

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Иваненко Даниил Станиславович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение электрического сопротивления покрытий, полученных
плазменным порошковым напылением**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

Научный руководитель:

к.ф.-м.н Д.В. Сергачев

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

С.Е. Краснопевцев

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось знакомство с технологией плазменного порошкового напыления, широко используемой в технической промышленности, а также измерение электрического сопротивления напылённого токопроводящего покрытия. На стальной стержень при помощи плазмотрона был нанесён керамический слой (Al_2O_3), затем напылены токопроводящие линии из сплава алюминия и никеля. Для измерения малого электрического сопротивления получившегося образца была собрана схема, включавшая дополнительное известное активное сопротивление. Полученные токопроводящие каналы отвечают ожидаемым требованиям: способны стабильно проводить электрический ток, имеют относительно малое омическое сопротивление, обладают хорошими показателями адгезии и когезии, имеют высокую температуру плавления. Поверх был напылён диэлектрический слой из оксида алюминия (Al_2O_3). Получившийся образец может быть использован при создании электрических приборов, рассчитанных на работу при высоких температурах.

Ключевые слова: плазменное порошковое напыление, токопроводящие покрытия, газотермическое напыление.

Оглавление	
1. Введение	4
2. Принцип плазменного напыления	5
3. Экспериментальная установка для плазменного напыления	7
4. Эксперимент	9
5. Заключение	12
6. Литература	12
7. Приложение	14

1. Введение

Плазменное напыление — способ нанесения покрытия на поверхность объекта с использованием высокотемпературной плазменной струи. Плазменное напыление является вариантом газотермического напыления. Суть метода заключается в том, что в факел, создаваемый плазмотроном, подается порошковый материал, который, нагреваясь и ускоряясь, взаимодействует с поверхностью изделия и формирует покрытие. Целью данного процесса зачастую является улучшение таких свойств обрабатываемого материала, как износостойкость, антифрикционность, стойкость к коррозии, электропроводность, жаростойкость и др. Плазменное напыление покрытий широко применяется в таких областях, как машиностроение, энергетика, нефтяная и угольная промышленность, ракетная, авиационная и космическая техника, металлургия, химия, приборостроение, строительство, ремонт машин и восстановление деталей.

Технология применяется при изготовлении электронных компонентов: датчиков, антенн, сенсоров, токопроводящих коммуникаций (рис. 1)[1].

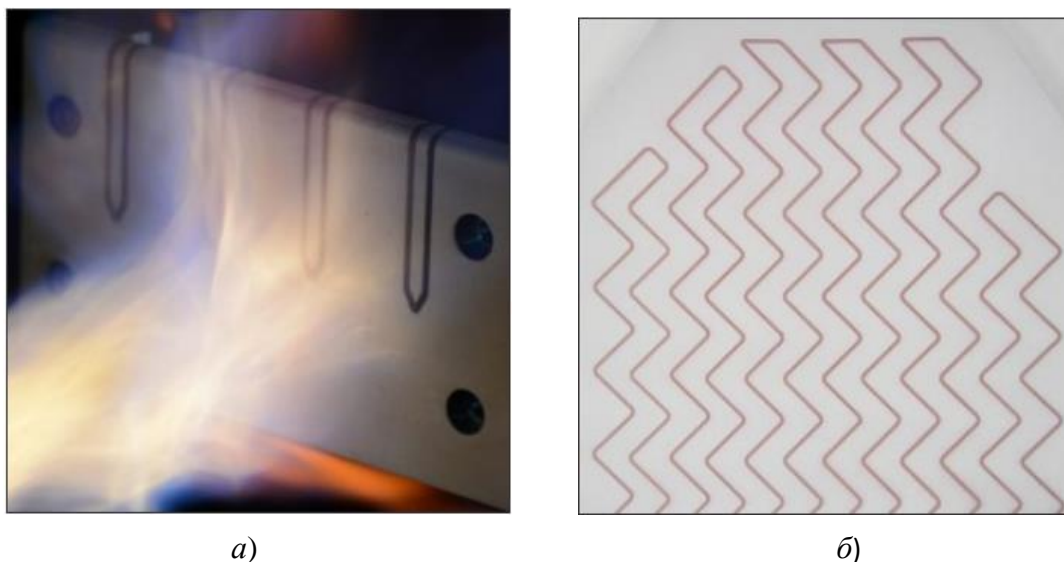


Рис.1 Примеры электронных компонентов, произведенных компанией MesoScribe:

a) термопара;

