

Министерство высшего и среднего специального
образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант В.И. Прилепин

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОФИЗИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНЫХ МЕТАЛЛОВ И
СПЛАВОВ В ТВЕРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ

(05.323. Литейное производство)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1972

Работа выполнена на кафедре "Теоретическая и общая теплотехника" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и в лаборатории физики контактных явлений Физико-технического института АН БССР.

Научный руководитель -
член-корреспондент АН БССР, доктор
технических наук, профессор
А.И.ВЕИНИН

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор
Г.Ф.БАЛАНДИН,

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник В.Р.РОВКАЧ

Ведущее предприятие -
Минский станкостроительный завод
имени С.М.Кирова

Автореферат разослан " " _____ 1972 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1972 г.

на заседании Объединенного совета по присуждению ученых степеней по механико-технологическим, машиностроительным, авто-тракторным и торфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Отзывы просим направлять по адресу: г.Минск, 27, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент

Н.В.Кислов

В в е д е н и е

В процессе строительства коммунизма наука все теснее смыкается с производством, а оно, в свою очередь, все шире и шире использует достижения науки. От успехов же науки в незначительной степени зависит темп нашего движения вперед, поскольку она помогает не только решить задачи сегодняшнего дня, но и заглядывать в день завтрашний.

Успешно развивается и литейное производство. На нынешнем уровне развития теории литейных процессов необходимо знание термофизических свойств отливки и формы в широком температурном интервале. Возросли требования к термофизическим (теплопроводность и теплоемкость) и электрическим (электропроводность) свойствам литых изделий и в таких отраслях новой техники, как реакторостроение, радиоэлектроника, техника низких температур, теплотехника и многих других. Вот почему в настоящее время широко развернулись исследования и разработки, направленные на создание методов определения термофизических и электрических свойств металлов и сплавов.

Однако, как показывает анализ существующих методов, в настоящее время нет еще такого экспериментального метода, который сочетал бы в себе надежность и точность с доступностью и простотой. Теория же не позволяет рассчитывать термофизические свойства металлов и сплавов в широком температурном интервале, и тем более предугадывать термофизические свойства новых создаваемых сплавов.

В настоящей работе ставится и на основе современной термодинамики необратимых процессов решается задача создания метода расчета термофизических свойств металлов и сплавов в твердом и жидком состояниях. Этот метод позволяет рассчитывать также и свойства сплавов через свойства компонентов. Справедливость полученных соотношений проверена на большом количестве экспериментальных данных (заимствованных из литературы и собственных).

Разработанный метод расчета термофизических коэффициентов

металлов и сплавов использован в семи работах, посвященных исследованию тепловых проблем и разработке технологии литейных процессов, внедренных затем в производство на минских заводах — станкостроительном им.С.М.Кирова, моторном, ордена Ленина тракторном, а также Минском и Уральском автомобильных заводах, Михайловском заводе по обработке цветных металлов, Интемироком заводе запасных частей. Это дало значительный экономический эффект.

Г л а в а I

В первой главе диссертации приведен обзор литературы, посвященной методам расчета литейных процессов. Рассмотрены требования к термофизическим (теплопроводность, теплоемкость) и электрическим (электропроводность) свойствам литых изделий, применяемых в различных отраслях новой техники. Проанализированы современные экспериментальные и теоретические методы определения термофизических и электрических свойств металлов и сплавов. Сформулирована задача исследования.

Из литературного обзора следует, что при расчете процесса затвердевания отливки по любому из существующих методов (по методу, основанному на строгом решении задачи, по методу конечных разностей, по эмпирическим формулам или по приближенным методам) необходимо знать численные значения термофизических коэффициентов как отливки, так и формы в широком температурном интервале.

В различных отраслях техники (для строительства авиационных, транспортных и стационарных газовых турбин, для самолетов и ракет, для тепловыделяющих элементов и теплоносителей в атомной и ядерной энергетике, для электротехники) нужны металлы и сплавы с определенными термофизическими и электрическими свойствами. Имеющиеся металлы и сплавы не всегда могут удовлетворить всем предъявляемым к ним требованиям. Поэтому в настоящее время происходит интенсивный поиск таких сплавов, свойства которых наиболее полно отвечали бы тем или иным требованиям. Вместе с созданием новых сплавов встает новая задача, заранее рассчитывать их термофизические и электрические

коэффициенты с тем, чтобы получить уже сплавы с нужными свойствами.

