

Н.Н. Рыкалин

Расчёты тепловых процессов при сварке

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
Н11

Н11 **Н.Н. Рыкалин**
Расчёты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин – М.: Книга по Требованию, 2024. – 294 с.

ISBN 978-5-458-38070-6

Книга содержит систематическое изложение методов тепловых расчётов сварочных процессов. В ней рассматриваются процессы распространения тепла при нагреве металла дугой и газовым пламенем, влияние характера распространения тепла на процессы плавления электродов и основного металла, а также на термический цикл и возникающие в основном металле структурные изменения.

ISBN 978-5-458-38070-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

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 первоизданном 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.

ные: развиваемое ими тепло сосредоточено на участке поверхности металла или в ограниченной области его объема. Эффективная тепловая мощность источника и характер ее распределения по участку или по области нагрева определяются физической природой источника тепла. Дуга прямого действия развивает тепло непосредственно в электрически активном пятне, а также нагревает металл посредством лучистого и конвективного теплообмена его поверхности со столбом дуги и с пятном на электроде. Тепловой поток дуги косвенного действия, а также газового пламени, обусловлен только лучистым и конвективным теплообменом нагреваемой поверхности с пятнами и пламенем дуги или с пламенем горючей газовой смеси.

Источники тепла, применяемые при сварке, характеризуются высокой концентрацией выделяемого тепла, необходимой для быстрого и эффективного местного нагрева металла до температуры, требуемой для сварки. На использовании тепла этих источников основаны наиболее широко применяемые способы сварки металлов — дуговая, газовая и контактная.

4. Процесс нагрева и охлаждения металла при сварке. Тепло, вводимое источником для нагрева свариваемых участков поверхности металла, распространяется по объему изделия. Процесс нагрева и охлаждения металла обусловлен:

- а) выделением тепла источником;
- б) распространением тепла в ванне расплавленного металла, главным образом вследствие конвективного теплообмена, вынужденного дутьем дуги или пламени;
- в) распространением тепла в массу нерасплавленного металла изделия посредством теплопроводности;
- г) потерей тепла через поверхность металла в окружающую среду вследствие лучистого и конвективного теплообмена и в соприкасающиеся с изделием твердые тела посредством теплопроводности.

Процессы распространения в нерасплавленном металле тепла, выделяемого сварочной дугой и газовым пламенем с учетом поверхностных потерь, изучены советскими исследователями достаточно полно для построения практически применимых расчетных схем.

5. Теория распространения тепла сосредоточенных источников и ее приложения. Для описания процессов распространения тепла в удаленной области дугу можно представлять сосредоточенным подвижным источником — точечным, линейным или плоским, в зависимости от формы нагреваемого тела [3]. Рассчитанные по этой схеме изменения температуры металла при дуговой сварке хорошо сходятся с изменениями температуры, измеренными посредством термопар.

Теория распространения тепла сосредоточенных подвижных источников дала возможность изучить следующие процессы, про-

текающие при дуговой сварке в области низких температур (до $800-1000^{\circ}$ для стали), и наметить пути управления ими:

а) структурные изменения при охлаждении в удаленных от дуги слоях зоны термического влияния, например, распад аустенита при сварке низколегированной конструкционной стали [25], [25], [27];

б) температурное деформирование и накопление местных пластических деформаций, ведущее к развитию собственных напряжений и остаточных деформаций в сварном изделии и к образованию холодных трещин [30], [31], [32]

Расчеты, основанные на схеме нагрева сосредоточенными источниками тепла, дали также возможность оценить в первом приближении эффективность процесса проплавления основного металла сварочной дугой и оценить влияние параметров режима на производительность проплавления [3], [14], [15], [17], [22], [23].