б) датчик обнаружения трещин

Преимуществом метода является то, что напыление покрытий возможно произвести на обширный ряд материалов, на объекты сложной геометрической формы. Сами покрытия могут обладать разными полезными свойствами в зависимости от выбранного порошкового вещества. С помощью потоков термической плазмы можно напылять практически любые порошковые материалы (керамические, металлические, металлокерамические и т. д.) При оценке покрытия, полученного плазменным порошковым напылением, исследуется когезия (связь между молекулами покрытия), адгезия (сцепление между подложкой и покрытием), приобретенные свойства. В случае напыления токопроводящих покрытий важным показателем является электрическое сопротивление, в данной работе проводилось измерение именно этого показателя для покрытия из сплава алюминия и никеля (ПН-85Ю15), нанесённого на стальной стержень (Ст3). Так как одной из сфер применения метода плазменного порошкового напыления является создание электроники, обладающей повышенными требованиями к прочности и термостойкости, знание значения электрического сопротивления представляет ценность.

Для достижения цели необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Ознакомиться с принципами работы плазмотрона и технологией плазменного напыления.
2. Подготовить поверхность стержня и нанести токопроводящие покрытия.
3. Собрать цепь для измерения электрического сопротивления образца.
4. Проанализировать получившийся результат.

2. Принцип плазменного напыления

Основным элементом любой установки плазменного напыления является плазмотрон. При подаче напряжения на катод и анод–сопло плазмотрона между ними возникает электрическое поле, которое провоцирует движение свободных электронов. Свободные электроны на пути к аноду разгоняются и сталкиваются с молекулами среды. Вследствие неупругих столкновений часть кинетической энергии свободных электронов передается связанным электронам в атомах,

возбуждая их переход на более высокий энергетический уровень [2, стр. 24-47]. В случае, когда полученная электроном энергия больше энергии связи с частицей, электрон покидает орбиту атома. Явление образования положительного иона и свободного электрона таким образом называется ударной ионизацией. Оторвавшись от ядра атома свободные электроны так же ускоряются и производят ионизацию. Возникает цепной процесс лавинного размножения электронов (рис. 2). Наряду с процессом ионизации и возбуждения электронов могут происходить обратные процессы – рекомбинации и тушение, а также процесс диссоциации, разделения сложных молекул на более простые, и обратный ему процесс ассоциации.

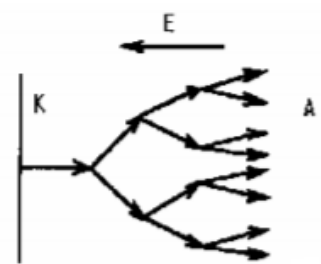


Рис. 2 Лавинообразное размножение электронов

При ионизации газа количество свободных электронов увеличивается, ранее диэлектрическая среда (газ) приобретает способность проводить электрический ток, происходит пробой среды, выраженный в образовании электрического дугового разряда. Конструкция плазмотрона обеспечивает сжатие (сужение) электрической дуги, что приводит к увеличению плотности энергии и повышению температуры дуги до 10000 – 15000К. Плазмообразующими газами выступают инертный газы. В направлении поверхности, на которую необходимо произвести напыление покрытия, подается инертный газ, который ионизируется за счет получения электронами тепловой энергии. Получившийся квазинейтральный газ заряженных частиц называется плазмой (рис. 3).



Рис. 3 Плазменная струя плазмотрона

Напыляемый порошок подается в поток плазмы, плавится и ускоряется. Плазменная струя, создаваемая современными плазмотронами, может иметь

широкий диапазон скоростей (вплоть до сверхзвуковых значений) и способна расплавить почти любой материал. Расплавленный порошок в потоке плазмы транспортируется на подложку. Удар частиц о поверхность вызывает их быстрое охлаждение и кристаллизацию. Формируется покрытие в результате действия сил механического зацепления, слабых сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса) и химических сил связи.

