МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *Политехнический*
Кафедра «*Электро- и нанотехнологии*»

Утверждено на заседании кафедры
«Электро- и нанотехнологий»
«19» января 2021 г., протокол №5

Заведующий кафедрой
_____В.В. Любимов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсовой работы
по дисциплине
«*Теоретические основы обработки концентрированными потоками энергии*»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
15.03.01 Машиностроение

с направленностью (профилем)
Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов

Форма обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 150301-01-21

Тула 2021 год

Разработчик методических указаний

Волгин В.М., профессор, докт.техн.наук, профессор _____
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись)*

Гнидина И.В., доцент, канд.техн.наук, доцент _____
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись)*

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовая работа направлена на расширение и углубление профессиональных знаний студентов по основной специальности в части приобретения и творческого развития у них навыков исследования физических основ генерации концентрированных потоков энергии (КПЭ) различных видов энергии с заданными энергетическими параметрами или основанных на них физико-химических процессов обработки. В ходе проектирования решаются задачи овладения студентами навыками математического моделирования процессов обработки, основанных на применении КПЭ, практического освоения пакетов прикладных программ, используемых для решения разнообразных инженерных задач.

2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАБОТЕ

2.1. Тематика курсовой работы включает исследования основных закономерностей воздействия концентрированных потоков энергии различных форм на материалы. Исследования осуществляются путем математического моделирования процесса взаимодействия концентрированных потоков энергии с обрабатываемой поверхностью в условиях различных физико-химических процессов. В рамках курсовой работы должен быть осуществлен анализ основных закономерностей воздействия различных видов концентрированных потоков энергии с заданными пространственно-временными и энергетическими параметрами (на примере электрохимического, электроэрозионного, лазерного, ультразвукового и других процессов) на обрабатываемую поверхность. С помощью разработанного на кафедре ЭиНТ программного обеспечения должно быть осуществлено моделирование воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемую поверхность с целью выявления влияния параметров потока на выходные характеристики (производительность, качество, точность). На основе результатов моделирования должны быть даны рекомендации по осуществлению конкретного физико-химического процесса с целью достижения требуемых выходных характеристик.

2.2. **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ** для проектирования включают: вид КПЭ, его пространственно-временные и энергетические параметры, а так же параметры обрабатываемой поверхности.

2.3. **ЗАДАНИЕ** на проектирование (согласовывается с консультантом) содержит перечень инженерных задач, подлежащих решению. Варианты заданий для выполнения курсовой работы содержатся в Приложении А.

2.4. **ОБЪЕМ** курсовой работы: пояснительная записка - 25...30 страниц формата А4;

2.5. **ВЫПОЛНЕНИЕ** курсовой работы осуществляется студентами самостоятельно во внеаудиторное время с использованием технической литературы, методических разработок кафедры и консультаций со стороны руководителя проекта. Практическое освоение студентами работы с пакетами программ осуществляется под руководством преподавателя-консультанта в виде индивидуальных занятий в компьютерном классе, а выполнение ими автоматизированных процедур задания самостоятельно под контролем учебно-вспомогательного персонала кафедры.

2.6. **ЗАЩИТА** курсовой работы осуществляется в установленные сроки. При оценке учитывается глубина проработки вопросов задания, степень автоматизации выполненных проектных процедур, качество оформления документации и эрудированность проектанта. В случае неудовлетворительной защиты тема работы изменяется.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.

3.1. СОДЕРЖАНИЕ пояснительной записки включает:

– введение;

– характеристика основных закономерностей формирования концентрированного потока энергии в условиях заданного физико-химического процесса, в том числе в виде схемы;

– математическая постановка задачи;

– описание работы программного обеспечения, разработанного для реализации математической модели;

– моделирование воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемую поверхность;

– основные результаты моделирования, представленные в виде графиков, диаграмм и т.п.

– разработка рекомендаций на основании результатов моделирования;

– заключительная часть.

3.2. **УКАЗАНИЯ** к выполнению отдельных этапов работы.

