

**И.К. Походня**

# **Сварка порошковой проволокой**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621  
ББК 34.4  
И11

И11 **И.К. Походня**  
Сварка порошковой проволокой / И.К. Походня – М.: Книга по Требованию,  
2021. – 223 с.

**ISBN 978-5-458-27137-0**

**ISBN 978-5-458-27137-0**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Дуговая сварка является основным процессом при изготовлении металлических конструкций. Механизация этого процесса стала главным направлением развития сварочного производства.

В послевоенные годы в нашей стране наиболее распространена была механизированная сварка под флюсом. Абсолютный рост объемов применения сварки под флюсом имеет место и сейчас, доля же этого процесса в общем объеме сварочных работ стабилизировалась. Это связано с быстрым развитием сварки в углекислом газе. Высокая производительность, простота, экономичность — отличительные черты сварки в углекислом газе. Однако повышенное разбрызгивание электродного металла, неблагоприятная форма швов и недостаточная их пластичность вызвали необходимость разработки новых электродных материалов. Эффективным решением явилось применение порошковых проволок.

Сварка под флюсом и в защитных газах применяется сейчас в основном в цеховых условиях. В то же время еще миллионы тонн сварных конструкций изготавливаются и монтируются на открытых площадках и в полевых условиях. Здесь пока господствует ручная сварка покрытыми электродами. Для механизации процесса сварки созданы самозащитные порошковые проволоки, которые позволяют в несколько раз повысить производительность сварки в сравнении со сваркой покрытыми электродами, обеспечивая при этом высокое качество швов.

Объем производства порошковой проволоки все увеличивается и область применения ее расширяется. С 1965 по 1972 г. выпуск порошковой проволоки в СССР возрос в 5 раз.

В пятилетнем плане развития сварочного производства на 1971—1975 гг. предусмотрено увеличить выпуск порошковых проволок различного назначения в три раза.

Работы по созданию порошковых проволок, исследованию процесса сварки ими, разработке промышленной технологии производства ведутся на протяжении последних 15 лет в Институте электро-сварки им. Е. О. Патона АН УССР. Эти работы получили признание в нашей стране и за рубежом. Фирмы ряда капиталистических стран

приобрели лицензии на порошковые проволоки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, и организовали их производство. Регистры США, Англии, ФРГ, Франции разрешили применение этих проволок для сварки конструкций особо ответственного назначения.

Результаты исследований процесса сварки порошковой проволокой и опыт его применения освещались в периодической печати и различных сборниках.

Настоящая монография является первой попыткой обобщения результатов работ авторов и других исследователей.

Первые три главы книги знакомят читателя с процессами, протекающими при нагреве и плавлении порошковой проволоки. На базе экспериментального материала рассмотрены способы раскисления металла, а также рациональные пути создания надежной газовой и шлаковой защиты, обеспечивающие оптимальные сварочно-технологические характеристики. Содержание последующих глав носит прикладной характер. В них дается характеристика промышленных марок порошковой проволоки; приведены основные технологические приемы сварки, показана технико-экономическая эффективность применения порошковой проволоки в различных отраслях промышленности.

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность сотрудникам Института электросварки им. Е. О. Патона инженерам В. Н. Головки, С. А. Супруну, В. Ф. Альтеру, принимавшим участие в разработке вопросов сварки порошковой проволокой; лаборантам В. Н. Игнатьюку и П. В. Колбушкову, сварщику С. И. Свириде, участвовавшим в проведении экспериментальных работ, а также кандидату технических наук Б. М. Шинкареву, инженерам П. В. Игнатченко, Б. И. Кармазину, И. Г. Шафрановскому, Н. А. Гриценко, М. А. Столпакову, Н. А. Ребриной, А. М. Титову, В. С. Брежневу, О. В. Шишову, П. И. Ладнову, И. Н. Кирееву, Ф. М. Даутову, А. А. Гридину, Р. Г. Шнейдерову, Я. Л. Львовскому, К. В. Лялину, И. Н. Недовизию, В. П. Пацеккину, Т. Е. Михалевскому, А. Е. Элю, Г. М. Манну и многим другим сотрудникам институтов и заводов, принимавшим участие в разработке вопросов технологии изготовления порошковой проволоки, организации ее производства и внедрения.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Б. Е. Патону за помощь и постоянный интерес к работе, а также доктору технических наук И. И. Фрумину за ценные советы и замечания, сделанные при рецензировании книги.

