжигом при температуре 800 °С в среде аргона после каждых трех циклов.

Таким образом, проведены исследования влияния структурного состояния на температурный коэффициент линейного расширения труб волноводов, изготавливаемых из сплава 32 НКД. Выбраны технологические режимы изготовления труб волноводов КВЧ-диапазона,

обеспечивающие степень деформации не более 30 % и промежуточный отжиг 800 °С.

Библиографическая ссылка

1. Достижения в освоении миллиметровых и субмиллиметровых волн / Р. П. Быстров [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 52–63.

L. I. Oborina, V. S. Biront, I. V. Blokhin, I. V. Trifanov, B. N. Ismaylov

ABOUT INFLUENCE OF THE STRUCTURAL CONDITION OF 32 NKD ON TEMPERATURE FACTOR OF LINEAR EXPANSION OF PIPES OF WAVE GUIDES

The article dwells on researches of influence of a structural condition of 32 NKD alloy on temperature factor of linear expansion of wave guides of EHF range.

Keywords: a wave guide, temperature factor of linear expansion, deformation degree, anneal, thermal processing/

© Оборина Л. И., Биронт В. С., Блохин И. В., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н., 2010

УДК 621.9.048

Т. А. Веретнова, А. А. Ковалева, И. Я. Шестаков, С. М. Тинькова, А. А. Пьяных

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

Предложена математическая модель теплового состояния заготовки при электроконтактной резке. Разработан способ совершенствования электроконтактной резки с целью улучшения технологических показателей процесса за счет регулирования температуры в зоне реза при соблюдении рассчитанных режимов обработки.

Ключевые слова: электроконтактная резка, регулирование температуры, режимы обработки.

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом-инструментом и удалении размягченного или расплавленного металла из зоны обработки механическим способом: отрывательным движением заготовки или инструмента.

Отличительным признаком электроконтактной обработки является механический способ генерирования импульсов путем прерывистого контактирования вращающегося дискового электрода-инструмента с обрабатываемой деталью (<http://elib.ispu.ru/library/lessons/tretyakova/index.html>).

Предметом исследования являются процессы теплообмена, происходящие в зоне контакта обрабатываемой детали и дискового электрода-инструмента, осуществляющего резку с определенной скоростью вращения и подачи.

Для расчета процесса нагрева и охлаждения металла при электроконтактной резке необходимо выбрать подходящую расчетную схему, выделяющую основные особенности рассматриваемого процесса и пренебрегающую второстепенными. Рациональный выбор расчетной схемы упрощает расчет и позволяет более четко выявить влияние основных параметров процесса.

В зависимости от формы и размеров изделия и от длительности процесса распространения тепла выбирается схема нагреваемого тела. Исходя из условий процесса электроконтактной резки, выбираем пластину малой толщины, поток тепла в пластине плоский. При расчетах обязательно учитываем теплообмен пластины с окружающей средой. Ввиду малой толщины пластины пренебрегаем неравномерностью распределения температуры, считаем ее осредненной по толщине. Источник тепла в соответствии со схемой нагреваемого тела в нашем случае может быть точечным или линейным, перемещающимся с постоянной скоростью [1].

Зона резания представляет собой систему тепловыделения и теплоотвода. Тепловыделение в этой зоне происходит из-за повышенного электрического сопротивления зоны контакта и трения между инструментом и заготовкой, теплоотвод – в основном за счет теплопроводности.

Задача проводимых исследований заключается в моделировании теплообменных процессов электроконтактной резки металла быстровращающимся диском, экспериментальном подтверждении результатов решения задачи на математической модели и установлении анали-

тической зависимости между подачей электрода-инструмента, режимами резки (электрическими параметрами) и теплофизическими свойствами материала исследуемых образцов.

Решение задачи моделирования теплообменных процессов связано с определением поля температур. Для установления зависимости между величинами, характеризующими явление теплопроводности, воспользуемся методом математической физики. В настоящее время для решения задач математической физики наибольшее распространение получил метод конечных элементов.

При этом методе исходная область определения функции разбивается с помощью сетки, в нашем случае неравномерной, на отдельные подобласти – конечные элементы. В качестве примера на рис. 1 представлена конечно-элементная сетка математической модели для цилиндрического полого образца.