Основное содержание разделов ***пояснительной записки***:

Характеристика основных закономерностей формирования концентрированного потока энергии включает в себя описание физико-химических процессов взаимодействия КПЭ с поверхностью обрабатываемой детали, основных параметров процесса, оказывающих влияние на конечный результат обработки; должны быть также приведены схематичные изображения процесса обработки, основанного на КПЭ.

Математическая постановка задачи включает в себя математическое описание основных закономерностей, на основании которых проводится исследование процесса обработки. Описание должно быть по возможности кратким, не перегруженным математическими зависимостями.

Описание работы программного обеспечения включает в себя описание алгоритма работы программного обеспечения, разработанного на кафедре ЭиНТ.

Моделирование воздействия концентрированного потока энергии проводится с помощью разработанного программного обеспечения. В данном разделе приводится описание основных входных данных (диапазонов их варьирования), а также приводятся результаты моделирования в виде таблиц результатов расчета, графиков, диаграмм и т.п. с подробным анализом полученных зависимостей.

Разработка рекомендаций производится на основании результатов моделирования и включает в себя описание диапазонов входных параметров (режимов проведения процесса обработки), рациональных с точки зрения достижения требуемого результата (точности и качества обрабатываемой поверхности).

3.3. **ОФОРМЛЕНИЕ** технической документации выполняется в соответствии с действующими нормами ЕСКД, ЕСТД и ЕСТПП, а также с применением ПЭВМ. Пояснительная записка выполняется с использованием текстовых редакторов типа Microsoft Word; графическая часть - с использованием средств машинной графики (системы AutoCAD, КОМПАС и т.д.). Для создания оригинального программного обеспечения используются соответствующие программные средства (Visual Basic, C++, Delphi и т.п.), могут также быть использованы имеющиеся на кафедре система автоматизации инженерных расчетов (NASTRAN, COSMOS). Для представления результатов моделирования могут быть использованы электронные таблицы Microsoft Excel.

Литература

1. Гнидина И.В. Концентрированные потоки энергии и физические основы их генерации: Учебное пособие. – Тула: ТулГУ, 2011. – 152 с.

2. Гнидина И.В. Теоретические основы обработки концентрированными потоками энергии: Учебное пособие. – Тула: ТулГУ, 2005. – 122 с.

3. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы. – М.: Наука, 1985. – 246с.

4. Намитоков К.К.Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456с.

5. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304с.

6. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация: Пер. с нем. В.В. Климова, В.Н. Пальянова./ Под ред. М.И. Гусевой. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 360с.

7. Таблицы физических величин. Справочник. Под. ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.

8. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеровв машиностроении иприборостроении. – Л.: Машиностроение, 1978.

9. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975.

10. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1988.

11. Кошкин Н.И. Элементарная физика: справочник. – М.: Наука, 1991.

Приложение А

Варианты заданий для выполнения курсовой работы

1. Теоретические положения

1.1. Исследование тепловых процессов в электроде-заготовке при электроэрозионном воздействии КПЭ

ЗАДАНИЕ. *Провести исследования зависимости глубины лунки от параметров процесса для различных материалов.*

Глубину лунки, образующейся после испарения материала электрода, можно оценить как:

$$h \le \frac{q_{эл.ср}\tau_и}{\rho_{эл}(C_T T_{исп} + L_{исп})}, \qquad (1)$$

где $q_{эл.ср}$ – среднее значение плотности теплового потока (потока тепла); $\tau_и$ - длительность импульса; $\rho_{эл}$ – плотность материала электрода; C_T – теплоемкость материала электрода.

$$q_{эл.ср} = \frac{W_и}{\pi \cdot r_{к.ср}^2 \cdot \tau_и}, \qquad (2)$$

где $r_{к.ср}$ – средний радиус канала разряда за время $\tau_и$ (в расчетах принимается $r_{к.ср}$=0,1мм); $W_и$ – энергия импульса.

В первом приближении энергию $W_и$ можно рассчитать по длительности импульса и по средним значениям силы тока и напряжения:

$$W_и = \frac{I_{ср} \cdot U_{ср}}{f}, \qquad (3)$$

где $I_{ср}$ – среднее значение тока; $U_{ср}$ – среднее значение напряжения; f – частота следования импульсов.

