

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

8

Издается с января 1958 г. ежемесячно

2000

Главный редактор:

В. А. ГРИГОРЯН

Заместители главного редактора:

С. М. КУЛАКОВ

В. А. ТЮРИН

Ответственный секретарь:

М. Н. ГОЛОВАН

Заместитель ответственного секретаря:

Н. П. ОЛЕНДАРЕНКО

Члены редакционной коллегии:

А. А. АГАПОВА

В. К. АФАНАСЬЕВ

В. Е. ГРОМОВ

Н. А. ЕФИМОВ

А. В. ЗИНОВЬЕВ

Ю. С. КАРАБАСОВ

Л. Я. КОЗЛОВ

В. А. КРИВАНДИН

Н. М. КУЛАГИН

Б. А. КУСТОВ

Б. В. ЛИНЧЕВСКИЙ

В. П. ЛУЗГИН

Г. Г. МИХАЙЛОВ

В. Н. ПЕРЕТЯТЬКО

Е. В. ПРОТОПОПОВ

В. А. РОМЕНЕЦ

В. М. РЯБКОВ

А. Н. САВЕЛЬЕВ

И. Ф. СЕЛЯНИН

А. Ф. СОФРОШЕНКОВ

А. И. СТЕПАНОВ

Ю. Н. ТАРАН-ЖОВНИР

Ю. И. УТОЧКИН

Ю. П. ФИЛИМОНОВ

В. П. ЦЫМБАЛ

Г. И. ЧЕРНЫШ

К. М. ШАКИРОВ

М. А. ШТРЕМЕЛЬ

Ю. С. ЮСФИН

**Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом**

Адреса редакции

117936, Москва В-49, Ленинский пр-т, д. 4

**Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет),
тел./факс (095) 236-14-27**

654080, Новокузнецк, 80, Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42

Сибирский государственный индустриальный университет, тел. (3843) 74-86-28

**Журнал представлен в сети INTERNET на сервере "Металлургическая отрасль России" (www.rusmet.ru)
по адресу: <http://www.rusmet.ru/izvuzchemet>**

СИБИРСКОМУ ГОСУДАРСТВЕННОМУ ИНДУСТРИАЛЬНОМУ УНИВЕРСИТЕТУ 70 ЛЕТ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ

© 2000 г. М.В. Попова, доцент, к.т.н.

Кафедра физики металлов Сибирского ордена Трудового Красного Знамени металлургического института имени Серго Орджоникидзе (СМИ) была создана в 1958 г. по инициативе доктора технических наук профессора Юрия Вячеславовича Грдины, который был ее первым заведующим.

Годом раньше при СМИ была создана научно-исследовательская лаборатория металловедения и металлофизики для разработки важнейших проблем металловедения (проблемная лаборатория физики металлов), научным руководителем которой был также назначен Ю. В. Грдина. Поэтому естественно, что деятельность кафедры протекала под его руководством по единому плану с проблемной лабораторией, в основе которого лежала разработка методов упрочнения транспортного и арматурного металла (объемная закалка рельсов), защита тугоплавких металлов от окисления при высоких температурах и др.

Ю. В. Грдина – известный советский металловед, заслуженный деятель науки и техники РСФСР – много и плодотворно работал в области металловедения и физики металлов. Им были выдвинуты и экспериментально подтверждены принципиально новые положения о кинетической теории образования эвтектических сплавов, о теории вторичной кристаллизации, дислокационной теории флокенообразования и разрушения, о механизме модифицирования стали и другим вопросам.

Творческая биография Ю. В. Грдины характеризует его как талантливого ученого и крупного организатора науки.

С 1937 г. Ю. В. Грдина возглавлял кафедру металловедения и термической обработки металлов СМИ, в течение многих лет был заместителем директора нашего института по научной работе и научным консультантом при Кузнецком металлургическом комбинате (КМК). В предвоенный период он занимался теоретическим металловедением (им были опубликованы труды по определению критических точек и электронной проводимости металлов, по кинетической теории эвтектических сплавов, по аномальной структуре стали и др.), совмещая это с выполнением работ производственного характера, которые помогли в кратчайший срок вывести КМК на проектную мощность. Значительным и важным этапом деятельности Ю. В. Грдины являлись годы Великой Отечественной войны. Он принимал участие

в разработке технологических процессов производства оборонной продукции на ряде заводов. В 1942 г. он защитил докторскую диссертацию на тему "Тепловая обработка как метод улучшения рельсов". Это была первая докторская диссертация в Сибирском металлургическом институте.

В послевоенные годы Ю. В. Грдина занимался в основном исследованиями в области транспортного металла. Работе по улучшению качества такого металла он отдал более трех десятилетий своей жизни. Он изучал вопросы оптимального вида термической обработки рельсов, хладостойкости рельсовой стали, образования флокенов в ней и разработки способов их предотвращения. Результатом этих исследований было строительство на всех заводах СССР термических отделений по предупреждению образования флокенов. За эти работы Ю. В. Грдина в 1953 г. был вторично награжден орденом Трудового Красного Знамени (первый раз – в 1945 г.). Труды Ю. В. Грдины, касающиеся проблем транспортного металла, и сейчас оказывают реальную помощь в решении производственных задач.

Важную роль в творческих достижениях Ю. В. Грдины сыграла его научно-организаторская деятельность. Он являлся председателем рельсовой комиссии, членом совета Госплана СССР по координации научно-исследовательской работы в области металлургии, членом Научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР и ряда других научных организаций.

В течение почти десяти лет (с 1958 по 1967 г.) Ю. В. Грдина руководил кафедрой физики металлов, отдавая все свои силы, знания и опыт делу подготовки и воспитания квалифицированных специалистов-металлофизиков. Под его руководством было защищено более 10 кандидатских диссертаций. В 1961 г. Ю. В. Грдина был награжден орденом Ленина за большие заслуги в развитии науки и подготовке специалистов.

После смерти Ю. В. Грдины коллектив кафедры возглавил кандидат технических наук доцент Владимир Сергеевич Львов, работавший на кафедре со дня ее основания. В. С. Львов занимался исследованием свойств напыленных слоев из тугоплавких металлов, нанесенных с целью повышения жаростойкости, а также исследованием магнитных свойств сталей и сплавов.

С 1977 г., уже более двадцати лет, кафедру физики металлов возглавляет доктор технических наук профессор, академик РАЕН Владимир Константинович Афанасьев. Основное направление исследований В. К. Афанасьева – изучение общих закономерностей влияния элементов внедрения (водорода, кислорода, азота, углерода) на свойства металлов и сплавов. На основании этого техническая деятельность его включает разработку новых технологий и материалов в металлургии и машиностроении. В. К. Афанасьев имеет следующие внедренные разработки: ресурсосберегающие технологии получения металлических сплавов; технологии обработки металлов давлением, термической и химико-термической обработки; экономнолегированные сплавы, содержащие в качестве основных легирующих элементов водород, азот, фосфор. Основное направление исследований определяет круг его научных интересов: поведение металлов и сплавов в жидком и твердом состоянии с позиций ведущей роли водорода; природа процессов расширения и сжатия; Периодическая система элементов; проводимость тепла и электричества; природа, теория и практика магнетизма; электричество; воспроизведение естественных процессов рождения и смерти различных веществ. В. К. Афанасьев имеет 322 научных труда, в том числе 110 авторских свидетельств и патентов на изобретения и 4 монографии. Под его руководством защищено 14 кандидатских диссертаций и одна докторская. Профессор В. К. Афанасьев является членом двух специализированных Советов: по металлостроению (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) и по физической химии (Кемеровский государственный университет, г. Кемерово), а также членом редколлегии журнала "Известия высших учебных заведений. Черная металлургия" (курирует раздел "Физика металлов").

В сентябре 1958 г. была набрана первая группа металлофизиков в количестве 25 человек. Более 50 % первокурсников закончили школу с золотыми и серебряными медалями. Срок обучения студентов-металлофизиков первых четырех наборов составлял 5,5 лет. Первый выпуск студентов-металлофизиков состоялся в марте 1964 г. Закончили институт 19 человек, из них 6 получили дипломы с отличием, 4 человека защитили дипломные работы на английском языке.

С 1963 г. прием на специальность "Металлофизика" увеличился вдвое, и так было до 1970 г. включительно, а затем прием снизился. За период с 1958 по 1997 гг. дипломы инженера-металлурга по специальности "Физика металлов" получили 460 человек, 79 из них – дипломы с отличием.