Нагрев током электродов при ручной сварке и электродной проволоки при автоматической сварке рассчитывают по схеме равномерно распределенного объемного источника тепла. В сочетании с расчетом нагрева электрода или проволоки дугой, рассматриваемой как плоский подвижной источник тепла, эти расчеты дают возможность оценить влияние параметров режима на производительность расплавления присадочного металла при дуговой сварке [15], [18], [20], [22].

6. Теория местных распределенных источников и ее приложения. Процессы распространения тепла в области, близкой к источнику, при нагреве металла дугой прямого и косвенного действия, пламенем газовых горелок и электрическим током с неравномерно распределенной плотностью целесообразно описывать, считая источник местным нормально распределенным по поверхности или объему тела. Удельный тепловой поток такого источника распределен по нагреваемому участку поверхности или объему металла согласно с законом нормального распределения*.

Рассчитанные по схемам нормально кругового и нормально-полосового источника изменения температуры металла, нагреваемого ацетилено-кислородным пламенем простой и линейной многопламенной горелки, хорошо сходятся с изменениями температуры (до $1200-1300^{\circ}$ для стали), измеренными термометрами. Эти схемы позволяют рассчитывать процессы нагрева и охлаждения при газовой сварке (ручной, прессовой и скоростной автоматической), а также при поверхностной закалке, при подогреве для резки и при других видах обработки пламенем [10], [11].

Представление поверхностной (т. е. не углубляющейся значительно в ванну расплавленного металла) дуги схемой нормально-кругового источника тепла дает возможность рассчитывать тепловые процессы, протекающие в высокотемпературной

* Рыкалин Н. Н., Развитие теории распространения тепла при сварке применительно к распределенным источникам. Доклад на заседании Ученого совета секции электросварки и электротермии АН СССР 7 июня 1950 г.

(выше $800\text{--}1000^\circ$ для стали) области нерасплавленного основного металла [9].

Теория распространения тепла местных нормально-распределенных подвижных источников при дуговой сварке, при газовой сварке и при нагреве пламенем дает возможность изучить следующие процессы, протекающие в области высоких температур (выше $800\text{--}1000^\circ$ для стали), и наметить пути управления ими:

а) проплавление основного металла с оценкой размеров ванны расплавленного металла и зоны проплавления;

б) первичную кристаллизацию наплавленного металла и структурные изменения при охлаждении;

в) структурные изменения при нагреве и охлаждении в промежутке высоких температур в околошовной зоне основного металла (например, рост зерна аустенита в зоне перекристаллизации стали), а также диффузионные взаимодействия между основным и наплавленным металлом;

г) образование горячих трещин в наплавленном металле и в околошовной зоне, связанное со скоростью деформирования в температурном промежутке пониженной пластичности [33].

7. **Назначение книги.** Трудami советских ученых и инженеров, работающих в Академии наук СССР, в Академии наук УССР, в высших учебных заведениях, в отраслевых институтах и в заводских лабораториях, созданы научные направления, возникшие из потребностей практики и тесно с ней связанные. Среди них следует назвать теорию сварочных процессов, включающую тепловые и металлургические основы сварки, теорию прочности сварных конструкций, технологию дуговой, контактной и газовой сварки, теорию электрических машин и аппаратов для сварки. Этим направлениям соответствуют научные дисциплины, на которых строится подготовка студентов и аспирантов сварочной специальности.

Предлагаемая вниманию читателей книга предназначена для студентов сварочной специальности, изучающих тепловые основы сварки (1-ю часть курса «Теория сварочных процессов»), для инженеров, работающих в исследовательских институтах, заводских лабораториях и технологических бюро, и для аспирантов. В ней изложены обоснования и способы расчета процессов нагрева и охлаждения металла при дуговой и газовой сварке и при обработке металлов газовым пламенем. Развитые в книге способы расчета основаны на теоретических исследованиях и опытах, проводившихся в Секции электросварки и электротермии Академии наук СССР и в сварочной лаборатории Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана.