Среднее значение напряжения пробоя $U_{ср}$ = (0,5 … 0,75)U_0, где U_0 – напряжение холостого хода при разомкнутых электродах. Значения $I_{ср}$ и U_0 выбираются в зависимости от модели генератора импульсов (см. Приложение А).

1.2. Исследование тепловых процессов при лазерном воздействии КПЭ

1.2.1. **ЗАДАНИЕ.** *Провести исследование зависимости параметров процесса лазерной закалки от глубины закаленного слоя для различных материалов и подобрать технологический лазер для проведения обработки. Для материалов, отличных от сталей, при расчетах следует принимать $T_{зак} \approx 0.5 T_{пл}$.*

Считается, что глубина закаленного слоя $z_{зак}$ при лазерном воздействии может достигает максимального значения z_{max} за время действия импульса длительностью $\tau_и$ (время закалки) при достижении на поверхности заготовки температуры плавления $T_{пл}$. При этом интенсивность теплового источника должна составить:

$$q_0 = \mathrm{T}_{\text{пл}} \lambda_{\mathrm{T}} \left(\pi \big/ 4 \cdot \mathrm{a} \tau_{\text{и}} \right) \qquad (4)$$

где $a = \dfrac{\lambda_{\mathrm{T}}}{C_{\mathrm{T}} \rho}$ – коэффициент температуропроводности материала; C_{T} - удельная теплоемкость материала; ρ - плотность материала; λ_{T} - коэффициент теплопроводности материала; q_0 – плотность мощности теплового источника, действующего на поверхности заготовки; $\mathrm{T}_{\text{пл}}$ – температура плавления материала.

С другой стороны,

$$q_0 = \frac{4 \cdot A_{эф} \mathrm{P}}{\pi \cdot d_{ф}^{\ 2}}, \qquad (4')$$

где $\mathrm{A}_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент поверхностного поглощения, характеризующий отношение энергии, поглощенной поверхностью в процессе обработки, к полной энергии лазерного излучения (при расчетах принимается 0,5 … 1); P - мощность лазера; $d_{\text{ф}}$ – диаметр фокального пятна

Время закалки может быть вычислено по формуле:

$$t_{зак} = \tau_{и} \frac{\pi \cdot \mathrm{z}^{2}{}_{\text{зак}}}{4 \cdot \mathrm{a}} \mathrm{T}_{\text{пл}} \lambda_{\mathrm{T}} \left[\mathrm{T}_{\text{пл}} \big/ \left(\mathrm{T}_{\text{пл}} - \mathrm{T}_{\text{зак}} \right) \right], \qquad (4'')$$

где $\mathrm{T}_{\text{зак}}$ – температура закалки материала.

1.2.2. **ЗАДАНИЕ.** *Провести исследование изменения параметров прошиваемых отверстий (глубины и диаметра) в зависимости параметров лазерного излучения для различных материалов.*

Расчет параметров отверстий (глубины *h* и радиуса *r*) при лазерной прошивке ведется по формулам:

$$\begin{aligned} h(t) &= \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\mathrm{tg}\gamma} \right)^3 + \frac{3P \cdot t}{\pi \cdot \mathrm{tg}^2 \gamma \cdot \rho L_и}} - \frac{r_0}{\mathrm{tg}\gamma}; \\ r(t) &= \sqrt[3]{r_0^{\ 3} + \frac{3P \cdot t \cdot \mathrm{tg}\gamma}{\pi \cdot \rho L_и}}, \end{aligned} \qquad (5)$$

где P - мощность лазерного излучения; r_0 – радиус фокального пятна; t – время обработки; γ - угол расфокусировки лазерного луча; ρ – плотность обрабатываемого материала; $L_и$ – удельная теплота испарения материала.