В феврале 2000 г. состоится первый выпуск инженеров-физиков по специальности "Физика металлов", срок обучения которых в связи с новым учебным планом вновь увеличился до 5,5 лет, а квалификация их будет позволять вести как научно-исследовательскую, так и преподавательскую работу.

Студенты-металлофизики всегда отличались лучшей успеваемостью по всем дисциплинам, активным участием в общественной и культурной жизни института.

Отличительной особенностью специальности "Физика металлов" является то, что научная работа студентов предусмотрена планом учебного процесса. Уже со 2-го–3-го курсов студенты начинают заниматься исследованиями, сначала вместе с преподавателями, потом – самостоятельно по тематике кафедры. Навыки исследовательской работы закрепляются во время практики, одна из которых проводится в Центральном заводском лабораториях, другая – в лабораториях университета. Дипломная работа студентов является заключительным этапом в их научной работе.

Студенты 4-го и 5-го курсов ежегодно участвуют в научных студенческих конференциях, областных и зональных выставках студенческих работ, во Всесоюзных (Всероссийских) конкурсах, где студенческие работы неоднократно отмечались дипломами и грамотами. В 1967 и 1986 годах научные студенческие работы, выполненные на кафедре, по итогам Всесоюзных конкурсов на лучшую работу студентов по разделу "Металлургия" были отмечены серебряной и бронзовой медалями и денежными премиями. В последнее время хорошей традицией стало участие студентов-металлофизиков в научной студенческой конференции "Физика твердого тела", регулярно проводящейся в Томском государственном университете, а также в научно-практических конференциях, посвященных проблемам прочности (г. Тамбов), наследственности (г. Самара), мезомеханики (г. Томск) и др. Все чаще происходит так, что студенты в процессе выполнения дипломной научно-исследовательской работы подают заявку на выдачу патента РФ на изобретение и к моменту защиты дипломной научно-исследовательской работы имеют уже положительное решение о выдаче патента. Только за последний 1998–1999-й учебный год было опубликовано 28 работ в соавторстве со студентами, из них – два патента на изобретения.

Система подготовки, организованная на кафедре, позволяет выпускать высококвалифицированных специалистов, имеющих достаточную теоретическую подготовку и практические навыки проведения исследовательской работы. Об этом свидетельствует тот факт, что каждый десятый выпускник кафедры имеет ученую степень кандидата технических наук.

Кроме учебно-методической, на кафедре интенсивно ведется научно-исследовательская работа под руководством и по направлениям, определяемым заведующим кафедрой В. К. Афанасьевым. Основные практические разработки, осуществляемые на кафедре физики металлов в настоящее время:

1. Технологии обработки шихты, расплава, кристаллизации, позволяющие получать требуемое сочетание свойств металлических сплавов;

2. Технологии дегазации металлов и сплавов, регулирующие их физические, химические и механические свойства;

3. Технологии деформации труднодеформируемых и по общим представлениям недеформируемых сплавов, позволяющие, например, для углеродистой стали получать необычное сочетание высокой прочности и пластичности.

тичности, коррозионной стойкости, малые потери на перемагничивание, которые обычно достигаются за счет высокого легирования;

4. Создание литейных и деформируемых поршневых сплавов с необычно низким коэффициентом линейного расширения и высокими механическими свойствами;

5. Технологии получения и обработки литых и деформируемых сплавов Al-30-50 % Si различного целевого назначения;

6. Получение самых дешевых в мире синтетических сплавов Al-Si;

7. Получение сверхлегких литых и деформируемых сплавов на основе кремния с уникальным сочетанием коэффициента линейного расширения и других свойств;

8. Создание серии сплавов Al-Me-H, Al-Me-H-P, Al-Me-H-N, Al-Me-H-N-P с особым сочетанием физико-механических свойств;

9. Получение сверхпрочных деформируемых сплавов на основе Al-Mg с пределом прочности 800 МПа и более;

10. Технологии термической, химико-термической и механо-термической обработки железных сплавов, позволяющие получить повышение свойств с одновременным снижением стоимости;

11. Создание технологий обработки доменного чугуна, позволяющих получать из него высококачественные отливки и деформируемый полуфабрикат с необычными свойствами;

12. Создание способов переработки отходов металлургического производства (шлаков, шламов, золы, пыли и др.).

Коллектив кафедры неоднократно награждался почетными грамотами за первое и второе места по итогам соревнования за достижение высоких показателей в изобретательской, рационализаторской и патентно-лицензионной работе. В 1997 г. коллектив кафедры занял третье место в рейтинге кафедр университета по основным направлениям их деятельности, а в 1998 г. – первое место, за что был награжден почетной грамотой. Кроме того, в 1998 г. преподаватели кафедры участвовали в работе Международной выставки-ярмарки "Экспо-Сибирь" (г. Кемерово). Было представлено пять экспонатов и получен диплом второй степени за "Способ обработки труднодеформируемых металлов и сплавов", разработанный В. К. Афанасьевым и др. На специализированной выставке-ярмарке "Металлургия-99" (г. Новокузнецк) был получен диплом первой степени за комплекс научно-технических разработок в области новых металлургических материалов, изделий и технологий, выполненных кафедрой физики металлов.

Таким образом, кафедра физики металлов, существующая в Сибирском государственном индустриальном университете уже более сорока лет, занимает достойное место в ряду кафедр, выпускающих высококвалифицированных специалистов, и является центром научных исследований в области материаловедения и создания новых материалов с требуемыми свойствами.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ТЕПЛОФИЗИКИ И ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

© 2000г. Профессор Г.В. Самохвалов, профессор Г.И. Черныш

В августе 1934 г. приказом по Сибирскому институту черных металлов была организована кафедра теплотехники со штатом из трех преподавателей и двух лаборантов; заведующим кафедрой назначили М. С. Спиридонова, исполнявшего обязанности научного сотрудника. При кафедре были лаборатории топлива и огнеупорных материалов, в которых наряду с учебными занятиями проводились исследования свойств кузнечных углей, местных строительных и огнеупорных материалов с участием преподавателей кафедр металлургии чугуна и физической химии. По тем временам лаборатории были оснащены очень хорошо – оборудование было в основном от немецких фирм, в достаточном количестве. Снабжение института оборудованием обеспечивал Наркомат тяжелой промышленности.

Кафедра относилась к разряду общетехнических и проводила занятия по общей теплотехнике, по печам, топливу и огнеупорам, по гидравлике.

В 1940 г. в институт прибыл И. С. Назаров, защитивший кандидатскую диссертацию в Уральском политехническом институте. Он и сменил М. С. Спиридо-

нова на посту заведующего кафедрой. В 1941 г. вышел в свет учебник И. С. Назарова "Основы теории промышленных печей".

В годы Великой Отечественной войны институт был переселен из специально построенного для него здания в несколько бараков, условия работы резко ухудшились, но зато в институт прибыли квалифицированные специалисты из высших учебных заведений западных областей СССР. Работники кафедры в эти годы непосредственно на заводах помогли организовать новые технологические процессы для обеспечения военных заказов, выплавки броневой стали.

В послевоенные годы количество студентов в институте увеличилось, появились новые учебные дисциплины, новые учебные планы, перестраивалась работа кафедры, потребовались новые лабораторные помещения. Были организованы лаборатории общей теплотехники, гидравлики, КИП и автоматики. И. С. Назаров вошел в состав авторского коллектива по подготовке учебника "Металлургические печи", изменилось и название кафедры.

В 1955 г. по возвращении из Китайской Народной Республики профессор И. С. Назаров организовал первый набор студентов по специальности "Металлургические печи". С этого года кафедра стала выпускающей, ее научный потенциал увеличился, она стала выполнять довольно крупные исследования по заказам промышленных предприятий. Так, для Кузнецкого металлургического комбината было рассчитано изменение температурного режима фундаментов доменных печей по мере износа лещади, что позволило контролировать этот процесс по показаниям термопар; для завода ферросплавов впервые был составлен полный материальный и тепловой балансы ферросплавных печей, а для проектировавшегося Запсиба были проведены исследования по скоростному нагреву арматуры под закалку.

В 1957 г. И. С. Назарову была поручена организация редакции и типографии для выпуска журнала "Известия высших учебных заведений. Черная металлургия", и он стал первым его редактором, сотрудники кафедры помогали в оформлении и редактировании статей. Оба автора этой статьи в марте 1958 г. были командированы (первый - на Украину, второй - на Урал) пропагандировать по заводам и институтам новый, еще никому не известный журнал.

В 1959 г. кафедра металлургических печей выделила из своего состава часть преподавателей для подготовки специалистов по автоматизации металлургических производств, ими руководил д.т.н. профессор П. М. Масловский, возглавивший впоследствии сибирское отделение редакции журнала "Изв. вуз. Черная металлургия".