Содержание книги в основном соответствует курсу лекций, читавшихся, начиная с 1946 г., студентам сварочной специальности и аспирантам МВТУ, но некоторые разделы (метод источников, нагрев нормально распределенными источниками, сложный термический цикл) изложены более подробно с целью облегчить самостоятельную работу над книгой.

Для изучения тепловых основ сварки необходимы следующие дисциплины общетехнического цикла: физика, основы теплопередачи, электротехника, металловедение. В свою очередь, тепловые основы сварки, представляющие часть теории сварочных процессов, нужны для изучения теории металлургических процессов и ряда прикладных дисциплин сварочной специальности: технологии дуговой сварки, технологии газовой сварки и резки, технологии контактной сварки и сварных конструкций (включая теорию сварочных деформаций и напряжений).

Широкое применение всех видов сварки, осуществляемое на основе Сталинских планов развития народного хозяйства СССР, требует распространения научных методов расчета сварочных процессов, в том числе современных методов расчета тепловых процессов при сварке, среди исследовательских и практических работников. Расчеты дают возможность оценить влияние параметров режима сварки на протекание сварочных процессов. Тепловые расчеты целесообразно применять в исследовательской работе и в технологических бюро при разработке технологических процессов сварки.

Расширяющееся применение в промышленности легированных сталей и специальных сплавов требует назначения более точного режима, обеспечивающего заданные требования к структуре зоны термического влияния и свойствам сварного соединения. Расчеты тепловых процессов обобщают данные лабораторных опытов и указывают пути их переноса на целые конструкции, сокращая тем самым срок освоения новых изделий в сварочном производстве.

Дружная работа исследователей и производственников поможет отработать и улучшить способы расчета тепловых процессов при сварке и будет способствовать дальнейшему развитию сварочного дела в нашей стране — родине электрической сварки.

Автор благодарит кандидатов технических наук Л. Н. Белова, А. А. Ерохина, И. Д. Кулагина, Л. А. Фридлянда и М. Х. Шоршорова, участвовавших в разработке ряда излагаемых в книге вопросов, и А. И. Пугина, оказавшего большую помощь в подготовке рукописи к печати.

ГЛАВА I

ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

§ 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Неравномерное распределение температуры в металле, характерное для сварки и других видов местной тепловой обработки металла, неустойчиво. С течением времени температура в неравномерно нагретом теле выравнивается, причем более нагретые части отдают тепло непосредственно соприкасающимся с ними менее нагретым частям. Этот вид передачи тепла носит название теплопроводности.

В твердых телах теплопроводность является единственным механизмом распространения тепла. В жидкостях и газах роль теплопроводности обычно невелика в сравнении с другими видами теплообмена — конвективным и лучистым (§ 2).

Основные определения. Температурное поле есть совокупность значений температуры в данный момент во всех точках пространства. Температурное поле описывают уравнениями, отнесенными к определенной системе пространственных координат, например, к прямоугольной: $T = T(x, y, z)$ или к цилиндрической $T = T(r, \varphi, z)$.

Температурное поле в теле удобно характеризовать изотермами. Изотермическая поверхность представляет собой геометрическое место точек тела, имеющих одинаковую температуру (фиг. 1).

Изотермические поверхности не могут пересекаться, так как в точках их пересечения имели бы место различные температуры, что физически невозможно.

При перемещении в поле по заданному направлению ss температура непрерывно изменяется. Среднее изменение температуры на участке между двумя изотермами будет равно $\frac{T_1 - T_2}{\Delta s}$, где $T_1 - T_2$ — разность температур соседних изотерм, Δs — расстояние между изотермами по направлению ss . Уменьшая расстояние Δs , в пределе получим градиент температуры по данному направлению