Экспериментальное определение термофизических свойств металлов и сплавов при различных температурах представляет значительные трудности: нужны сложные установки, длительные и кропотливые эксперименты. Теория в настоящее время не позволяет с достаточной степенью точности рассчитывать термофизические свойства металлов и сплавов в широком температурном интервале. Особенно остро ощущается отсутствие методов определения термофизических коэффициентов при создании новых сплавов с заранее заданными свойствами.

В настоящей работе была поставлена задача разработать метод определения термофизических и электрических свойств металлов в твердом и жидком состояниях. Создать метод определения термофизических и электрических свойств сплавов через свойства компонентов, а также исследовать область его применения.

В связи с тем, что для многих литых сплавов экспериментальные данные отсутствуют, а полученные различными исследователями отличаются друг от друга значительно (иногда до 30%), выполнить сравнение полученных теоретических соотношений с собственными экспериментальными данными. С этой целью разработать методику, создать экспериментальную установку и выполнить эксперименты по определению термофизических и электрических свойств сплавов цветных и черных металлов. Использовать разработанный метод при расчете различных технологических процессов литья.

Г л а в а II

Во второй главе диссертации методами термодинамики необратимых процессов выведены необходимые расчетные формулы. Затем по литературным данным исследована применимость их к металлам, полупроводниковым соединениям и сплавам при различных температурах.

При разработке необходимого метода были приняты во внимание те связи, которые содержатся в уравнениях термодинамики необратимых процессов, развитой в трудах советских и зарубежных ученых, а также то обстоятельство, что тепловые измерения во много раз сложнее и длительнее электрических.

Согласно закону отношения проводимостей, установленному термодинамикой необратимых процессов, отношение двух проводимостей равно отношению соответствующих емкостей. В настоящей работе мы ограничиваемся двумя степенями свободы — термической и электрической. В этом случае закон отношения проводимостей запишется так (для одного моля вещества):

$$\frac{L_Q}{L_V T} = L = \frac{C_M}{K_{\psi M} T} = R_{\psi M} C_M \theta^2 / \text{град}^2, \quad (1)$$

где L_Q — коэффициент теплопроводности, вт/(м.град); L_V — коэффициент электропроводности, I/(ом.м); T — абсолютная температура, °К; L — коэффициент Лоренца, в²/град²; C_M — молярная теплоемкость системы, дж/(кг-атом.град); $K_{\psi M}$ — молярная емкость системы по отношению к электрическому заряду:

$$K_{\psi M} = \frac{1}{R_{\psi M} T} \quad \text{Ф/кг-атом.} \quad (2)$$

Таким образом, термодинамика необратимых процессов приводит к выражению (1), которое в целом совпадает с тем, что было известно раньше (А.С.Предводителя): согласно формуле (1) отношение теплопроводности к произведению электропроводности на абсолютную температуру пропорционально молярной теплоемкости. Однако в отличие от предыдущего термодинамика утверждает, что в равенстве (1) коэффициент пропорциональности $R_{\psi M}$ должен быть функцией температуры и электрического потенциала. Вид этой функции находится из опыта, причем обычно зависимость коэффициентов от электрического потенциала не рассматривают, а принимают во внимание только их температурные изменения.

Формула (1) является основной расчетной формулой предлагаемого метода (с зависящим от температуры коэффициентом $R_{\psi M}$). Она связывает тепловые характеристики с электрическими. Труднее всего экспериментально определяется теплопроводность, поэтому опыт целесообразно организовать так,

чтобы в нем можно было измерить электропроводность. Тогда теплопроводность легко вычисляется по формуле (1).

Соотношение (1) может быть легко переписано через удельные величины. Действительно, так как

$$C_{\mu} = \mu C_p \quad \text{дж}/(\text{кг-атом}\cdot\text{град}) \quad (3)$$

и

$$K_{\psi\mu} = \mu K_{\psi p} \quad \text{ф}/(\text{кг-атом}), \quad (4)$$

где μ - масса одного килограмм-атома, кг/кг-атом;

то

$$R_{\psi p} = \mu R_{\psi\mu} \quad \text{кг}/(\text{ф}\cdot\text{град}) \quad (5)$$

и

$$L = R_{\psi\mu} C_{\mu} = R_{\psi p} C_p \quad \text{в}^2/\text{град}^2 \quad (6)$$

Изложенный метод определения термофизических и электрических свойств справедлив не только для металлов, но и для сплавов. Теоретическим основанием для такого распространения метода на область сплавов служит то обстоятельство, что емкости обладают свойством аддитивности. Основной расчетный коэффициент $R_{\psi\mu}$ обратен электроемкости $K_{\psi\mu}$, поэтому свойство аддитивности распространяется также на величину $1/R_{\psi\mu}$. Отсюда возникает идея определения термофизических и электрических свойств сплавов по соответствующим известным свойствам их компонентов.