## **ГЛАВА I**

### **ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ НАГРЕВЕ И ПЛАВЛЕНИИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ**

#### **1. Общие сведения**

**Сущность способа сварки порошковой проволокой.** Порошковая проволока представляет собой непрерывный электрод трубчатой или другой, более сложной конструкции с порошкообразным наполнителем — сердечником. Сердечник состоит из смеси минералов, руд, ферросплавов металлических порошков, химикатов и других материалов. Назначение азличных составляющих сердечника подобно назначению электродных покрытий — защита расплавленного металла от вредного влияния воздуха, раскисление, легирование металла, связывание азота в стойкие нитриды, стабилизация дугового разряда и др. Составляющие сердечника должны, кроме того, удовлетворять общепринятым требованиям, предъявляемым ко всем сварочным материалам: обеспечивать хорошее формирование швов, легкую отделимость шлаковой корки, провар основного металла, минимальное разбрызгивание металла, отсутствие пор, трещин, шлаковых включений и других дефектов, определенные механические свойства швов и сварных соединений и т. д.

Порошковые проволоки используются для сварки без дополнительной защиты зоны сварки, а также для сварки в защитных газах, под флюсом, электрошлаковой. Проволоки, используемые для сварки без дополнительной защиты, называются самозащитными. Входящие в состав сердечника таких проволок материалы при нагреве и расплавлении в дуге создают необходимую шлаковую и газовую защиту расплавленного металла. В настоящее время наибольшее распространение получили порошковые проволоки для сварки в углекислом газе и самозащитные порошковые проволоки.

В зависимости от диаметра и состава порошковой проволоки сварка может осуществляться во всех трех пространственных положениях.

Схема процесса сварки самозащитной порошковой проволокой со свободным формированием шва приведена на рис. 1. Электрическая дуга возбуждается между оболочкой 1 порошковой проволоки и основным металлом 10. За счет тепла, выделяемого в дуге, плавятся оболочка и сердечник 2 проволоки. Расплавившийся металл оболочки и сердечника образует на торце проволоки капли 3, ко-

торые растут и переносятся в сварочную ванну 5. При расплавлении минералов, руд и химикатов, входящих в состав сердечника, образуется шлак 6, покрывающий тонким слоем капли и сварочную ванну. Дуга 4 горит между каплей или оболочкой и сварочной ванной. При разложении карбонатов и органических материалов сердечника выделяются газы 9, которые защищают расплавленный металл от воздуха. Проволока по мере оплавления автоматически

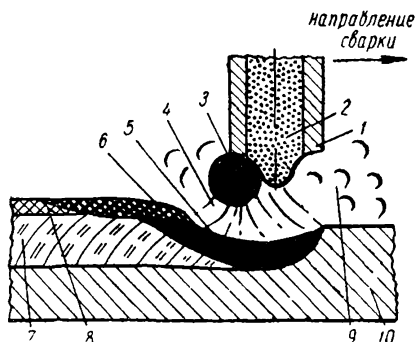


Рис. 1. Схема процесса сварки самозащитной порошковой проволокой.

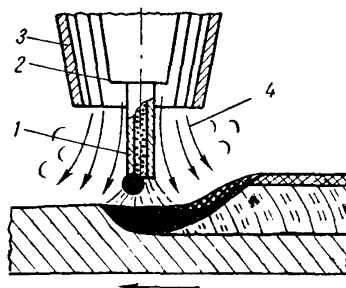


Рис. 2. Схема процесса сварки порошковой проволокой в углекислом газе:

1 — проволока; 2 — токоподвод; 3 — сопло; 4 — углекислый газ.

подается в зону сварки. При удалении дуги жидкий металл сварочной ванны кристаллизуется, образуя сварной шов 7, покрытый слоем затвердевшего шлака 8.

Схема процесса сварки порошковой проволокой в защитном газе приведена на рис. 2.