1.2.3. **ЗАДАНИЕ.** *Провести исследование зависимости температуры в зоне воздействия излучения при лазерной резке различных материалов от параметров процесса. Очевидно, что при анализе результатов моделирования необходимо обращать внимание на то, достигается ли в зоне резания температура разрушения соответствующего материала. Температуры разрушения некоторых материалов приведены в Приложении Б.*

При лазерной резке материалов температура в зоне воздействия лазерного луча, движущегося со скоростью V вдоль поверхности, может быть оценена по формуле:

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0^2}{2\lambda_T h}\ln\left(\frac{2.25a}{r_0 V}\right) + T_н; \qquad (6)$$
$$q_0 = \frac{k \cdot P}{\pi \cdot r_0^{\,2}}$$

где q_0 – плотность мощности лазерного излучения; k – % мощности лазера, используемый при обработке; P – мощность лазерного излучения; R – коэффициент отражения (при расчетах принять 0,25); r_0 – радиус фокального пятна; $\lambda_т$ – коэффициент теплопроводности материала; V - скорость перемещения лазерного луча; h – толщина заготовки; $a = \frac{\lambda_т}{C_т \rho}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки; $C_т$ - удельная теплоемкость материала; ρ - плотность материала; $T_н$ – начальная температура ($T_н$=20°C).

1.3. Исследование процесса ионной имплантации

ЗАДАНИЕ. *Провести исследования распределения имплантируемых ионов в зависимости от вида имплантируемых ионов, энергии имплантации и химического состава мишени. Рассмотреть распределение ионов в пределах расстояния* $x=2*R_p$.

Распределение пробегов имплантированных ионов определяется средним пробегом R_p , стандартным отклонением ΔR_P и дозой облучения N_0.

$$\frac{N(x)}{N_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}\exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right] \qquad (7)$$

Параметры длины пробегов различных ионов (R_p, ΔR_p) для различных мишеней и величин энергии имплантации приведены в [6].

1.4. Исследование физико-химических процессов при электрохимической обработке

ЗАДАНИЕ. *Провести исследование зависимости температуры и относительного объемного газосодержания раствора электролита от параметров процесса. Очевидно, что при анализе результатов моделирования следует обращать внимание на то, чтобы температура электролита при обработке не превышала температуру кипения соответствующего вещества, а газосодержание не должно превышать 1.*

При электрохимической обработке температура T и относительное объемное газосодержание φ раствора электролита на выходе из зоны могут быть приближенно определены по следующим соотношениям:

$$T = T_0 + \frac{U^2 \chi_0 L}{S^2 V_0 \rho_0 C_T} \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{\eta_Г \varepsilon_Г U \chi_0 L}{S^2 V_0 \rho_Г + \eta_Г \varepsilon_Г U \chi_0 L} \quad (9)$$

где T_0, χ_0, V_0, ρ_0 – температура, удельная электропроводность, скорость течения и плотность раствора электролита на входе в зону обработки, соответственно; S - межэлектродный зазор между заготовкой и инструментом; U - напряжение, приложенное к электродам; L - длина зоны обработки; $C_Т$ - удельная теплоемкость материала; $\eta_Г, \varepsilon_Г, \rho_Г$ - выход по току, электрохимический эквивалент и плотность газообразных продуктов, выделяющихся на электродах, соответственно.

Плотность газа определяется по следующему соотношению (кг/м^3):

$$\rho_Г = \frac{2p}{1000 R_Г \cdot T_0}, \quad (10)$$

где p – давление (Па); $R_Г = 8.32$ Дж/(моль ^{0}К) – универсальная газовая постоянная.

При выделении газообразного водорода на электроде-инструменте значение электрохимического эквивалента $\varepsilon_Г$ (кг/Кл) может быть определено по следующему соотношению:

$$\varepsilon_Г = \frac{1}{1000F}, \quad (11)$$

где F = 96485 Кл/моль – постоянная Фарадея.

1.5. Общие рекомендации по теоретической части:

1. Для выполнения курсовой работы используется программное обеспечение, созданное на кафедре Электро- и нанотехнологий. В соответствии с вариантом задания используется конкретный раздел программы (**case No**), для чего в начале программы переменной **var** присваивается соответствующее значение (от **1** до **6**). Затем в соответствии с заданием вводятся исходные данные.

2. В процессе выполнения курсовой работы для заданного варианта рассчитываются зависимости исследуемого параметра от исходных данных, значения которых приведены в диапазонах.

3. Графики зависимостей выполняются в соответствии с ГОСТ (все оси обозначены, единицы измерений параметров на осях подписаны, легенда приведена) с помощью электронных таблиц MS Excel.