С 1962 по 1974 годы кафедрой заведовал доцент Е. И. Корочкин. Он же был проректором по учебной работе. По его инициативе часть студентов-теплотехников специализировалась на очистке промышленных газов, так как промышленные предприятия стали больше внимания уделять борьбе с загрязнением атмосферы, да и существующее очистное оборудование нужно было эксплуатировать более квалифицированно. В 1982 г. на кафедре была открыта новая специальность "Улавливание и утилизация пылей и газов".

С 1974 г. и по настоящее время кафедрой заведует профессор Г. И. Черныш. В этом же году на кафедре произошли два крупных события: летом кафедра переехала в новый учебный корпус, а осенью набрала две группы студентов на новую специальность "Теплогоснабжение и вентиляция". Коллективу кафедры пришлось затратить немало энергии и времени, чтобы после переезда всех лабораторий обеспечить учебный процесс для студентов прежних наборов и подготовиться к занятиям по новым специальным дисциплинам, необходимым для студентов "теплогоснабжения". Ведение части этих дисциплин было поручено специалистам, пришедшим на кафедру из институтов "Сантехпроект" и "Промстройпроект", а части - металлургам-теплотехникам, прошедшим стажировку в строительных учебных заведениях. Такая двойная специализация кафедры продолжалась до 1982 г., когда кафедра "Теплогоснабжение и вентиляция" в составе шести преподавате-

лей, со своими лабораториями, с хорошим методическим обеспечением стала самостоятельной и вошла в состав строительного факультета.

В настоящее время бывшая кафедра теплотехники, а затем - металлургических печей называется кафедрой теплофизики и промышленной экологии. В ее коллективе 16 преподавателей и 5 человек лаборантского состава; из преподавателей - 4 профессора (один из них доктор), 8 доцентов. В разное время на кафедре работали профессор В. В. Юшкин, М. Я. Меджибожский, Е. Л. Медиокритский, Н. Е. Хисамутдинов, доценты В. Д. Марон, С. М. Коган. В 1999 г. кафедра отметила свой 65-летний юбилей и 40-й выпуск специалистов, и если первый выпуск состоял из 14 инженеров, то общее количество выпускников кафедры сейчас достигло 2000. Работают выпускники от Комсомольска-на-Амуре до Белгорода, от Норильска до Алмаляка и Ташкента. За последние годы основным потребителем наших специалистов стал Кузбасс и азиатская часть Российской Федерации.

Для выполнения курсовых научно-исследовательских работ, курсовых и дипломных проектов, для подготовки к зачетам и экзаменам коллективом кафедры подготовлено 8 учебных пособий внутривузовского издания и 8 учебников и пособий с грифом Министерства высшего образования, две монографии. Преподаватели кафедры участвовали в подготовке национальных научных и инженерных кадров в Китайской Народной Республике, Арабской Республике Египет, Алжирской Народной Демократической Республике, Мексике. Для своих нужд сейчас кафедра обучает аспирантов. Сотрудниками кафедры получено более сотни авторских свидетельств на изобретения.

Коллектив кафедры проводит исследования на Кузнецком (КМК) и Западно-Сибирском (ЗСМК) металлургических комбинатах, на Кузнецком заводе ферросплавов и на других предприятиях Кузбасса в направлении совершенствования процессов сжигания топлива, интенсификации теплообмена и тепловой обработки металлов, в области промышленной экологии.

По данным, полученным на КМК, институтом "Стальпроект" была разработана серия плоскопламенных горелок для газовых смесей на основе коксового и доменного газов. Горелки этого типа были установлены на нагревательных печах КМК и ЗСМК, на зажигающих горнах агло-известкового производства ЗСМК и позволили значительно сократить расход топлива. Эта работа, как и работа по радиационным рекуператорам, была удостоена серебряных медалей ВДНХ.

По результатам исследования теплового состояния слитков, а также напряженного состояния стали в области упругих и пластических деформаций были разработаны рекомендации по ускорению нагрева как слитков на ЗСМК, так и заготовок в прокатных цехах КМК и ЗСМК. Сотрудники кафедры активно участвуют в экологических программах на многих объектах металлургии, машиностроения и местной промышленности Кузбасса.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРЕ МЕТАЛЛУРГИИ ЧУГУНА 70 ЛЕТ

© 2000 г. В.А. Долинский, зав. кафедрой, к.т.н.

В 1930 г. находившийся в Томске Сибирский металлургический институт выпустил первых инженеров-доменщиков, в их числе был Герой Социалистического Труда, Лауреат Государственной премии, д.т.н., профессор Б.Н. Жеребин – сотрудник кафедры металлургии чугуна нашего вуза.

Для чтения курса "Металлургия чугуна" по рекомендации В.Е. Грум-Гржимайло и академика М.А. Павлова в Томский технологический институт был приглашен профессор Н.А. Костылев, под руководством которого осуществлялась дальнейшая работа кафедры металлургии чугуна Сибирского металлургического института в г. Новокузнецке.

На кафедре в разное время работали преподавателями заслуженный деятель науки и техники УССР, д.т.н. профессор П.Г. Рубин; доктора технических наук профессора Н.Н. Чернов, И.К. Борискин; кандидаты технических наук доценты С.Н. Трекало, А.А. Вознесенский, В.П. Дембовецкий, Л.С. Непенин, А.И. Солдаткин, М.С. Быков, В.Г. Пыжов. В настоящее время на кафедре работают д.т.н. профессор Н.Е. Хисамудинов, кандидаты технических наук доценты В.А. Долинский, А.И. Степанов, М.С. Кудояров, Н.Г. Дячок; старший преподаватель М.И. Карпенко.

За время существования кафедрой подготовлено более 1000 специалистов, среди них доктора и кандидаты технических наук, ответственные работники министерств, предприятий, проектных и научно-исследовательских институтов.

Кафедра имеет лаборатории подготовки сырья к доменной плавке, восстановления, теории и технологии доменного процесса, печную. Создана межкафедральная (металлургии чугуна и геологии) лаборатория по петрографическому и минералогическому анализам железорудного сырья и продуктов доменной плавки.

Кафедрой проводилась и проводится большая научно-исследовательская работа. Научные работы Н.А. Костылева посвящены металлургии чугуна и стали. Среди его трудов наибольшее значение имеет монография "Очерки теории доменной плавки", в которой были практически рассмотрены и обобщены различные соответствующие теории.

В 1936 г. в связи со слиянием СИЧМа (Сибирского института черных металлов) с СИМом (Сибирским институтом металлов) на кафедре наметились, а затем получили широкое развитие исследования прямого получения железа из руд. Перешедшим из СИМа на кафедру металлургии чугуна Л.С. Непениным была спроектирована и построена первая в стране полупромышленная вращающаяся печь, на которой впоследствии были проведены большие исследования прямого получения

железа из колошниковой пыли, орско-халиловских хромо-никелевых руд и руд Горной Шории.

Н.Н. Круглов являлся основоположником нового направления научных исследований кафедры: изучения металлургических свойств железных руд Сибири и рациональной подготовки их к доменной плавке.

Под руководством П.Г. Рубина проведены работы по повышению производительности коксовых печей Кузнецкого металлургического комбината (КМК), поведению цинка в доменных печах (А.А. Вознесенский, Л.В. Бородин), исследованию минерального состава и обогатимости железных руд Нижне-Ангарского (Л.В. Бородин, М.С. Быков) и Абаканского месторождений, а также агломерации железных руд Горной Шории с добавкой марганцевой руды.

Кафедрой металлургии чугуна (В.П. Дембовецкий) совместно с кафедрой металлургии стали (Е.Я. Зарвин) и доменным цехом КМК (Б.Н. Жеребин) в 50-х годах проведены опытные плавки в доменной печи маломарганцовистого чугуна и его передел в сталь.

В 70-е годы под руководством М.С. Быкова на кафедре сложилось научное направление "Совершенствование технологии окискования железорудного сырья и доменной плавки". Работы, проведенные в этом направлении, имели особое значение при освоении мощности агломашин аглофабрики Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК) и технологии доменной плавки на доменной печи объемом 3000 м³. Разработанная роторная дробилка агломерата (И.К. Борискин) в составе дробильно-сортировочного комплекса запатентована в США, Японии, ФРГ, Франции, Англии и Италии.

В настоящее время на кафедре проводятся исследования по разработке ресурсосберегающих технологий утилизации отходов металлургической промышленности. Выполняются работы в творческом сотрудничестве с КМК, ЗСМК, Сибгипрометом и Карагандинским Гипрометом, Московским институтом стали и сплавов и др.