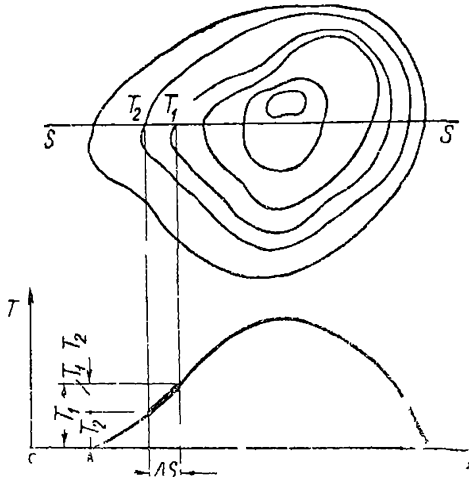
$$\lim \left| \frac{T_1 - T_2}{\Delta s} \right|_{\Delta s \rightarrow 0} = \frac{\partial T}{\partial s}. \quad (1.1)$$

Очевидно, что градиент по касательной tt к изотерме равен нулю, а по нормали nn к изотерме принимает максимальное значение.

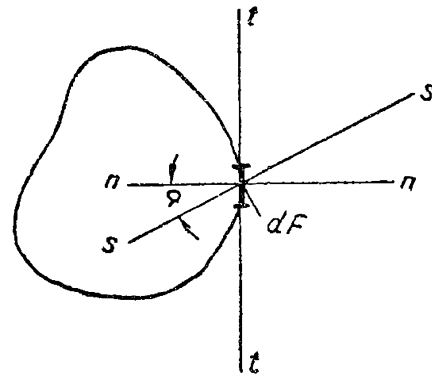
ние, называемое градиентом температуры в данной точке поля (фиг. 2)

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (1.2)$$

Градиент температуры в данной точке есть вектор, совпадающий с направлением наибольшего изменения температуры, нормальным к изотермической поверхности; величина его равна производной от температуры по нормали к изотермической поверх-



Фиг. 1. Изображение температурного поля изотермами



Фиг. 2. Нормаль, касательная и секущая под углом α в данной точке изотермы

ности. Положительный градиент соответствует возрастанию температуры.

Градиент по заданному направлению ss , образующему с нормалью nn угол α ,

$$\frac{\partial T}{\partial s} = \frac{\partial T}{\partial n} \cos \alpha, \quad (1.3)$$

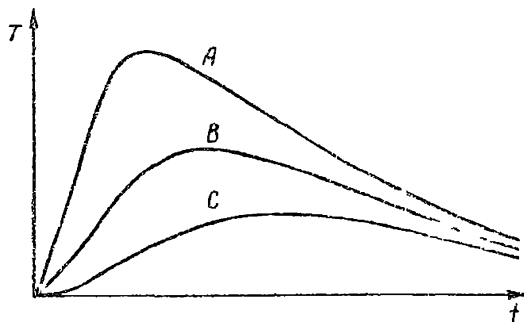
очевидно, тем меньше, чем направление ss ближе к направлению касательной tt к изотермической поверхности.

Процесс распространения тепла представляется совокупностью мгновенных температурных полей для всех моментов времени в течение определенного промежутка и описывается уравнением $T = T(x, y, z, t)$, выражающим зависимость температуры от пространственных координат и времени t . Изменение со временем температуры в различных точках тела изображают графиками (фиг. 3). Скорость изменения температуры в данной точке поля в данный момент, очевидно, выразится соответствующим значением частной производной от температуры по времени $\frac{\partial}{\partial t} T(x, y, z, t)$.