4. Для случая ионной имплантации (варианты 16-18, case 5) результаты расчета для каждого элемента записываются в файл ***.txt**, который затем должен быть загружен в MS Excel для построения графиков.

5. Значения параметров, характеризующих обрабатываемый материал, берутся из литературы [7-11] или из Приложения Б.

6. При моделировании необходимо **<u>СТРОГО</u>** следить за соответствием друг другу единиц измерений различных величин. Необходимо все единицы перевести в систему СИ.

2. Задания для выполнения курсовой работы

№ варианта	Моделируемые зависимости (раздел программы)	Исходные данные
1.	(1) (var=1; case 1)	Материал заготовки: • сталь 35; • медь; I=40A; q=1; U=120 В; f = 20…250 кГц.
2.	(1) (var=1; case 1)	Материал заготовки: • медь; • никель; I=25A; q=2; U=50…250 В; f = 100 кГц.
3.	(1) (var=1; case 1)	Материал заготовки: • алюминий; • никель; I=25A; q=10; U=200 В; f = 10…1000 кГц.
4.	(1) (var=1; case 1)	Материал заготовки: • сталь 40Х; • алюминий; I=10…100A; q=2; U=100 В; f = 80 кГц.
5.	(1) (var=1; case 1)	Материал заготовки: • никель; • медь; I=10…50 А; q=2; U=50 В; f = 150 кГц.
6.	(4-4”) (var=2; case 2)	Материал заготовки: • сталь Х18Н10Т; • никель; $z_{зак}$ = 0.1…0.5 мм; $d_ф$=100 мкм
7.	(4-4”) (var=2; case 2)	Материал заготовки: • алюминий; • хром $z_{зак}$ = 0.05…0.25 мм; $d_ф$=10 мкм
8.	(4-4”) (var=2; case 2)	Материал заготовки: • сталь 12Х18Н10Т; • медь; $z_{зак}$ = 0.5 мм; $d_ф$=10…50 мкм
9.	(4-4”) (var=2; case 2)	Материал заготовки: • вольфрам; • медь; $z_{зак}$ = 0.25 мм; $d_ф$=5…20 мкм

10.	(4-4”) (var=2; case 2)	Материал заготовки: • сталь 12Х18Н10Т; • алюминий; $z_{зак}$ = 0.5 мм; $d_ф$=20…100 мкм
11.	(5) (var=3; case 3)	Материал заготовки: • сталь 40Х; • молибден P=100 Вт r_0=15 мкм γ = 1° t = 10^{-4}…10^{-2}с
12.	(5) (var=3; case 3)	Материал заготовки: • медь; • никель P=300 Вт r_0=25 мкм γ = 1°…10° t = 5 с
13.	(5) (var=3; case 3)	Материал заготовки: • алюминий; • хром P=50 Вт r_0= 5…250 мкм γ = 1° t = 0.5 с
14.	(5) (var=3; case 3)	Материал заготовки: • сталь 12Х18Н10Т; • алюминий P=30…100 Вт r_0= 80 мкм γ = 3° t = 0.25с
15.	(5) (var=3; case 3)	Материал заготовки: • сталь 40; • алюминий P=50…300 Вт r_0= 200 мкм γ = 2° t = 0.5 с
16.	(6) (var=4; case 4)	Материал заготовки: • фанера; • бумага h = 2 мм P= 100 Вт k=0.3 r_0= 250 мкм V = 50…100 мм/с
17.	(6) (var=4; case 4)	Материал заготовки: • фанера; • резина h = 1…5 мм P= 100 Вт k=0.5 r_0= 250 мкм V = 5…50 мм/с
18.	(6) (var=4; case 4)	Материал заготовки: • пластмасса; • резина h = 0.5…3 мм P= 80 Вт