Для отдельных чистых металлов, входящих в состав сплава, все необходимые свойства находятся изложенным выше методом. Зная нужные коэффициенты для чистых металлов, термофизические и электрические свойства сплавов определяют следующим образом.

Расчетный коэффициент $R_{\psi\mu}$, входящий в формулу (1), для сплава вычисляется с помощью выражения

$$\frac{1}{R_{\psi\mu}} = \mu \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i R_{\psi\mu i}} \quad \text{ф}\cdot\text{град}/\text{кг-атом}, \quad (7)$$

где μ - кажущаяся (средняя) масса килограмм-атома, или кажущаяся (средняя) килограмм-атомная масса сплава:

$$\mu = \sum_{i=1}^n z_i \mu_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} \quad \text{кг/кг-атом}; \quad (8)$$

z_i - относительное объемное содержание i -го компонента в сплаве, имеющем объем V ;

$$z_i = \frac{V_i}{V}; \quad (9)$$

V_i - объем этого компонента, м³; μ_i - его килограмм-атомная масса, кг/кг-атом; g_i - относительное массовое содержание i -го компонента в сплаве, имеющем массу m ;

$$g_i = \frac{m_i}{m}; \quad (10)$$

m_i - масса этого компонента, кг; $R_{\nu\mu}$ - его расчетный коэффициент, кг-атом/(ф.град).

Так как молярные и удельные коэффициенты связаны между собой равенством (5), то соотношение (7) можно переписать так (для удельного коэффициента $R_{\nu\rho}$ сплава):

$$\frac{1}{R_{\nu\rho}} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{R_{\nu\rho i}} \quad \text{ф.град/кг}. \quad (11)$$

Величина g_i , характеризующая относительное массовое содержание i -го компонента в сплаве, определяется делением процентного содержания данного компонента в сплаве на 100.

Теплоемкости C_{μ} и C_{ρ} , входящие в формулу (6), для сплава определяются по закону Неймана и Коппе:

$$C_{\mu} = \mu \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i} C_{\mu i} \quad \text{дж/(кг-атом-град)} \quad (12)$$

и

$$C_p = \sum_{i=1}^n g_i C_{pi} \quad \text{дж/(кг·град)}, \quad (13)$$

где C_{mi} и C_{pi} - мольная и удельная теплоемкости при постоянном давлении L -го компонента. Найденные значения величин $R_{\psi M}$ и C_M (или $R_{\psi p}$ и C_p) используются для расчета по формуле (1) (или по формуле (6)) необходимых характеристик сплава.

Многочисленные экспериментальные данные различных авторов по коэффициенту Лоренца и мольной теплоемкости показывают, что для чистых металлов, находящихся в твердом состоянии при низких, средних и высоких относительных температурах T/θ (где θ - характеристическая температура Дебая) коэффициент $R_{\psi M}$ можно представить в виде линейной функции от температуры. Имеем:

$$R_{\psi M} \cdot 10^{12} = A - B(T/\theta - C) \quad \text{кг·атом/(ф·град)}, \quad (14)$$

где A , B и C - коэффициенты.

Используя экспериментальные данные по L и C_M , были найдены значения $R_{\psi M}$, через которые затем по методу наименьших квадратов проведены прямые (14). Полученные при этом значения коэффициентов A , B и C (для небольшой части исследованных металлов) приведены ниже.

	A	B	C	ΔT	$\theta, ^\circ K$
Al	1,018	0,130	0,240	101-800	420
Cu	1,486	0,427	0,467	273-1273	585
Fe	1,455	0,398	0,156	73-1073	467
Ag	1,020	0,066	0,470	100-770	225
W	1,179	0,068	1,230	500-3000	405

где ΔT - интервал исследованных температур.

Анализ экспериментальных данных показывает, что и для жидких металлов имеет место аналогичная зависимость, но при

этом характеристическая температура Дебая уже не играет столь важной роли как у твердых металлов:

$$R_{\psi M} 10^{12} = A' - B' \cdot 10^{-6} (T - C') \text{ кг-атом/}(\varphi\text{-град)}. \quad (15)$$

Значения коэффициентов A' , B' и C' для некоторых жидких исследованных металлов приведены ниже:

	A'	B'	C'	ΔT
Al	0,647	175	933	933-1133
Zn	0,846	851	692	692-892
Rb	0,725	58,7	373	373-1073
Sn	0,918	574	505	505-1073
Pb	0,859	411	623	623-1023

Этих данных достаточно для того, чтобы через теплоемкость определить коэффициент Лоренца L твердых и жидких металлов. Используя полученные значения коэффициентов A , B , C , A' , B' и C' и экспериментальные значения C_M по формуле (I) был выполнен расчет L . Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает в среднем 2-4%.