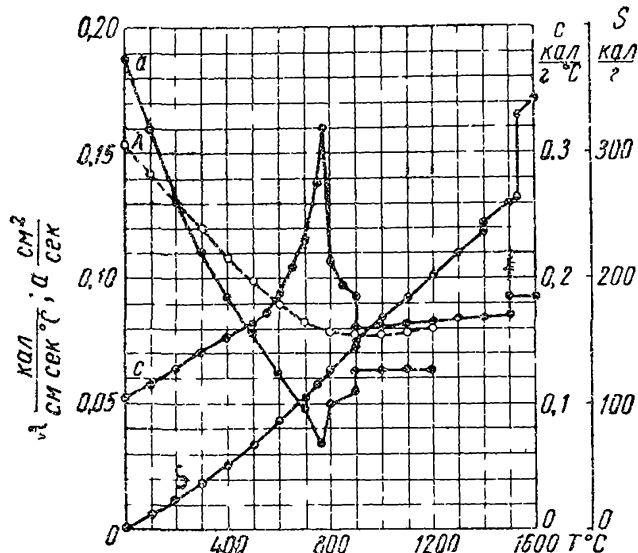
Теплосодержание S кал/г, т.е. количество теплоты, сообщенное твердому телу при нагреве до температуры T ,

отнесенное к единице его массы, отсчитывают при технических расчетах не от абсолютного нуля, а от значения, соответствующего нулю стоградусной шкалы. Теплосодержание железа S при нагреве от 0 до 1600° возрастает на 343 кал/г (фиг. 4). В критических точках, соответствующих аллотропическим превращениям $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$ (906°) и $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\delta$ (1401°), а также температуре плавления (1523°), при нагреве поглощается, а при охлаждении выделяется теплота, и теплосодержание изменяется скачкообразно.

Теплоемкость твердого тела (истинная или при данной температуре) $c \text{ кал/г}^\circ\text{C}$ представляет предел отношения количества теплоты ΔS , сообщенного телу, к соответствующему изменению температуры ΔT при бесконечном уменьшении этого изменения $c = \frac{dS}{dT}$. В критических точках, где зависимость теплосодержания от температуры испытывает



Фиг. 3. Изменение со временем температуры в различных точках тела — А, В и С.



Фиг. 4. Теплофизические свойства малоуглеродистой стали с 0,1% С:

теплосодержание S истинная теплоемкость c , коэффициент теплопроводности λ , коэффициент температуропроводности a в промежутке температур $0-1600^\circ$.

разрыв непрерывности, понятие истинной теплоемкости теряет смысл. Теплоемкость железа изменяется с температурой, достигая в точке Кюри (768°) максимального значения $0,32 \text{ кал/г}^\circ\text{C}$ (фиг. 4). Для расчетов иногда удобно принимать среднюю теплоемкость в данном промежутке температур, представляющую отношение количества теплоты $S_2 - S_1$, сообщенного телу, к соответствующей разности температур $T_2 - T_1$. Так, например, средняя теплоемкость железа в промежутке от 0 до 1500° составляет $\frac{259}{1500} = 0,173 \text{ кал/г}^\circ\text{C}$.

Закон теплопроводности Фурье. В неравномерно нагретом теле температура с течением времени выравнивается, причем тепло перемещается от слоев с более высокой температурой к слоям менее нагретым.

тым. Чем резче изменяется температура по заданному направлению, тем большее количество тепла протекает в этом направлении от более нагретой зоны к менее нагретой. Количество тепла dQ , протекающее вследствие теплопроводности за время dt через элемент dF изотермической поверхности, пропорционально падению температуры $\left(-\frac{\partial T}{\partial n}\right)$ по направлению нормали к этой поверхности, площади dF и времени dt

$$dQ = \lambda \left(-\frac{\partial T}{\partial n}\right) dF dt. \quad (1.4)$$

Падение температуры по данному направлению равно градиенту по тому же направлению, взятому с обратным знаком. Положительный градиент по данному направлению означает, что температура по этому направлению возрастает. Поток тепла всегда направлен в сторону убывающей температуры, т. е. совпадает по направлению с отрицательным градиентом. Поэтому количество протекающего тепла принято пропорциональным градиенту с обратным знаком. Множитель пропорциональности λ называется коэффициентом теплопроводности.