		k=0.65 r_0= 100 мкм V = 10 мм/с
19.	(6) (var=4; case 4)	Материал заготовки: • стекло; • пластмасса; h = 1 мм P= 50 Вт k=0.4 r_0= 100 мкм V = 25…80 мм/с
20.	(7) (var=5; case 5)	Материал подложки – германий; имплантируемый материал – алюминий Энергия имплантации E = 10, 100, 200, 400 кэВ $N_0 = 10^{15}$ см$^{-2}$
21.	(7) (var=5; case 5)	Материал подложки – оксид кремния; имплантируемые материалы – бор, фосфор, цинк. Энергия имплантации E = 100 кэВ $N_0 = 10^{15}$ см$^{-2}$
22.	(7) (var=5; case 5)	Материал подложки – оксид алюминия; имплантируемый материал – бор. Энергия имплантации E = 10,50, 100, 200 кэВ $N_0 = 10^{15}$ см$^{-2}$
23.	(7) (var=5; case 5)	Материал подложки – оксид кремния; имплантируемые материалы – цинк. Энергия имплантации E = 100,200,300,400 кэВ $N_0 = 10^{15}$ см$^{-2}$
24.	(8), (9) (var=6; case 6)	U = 10…50 В; S = 0.5; 1.5 мм; L = 50 мм; V = 1 м/с; электролит – вода: $p = 10^5$ Па; T_0 = 20°C; χ_0 = 10 Ом$^{-1}$м$^{-1}$; $\rho_0 = 10^3$ кг/м^3; Ct = 4200 Дж/кг·град С $\eta_Г$ = 1
25.	(8), (9) (var=6; case 6)	U = 10; 25 В; L = 5…50 мм; S = 0.75 мм; V = 5 м/с; электролит – вода: $p = 10^5$ Па; T_0 = 20°C; χ_0 = 10 Ом$^{-1}$м$^{-1}$; $\rho_0 = 10^3$ кг/м^3; Ct = 4200 Дж/кг·град С $\eta_Г$ = 1
26.	(8), (9) (var=6; case 6)	U = 10 В; L = 25; 100 мм; S = 0.5 мм; V = 0.25…1 м/с; электролит – вода: $p = 10^5$ Па; T_0 = 20°C; χ_0 = 10 Ом$^{-1}$м$^{-1}$; $\rho_0 = 10^3$ кг/м^3; Ct = 4200 Дж/кг·град С $\eta_Г$ = 1

Приложение Б.
Основные теплофизические и оптические параметры некоторых материалов [7–11]

Таблица 1. Параметры металлов

Металл	Параметры							
	плотность, ρ, 10^3 кг/м^3	теплопроводность, k, Вт/м · К	теплоемкость, c, Дж/кг · К	температура плавления, $T_{пл}$, ^{0}C	температура кипения, $T_{кип}$, ^{0}C	теплота плавления, $L^м_{пл}$, 10^6 Дж/кг	теплота испарения, $L^м_и$, 10^6 Дж/кг	коэффициент отражения R, ($\lambda = 1.06$ мкм)
Al	2.7	233	920	660	2447	0.396	10.9	0.93
Au	19.3	300	128	1063	2700	0.065	1.65	0.98
Bi	9.7	8	122	271	1559	0.052	0.72	0.55
Cr	7.1	45	460	1903	2642	0.280	6.71	0.57
Cu	8.2	373	386	1083	2595	0.205	4.78	0.91
Fe	7.9	50	450	1535	2900	0.278	7.0	0.63
Ni	8.7	68	440	1453	2800	0.303	6.48	0.74
V	6.0	31	514	1730		0.344	8.98	0.55
W	19.3	190	105	3380	5530	0.191	4.35	0.68

Таблица 2. Ориентировочные значения параметров неметаллических материалов

Материал	Физические параметры					
	плотность, ρ, 10^3 кг/м^3	теплопроводность, k, Вт/м · К	теплоемкость, c, 10^3 Дж/кг · К	температура разрушения, T_p, ^{0}C	показатель поглощения, α, м$^{-1}$	поглощательная способность, A
					($\lambda = 10.6$ мкм)	
бумага	0.7	0.25	1.5	600	100	0.55
фанера	0.9	0.5	2.5	1800	100	0.8
керамика	1.5	0.8	0.6	1500	100	0.9
пластмасса	2.2	0.5		600	50	0.5
стекло	2.3	0.75	0.8	1700		0.9
резина	1.2	0.15	0.9	900		