По указанному выше направлению только за последние годы выполнено более 20 работ по государственной, хозяйственной и государственной тематике, имеется около 100 публикаций, в том числе напечатана монография И.К. Борискина с соавторами "Теория, технология и оборудование интенсивной обработки агломерата".

Выполняются также научно-методические работы по применению ЭВМ в металлургических расчетах, по совершенствованию преподавания разделов спецкурса. Все читаемые кафедрой курсы полностью обеспечены необходимой учебно-методической литературой.

В процессе выполнения научно-исследовательских и научно-методических работ на кафедре организован проектный кабинет, лаборатория макетно-модельного проектирования, зал для организации компьютерного класса, в том числе САПР.

Сотрудники кафедры участвуют во всероссийских отраслевых совещаниях, конференциях, симпозиумах, конгрессах, конференциях предприятий, днях науки, читают лекции на предприятиях и в учреждениях, принимают участие в региональных и международных выставках.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

© 2000 г. А.Ф. Софрошенков, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

Кафедра металловедения, оборудования и технологии термической обработки металлов в нашем вузе ведет свою историю с 1934–1935 гг. Как самостоятельная кафедра оформилась в 1937 г., когда ее возглавил крупный ученый профессор Ю. В. Грдина, который был одновременно техническим директором Сибирского исследовательского института металлов в г. Новосибирске. Исследовательский институт металлов перевели в Новокузнецк и слили с нашим учебным институтом, что дало возможность улучшить лабораторную базу последнего и усилить преподавательские кадры.

На этапе становления и развития кафедры большое внимание уделялось вопросам производства и улучшения качества транспортного металла и прежде всего – железнодорожных рельсов. В начале 40-х годов на кафедре была проведена работа по проектированию и строительству экспериментальной установки для испытания рельсов. Опытно-промышленные испытания на Кузнецком металлургическом комбинате сыграли большую роль в организации термической обработки рельсов.

В начале Великой Отечественной войны в Новокузнецк был эвакуирован Московский институт стали и сплавов. Было организовано две кафедры: кафедра металловедения во главе с профессором И. Л. Миркиным и выпускающая кафедра термической обработки металлов во главе с профессором Ю. В. Грдиной, который в 1942 г. защитил первую в нашем вузе докторскую диссертацию на тему "Термическая обработка рельсов". В 1943 г. обе кафедры были реорганизованы в одну кафедру металловедения и термической обработки металлов. В 1958 г. произошло ее новое разделение на кафедру физики металлов и кафедру металловедения, оборудования и технологии термической обработки. Первую возглавил Ю. В. Грдина, а вторую – А. А. Говоров.

С момента образования кафедры металловедения и термической обработки металлов были определены основные направления, ориентированные на глубинную подготовку будущих инженеров и ученых и на научные исследования, связанные с улучшением качества транспортного металла и арматурной стали, химико-термической обработкой и др. Научно-исследовательские

работы осуществлялись преподавателями и научными сотрудниками кафедры. В основном решались практические задачи для промышленных предприятий. Для выполнения научно-исследовательских работ широко привлекались студенты: при прохождении производственных практик они выполняли научные и конструкторские работы по заказам предприятий. Начиная со второго курса студенты участвовали в научных кружках, докладывая результаты работ на семинарах и конференциях разного уровня, принимая участие в различных конкурсах.

Основные научные работы выполнялись в содружестве с Кузнецким и Нижне-Тагильским металлургическими комбинатами (КМК и НТМК), Западно-Сибирским металлургическим комбинатом, Институтом им. Байкова, Украинским институтом металлов и рядом машиностроительных заводов и научных учреждений. В этот период наибольший вклад в развитие теории и практики получения высококачественных рельсов внесли сотрудники кафедры В. Ф. Зубарев, доценты А. А. Говоров, Н. Н. Шубина, А. В. Котов, Д. И. Тараско, Л. Б. Крепышева, В. И. Царапкин, В. Е. Львов, О. В. Гордин, Н. С. Кадыков, В. В. Дружинин, инженер Д. С. Груздев, старший преподаватель А. Б. Алаыкин. Под руководством профессора Ю. В. Грдины была разработана технология предупреждения образования флокенов в рельсах. На НТМК был внедрен режим термической обработки рельсов после их выхода со стана 150.

Группой сотрудников двух кафедр во главе с Ю. В. Грдиной была создана технология термической обработки рельсов – струйная закалка головки рельсов с прокатного или печного нагрева и последующий самоотпуск. Впервые в мировой практике была разработана технология объемной закалки рельсов в масле и последующего отпуска в печах. Спроектированное уникальное термическое оборудование позволило осуществить эту технологию на КМК и НТМК. Технологический процесс объемного упрочнения рельсов способствовал увеличению их стойкости в 1,5–2 раза, что позволило обеспечить железнодорожный транспорт рельсами очень высокого качества. Внедренный на метал-

лургических комбинатах, этот процесс до настоящего времени является уникальным.

За все исследования в 1966 г. авторам была присуждена первая премия им. Н. А. Минкевича. В 1964 г. за разработку технологии термической обработки рельсов, проектирование и строительство термического цеха группа участников, в том числе и руководитель этих работ Ю. В. Грдина, были удостоены Государственной премии СССР. Сотрудники кафедры вели исследования и по ряду других направлений. Были получены и внедрены новые технологии термической обработки, в результате которых произошло повышение стойкости инструмента, органов землеройных машин, деталей металлургического оборудования, а также стало возможным восстановление валков листовых станов путем наплавки (Д. И. Тараско, А. Ф. Синявский, Л. А. Стародубцева, А. С. Помельникова, А. Е. Корочкин, А. Ф. Софрошенков).

Натурные испытания вагонных осей на усталостную прочность в связи с переводом подвижного состава на подшипники качения дали возможность выбирать способ запрессовки, что обеспечило надежность и долговечность подвижного состава. Важные исследования по комплексному легированию черных и цветных металлов способствовали внедрению разработанных технологий в угольную промышленность, в металлургию, в инструментальную промышленность (Л. А. Стародубцева, А. Ф. Софрошенков, Л. В. Вершинина, Н. Г. Вавиловская).

Необходимость интенсифицировать процесс химико-термической обработки привела к получению технологии термоциклирования при хромировании и борировании, а в конечном счете – к повышению стойкости инструмента и технической оснастки.

На кафедре были проведены большие исследования по разработке боросиликатных расплавов, которые использовались для нагрева, травления и термической обработки катанки, проволоки и других изделий. Разработанные составы боросиликатных расплавов позволяют осуществить безокислительный нагрев, удаление окалины с окисленного металла в процессе нагрева, выдержки и охлаждения. Предложенные фритты можно использовать также в качестве смазки при горячей прокатке и в качестве среды при проведении безуглероживающего отжига (Д. И. Тараско, А. Ф. Софрошенков, А. С. Помельникова).

Для повышения эксплуатационной надежности деталей и узлов тяжело нагруженных машин была разработана технология их обработки в плазме тлеющего разряда. Применение такого интенсифицированного

метода химико-термической обработки, как ионная цементация, значительно повышает надежность деталей машин и механизмов (М. И. Бадьина).

Выполненные В. П. Морозовым исследования влияния водорода на хрупкость железа и сталей позволили выявить механизмы разрушения этих материалов.

А. Ф. Софрошенковым были разработаны новые литые безвольфрамовые стали, обладающие высокими свойствами и работающие в экстремальных условиях, а при определенных ситуациях заменяющие деформированные стали. Исследованы механизм разрушения сталей и влияние структурного состояния на торможение трещин. Разработаны новые расплавы и циклические режимы для поверхностного упрочнения быстрорежущих сталей, что дало возможность использовать такие стали в аппаратах высокого давления.

Результаты проведенных научно-исследовательских работ опубликованы в монографии, сотнях статей в отечественных и зарубежных журналах, получены десятки авторских свидетельств и патентов. За много лет своего существования кафедра выпустила более 2000 специалистов для работы в различных отраслях страны. Кафедра полностью обеспечила себя кадрами из выпускников, которые в разное время защитили диссертации и успешно трудятся на кафедре.

Несмотря на трудности, связанные с бюджетным финансированием, на кафедре имеется аспирантура и докторантура, а также успешно работает Совет по защите докторских и кандидатских диссертаций по металлоредению и термической обработке. На кафедре довольно широко поставлена методическая работа, которая направлена на повышение роли самостоятельной деятельности студентов, индивидуальной работы преподавателей со студентами. Выпускаются методические и лекционные пособия, ставятся новые лабораторные работы.