3. Экспериментальная установка для плазменного напыления

Плазменное порошковое напыление производилось на установке «Термоплазма 50–03» (рис. 4), разработанной в институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН). Установка состоит из источника постоянного тока, системы водяного охлаждения, газораспределительной системы, дозатора порошка, пульта управления и двух плазмотронов «ПНК – 50» (номинальная мощность 50 кВт), один – для напыления керамических порошков, другой – металлических.

Использованный электродуговой плазмотрон выполнен по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ), предназначен для работы в турбулентном, переходном и ламинарном режимах истечения плазменных струй, что предоставляет возможно эффективно работать с большим числом порошковых материалов [3-4]. Секционированная межэлектродная вставка позволяет регулировать длину и напряжение электрической дуги между катодом и анодом, а также снижает уровень пульсации параметров плазменной струи. Напыляемый порошок вводится в плазменную струю через сопло, которое установлено после анода. Плазмообразующие инертные газы подаются со стороны катода через устройство закрутки потока. Транспортирующие, разгоняющие плазменную струю, газы проходят через кольцо закрутки и подаются в зазор между последней секцией межэлектродной вставки и анодом. Подача порошковых материалов осуществляется в прикатодной области. Плазмотрон оснащен запатентованным узлом кольцевого ввода порошка с

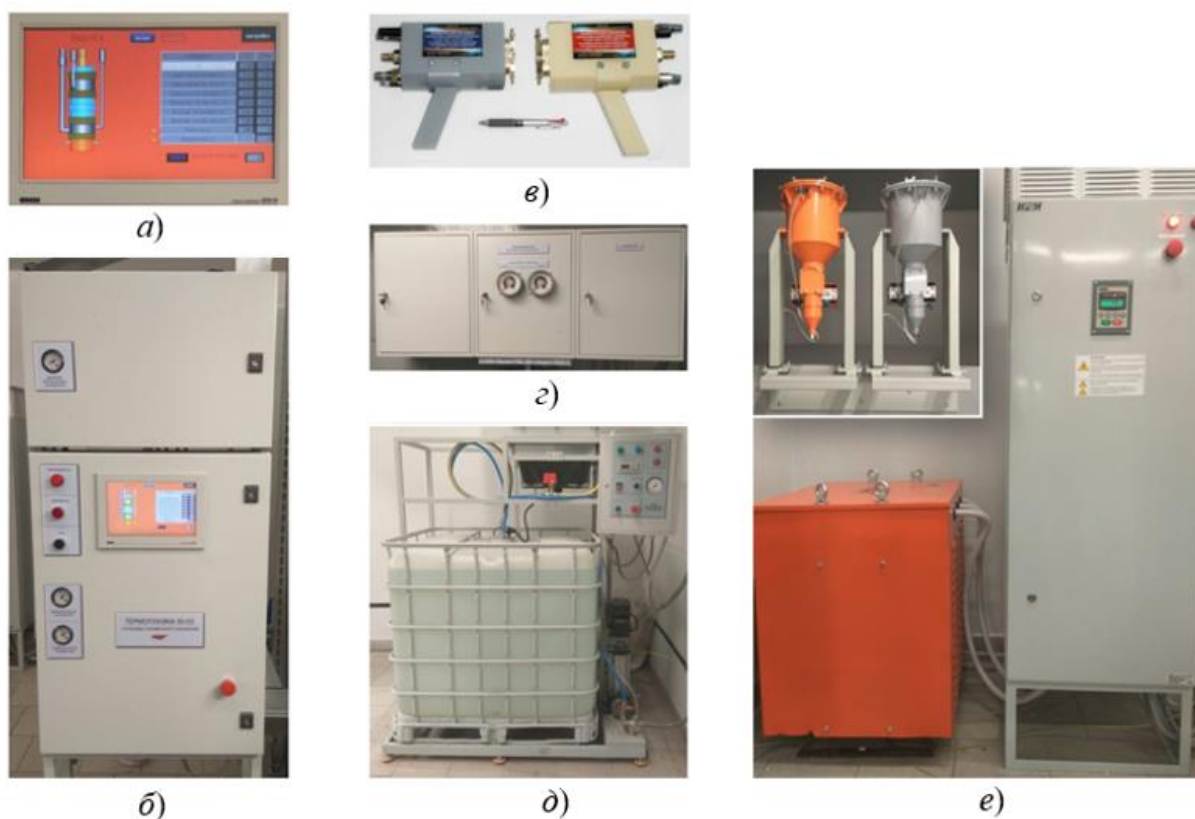


Рис.4 Внешний вид элементов установки плазменного напыления «Термоплазма 50-03»:

- a) Панель оператора;
- б) Пульт управления установки;
- в) Плазматроны
- г) Блок переключений
- д) Блок автономного охлаждения
- е) Дозаторы, трансформатор и источник питания

газодинамической фокусировкой, созданным для более эффективного нагрева и ускорения частиц, улучшения качества нанесения покрытия. В узле кольцевого ввода соосно расположены сопла и расположенные между ними кольцевые щелевые каналы. Эти каналы предназначены для одновременного ввода порошка, транспортирующего и фокусирующего газа. Узел обеспечивает равномерный ввод порошкового материала и фокусирующего газа в плазменную струю, при этом практически не возмущается плазменная струя. На рис. 5 [5] изображена схема узла кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой.

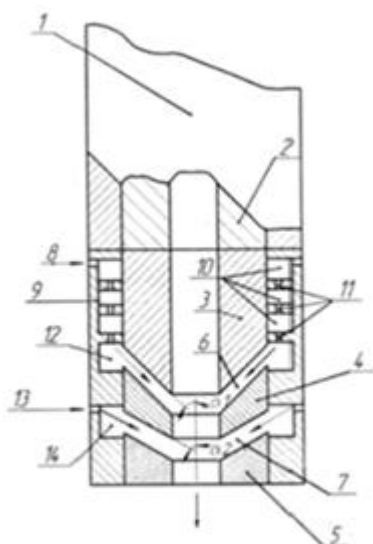


Рис. 5 Узел кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой: 1 – плазматрон; 2 – анод; 3 – входное сопло; 4 – промежуточное сопло; 5 – выходное сопло; 6, 7 – кольцевой щелевой канал; 8 – канал для ввода порошка и транспортирующего газа; 9 – многоступенчатый делитель; 10 – набор коллекторов; 11 – канал перепуска; 12 – коллектор; 13 – канал подачи фокусирующего газа; распределительный коллектор

4. Эксперимент

Немаловажной частью всего процесса является подготовка подложки и настройка оборудования [6]. Перед началом напыления поверхность подложки была промыта и обработана с помощью ацетона, что позволило убрать органические соединения, которые могут ухудшить сцепления покрытия с поверхностью. Затем образец прошел абразивную очистку в пескоструйной камере. Такая обработка избавляет поверхность от адсорбированных веществ, активирует поверхность подложки, то есть выводит её из состояния термодинамического равновесия с окружающей средой путем освобождения межатомных связей поверхностных атомов. В результате обработки поверхность становится шероховатой, что в последствии при напылении улучшает адгезию. Далее поверхность образца была обработана с использованием сжатого воздуха для того, чтобы убрать оставшиеся после предыдущей стадии частицы абразива.

Настройка оборудования производится в специальном программном обеспечении, разработанном в ИТПМ СО РАН. Для установки плазменного

напыления выставляются параметры расхода порошка, работы системы охлаждения, режим напыления (прил. 1), прописывается поведения роботоманипулятора, удерживающего плазматрон, расстояние от плазматрона до подложки, скорость движения робота.

Для измерения электрического сопротивления получившегося образца была собрана простая схема (рис. 6), включавшая источник питания Omron s8vk c06024, цифровой универсальный вольтметр АКТАКОМ АВМ-4306, резистор с номинальным сопротивлением 1 кОм.

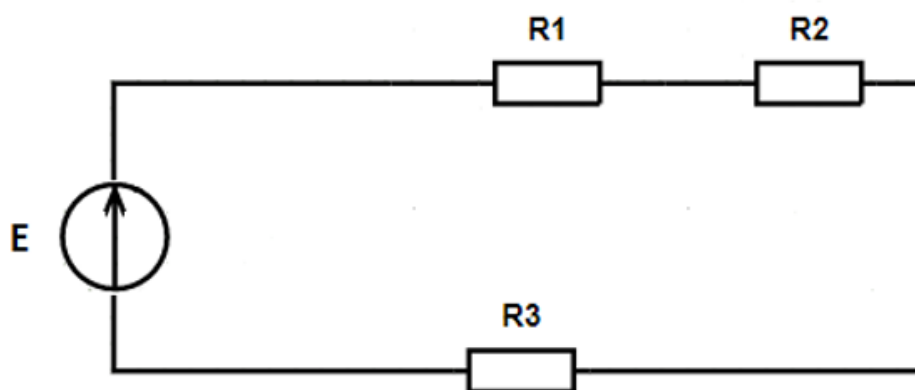


Рис. 6 Схема цепи для измерения электрического сопротивления образца

Расчет сопротивления напылённой токопроводящей дорожки проводился по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}$$