В процессе формирования отливки центральную роль играет переход металла из жидкого состояния в твердое. Поэтому важно уметь оценить изменение термофизических и электрических свойств металлов при этом переходе. Из рассмотрения экспериментальных данных следует, что при агрегатном переходе коэффициент $R_{\psi M}$ изменяется незначительно. Этим обстоятельством можно пользоваться при приближенных расчетах.

Анализ расположения и строения электронных оболочек у элементов и сопоставление их свойств со значениями коэффициента $R_{\psi M}$ позволило установить периодический характер изменения величины $R_{\psi M}$ с порядковым номером элемента в таблице Менделеева. Периодический закон изменения величины $R_{\psi M}$ позволяет предсказать величину этого коэффициента для элементов, для которых нет необходимых экспериментальных данных, по значениям его для сходных элементов другого периода. Коэффициенты $R_{\psi M}$ сравниваются, например, при $T = \theta$, или при комнатной температуре.

Аналогичный периодический характер имеет изменение и коэффициента B , определяющего скорость изменения величины $R_{\psi M}$ с температурой.

В случае полупроводниковых соединений картина переноса усложняется наличием проводимостей различного рода — речетчатой, носителями разного рода и т.д. Это делает несправедливым закон отношения проводимостей и вытекающее из него равенство (1), так как он получен для случая, когда действует один вполне определенный носитель тока.

Основываясь на экспериментальных работах, в которых специально выделена проводимость, обусловленная распространением одного неизменного носителя тока, был рассчитан коэффициент $R_{\psi M}$ для следующих полупроводниковых соединений в области низких температур: $PbTe$, $PtSe$, PbS и $HgSe$. Но при этом оказалось, что величина $R_{\psi M}$ является заметной (нелинейной) функцией не только температуры, но и электрического потенциала. Именно такую функциональную зависимость и предсказывает термодинамика необратимых процессов. Это обстоятельство затрудняет использование предложенного метода для расчета свойств полупроводниковых соединений.

Полученные соотношения были опробованы на большой группе сплавов (двух- и многокомпонентных) при различных температурах.

При комнатной температуре был рассчитан коэффициент Лоренца сплавов алюминия с медью, магнием, кремнием, железом и никелем (двух- и многокомпонентные) через аддитивный коэффициент и расчетные значения теплоемкости. Отклонения расчетных значений от экспериментальных не превышают в среднем 5,5%. Исследованы изменения коэффициента теплопроводности у сплавов алюминия с кремнием, марганцем и медью от содержания легирующих элементов, а у сплавов алюминия с магнием — от содержания магния и от температуры. Во всех случаях получено достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Расчитаны значения коэффициента Лоренца жаропрочных сплавов на основе меди с добавками бериллия, циркония, никеля и хрома в интервале температур 323–873°K через свойства компонентов. Получено удовлетворительное совпадение с эксперименталь-

ными данными.

При комнатной температуре исследована зависимость коэффициента теплопроводности двухкомпонентных сплавов $Cu-Zn$, $Ag-Au$, и $Ag-Pb$ от состава сплавов. Результаты расчетов также хорошо соответствуют результатам экспериментов.

Хорошее совпадение расчетных значений коэффициента Лоренца с экспериментальными данными наблюдается и у сплавов технического висмута с кадмием (8 сплавов различных составов при различных температурах).

Предлагаемый метод расчета свойств сплавов через свойства компонентов опробован на семнадцати различных сталях, выпускаемых заводом "Электросталь", в интервале температур $300-1200^{\circ}K$. Расчетные значения коэффициента Лоренца этих сталей удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Причем точность расчета значительно возрастает если использовать сглаженные экспериментальные значения теплоемкости этих сталей.

На трех сплавах (германское серебро, манганин и сплав Липовица) исследована применимость предлагаемого метода расчета термофизических свойств сплавов через свойства компонентов к сплавам в области низких температур. Полученные результаты не позволили однозначно ответить на этот вопрос.

Несмотря на бедность экспериментального материала по термофизическим и электрическим свойствам жидких сплавов, было установлено, что этот метод применим и жидким сплавам. Этот результат получен на сплавах натрия с кадмием и висмута со свинцом. Отклонения теоретических значений коэффициента Лоренца этих сплавов, рассчитанных с использованием аддитивности коэффициента $R_{\text{уд}}$ и экспериментальных значений теплоемкости от экспериментальных данных, полученных различными авторами, не превышает 10-11%.