В настоящее время, продолжая традиционные исследования, кафедра металлоредения, оборудования и технологии термической обработки металлов успешно участвует в новых исследованиях, таких как интеграция разливки, прокатки и термической обработки, влияние прерывистой закалки на свойства стали, разработка процессов восстановления деталей аппаратов высокого давления, повышение качества проволоки из низкоуглеродистой стали, разработка технологии нейтрализации вредного влияния фосфора в чугуне и в ряде других исследований.

Отмечая свое 65-летие, коллектив кафедры уверен в дальнейшем росте ее научного потенциала, совершенствовании педагогической деятельности и сохранении традиций, заложенных нашими старшими товарищами.

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ И ТЕОРИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ К 70-летию СибГИУ

© 2000 г. Профессор Н.М. Кулагин

В 1939 г. в день Николая Зимнего (19 декабря) директор Сибирского металлургического института (СМИ) им. Серго Орджоникидзе проф. Д. Г. Гаршенин на основании приказа ВКВШ при СНК СССР издал приказ об утверждении кафедры физической химии в составе СМИ. Поскольку приказ ВКВШ был обнародован 29 ноября 1939 г., то эта дата и является датой рождения кафедры физической химии и теории металлургических процессов, и поэтому ее юбилей (60-летию) был отпразднован пятью месяцами раньше юбилея СибГИУ.

Начиная с 29 ноября 1939 г. и по 31 августа 1957 г. бессменным руководителем и организатором научной и учебной работы на кафедре был Владимир Александрович Кожеуров. Во время его заведования кафедрой преподавались две дисциплины: физическая химия и теория металлургических процессов. В последующем к ним добавилась коллоидная химия (при зав. кафедрой проф. Б. П. Бурyleва, 1967–1970 гг.) и коррозия и защита металлов (при зав. кафедрой проф. К. М. Шакирове, 1981 г. – по сей день). На протяжении последних 20 лет на кафедре преподаются эти четыре дисциплины.

Вплоть до 1953 г. в штатном расписании кафедры значились две ставки: заведующего кафедрой и старшего преподавателя. Довоенный план научной работы (главным образом, экспериментальной), составленный В. А. Кожеуровым, выполнить не удалось из-за нападения гитлеровской Германии на Советский Союз. В военные годы научная работа на кафедре заключалась в консультациях работников Кузнецкого металлургического комбината по технологическим вопросам и в участии в работе межкафедрального семинара по теоретической физике. Об организации экспериментальной работы нечего было и думать, с одной стороны, из-за почти полного отсутствия научных приборов и химических реактивов и, с другой стороны, из-за отсутствия лабораторных помещений. Выстроенное незадолго до войны великолепное институтское здание СМИ освободил под эвакуированный военный завод, а сам переместился в бараки. Нет худа без добра. Именно безвыходность положения послужила причиной углубленного изучения В. А. Кожеуровым таких разделов теоретической физики, как термодинамика, статистическая физика, теория электричества, теория химической связи и др.

В послевоенные годы В. А. Кожеуров, имея глубокие познания в физической химии, занялся разработкой теории ионных растворов с общим ионом и применением ее к расчетам металлургических равновесий. Полученные в этом направлении результаты обобщены им в книге и в защищенной в Институте химии силикатов АН СССР (г. Ленинград) в 1956 г. докторской диссертации на тему "Статистическая термодинамика

ионных растворов и применение ее к металлургическим шлакам".

Уже в этот период (сталинский – по г. Сталинску) проф. В. А. Кожеуров по глубине и значимости своих научных трудов стал одним из крупнейших ученых в области теоретической металлургии. В 1957 г. он проходит по конкурсу в Челябинский политехнический институт, где создает кафедру физико-химических исследований металлургических процессов и научную школу по теоретическому и экспериментальному изучению соединений переменного состава и шлаковых систем с произвольным числом катионов и анионов. К великому сожалению, в 1971 г. трагическая случайность оборвала жизнь этого замечательного человека и выдающегося ученого.

Теоретические работы проф. В. А. Кожеурова оказали сильное влияние на молодых сотрудников кафедры – Б. П. Бурyleва и Д. М. Лаптева

Б. П. Бурyleв по окончании института в 1957 г., будучи оставленным на кафедре проф. В. А. Кожеуровым, продолжил свою студенческую работу по применению теории регулярных растворов к системам на основе металлов группы железа, углубил ее, получив формулы для расчета асимметричных термодинамических функций бинарных растворов, и развил теорию растворов неметаллов в смешанных растворителях. Обнаружив недожизненные таланты и потрясающую работоспособность, за 13 лет пребывания на кафедре он защитил кандидатскую и докторскую диссертации и опубликовал свыше 170 статей и тезисов докладов

Д. М. Лаптев (зав. кафедрой 1970–1981 гг.) также был оставлен на кафедре В. А. Кожеуровым, но только в 1954 г. Первые три года он потратил на освоение метода Кнудсена с целью определения давления насыщенных паров щелочных металлов над бинарными силикатными расплавами. Однако преодолеть экспериментальные трудности не удалось, и поэтому в начале и середине 60-х годов его научные интересы сосредоточились на разработке методов решения политермических задач, с которыми приходится иметь дело при описании гетерогенных равновесий с помощью статистико-термодинамических теорий концентрационного типа. По полученным на этом направлении результатам им была защищена кандидатская диссертация.

По инициативе Б. П. Бурyleва на кафедру в 1969 г. были приглашены молодые кандидаты наук, окончившие аспирантуру Уральской школы проф. О. А. Есина и проф. С. И. Попеля. Вскоре их усилиями на кафедре были созданы новые научные направления: кинетика окислительно-восстановительных процессов (доц. А. А. Плышевский) и кинетический и гидродинамический анализы сталеплавильных реакций (доц. К. М. Шакиров).

Особенно успешно развивал свое направление К. М. Шакиров. В его теоретические и экспериментальные исследования вошли составными частями кинетика быстрых гетерогенных реакций в потоке, общая теория массообменных процессов в гетерогенных системах, связь между термодинамическими и кинетическими параметрами гетерогенных реакций и гидродинамическими характеристиками взаимодействующих фаз в газожидкостных системах, а также разнообразные практические и производственные приложения. Со временем это направление трансформировалось в более общее — "Физико-химическая гидродинамика в металлургии". Об успехах, достигнутых К. М. Шакировым, его учениками и сотрудниками, красноречиво говорят следующие цифры: по этому научному направлению защищены 3 докторские и 6 кандидатских диссертаций, опубликовано более 170 научных статей и тезисов докладов, сделаны 72 доклада на 26 международных, всесоюзных и региональных конференциях, получено 10 авторских свидетельств и 8 патентов на изобретения, в том числе 4 патента зарубежные.

Имеется еще одно направление, входящее в число основных направлений научной работы кафедры. В конце 60-х годов в ходе обсуждений с проф. В. А. Кожеуровым выдвинутой им гипотезы о неразличимости разновалентных ионов одного и того же металла вследствие непрерывного электронного обмена между ними (например, Fe^{2+} и Fe^{3+}) и вытекающего из этого нулевого значения энтропии смешения Д. М. Лаптев приступил к опытному изучению физико-химических свойств систем $LnCl_3-LnCl_2$, где Ln — элемент лантаноид. В расплавленном состоянии эти системы выгодно отличаются от систем типа $FeO-Fe_2O_3$ и от нестехиометрических соединений неограниченной смешиваемостью компонентов. Однако поставленная задача оказалась столь сложной и объемной, что к середине 90-х годов научная группа проф. Д. М. Лаптева только-только приблизилась к поставленной цели. На почти 30-лет-

нем исследовательском пути была основана научно-педагогическая школа "Физическая химия галогенидов лантаноидов" (ведущие ученые: докт. хим. наук проф. В. Ф. Горюшкин и канд. хим. наук проф. Н. М. Кулагин), защищены по химическим наукам 2 докторские и 6 кандидатских диссертаций, опубликовано свыше 230 научных статей и тезисов докладов, сделано более 30 докладов на 23 международных, всесоюзных и региональных конференциях, получено 4 авторских свидетельства и 2 патента на изобретения.

Кроме упомянутых научных направлений, на кафедре развивались и другие. Так, исследование Е. С. Воронцовым (зав. кафедрой в 1967 г.) кинетики образования цветов побежалости, начатое на нашей кафедре, в последующем (1970–1985 гг., Воронеж, политехнический институт) привело его к разработке метода интерференционной индикации физико-химических процессов. Определенные успехи были достигнуты доц. В. И. Дубинским в редокс-потенциометрическом изучении констант нестойкости комплексных ионов платины в водных растворах и проф. М. С. Хрушевым — в кинетике кремневосстановительных процессов.