Сперва было измерено напряжение холостого хода генератора, оно составило $E = 23,995$ В. При последовательном соединении элементов цепи значения тока на каждом элементе равны. Ток в цепи был рассчитан исходя из измеренного вольтметром падения напряжения на резисторе с известным сопротивлением.

$$I = U / R_3 = 2,39 \cdot 10^{-2} \text{ А, где } R_3 = 1 \text{ кОм, } U_R = 23,925 \text{ В.}$$

В местах присоединения проводов и напыленной токопроводящей дорожки возникает контактное сопротивление. Чтобы учесть его вклад в изменение напряжения на данном участке, было сделано два замера напряжения. На схеме токопроводящая линия условно представлена двумя резисторами R_1 и R_2 .

Первый раз измерялось падение напряжения между двумя концами токопроводящей линии $U_1 = 63$ мВ (условно падение напряжения на резисторах R_1 и R_2). Второй раз – между правым концом и точкой, удаленной на 11,8 см от правого конца $U_2 = 36$ мВ (условно падение напряжения на резисторе R_2). Пусть R_L - сопротивление взятое на единицу длины. Тогда суммарное сопротивление рассматриваемого участка цепи в первом случае состоит из контактного сопротивления $2R_K$ и сопротивления всей дорожки $R_L \cdot L_1$, во втором – так же из контактного сопротивления $2R_K$ и сопротивления части дорожки $R_L \cdot L_2$.

Найти R_L можно с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} R_L \cdot L_1 + 2R_K = \frac{U_1}{I}, \\ R_L \cdot L_2 + 2R_K = \frac{U_2}{I}; \end{cases}$$

где $L_1 = 22,1$ см, $L_2 = 11,8$ см

$R_L = 10,956 \pm 0,011$ Ом/м, соответственно сопротивление всей токопроводящей дорожки с учетом погрешности (прил. 2) составило $2,421 \pm 0,002$ Ом.

Удельное сопротивление высчитывалось по формуле:

$$p = \frac{R \cdot S}{l}$$

Геометрические параметры токопроводящей дорожки: длина - 0,221 м, площадь поперечного сечения – 0,6 мм².

Удельное электрическое сопротивление составило $p = 6,57 \pm 0,005$ Ом · мм²/м.

Удельное электрическое сопротивление получившегося образца выше в сравнении с удельным электрическим сопротивлением многих других материалов, обычно используемых при изготовлении токопроводящих коммуникаций (прил. 3). Однако, покрытие способно выдерживать значительно более высокие температуры. Благодаря этому свойству, изделия с покрытиями, нанесёнными методом плазменного напыления, могут быть использованы как часть термостойких электронных устройств.

Как видно из таблицы 1, показатель удельного электрического сопротивления образца может быть меньше, чем у микросхем компании Icemos Technology, применяющихся в создании высокотемпературной электроники.

Изделие	Удельное электрическое сопротивление (при комнатной температуре) Ом · мм ² / м	Рабочая температура К
Токопроводящие дорожки, нанесённые на стержень	6,5	1173
Пластина TSOI (Icemos Technology)	10	573

5. Заключение

В ходе курсовой работы был изучен принцип плазменного порошкового напыления покрытий. На стальной стержень были нанесены защитные керамические покрытия и токопроводящие дорожки из сплава алюминия и никеля. Было измерено электрическое сопротивление дорожек. Сравнение значения данного показателя с таковым у других материалов дало понять, что использование данных материалов оправдано в создании электроники, способной выдерживать высокие температуры.