Порошковая проволока может использоваться также для сварки с принудительным формированием (рис. 3).

**Классификация сварочных порошковых проволок.** Порошковые проволоки могут быть классифицированы по назначению, способу защиты металла от влияния воздуха, типу сердечника, механическим свойствам металла шва.

Назначение проволоки определяется классом свариваемого металла. Порошковые проволоки применяются для сварки малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей, легированных сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов. Наиболее широкое распространение получили проволоки для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей. Рассмотрению свойств этих проволок и особенностей сварки посвящена, в основном, настоящая монография.

По способу защиты порошковые проволоки делятся на два вида: 1) самозащитные; 2) для сварки с дополнительной защитой газом или флюсом.

В зависимости от состава сердечника проволоки, применяющиеся в нашей стране, можно разделить на пять типов — рутил-органические, рутиловые, карбонатно-флюоритные, рутил-флюоритные, флюоритные.

Сердечник проволоки рутил-органического типа состоит в основном из рутилового концентрата и алюмосиликатов (полевой шпат, слюда, гранит и др.). В качестве раскислителей используется ферромарганец, а газообразующими материалами служат крахмал или целлюлоза. Проволоки с сердечником рутил-органического типа используются как самозащитные.

В состав сердечника проволок рутилового типа входят в основном рутиловый концентрат, алюмосиликаты и руды. Раскислителями служат ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, ферроалюминий. Проволоки с сердечником рутилового типа используются с дополнительной защитой углекислым газом.

В сердечник проволоки карбонатно-флюоритного типа вводят в качестве газообразующих материалов карбонаты кальция, магния, натрия. В качестве шлакообразующих материалов используют рутиловый концентрат, алюмосиликаты, окислы щелочноземельных металлов, флюоритовый концентрат. Раскисляют металл ферромарганцем, ферросилицием. Для дополнительного раскисления металла и связывания азота в нитриды в сердечник проволок этого типа иногда вводят титан и алюминий. Проволоки с сердечником карбонатно-флюоритного типа чаще всего используют как самозащитные, но применяют и в сочетании с дополнительной защитой углекислым газом.

В состав сердечника проволок рутил-флюоритного типа входят в основном рутиловый и флюоритовый концентраты, в качестве шлакообразующих иногда вводят окислы щелочноземельных металлов, алюмосиликаты. Раскислителями служат ферромарганец и ферросилиций. Проволоки с сердечником этого типа применяются, как правило, с дополнительной защитой углекислым газом.

Сердечник проволок флюоритного типа в основном состоит из флюоритового концентрата, в небольших количествах вводят окислы щелочноземельных металлов. Для раскисления металла применяют ферромарганец, алюминий, магний. Алюминий также связывает азот металла сварочной ванны в нитриды. Проволоки с сердечником флюоритного типа используются как самозащитные.

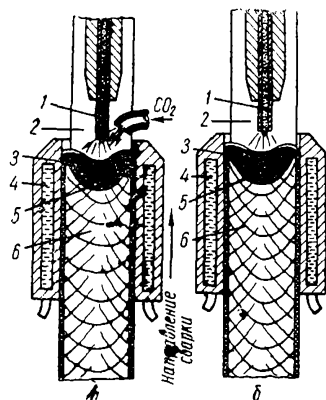


Рис. 3. Схема электродугового процесса сварки с принудительным формированием порошковой проволокой:

а — в углекислом газе; б — открытой дугой. 1 — порошковая проволока; 2 — свариваемый металл; 3 — шлак; 4 — ползуны; 5 — сварочная ванна; 6 — шов.

В сердечники проволок всех типов с целью увеличения производительности сварки и придания благоприятных сварочно-технологических свойств вводят железный порошок.