Подводя итог, отметим, что за 60 лет научной деятельности сотрудниками кафедры защищены 17 кандидатских и 7 докторских диссертаций, изданы 2 научные монографии [1, 2], одно учебное пособие с грифом МВ и ССО СССР [3] и многочисленные внутривузовские учебно-методические пособия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожеуров В.А. Термодинамика металлургических шлаков. — Свердловск: Металлургиздат, 1955. — 163 с.
2. Лаптев Д.М. Термодинамика металлургических растворов. — Челябинск: Металлургия, 1992. — 352 с.
3. Лаптев Д.М. Задачи и упражнения по термодинамике растворов: Учебное пособие для вузов. — М.: Металлургия, 1965. — 219 с.

Посвящается семидесятилетию
СибГНУ и двадцатилетию кафедры
информационных технологий в металлургии

ОТ ПЕРВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДО НОВОГО НЕПРЕРЫВНОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

(попытка наукометрического исследования)

© 2000 г. В.П. Цымбал, зав. кафедрой, проф., д.т.н.

История существования кафедры информационных технологий в металлургии началась, по существу, с педагогического эксперимента, который продолжается и в настоящее время.

В декабре 1980 г. отдельным приказом министра высшего образования Н. Ф. Образцова организована лаборатория обучающихся систем на основе тренажеров и технологических игр, а в январе 1981 г. письмом заместителя министра Ф. М. Седыкина в Сибирском металлургическом институте была разрешена в порядке эксперимента подготовка одной группы инженеров-металлургов со специализацией "Математическое обеспечение и применение ЭВМ в металлургии". Таким образом, коллективу ученых, выделенному из состава кафедры автоматизации металлургического производства, была доверена важная и редкая, по тем временам, задача создания новой специализации, которая в последующем практически превратилась в специальность и была заимствована другими вузами. Основанием для такого решения служил уже имеющийся к тому времени существенный научный задел как в направлении математического моделирования металлургических процессов, так и в направлении вузовской педагогики и инженерной психологии.

В предлагаемой статье предпринята попытка содержательного наукометрического анализа сорокалетней ретроспективы развития научных направлений, зародившихся еще в недрах кафедры автоматизации металлургического производства и продолженных уже в рамках упомянутой выше кафедры. В дальнейшем предполагается развить этот анализ до уровня графа индекса авторских ссылок, пользование которым существенно облегчает поиск информации в смежных научных направлениях.

У истоков дерева научных направлений, развившихся к настоящему времени, стоят первые работы по математическому моделированию металлургических процессов [1] и одна из первых диссертаций этого направления [2], защищенная в 1963 г. Близкие к этому направлению работы велись в эти годы также в Московском институте стали (Сургучев Г. Д. и др.) и в ЦНИИЧермете (Туркенич Д. И., Травин О. В., Рожков И. М. и др.). Модели [1, 2] явились основой для постановки задачи непрерывной оценки содержания углерода и управления процессом окисления углерода в мартеновских печах [3, 4].

Упрощенный вариант одной из моделей [1] был реализован в виде промышленных аналоговых вычислительных устройств на ферродинамических преобразователях, которые оказались работоспособными в условиях мартеновского цеха и были внедрены на большинстве мартеновских печей Кузнецкого металлургического комбината (КМК) и на одной из крупнейших

печей с продувкой кислородом Карагандинского металлургического комбината (КарМК) [5]. А на одной из печей было реализовано промышленное вычислительное устройство для непрерывного определения содержания углерода в ванне мартеновской печи [5, 6].

Использование информации промышленных ВУ позволило более эффективно управлять окислительной способностью и тепловым режимом мартеновских печей [7]. Благодаря наличию такой информации, а также детерминированной свертки большого числа параметров с помощью имеющихся моделей удалось осуществить в условиях мартеновского цеха по существу уникальный для металлургии активный эксперимент, при котором варьировались четыре комплексных параметра: тепловая нагрузка, избыток воздуха над теоретически необходимым для сжигания топлива, расход руды в завалку (независимо от марки стали), продолжительность завалки и прогрева. Фактически в этих моделях было учтено более пятнадцати параметров. Полученные при этом детерминированно-вероятностные уравнения для прогнозирования продолжительности плавления и количества окисленного за этот период углерода оказались достаточно физическими и адекватными [8]. Эта модель была использована для оптимизации процесса и значительного повышения точности шихтовки [9, 10].

Использование непрерывной информации промышленных ВУ и анализ процессов на основе разработанных моделей, которые продолжали совершенствоваться, позволили вскрыть ряд интересных закономерностей в процессах обезуглероживания жидкой ванны. Наиболее фундаментальная из них – саморегулирование состава продуктов сгорания во взаимосвязи со способностью мартеновской ванны к самораскислению. Это показано на рис. 1, из которого видно, что связь между избытком воздуха на подводной головке $V_{изб}^{O_2}$ (по данным ВУ) и избытком воздуха на отводящей головке $V_r^{O_2} = O_2 - 0,5CO$ (по данным газового анализа) для периодов с твердой ванной (завалка, прогрев) является достаточно определенной (линии 1 и 1'), а для периодов с жидкой ванной (плавление, доводка) – практически отсутствует (линии 2 и 2').

Вначале нам самим такая ситуация казалась парадоксальной, особенно до того момента, когда мы подумались разделить на две группы (на периоды с твердой и жидкой ванной) смешанные до этого данные газового анализа. Статья с анализом этой закономерности и вытекающих из нее принципиально новых подходов к управлению тепловым и окислитель-

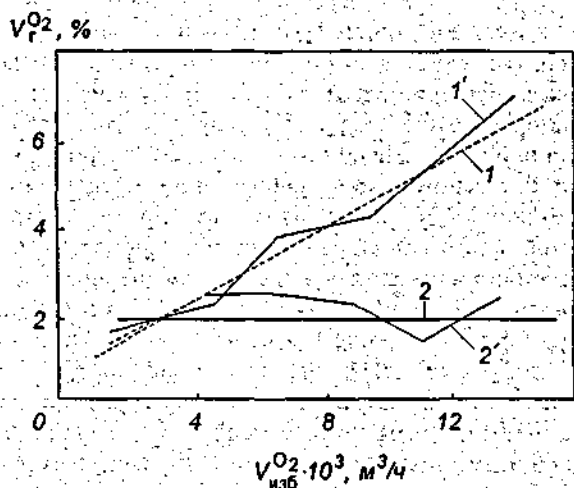


Рис. 1. Связь между избытком воздуха на подводящей головке и составом дымовых газов для твердой (1) и жидкой (2) ванны

ным режимами мартеновских печей была направлена в журнал "Сталь" в 1971 г., однако была дважды отклонена рецензентом. Как выяснилось позже в частной беседе, было сказано, что данные в общем интересные, но саморегулирование тут якобы не причем. Эта статья была опубликована спустя четыре года в журнале "Изв. вуз. Черная металлургия" [11].

Мы остановились более подробно на этом вопросе потому, что у нас есть основания с удовлетворением отметить, что нам удалось в какой-то мере предвосхитить (хотя и на достаточно частном примере) появление теории самоорганизации. Как известно, первые фундаментальные работы этого нового научного направления (И. Пригожин, Г. Хаксен) появились в английском оригинале в 1978 и 1979 гг., а на русском языке — соответственно в 1979 и 1980 г.г. [12, 13].

Использование вскрытых закономерностей самораскисления мартеновской ванны позволило предложить принципиально новый способ управления окислительной способностью и тепловым режимом мартеновских печей, не требующий быстродействующего непрерывного газового анализа, на реализацию которого были затрачены многолетние усилия и значительные финансовые средства. Оказалось, что с учетом этой закономерности можно ограничиться данными периодического анализа на этапе поиска оптимальных режимов. Полученные при этом режимы были внедрены на большинстве мартеновских печей КМК и одной печи КарМК, что дало большой экономический эффект в виде снижения расхода руды в завалку на 13 кг/т и расхода топлива на 5 кг/т, при этом одновременно повысилась производительность печей. В годовом исчислении это выразилось в десятках тысяч тонн руды и мазута.

Уместно вспомнить огромные усилия и средства, которые были затрачены в шестидесятых—семидесятых годах на создание систем автоматического регулирования тепловым режимом в мартеновских печах, ориентированных на использование непрерывного анализа дымовых газов в замкнутом контуре. Тщетность этих попыток связана, по-видимому, не только с ненадежностью систем газового анализа (например, α -индика-

тор Тулуевского оказался вполне работоспособным), сколько с неправильностью используемых принципов и подходов, в том числе неучетом явлений самоорганизации кипящей ванны.