6. Литература

1. Продукция компании MesoScribe URL: <https://www.mesoscribe.com/products/>
2. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков; под ред. В.А. Курнаева. М: МИФИ, 2007. 368 с
3. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В. И. Кузьмин, С. П. Ващенко, И. П. Гуляев, Е. В. Картаев, Д. В. Сергачёв [и др.] // Вестник Югорского государственного университета 2015 г. выпуск 2 (37). с. 45–52

4. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhal'chenko, O. B. Kovalev [et al.] // J. of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – No. 1. – P. 159–168.

5. Плазменная сфероидизация металлических порошков для аддитивных технологий: магистерская диссертация / Дудихин Дмитрий Витальевич – Томск, 2018г. - 145с.

6. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. [и др.]; под ред. Л.Х Балдаева – М.: Маркет ДС, 2007 – 344 с.

7. Приложение

Приложение 1. Режим напыления

Наименования величины, ед. измерения	Керамический диэлектрический слой	Металлический токопроводящий слой
Расход плазмообразующего газа, г/с	1,25	3
Сила тока, А	240	160
Напряжение, В	225	240
Эл. Мощность, кВт	54	38,4

Приложение 2. Расчет погрешности косвенных измерений.

Погрешность в представленных прямых измерениях возникает за счёт погрешности измерительных приборов. Заявленная производителем погрешность для резистора R_3 составляет 0,1 %, т. е. $R_3 = 1000 \pm 1$ Ом, номинальная погрешность используемого вольтметра, согласно документации, составляла: для измерения падения напряжения на резисторе R_3 – 0,012% + 5 единиц наименьшего разряда, т. е. $U_R = 23,925 \pm 0,0078$ В, для измерения падения напряжения на токопроводящей линии – 0,012% + 8 единиц наименьшего разряда, т. е. $U_1 = 63 \pm 0,0155$ мВ, $U_2 = 36 \pm 0,0123$ мВ.

Для расчёта погрешностей косвенных измерений используется формула:

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \Delta z\right)^2 \dots},$$

где ΔL – погрешность рассчитываемой величины, Δx (y, z, \dots) – погрешности физических параметров, входящих в формулу. $L = f(X, Y, Z \dots)$ – значение рассчитываемой величины.

Для начала нужно было узнать погрешность полученного значения тока в цепи.

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\partial\left(\frac{U_R}{R}\right)}{\partial R}\Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial\left(\frac{U_R}{R}\right)}{\partial U}\Delta U_R\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{U_R}{R^2}\Delta R\right)^2 + \left(\frac{1}{R}\Delta U_R\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(-\frac{23,925}{1000^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{1000} \cdot 0,0078\right)^2} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ (A)}$$

Затем необходимо найти погрешность величины R_L :

$$R_L = \frac{U_2 - U_1}{I(L_2 - L_1)}$$

Пусть $U_2 - U_1 = U_{21}$. Учитывая тот факт, что при вычитании величин погрешности также вычитаются, имеем $\Delta U_{21} = \Delta U_2 - \Delta U_1$.

$$\Delta R_L = \frac{1}{(L_2 - L_1)} \sqrt{\left(\frac{\partial\left(\frac{U_{21}}{I}\right)}{\partial I}\Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial\left(\frac{U_{21}}{RI}\right)}{\partial U_{21}}\Delta U_{21}\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{U_{21}}{I^2}\Delta I\right)^2 + \left(\frac{1}{I}\Delta U_{21}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(-\frac{27 \cdot 10^{-3}}{(2,39 \cdot 10^{-2})^2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \left(\frac{1}{2,39 \cdot 10^{-2}} \cdot (-0,0032 \cdot 10^{-3})\right)^2} = 0,011 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{м}}\right)$$

Тогда, соответственно, при вычислении R погрешность получится

$$\Delta R = L_2 \cdot \Delta R_L = 0,002 \text{ (Ом)}$$

Аналогично

$$\Delta p = \frac{\Delta R \cdot S}{L_2} = 0,005 \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}\right)$$

Приложение 3. Удельное электрическое сопротивление и температура
плавления некоторых материалов

Материал	Удельное электрическое сопротивление Ом · мм ² / м	Температура плавления К
Медь	0,018	1356
Серебро	0,0162	1233
Олово	0,12	505
Вольфрам	0,053	3683
Висмут	1,2	544
Оксид Алюминия	диэлектрик	2345
Сплав алюминия и никеля	-	1700