Таким образом, преимущество изложенного метода расчета заключается в том, что он позволяет рассчитывать необходимые термофизические и электрические свойства сплавов в твердом и жидком состояниях по соответствующим характеристикам компо-

нентов. Благодаря этому отирывается возможность теоретически предсказывать свойства сплавов и таким образом проектировать сплавы с наперед заданными свойствами.

Г л а в а III

В третьей главе описаны экспериментальные установки и результаты экспериментов по определению электрических и термофизических коэффициентов металлов и сплавов. При разработке опытных установок преследовались две цели - подтвердить изложенные выше соображения, а также дать удобный и простой метод экспериментального определения термофизических характеристик металлов и сплавов по их электрическим характеристикам. В первом случае эксперимент должен позволять одновременно определять теплопроводность, теплоемкость и электропроводность измеряемого образца, во втором случае достаточно измерить лишь его электропроводность.

В качестве метода, позволяющего определять весь комплекс термофизических и электрических свойств был выбран метод типа метода Колларгуна. Образец диаметром около 5 мм и длиной около 100 мм закрепляли в двух массивных держателях, к которым с помощью спиралей подводили постоянный ток $I_{\text{в}}$, нагревающий образец. Температуру по длине образца измеряли термометрами в трех точках T_1 , T_2 (средняя точка) и T_3 . Образец помещали в электropечь сопротивления, которая поддерживала температуру системы на нужном уровне. Температуру в печи также измеряли в трех точках. Эти измерения необходимы для учета поправки на теплообмен боковой поверхности образца с окружающей средой. Пространство между образцом и печью наполнялось теплоизоляционной ваткой. Выходные отверстия печи заглушены резиновыми пробками, через которые пропущены провода. Установка работает следующим образом.

С помощью электropечи температура системы устанавливается на заданном уровне. Затем подается электрический ток. В результате действия эффекта диссипации образец нагревается, причем температура его средней точки (T_2) поднимается несколько выше

(5-10⁰) температуры краев (T_1 и T_2) из-за теплоотвода в держатели. По температурному полю образца (неравномерность распределения температуры в сечении пренебрегаем) на установившемся режиме определяли следующие искомые величины:

$$\frac{L_q}{L_v} = \frac{\Delta\psi^2}{2T_2 - T_1 - T_3} \quad \text{в}^2/\text{град}; \quad (16)$$

$$L_v = \frac{l}{3\pi z^2} = \frac{I_r}{\Delta\psi} \quad \text{в}/(\text{см} \cdot \text{м}), \quad (17)$$

где $\Delta\psi$ - падение напряжения на контрольной длине l образца, в; z - радиус образца, м; I_r - сила тока а.

Удельную теплоемкость при постоянном давлении материала определяли по скорости охлаждения (уменьшения) температуры образца в момент выключения рабочего тока. Имеем

$$C_p = \frac{I_r \Delta\psi}{\rho V \frac{dT}{dt}} \quad \text{дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}), \quad (18)$$

где ρ - плотность материала, кг/м³; V - объем, м³. Таким образом из одного опыта на одном и том же образце экспериментально находятся все необходимые термофизические и электрические характеристики металла или сплава. Найденные значения величин относятся к температуре $T = (T_1 + T_2 + T_3)/3$. Теплообмен боковой поверхности образца учитывается путем введения в приведенные выше формулы поправки, которые определяются экспериментально по температурному полю в образце и вachi до прохождения по образцу рабочего тока.

Описанным выше способом были исследованы зависимости теплопроводности, электропроводности и теплоемкости цветных сплавов, углеродистых и легированных сталей и чугунов от температуры (в интервале 293-773⁰) и состава сплавов.

Установлено, что теоретический расчет термofизических свойств сплавов (коэффициента теплопроводности), основанный на аддитивности коэффициента R_{γ} , дает погрешность для латуны и бронзы, в среднем не превышающую 2-8%. Для углеродистых и легированных сталей погрешность в среднем в 2 раза выше, чем для цветных сплавов. Погрешность расчета коэффициента теплопроводности различных чугунов может достигать 30-40%. Правда, при расчетах не принималось во внимание влияние фосфора и серы на свойства чугунов (и сталей), поскольку для этих элементов нет необходимых экспериментальных данных.