Параллельно с внедрением вычислительных устройств, оптимизацией тепловых и технологических режимов, которые велись в содружестве с ЦЛАМ и ТЛП КМК, продолжалась работа по методологии математического моделирования [14], а также поэтапному совершенствованию конкретных моделей, чему и была посвящена кандидатская диссертация В. Н. Буинцева [15, 16]. Для этой цели в содружестве с С. А. Дубровским были удачно использованы компонентный и факторный анализы [17]. Вопросы исследования и управления сталеплавильным процессом с применением математических моделей были систематизированы и обобщены в докторской диссертации В. П. Цымбала [18].

В 1972—1975 гг. начало развиваться еще одно научно-техническое направление, с одной стороны, связанное с математическим моделированием, с другой стороны, требующее привлечения знаний из области инженерной психологии и педагогики. Речь идет о впервые поставленной для металлургии задачи создания тренажеров и компьютерных обучающих систем. В то время тренажерные системы уже имели определенное развитие в некоторых областях техники (авиации, космонавтике, ВМФ, энергетике). К тому же опыт использования наших моделей показал их недостаточную количественную адекватность для целей управления; но достаточно хорошую качественную адекватность в смысле отражения причинно-следственных связей, что явилось важнейшим фактором для их использования в качестве заместителя объекта при обучении. С другой стороны, проблемы внедрения промышленных вычислительных устройств и разработанных рациональных технологических режимов объективно требовали новых методов и средств обучения, повышения квалификации и воздействия на человека-оператора.

Задача создания тренажеров потребовала решения целого комплекса научных и научно-технических проблем. Кроме моделей основных процессов нагрева и обезуглероживания, имевшихся к тому времени, необходимо было получить модели ограничений, описывающих состояние агрегатов и технологические требования. В результате анализа существующих дидактических систем была разработана двухуровневая система управления процессом обучения [19], упрощенная схема которой приведена на рис. 2.

На первом уровне этой системы осуществляется самообучение оператора на основе математической модели по технико-экономическим критериям, на втором уровне ведется управление процессом обучения по дидактическим критериям. На основе этой структуры строились все создаваемые в последующем тренажеры и компьютерные АОС. В результате была разработана достаточно стройная система и обобщен опыт создания и использования тренажеров [20]. Методика и опыт разработки тренажера "Сталевар" были рассмотрены в диссертации А. Ф. Сакуна [21].

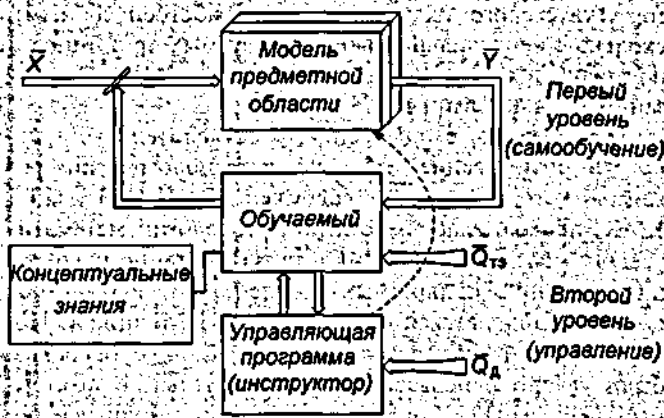


Рис. 2. Двухфазная структура обучающей системы ($Q_{т}$, $Q_{э}$ - технико-экономические и дидактические критерии)

Большую роль в проблеме создания тренажеров играет имитация реальной производственной обстановки и наглядное представление информации. В этом направлении нами в содружестве с А. Г. Падалко были получены очень интересные и необычные результаты [22, 23], которые несколько позже были высоко оценены представителями Института психологии АН СССР (А.Н. Лебедев).

Остановимся на этой проблеме несколько подробнее. На рис. 3 представлена образно-наглядная модель конвертерной плавки, построенная на основе фунда-

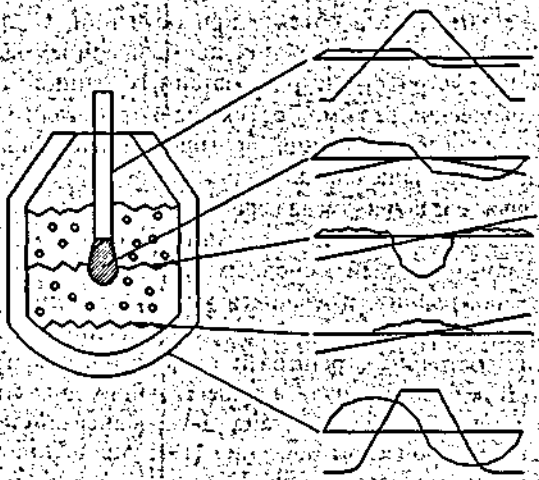


Рис. 3. Образно-наглядная модель конвертерного процесса, реализованная путем синтеза периодических колебаний

ментального положения В. А. Веникова о подобии сложных систем (подобие элементов и соединяющих систем).

При реализации выделенных пространственных элементов посредством специализированной электронной схемы, управляющей лучом на электронно-лучевом индикаторе, был использован метод аппроксимации этих элементов, смысл которого заключается в синтезе опи-

бающих их линий путем суммирования сдвинутых определенным образом по фазе периодических сигналов. Как оказалось при обсуждении с А. Н. Лебедевым, этот подход очень близко корреспондирует с менее распространенной (чем двоично-нейронная) теорией восприятия и запоминания информации, предложенной академиком М. Н. Ливановым, связанной с пространственной организацией периодических процессов мозга и хранением сигналов в виде систем периодических колебаний нейронной активности [24]. Хотя в последующем, в связи с ростом возможностей и быстродействия цифровых ЭВМ, эта картинная модель была реализована (Падалко А. Г., Толстеньев В. М.) программным путем [25], мы считаем необходимым напомнить здесь об этом интересном, но пока не нашедшем дальнейшего развития направлении в связи со скорым достижением предельных по быстродействию возможностей цифровых ЭВМ, которые философы называют элементарными. С учетом этого возникает необходимость использования других принципов восприятия и переработки информации, в том числе, возможно, близких к упомянутым выше.

Вернемся к проблеме создания тренажеров. Для воспроизведения обстановки и наглядного отображения информации сотрудниками кафедры и лаборатории обучающих систем (Падалко А. Г., Буинцев В. Н., Сакун А. Ф., Мочалов С. П. и др.) был создан целый ряд устройств, на которые были получены авторские свидетельства. Среди них следует выделить устройство для моделирования пламени [26], для генерирования функций, коммутаций и представления информации на ЭЛТ [27]. Получены также авторские свидетельства на ряд тренажеров: оператора мартеновской печи, кислородного конвертера, оператора энергетических и энергоемких объектов [28], а также на ряд устройств оценки деятельности оператора [29].

Первый тренажер "Сталевар" был создан в 1976 г. еще в рамках кафедры автоматизации металлургических процессов, а тренажер "Конвертерщик" - в 1981 г., в первый год существования новой кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ в металлургии. В 1982 г. на этих тренажерах под эгидой ЦК ВЛКСМ в связи с 50-летием КМК был организован конкурс операторов конвертеров и мартеновских печей, который показал достаточную эффективность этих тренажеров. С 1981 по 1986 гг. наступил этап достаточно широкого внедрения тренажеров, в основном в средних специальных учебных заведениях Минчермета УССР, в связи с интересом, проявленным начальником отдела подготовки кадров И. В. Молчановым, и при содействии Днепропетровской экспериментальной лаборатории, возглавляемой А. Ф. Косолаповым. При таком сотрудничестве было реализовано более 15 тренажеров в средних и высших учебных заведениях Днепропетровска, Донецка, Мариуполя, Макеевки и др. Тренажер "Сталевар" был реализован также на КМК и ММК. Все перечисленные тренажеры были реализованы на основе аналоговых ЭВМ, реальных пультов и шпотов управления.