Классификация проволок по механическим свойствам наплавленного металла пока еще не утверждена. Обычно по этому признаку

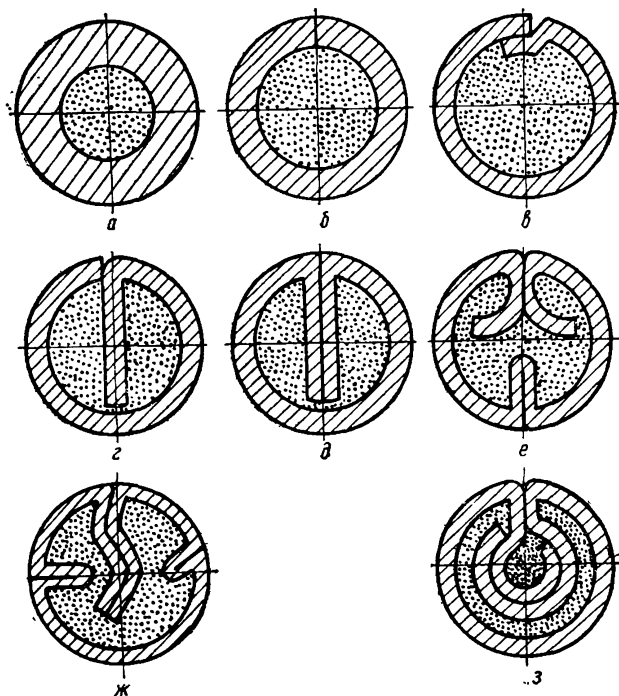


Рис. 4. Конструкции порошковой проволоки.

свойства швов, выполненных порошковыми проволоками, сравнивают со свойствами швов, выполненных электродами различных типов, регламентированных ГОСТом 9467—60.

**Конструкции порошковых проволок.** Из применяющихся конструкций порошковых проволок (рис. 4) наиболее распространены проволоки трубчатой конструкции (а, б, в). Введение части оболочки внутрь сердечника (г, д, е, ж, з) обеспечивает более равномерное плавление его и более эффективную защиту металла от воздуха.

Влияние конструкции проволоки на особенности ее плавления и свойства швов рассматривается ниже.

**Коэффициент заполнения.** Количество материала в сердечнике порошковой проволоки принято оценивать коэффициентом запол-

нения  $K_3$ :

$$K_3 = \frac{G_{\text{пор}}}{G_{\text{пров}}} 100 \%, \quad (1)$$

где  $G_{\text{пор}}$  — масса порошкового наполнителя;  $G_{\text{пров}}$  — общая масса проволоки.

В зависимости от назначения проволоки  $K_3$  колеблется в широких пределах (10—40%). От величины  $K_3$  в значительной мере зависит эффективность защиты расплавленного металла. Стабильность коэффициента заполнения определяет качество изготовления проволоки.

**Характеристики расплавления.** Коэффициент расплавления ( $\alpha_p$ ) представляет удельную (отнесенную к одному амперу сварочного тока) производительность процесса расплавления оболочки проволоки и определяются из выражения

$$\alpha_p = \frac{G_{\text{пров}}(1-K_3)}{I_{\text{св}}\tau} \text{ г/а} \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{св}}$  — сила тока;  $\tau$  — время расплавления проволоки.

Коэффициентом наплавки  $\alpha_n$  характеризуется удельная производительность процесса наплавки:

$$\alpha_n = \frac{G_n}{I_{\text{св}}\tau} \text{ г/а} \cdot \text{ч}, \quad (3)$$

где  $G_n$  — масса металла, наплавленного за время  $\tau$ .

Потери электродного металла (без учета потерь на угар и испарение) учитываются коэффициентом набрызгивания  $\alpha_{\text{нб}}$ :

$$\alpha_{\text{нб}} = \frac{G_{\text{бр}}}{G_n} 100 \%, \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{нб}}$  — потери электродного металла на разбрызгивание;  $G_{\text{бр}}$  — масса брызг;  $G_n$  — масса наплавленного металла.

Производительность процесса  $G_{\text{пр}}$  часто определяют массой металла, наплавленного в единицу времени:

$$G_{\text{пр}} = \frac{G_n}{\tau} \text{ кг/ч}. \quad (5)$$

## **2. Развитие процессов в твердой фазе при нагреве**

В процессе сварки порошковая проволока проходит стадии нагрева и плавления, сопровождающиеся окислением железа и легирующих элементов, разложением органических материалов, карбонатов и фторидов, комплексообразованием и пр. Развитие этих процессов в сердечнике оказывает существенное влияние на

взаимодействие расплавленного металла с газами и шлаком и во многом определяет технологические показатели сварки.