Для экспериментального определения термofизических свойств целесообразно применить установку, на которой определяется только электропроводность образца, теплопроводность же можно рассчитать по формуле (I). В этой установке образец помещается в кварцевую трубку, которая находится в электропечи сопротивления. Печь позволяет установить заданную температуру T исследуемого образца (293-1523°.). Через образец пропускается рабочий электрический ток I_{γ} . Падение напряжения на образце ΔU и температуру образца измеряем потенциометром. Чтобы избежать окисления образца все измерения ведутся в вакууме, для чего один конец трубки вакуумным флангом соединяем с вакуумными насосами, другой был заглушен переходником, через который пропущены провода. Коэффициент электропроводности определяется по формуле (I7). С помощью электропроводности по формуле (I) вычисляются термofизические характеристики исследуемого металла или сплава.

Г л а в а I V

Четвертая глава посвящена исследованию промышленному методу разрабатываемого метода.

Для выполнения работы по внедрению процесса литья деталей из бронзы в алюминиевые кокилы нами был экспериментально исследован коэффициент электропроводности, а затем рассчитаны термofизические коэффициенты окислительной бронзы ОНС-4-5-5 в интервале температур 1123-1273°K. Найденные значения коэффициен-

тов использованы В.Р.Розничев и Л.М.Зарецкий при исследовании влияния тепловых условий затвердевания отливки на качество изделий из оловянистых бронз и приведены в таблице. Результаты исследований позволили осуществить процесс литья деталей из оловянистых бронз в алюминиевые анодированные модели в условиях Мясного и Уральского автомобильных заводов. Суммарный экономический эффект от внедрения составил 46 тыс. рублей в го. при годовом выпуске литья 200 тонн.

Таблица 01

Значения электропроводности $L_v \cdot 10^6$ (I/(ом.м)), теплопроводности L_q (вт/(м.град)) и удельной теплоемкости C_p (дж/(кг.град)) сплавов при различных температурах T (°К)

1	2	3	4	5	6	7	8
Al-4,5%Cu	T	323	373	473	573	673	773
	L_v	23,0	21,7	17,85	15,15	13,0	10,75
	L_q	175	191	207	211	214	204
	C_p	898	915	960	1001	1049	1095
Al-9	T	293	373	-	573	-	773
	L_v	22,2	16,0	-	9,6	-	7,1
	L_q	161,9	149	-	142,7	-	144,3
	C_p	886	924	-	1019	-	1117
ОЦС-5-5-5	T	1123	1223	1273	-	-	-
	L_v	4,74	3,94	2,90	-	-	-
	L_q	119,7	104,8	78,6	-	-	-
	C_p	442	450	454	-	-	-
3Х2В8Ф	T	323	373	473	573	673	773
	L_v	3,05	2,55	2,05	1,75	1,45	1,25
	L_q	31,3	29,6	31,5	32,4	31,8	31,0
	C_p	431	437	481	525	572	620

	1	2	3	4	5	6	7	8
X15H1303Л	T	1273	1373	1473	1573	1673	-	
	L _w	0,96	0,93	0,875	0,825	0,77	-	
	L _a	38,6	38,1	35,9	34,4	32,4	-	
	C _p	626	655	685	714	742		
0Ч 2I-40	T	323	473	673	873	1073	1273	
	L _w	1,46	1,22	0,94	0,74	0,59	0,56	
	L _a	16,3	20,4	22,8	22,2	19,8	17,7	
	C _p	471	535	644	755	881	971	

Для выполнения работы по внедрению способов управления процессом формирования зональной ликвиции были выполнены эксперименты и рассчитаны термофизические коэффициенты сплава **Al-4, 5% Cu** в интервале температур **293-773°K**. Эти результаты (см. табл.) были использованы В.Ф.Соболевым при теоретическом и экспериментальном исследовании задачи о формировании прямой и обратной ликвиции. Результаты этих исследований позволили указать способы управления процессом формирования зональной ликвиции, которые были проверены в заводских условиях и внедрены на Микском моторном заводе.

Результаты наших экспериментов и расчетов термофизических коэффициентов сплава **Al-9** и стали **5ХНТ** в интервале температур **293-773°K** (см. табл.) использованы Ю.А.Лосовым при исследовании теплового режима процесса намораживания алюминиевых лент на вращающейся кристаллизаторе, изготовленном из этих сплавов. Опыробования, проведенные в производственных условиях на Михайловском заводе по обработке цветных металлов, показали, что лента заготовки, полученная методом намораживания на валке, может быть использована для холодной прокатки тонких алюминиевых полос. По предварительным расчетам стоимость каждой тонны продукции из непрерывно намороженной ленты снивится на 94 рубля.