Удельный тепловой поток $q(x, y, z, t)$ кал/см² сек через данную поверхность в данной точке (x, y, z) и в данный момент t есть предел отношения количества тепла ΔQ , протекающего через элементарную площадку ΔF поверхности за элемент времени Δt , к площадке ΔF и к времени Δt при бесконечном уменьшении ΔF и Δt

$$q = \lim_{\substack{\Delta F \rightarrow 0 \\ \Delta t \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta F \Delta t} \right) = \frac{dQ}{dF dt}. \quad (1.5)$$

Закон теплопроводности Фурье выражает, что удельный тепловой поток q через изотермическую поверхность

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.6)$$

равен произведению коэффициента теплопроводности на градиент $\frac{\partial T}{\partial n}$ в данной точке, взятый с обратным знаком. Можно показать, что удельный тепловый поток q_s по любому заданному направлению ss , т. е. через элемент ΔF_s поверхности, перпендикулярной этому направлению, равен произведению коэффициента теплопроводности на градиент $\frac{\partial T}{\partial s}$ по тому же направлению, взятый с обратным знаком

$$q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial s} = q \cos \alpha, \quad (1.7)$$

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность вещества проводить тепло. Численно коэффициент теплопроводности равен удельному тепловому потоку, отнесенному к единице температурного градиента (с обратным знаком) или количеству тепла, протекающему через единицу поверхности за единицу времени при падении температуры по направлению нормали к этой поверхности в 1° на единицу длины. Размерность λ в физической системе единиц (удобной для расчета сварочных процессов) — $\frac{\text{кал/см}^2 \text{ сек}}{^\circ\text{C/см}}$

или сокращенно $\text{кал/см сек}^\circ\text{C}$; в технической системе — $\text{ккал/м час}^\circ\text{C}$, в

электротехнической — $\text{вт/см}^\circ\text{C}$. Для перевода величин λ из одной размерности в другую применяют следующие соотношения:

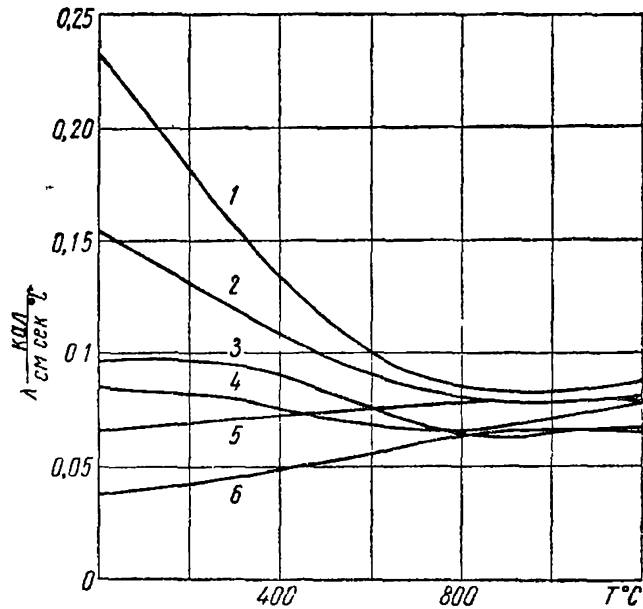
$$1 \text{ кал/см сек}^\circ\text{C} = 360 \text{ ккал/м час}^\circ\text{C} = 4,19 \text{ вт/см}^\circ\text{C};$$

$$1 \text{ ккал/м час}^\circ\text{C} = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ кал/см сек}^\circ\text{C};$$

$$1 \text{ вт/см}^\circ\text{C} = 0,239 \text{ кал/см сек}^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплопроводности металла зависит от его химического состава, структуры и температуры. Коэффициент теплопроводности для железа, углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса с увеличением температуры до $800\text{--}900^\circ$ падает, а для высоколегированных сталей аустенитного класса — нержавеющей, жароупорной — повышается (фиг. 5). Значения коэффициентов теплопроводности для разнообразных марок углеродистой и легированной стали находятся между значениями λ для железа и для хромоникелевой нержавеющей стали. При нормальной температуре коэффициенты λ значительно различаются, но по мере повышения температуры разница между коэффициентами теплопроводности различных марок стали сглаживается. При температурах выше 800° коэффициенты λ различных марок стали, находящихся в аустенитном состоянии, близки друг к другу и не выходят из пределов $0,06\text{--}0,08 \text{ кал/см сек}^\circ\text{C}$.