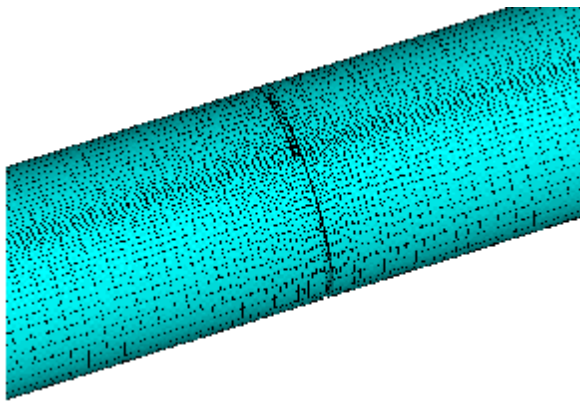


Рис. 1. Конечно-элементная сетка математической модели исследуемого образца

На рисунке видно, что сетка имеет специальное сгущение в месте контакта диска инструмента с обрабатываемой деталью, это обеспечивает более точное решение задачи.

Искомая непрерывная функция аппроксимируется кусочно-непрерывной, определенной на множестве конечных элементов. Аппроксимация может задаваться произвольным образом, но чаще всего для этих целей используются полиномы, которые подбираются так, чтобы обеспечить непрерывность искомой функции в узлах на границах элементов, такая методика расчета используется в программе Ansys.

Моделирование тепловых процессов при электроконтактной резке проводилось для следующих образцов: стального прутка, алюминиевой трубы, стальной трубы, медной трубы, титановой пластины.

При разработке математической модели принято, что распределение температуры по объему обрабатываемой детали описывается трехмерным стационарным уравнением теплопроводности, представленном в виде

$$\operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad}(T)) = 0,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T – температура, К.

Теплофизические свойства материала обрабатываемых образцов использовались как функции от темпера-

туры. На наружных поверхностях было задано граничное условие третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\Sigma} (T - T_{\text{oc}}),$$

где T – температура металла, К; T_{oc} – температура окружающей среды, К; α_{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

На торцевых поверхностях заданы граничные условия второго рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

В зоне контакта электрода-инструмента (диска) с обрабатываемой заготовкой задан тепловой поток, определяемый электрическими параметрами (режимами) резки.

Система нелинейных алгебраических уравнений в нашей задаче решалась с помощью итерационного метода Ньютона–Рафсона (<http://www-sbras.nsc.ru/rus/textbooks/akhmerov/mo/4.html>). Определяемой величиной является температура, для которой составлены полиномы.

$$\begin{aligned} a_{11}t + a_{12}t + \dots + a_{1n}t &= 0, \\ a_{21}t + a_{22}t + \dots + a_{2n}t &= 0, \\ a_{31}t + a_{32}t + \dots + a_{3n}t &= 0, \\ &\dots \\ a_{n1}t + a_{n2}t + \dots + a_{nn}t &= 0, \end{aligned}$$

где a_{ij} – коэффициенты, учитывающие теплофизические параметры материала, зависящие от температуры; t – температура в узлах сетки, °С.

Нелинейность уравнений объясняется зависимостью теплопроводности материала от температуры. Задача решена методом конечных элементов при помощи программы Ansys.

В качестве примера на рис. 2–4 приведены расчетные температурные поля алюминиевой трубы (трубы), стального (прутка) и титановой (пластины).

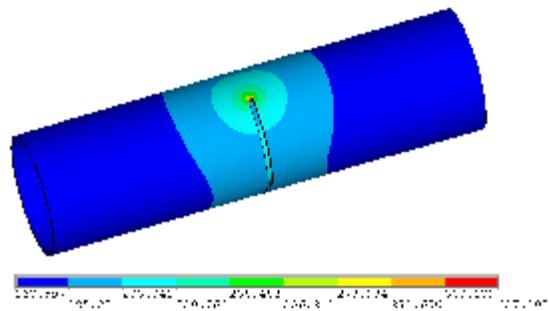


Рис. 2. Распределение температурных полей в алюминиевой трубе

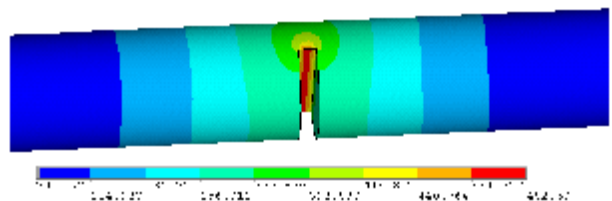


Рис. 3. Распределение температурных полей в стальном прутке

Расчет температурных полей проведен при разных режимах резки, заданных на основе опытных данных. Анализ полученных результатов говорит о том, что резка металла может осуществляться как при температуре плавления в зоне контакта режущего диска и заготовки, так и при температуре рекристаллизации.