Для работы по внедрению в производство процесса непрерывного литья труб намораживанием нами были выполнены эксперименты по определению коэффициента электропроводности и затем рас-

считаны теплопроводность и теплоемкость жаропрочной стали Х15Н13В31 в интервале температур 1173-1673⁰К. Результаты экспериментов и расчетов, также приведенные в таблице, использованы В.И.Тутоски и В.А.Гринбергом при исследовании этого процесса и внедрении его в производство на Минском ордена Ленина тракторном заводе. Экономический эффект от внедрения составил 40400 рублей в год.

Полученные экспериментально значения коэффициента электропроводности сплава АЛ-2 и стали 3Х2В8Ф в интервале температур 293-873⁰К послужили основой при расчетах теплопроводности и теплоемкости этих сплавов. Значения коэффициента теплопроводности и теплоемкости были использованы И.К.Игнатиком при расчете теплового режима отливки при литье под давлением. На основании этих расчетов были разработаны рекомендации по избежанию поверхностных дефектов в отливках и по повышению плотности изделий. Рекомендации работы внедрены на Минском моторном заводе. Экономический эффект от снижения брака составил 195,8 рублей на тонне литой продукции.

Термофизические коэффициенты чугунов, рассчитанные через их экспериментально определенную электропроводность в интервале температур 293-1400⁰К, использованы А.Г.Кучерявым в тепловых расчетах по формированию и охлаждению отливки станины отрезного станка 8В66* и при расчете и проектировании кокильной установки для литья этой станины. Результаты работы внедрены на Минском станкостроительном заводе им.С.М.Кирова. Экономическая эффективность от внедрения составила 11,7 тысяч рублей в год.

Результаты наших экспериментов и расчетов электрических и термофизических свойств чугунов были использованы Н.Е.Волковой при расчете и разработке метода выбора оптимального технологического процесса литья чугунной гильзы двигателя автомобиля ЗИЛ-130 в облицованный кокиль. Внедрение в производство этого процесса позволит только одному Литомирскому заводу запасных частей получить суммарный годовой экономический эффект 73 тыс. рублей, а в масштабах всей отрасли автомобилестроения - 986 тыс. рублей.

1. На основе термодинамики необратимых процессов разработан метод определения термофизических и электрических свойств металлов и сплавов в широком температурном интервале. Установлено, что отношение коэффициента теплопроводности к произведению коэффициента электропроводности на абсолютную температуру (коэффициент Лоренца) металлов и сплавов пропорционально их теплоемкости. Коэффициент пропорциональности $R_{\psi\mu}$ (коэффициент Вейника) металлов и сплавов зависит от температуры.

2. Методами термодинамики необратимых процессов установлено, что величина $1/R_{\psi}$ сплавов подчиняется правилу аддитивности, т.е. термофизические свойства сплавов можно определять по соответствующим известным свойствам компонентов.

3. Предложенный метод опробован на металлах в области низких, средних и высоких относительных температур. Установлено, что коэффициент $R_{\psi\mu}$ твердых металлов убывает с возрастанием температуры, и его изменение можно представить в виде линейной функции температуры. Для пятнадцати твердых металлов определен вид этой функции. С помощью полученного таким образом коэффициента $R_{\psi\mu}$ был выполнен расчет коэффициента Лоренца металлов в твердом состоянии. Получено хорошее соответствие с литературными данными (отклонения в среднем не превышают 4%).

4. Разработанный метод применен к жидким металлам. Установлено, что у металлов, находящихся в жидком состоянии, сохраняется та же картина изменения коэффициента $R_{\psi\mu}$ с изменением температуры. Для двенадцати жидких металлов определен вид этой зависимости от температуры. На основе установленной зависимости был выполнен расчет коэффициента теплопроводности и коэффициента Лоренца для металлов, находящихся в жидком состоянии. Отклонения расчетных значений от экспериментальных данных в среднем не превышают 2%.

5. По литературным данным исследован скачок коэффициента $R_{\gamma\mu}$ металлов при переходе их из твердого состояния в жидкое. Установлено, что при агрегатном превращении этот коэффициент изменяется незначительно (отношение $R_{\gamma\mu}^{\text{ж}}/R_{\gamma\mu}^{\text{т}} \approx 1$).