Нагрев оболочки порошковой проволоки при сварке происходит преимущественно за счет тепла, выделяющегося при прохождении сварочного тока, и тепла, выделяющегося в активном пятне. При этом на участке проволоки от среза наконечника мундштука до

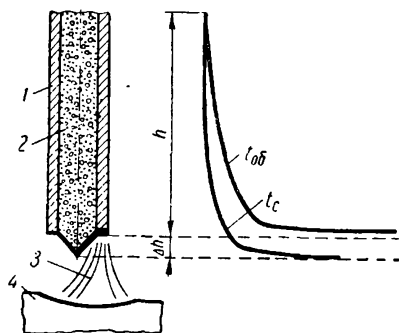


Рис. 5. Распределение температур на вылете порошковой проволоки (схема):

1 — оболочка; 2 — сердечник; 3 — дуга; 4 — основной металл.  $t_{об}$  — температура нагрева оболочки;  $t_c$  — температура нагрева сердечника.

дуги устанавливается квазистационарное температурное поле. Схема распределения температуры в порошковой проволоке представлена на рис. 5. Тепло, выделяющееся в активном пятне, нагревает лишь небольшой участок величиной не более 1—3 мм на торце проволоки. На этом участке оболочка проволоки нагревается до температуры плавления  $t_{пл}$  и выше.

Распределение температуры в электродной проволоке на вылете можно рассчитать по известным формулам или с помощью номограмм [79, 81, 115].

Площадь оболочки  $S$  в поперечном сечении составляет обычно 2—5 мм<sup>2</sup>. Расчет показывает,

что в процессе сварки оболочка порошковых проволок на вылете может нагреваться до температур примерно 1000°С (рис. 6).

Нагрев сердечника осуществляется передачей тепла от дуги и оболочки. При высоких скоростях подачи проволоки тепло, выделяющееся на торце, распространяется на меньшую длину, чем в оболочке, так как теплопроводность сердечника на 1—2 порядка меньше теплопроводности оболочки.

За исключением небольшого участка, нагреваемого с торца, сердечник можно представить в виде цилиндра бесконечной длины, нагреваемого с поверхности. Из теории переноса тепла применительно к дисперсным системам и капиллярно-пористым телам следует, что для определения температуры  $T$  в произвольной точке цилиндра в момент времени  $\tau$  требуется решить дифференциальное уравнение [29, 60]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (6)$$

где  $\frac{\lambda}{c\gamma}$  — температуропроводность;  $r$  — текущий радиус цилиндра с радиусом  $R$ .

Решение уравнения (6) может быть записано в виде ряда:

$$\frac{T_n - T}{T_n - T_n} = \frac{2}{R} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{e^{\frac{-a_i^2 \lambda \tau}{c \gamma}}}{a_i J_1(a_i R)} J_0(a_i r), \quad (7)$$

где  $J_0$  и  $J_1$  — функции Бесселя первого рода (нулевого и первого порядков);  $a_i$  —  $i$ -й корень уравнения  $J_0(a_i R) = 0$  (8);  $T_n$  — температура поверхности;  $T_n$  — начальная температура тела цилиндра.

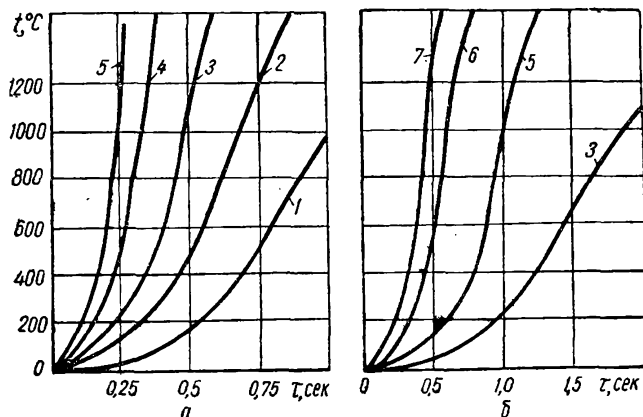


Рис. 6. Зависимость температуры нагрева оболочки порошковой проволоки площадью 2 мм<sup>2</sup> (а) и 4 мм<sup>2</sup> (б) от времени прохождения сварочного тока:

1 — 200а; 2 — 250а; 3 — 300а; 4 — 350а; 5 — 400а; 6 — 500а; 7 — 600а.