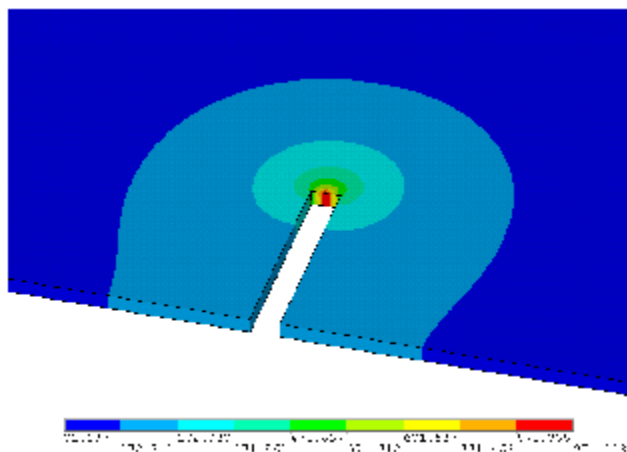


Рис. 4. Распределение температурных полей в титановой пластине

Температура рекристаллизации определяется по следующему выражению [2]:

$$T_p = 0,5 \dots 0,6 T_{пл},$$

где T_p – температура рекристаллизации металла; $T_{пл}$ – температура плавления металла.

Резка при температуре рекристаллизации позволит значительно снизить удельные энергозатраты и улучшить технологические показатели процесса. Для обеспечения данной температуры в зоне контакта электрода-инструмента и обрабатываемой детали необходимо соблюдать соответствующие режимы резки: напряжение, силу тока и подачу электрода-инструмента.

Апробация математической модели проводилась путем сравнения полученных результатов с данными опытов.

Резка проведена на образцах: стальном прутке (сталь У8А), алюминиевой трубе (Д16), стальной трубе (12Х18Н10Т), медной трубе (М1) титановой пластины (ВТ1).

Геометрия образцов представлена в таблице.

Сравнение указывает на правильный характер распределения температуры, поскольку металлографический анализ исследуемых образцов подтверждает, что температура в зоне контакта электрода-инструмента и обрабатываемой детали соответствует температуре рекристаллизации.

Микроструктура исследуемых образцов представлена на рис. 5.

Микроструктура стального образца из стали марки У8 (рис. 5, а) является однородной, нет разграничения по зонам, отсутствует дендритная структура, что говорит о том, что оплавления в процессе резки не происходило.

При анализе алюминиевого образца (рис. 5, б) видно, что резка трубы из алюминиевого сплава приводит к отслоению верхнего слоя. Частицы металла как бы прилипают к поверхности, образуя неровную «корочку». Оплавления при резке не происходит.

Более глубокое металлографическое исследование структуры показало, что в поперечном сечении трубы наблюдаются 3 зоны. Первая (ближе к краю) и третья (центральная) зоны мелкозернистые, образуют дисперсную «корочку» на поверхности за счет отвода тепла вглубь металла и во внешнюю среду (воздух). Это приводит к ускоренному охлаждению и, как следствие, получению мелкозернистой структуры. Такое распределение структуры связано с температурным градиентом по сечению трубы, независимо от силы тока, подаваемой при резке. Также наличие этих зон наблюдается при изучении продольного разреза трубы, т. е. в зоне контакта с режущим инструментом.

Металлографический анализ образца марки ВТ1 (рис. 5, в) показывает, что зона термического воздействия очень узкая, оплавления не произошло. У кромки структура мелкозернистая, зерна имеют четкую геометрическую форму, к центру происходит укрупнение зерна.

При металлографическом исследовании медных образцов видно, что за счет теплопроводности рост зерен происходит быстрее и глубина измененных слоев больше, чем у алюминиевых образцов. Поверхностные отделения размягченного слоя показаны на рис. 5, г. Кусочки металла как бы приклеены к поверхности трубы. Они не образуют сплошности и имеют пустые пространства.

Анализ структуры образца из стали в поперечном сечении показывает по внешнему краю столбчатые кристаллы твердого раствора, далее структуру в виде сот (рис. 5, д).

Это говорит об оплавлении при резке на рабочем токе 35...45 А. При уменьшении силы тока и подачи электрода-инструмента резка образцов из стали 12Х18Н10Т происходит при температуре рекристаллизации.

В результате проведенного исследования получены следующие выводы. Во-первых, расчетная схема выбрана верно, что подтверждается распределением температурных полей по толщине исследуемых образцов. Во-вторых, совпадение теоретических предпосылок с практическими результатами свидетельствует об адекватности выбранной модели. В-третьих, разработанный способ электроконтактной резки металла позволяет снизить

Геометрические параметры исследуемых образцов

Материал	Диаметр, мм		Толщина, мм
	D_n	D_b	
Алюминий (труба)	40,88	38,60	2,28
Сталь 12Х18Н10Т (труба)	16,1	13,5	1,3
Медь М1 (труба)	8,45	6,55	1,9
Сталь У8А (пруток)	12,5		–
Титан ВТ1 (пластина)	20,5		1,6

удельные энергозатраты при обработке металла и упростить реализацию метода путем подачи электрода-инструмента со скоростью, зависящей от температуры рекристаллизации, теплофизических свойств металла и толщины обрабатываемой заготовки [3].