Теплопроводность и электропроводность металлов обусловлены одинаковым механизмом — перемещением свободных электронов под действием разности температур или электрических потенциа-



Фиг. 5. Коэффициент теплопроводности λ различных марок стали в зависимости от температуры:

1 — электролитическое железо, 2 — малоуглеродистая сталь 0,1% С, 3 — углеродистая сталь 0,45% С, 0,06% Si, 0,07% Mn, 4 — низколегированная хромистая сталь: 0,10% С, 0,02% Si, 0,4% Mn, 4,98% Cr, 5 — хромистая сталь: 1,52% С, 0,38% Si, 0,38% Mn, 13,1% Cr, 6 — хромоникелевая нержавеющая сталь 18-8: 0,15% С, 0,15% Si, 0,26% Mn, 8,04% Ni, 17,8% Cr.

лов. Поэтому между физическими коэффициентами теплопроводности λ и электропроводности $\sigma = \frac{1}{\rho}$ в 1/омсм существует связь, выражаемая законом Лоренца

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L (T + 273^\circ). \quad (1.8)$$

Отношение коэффициентов теплопроводности и электропроводности пропорционально абсолютной температуре металла. Коэффициент пропорциональности для черных и цветных металлов практически постоянен и составляет $L = (5 \div 7) \cdot 10^{-3} \frac{\text{ом кал}}{\text{сек}^\circ\text{C}}$. Соотношением (1.8) иногда пользуются для приближенной оценки зависимости коэффициента теплопроводности от температуры, так как при повышенных температурах электрическое сопротивление определяется из опытов значительно проще, чем коэффициент теплопроводности.

§ 2. ПОВЕРХНОСТНАЯ ТЕПЛООТДАЧА

Конвективный теплообмен. При конвективном теплообмене тепло передается движущимися частями жидкости или газа. При естественном или свободном конвективном теплообмене часть жидкости или газа перемещается вследствие различной плотности неодинаково нагретых зон. Если в жидкую среду с температурой T_0 поместить твердое тело, нагретое до более высокой температуры T , то частицы жидкости, омывающие поверхность нагретого тела, будут подогреваться. Так как плотность нагретых слоев жидкости меньше плотности холодных слоев, нагретые частицы будут подниматься вверх, уступая место у нагретой поверхности холодным слоям. Таким образом, в жидкости устанавливается конвективный ток, способствующий выравниванию ее температуры.

Вынужденный конвективный теплообмен есть перенос теплоты потоком жидкости или газа, находящимися в движении под действием внешних причин. Так, например, в сварочной ванне наряду с естественным может наблюдаться и вынужденный конвективный теплообмен, вызванный дутьем дуги или газового пламени.

Удельный поток конвективной теплоотдачи поверхности твердого тела жидкости или газу, т. е. количество тепла, проходящее через единицу поверхности тела за единицу времени, $q_k \text{ кал/см}^2 \text{ сек}$, обычно выражают правилом Ньютона

$$q_k = \alpha_k (T - T_0), \quad (2.1)$$

где T — температура поверхности твердого тела в $^\circ\text{C}$;

T_0 — температура жидкости или газа в $^\circ\text{C}$;

α_k — коэффициент конвективной теплоотдачи в $\text{кал/см}^2 \text{ сек}^\circ\text{C}$.

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_k зависит: 1) от формы и размеров поверхности, отдающей тепло (шар, цилиндр, пластина) и от ее положения в пространстве (вертикального, горизонтального,