В литературе имеются решения уравнения в виде графиков [178].

Принимая равным нулю расход тепла на перегрев продуктов диссоциации и полагая, что в реакционной зоне все тепло расходуется на компенсацию эндотермического эффекта, можно определить время диссоциации карбоната. В результате преобразования уравнения, выведенного О. А. Есиным и П. В. Гельдом [40], получается следующее выражение:

$$\tau_d = A \frac{Q' \gamma}{\lambda (T_n - T_p)}, \quad (9)$$

где  $\tau_d$  — время диссоциации;  $Q'$  — тепловой эффект, отнесенный к единице массы карбоната;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности твердого продукта разложения;  $\gamma$  — объемный вес;  $T_n$ ,  $T_p$  — соответственно температура поверхности и реакционной зоны;  $A$  — коэффициент, зависящий от размеров образца и степени диссоциации.

На рис. 7 приведены результаты расчетов времени диссоциации

образца карбоната кальция диаметром 2 мм (что примерно соответствует размеру сердечника трубчатой проволоки диаметром 3 мм). При вычислении времени полной диссоциации требуется вносить поправку на перегрев реакционной зоны [40].

Из выражения (9) видно, что сокращение времени диссоциации может быть достигнуто увеличением теплопроводности порошка. Минеральные примеси ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) имеют коэффициент теплопроводности такого же порядка, как и продукты диссоциации

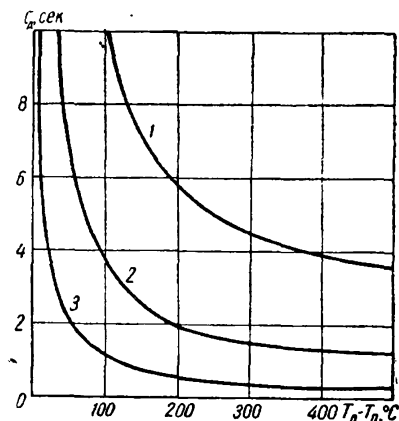


Рис. 7. Зависимость степени диссоциации  $\alpha_d$  карбоната от температуры перегрева поверхности сердечника и времени:

1 — 75%; 2 — 44%; 3 — 24%.

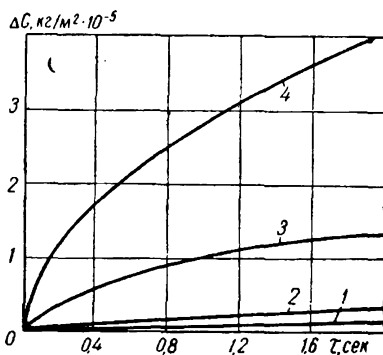


Рис. 8. Зависимость скорости окисления поверхности железа от времени при температурах нагрева, °C:

1 — 900; 2 — 1000; 3 — 1200; 4 — 1400.

карбонатов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ). Теплопроводность можно повысить, введя в сердечник металлические порошки, теплопроводность которых на порядок выше. Коэффициент теплопроводности порошка железа, например, с крупностью частиц 0,1—0,2 мм составляет  $(45 \div 60) \cdot 10^6$  дж/м·сек·град ( $3 \div 4$  ккал/м·час·град), а порошка алюминия  $(75 \div 90) \cdot 10^6$  дж/м·сек·град [148].

Зная, как распределяется температура в оболочке и сердечнике, можно рассчитать степень окисления железа. При сварке открытой дугой металл оболочки и компоненты сердечника окисляются, в значительной мере за счет кислорода воздуха. При окислении железа на воздухе при температурах выше 200° С установлена следующая зависимость количества образовавшегося окисла от температуры:

$$\Delta G = 22,7 \cdot 10^4 \sqrt{\tau} e^{-\frac{9000}{T}}, \quad (10)$$

где  $\Delta G$  — прирост массы,  $\text{kg/m}^2$ ;  $\tau$  — время, сек;  $T$  — температура, °К.