Библиографические ссылки

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М. : МАШГИЗ, 1951.
2. Евстратов В. А. Теория обработки металлов и сплавов. Харьков : Вища шк. : Изд-во при Харьк. ун-те, 1981.
3. Исследование влияния теплообменных процессов на удельные энергозатраты при электроконтактной резке металла / Т. А. Веретнова [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 2(23). 2009. С. 241–246.

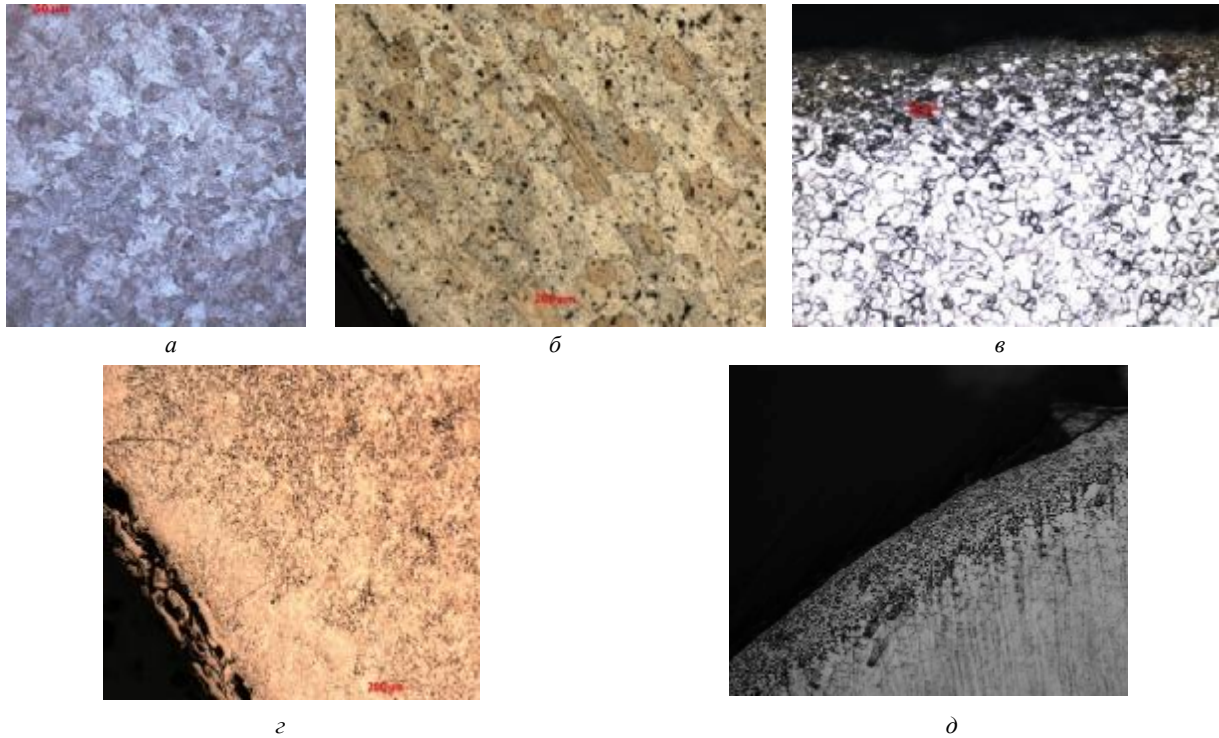


Рис. 5. Микроструктура образцов:
а – сталь У8А; б – алюминий Д16; в – титан ВТ1; г – медь М1; д – сталь 12Х18Н10Т

T. A. Veretnova, A. A. Kovalyova, I. Ya. Shestakov, S. M. Tinkova, A. A. Pyanikh

MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES UNDER ELECTROCONTACT CUTTING OF METALS

The article offers mathematical model of thermal condition of a work-piece during electrocontact cutting. The offered way of improvement of electrocontact cutting is developed in order to improve the technological efficiency of the process at the expense of temperature regulation in cutting zone under the calculated modes of processing.

Keywords: electrocontact cutting, temperature regulation.

© Веретнова Т. А., Ковалева А. А., Шестаков И. Я., Тинькова С. М., Пьяных А. А., 2010