6. Установлен периодический характер изменения величины $R_{\gamma\mu}$ металлов от порядкового номера элемента в таблице Д.И. Менделеева. Аналогичный периодический характер имеет и изменение коэффициента B , определяющего скорость изменения величины $R_{\gamma\mu}$ с изменением температуры. Полученный периодический закон изменения величины $R_{\gamma\mu}$ и его температурного коэффициента B позволяет предсказывать величину этого коэффициента для элементов при различных температурах (для которых нет необходимых экспериментальных данных) по значениям этого коэффициента для соседних элементов другого периода. Были сделаны оценки величины $R_{\gamma\mu}$ и его температурного коэффициента для следующих элементов: V, Co, Ga, Cd, Ru, Rd, Hf, Os, Pt, Hg, Th, Cs, Pa и Sc.

7. Разработанный метод применен для расчета термоэлектрических и электрических свойств полупроводниковых соединений в области низких температур. Установлено, что величина $R_{\gamma\mu}$ полупроводниковых соединений является нелинейной функцией температуры и зависит от концентрации носителей тока.

8. По разработанному методу выполнен расчет коэффициента $R_{\gamma\rho}$ сплавов, а с помощью его и теплоемкости - коэффициента теплопроводности и коэффициента Лоренца твердых сплавов различных составов на основе алюминия, меди, серебра, висмута, железа при различных температурах, легкоплавких жидких сплавов и сплавов в области низких температур. Во всех случаях получено хорошее соответствие расчетных значений экспериментальным. Исключения составляют сплавы в области низких температур, для которых в настоящее время нет необходимого количества экспериментальных данных, и вопрос о применимости к ним разработанного метода остается открытым.

9. Для подтверждения полученных соотношений разработан методика и создана экспериментальная установка, которая позволяет выполнять комплексное определение коэффициентов теплопроводности, электропроводности и теплоемкости металлов и сплавов в области температур 293-773°К.

10. Экспериментально исследованы зависимости теплопроводности, электропроводности и теплоемкости сплавов цветных металлов (латуны Л62 и ЛС-59-Г и бронзы АБ-9-4Л), углеродистых сталей (Ст3, Ст5, Ст45 и У8), легированных сталей (40Х, 20ХН, 5ХНВ и Р12) и трех чугунов различных составов от температуры и состава сплавов.

11. По разработанному методу рассчитан коэффициент теплопроводности этих сплавов. Установлено, что теоретический расчет, основанный на аддитивности коэффициента R_{Σ} , дает погрешность в среднем не превышающую для цветных сплавов - 2-8%, для углеродистых сталей - 4-12%, для легированных сталей - 5-17%, для чугунов - 30-40%.

12. На простой экспериментальной установке, позволяющей определять электропроводность металлов и сплавов при температурах 293-1573°К в вакууме, были исследованы температурные зависимости коэффициента электропроводности сплавов цветных металлов (АЛ-2, АЛ-9, *Al - 4,5% Cu* и бронзы ОЦС-5-5-5), сталей (5ХНГ, 3Х2В8Ф и Х15Н13Ю3Л) и чугунов (СЧ 15-32 и СЧ 21-40). По разработанному методу с использованием экспериментальных значений коэффициента электропроводности был выполнен расчет термофизических коэффициентов (теплопроводности и теплоемкости) этих сплавов.

13. Полученные термофизические коэффициенты сплавов цветных металлов, сталей и чугунов были использованы при исследо-

вании и расчета тепловых процессов в семи работах, внедренных в производство на Минском станкостроительном заводе им. С.М.Кирова, на Минском моторном заводе, на Минском ордена Ленина тракторном заводе, на Минском и Уральском автомобильных заводах, на Михайловском заводе по обработке цветных металлов, на Литомирском заводе запасных частей. Получен значительный экономический эффект.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. В.И.Прилепин. К теории определения термофизических свойств металлов. Сб. "Вопросы прочности и пластичности металлов". Минск, изд-во "Наука и техника", 1970, стр.154-156.

2. А.И.Вейник, В.И.Прилепин. Новый метод определения термофизических свойств металлов и сплавов. Сб. "Новое в литейном производстве". НИО БЕЛМАШИПРОМ. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции 24-26 ноября 1970 г. Минск, 1970, стр.104-109.

3. В.И.Прилепин, Ю.П.Глухов. Экспериментальный метод определения термофизических и электрических свойств металлов и сплавов. Сб. "Вопросы прочности и пластичности металлов". Минск, изд-во "Наука и техника", 1971, стр.150-151.

Основные результаты доложены и обсуждены:

1. На XXVI и XXVII научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института совместно с работниками промышленности и строительства (Минск, 1970, 1971 гг.).

2. На V и VI научных конференциях молодых ученых отделения физико-технических наук АН БССР (Минск, 1970, 1971 гг.).

3. На республиканской научно-технической конференции "Новое в литейном производстве" (Минск, 1970 г.).