Начиная с 1987 г. в связи с возрастанием быстродействия и возможностей цифровых ЭВМ, появлением персональных компьютеров типа IBM началась новая полоса развития обучающе-тренирующих систем применительно к персональным ЭВМ, которые отличались несколько меньшими возможностями в смысле воспроизведения реальной производственной обстановки, но обладали значительно большими возможностями не только в смысле тренировки навыков, но и в смысле повышения степени усвоения знаний, принятия решений на уровне не только оператора, но и на уровне

мастера, начальника смены и т.д. Наиболее емкая и интересная обучающая программа была создана для конвертерного процесса, а затем в несколько упрощенном виде – для мартеновского и электросталеплавильного процессов (Мочалов С. П., Красноперов С. Ю., Федотова Ю. М., Коротких В. Г., Буинцев В. Н., Сакун А. Ф. и др.) [30]. Эти системы были внедрены на ряде металлургических предприятий (ЗСМК, КарМК), а также во многих высших и средних учебных заведениях и показали достаточно высокую эффективность. С 1987 по 1991 гг. работы этого направления были продолжены по договору с НИИ Профтехобразования г. Санкт-Петербурга, где особое внимание уделялось методике обучения с применением АОС.

Параллельно с разработкой и внедрением обучающе-тренирующих систем продолжались работы по совершенствованию математических моделей и оптимизации технологических режимов на их основе. Остановимся еще раз на примере с оптимизацией мартеновской плавки, чтобы затем сосредоточиться на конвертерном процессе.

Описанный выше опыт оптимизации теплового и окислительного режимов мартеновских печей был снова успешно использован, когда в 1979–80 гг. осуществлялся перевод мартеновских печей КМК на природный газ. В связи с его высокой калорийностью и плохой светимостью факел визуально стал коротким и не покрывал даже половины длины ванны. Казалось естественным стремление сталеваров к повышению тепловой нагрузки. Однако это не только не дало эффекта, но и наоборот привело к снижению окислительной способности газовой фазы печи и увеличению расхода руды в завалку и доводку. Продолжительность плавки возросла до 11–12 ч вместо 10–11 ч. Вместо ожидаемого положительного эффекта от использования природного газа КМК оказался в глубоком прорыве. Производительность мартеновских печей снизилась почти на 10 %, и это практически поглотило прирост производства от запущенного незадолго до этого второго электросталеплавильного цеха. На комбинат возвратился в качестве директора А. Ф. Кузнецов. Для анализа обстановки был привлечен ряд центральных НИИ, рекомендации которых были направлены главным образом на совершенствование конструкций топливосжигающих устройств.

Творческий коллектив нашей кафедры совместно с ТТЛ и ЦЛАМ КМК (Цымбал В. П., Калиногорский Н. А., Грицков В. С., Шерышев Ю. А., Хорошавин Е. Ф. и др.) [31, 32] предложил вернуться к ранее (до перехода на природный газ) проверенным идеям повышения роли окислительной способности газовой фазы печи (за счет которой выгорает до 50 % углерода) и учета ранее упоминавшегося свойства саморегулирования кипящей ванны. Спланированные активные эксперименты позволили снова подтвердить правильность этих предположений и найти конкретные пределы рациональных режимов. В результате, как видно из поясняющей качественной схемы (рис. 4), оказалось возможным, с учетом сохранения постоянства количества окислительного углерода ΔC (холм с плоской вершиной), перейти из области 1 (с большим расходом руды G_p , большой тепловой нагрузкой Q_t и малым избытком кислорода $V_{изб}^{O_2}$) в область 2 (с меньшим на 10–12 % расходом руды, большим избытком кислорода и меньшей на 10–15 % тепловой нагрузкой).

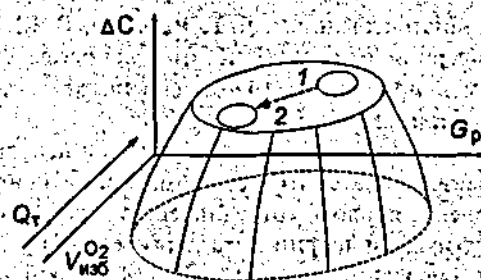


Рис. 4. Оптимизация мартеновской плавки путем повышения окислительной способности печи

Характер изменения продолжительности периода плавления должен отражать не показанный на этом рисунке овраг (или воронку). Как оказалось, в результате последовательной реализации этих режимов и продолжительность плавки вернулась в нормальное русло. Мы подробно остановились на этом примере потому, что здесь, как и ранее в 1970–71 гг. был получен парадоксальный результат: достигнута огромная экономия руды и топлива (десятки тысяч тонн в год) и стабилизация технологии казалось бы из "ничего", благодаря многократно подтвержденной гипотезе, т.е. из того, что мы теперь называем наукоемкими информационными технологиями. По результатам этих работ был создан пакет прикладных программ для исследования и оптимизации режимов работы [33, 34]. Этим вопросам были посвящены кандидатские диссертации Н. А. Калиногорского и Г. Б. Мельника [32, 34].

Накопившийся к 1984–85 гг. собственный опыт математического моделирования, а также сформировавшиеся в науке методы и подходы были обобщены в монографии "Математическое моделирование металлургических процессов" [35], которая была рекомендована в качестве учебного пособия; в настоящее время она используется практически во всех металлургических вузах и требует переиздания.

Теперь возвратимся на 5–7 лет назад и остановимся на направлении, связанном с исследованием, математическим описанием и оптимизацией конвертерного процесса.

В хронологически первой статье этого направления [36] под названием "Об одном подходе к моделированию сложных металлургических систем" авторы В. П. Цымбал, Л. Г. Рыбалко, И. И. Ливерц, С. П. Мочалов сделали попытку перенести в металлургию апробированные ранее в химической технологии подходы, связанные с разбиением системы на так называемые условно элементарные операторы, связанные с фундаментальными физическими закономерностями (идеальное перемешивание и вытеснение, тепло- и массоперенос, химическая кинетика и др.). К этому подходу мы в последующем неоднократно обращались при попытках построения инструментальных систем моделирования.

Определенный след в изучении конвертерного процесса оставили работы [37], связанные с косвенным контролем уровня шлака, в том числе на основе уст-

ройства, запатентованного Л. Г. Рыбалко, В. К. Келем, И. И. Ливерцем и др. [38]. К этим вопросам мы еще возвратимся при анализе несколько позже выполненных диссертационных работ.

Интересным и плодотворным этапом в направлении исследования и математического описания конвертерного процесса явилось сотрудничество с кафедрой физической химии и теории металлургических процессов, в первую очередь с д.т.н. проф. К. М. Шакировым (в то время кандидатом наук). Им была предложена физико-химическая модель процесса обезуглероживания, основная теоретическая предпосылка в которой состояла в том, что в первичной реакционной зоне осуществляется прямое окисление железа и углерода газообразным кислородом в соответствии с мольными долями окисляемых элементов, а во вторичной реакционной зоне (точнее на межфазной поверхности) имеет место гетерогенно-кинетическое лимитирование скорости обезуглероживания, определенное прежде всего площадью межфазной поверхности, которая зависит от интенсивности продувки и положения фурмы.

Эта концепция оказалась плодотворной и была использована в качестве основы в диссертационных работах С. П. Мочалова, Р. С. Айзатулова, С. А. Шипилова, а также в математической модели тренажера "Конвертерщик" и одноименной компьютерной обучающей системе. Однако путь от теоретической концепции до адекватной практически полезной математической модели оказался весьма непростым. Понадобилось провести большое количество промышленных и модельных экспериментов для определения констант гетерогенных реакций, зависимости межфазной поверхности от режима продувки и т.д.

Здесь прежде всего следует отметить диссертационные работы Р. С. Айзатулова и С. П. Мочалова [39, 40], в рамках которых (благодаря тесному сотрудничеству с ЗСМК и активному участию Р. С. Айзатулова) удалось провести в ККЦ-2 очень сложные в организационно-технологическом отношении эксперименты (плавки с двумя-тремя промежуточными повалками, поддержание положения фурмы и интенсивности продувки на основе планов факторных экспериментов и т.п.), которые позволили экспериментально уточнить и идентифицировать неизвестные параметры математических моделей, получить весьма интересные данные по характеристикам свободного движения системы шлак-металл и динамике межфазной поверхности, влиянии ступенчатого изменения режима продувки на состав отходящих газов по данным непрерывного анализа и т.п. [41, 42].

На основе машинных экспериментов на идентифицированной модели были получены оптимальные программы изменения положения фурмы и интенсивности продувки, которые позволили увеличить выход жидкой стали на 1% и повысить степень удаления фосфора и серы. При исследовании конвертерного процесса на модели получены также интересные теоретические результаты, один из которых представлен на рис. 5.

Оказалось, что существует оптимальная программа изменения положения фурмы (h_{ϕ}), при которой благодаря эффекту саморегулирования ванны значительные колебания содержания оксида железа в шлаке (кривые 1-3) в середине плавки (на 8-9 минутах) к концу плавки стягиваются в достаточно узкий пучок. Есте-

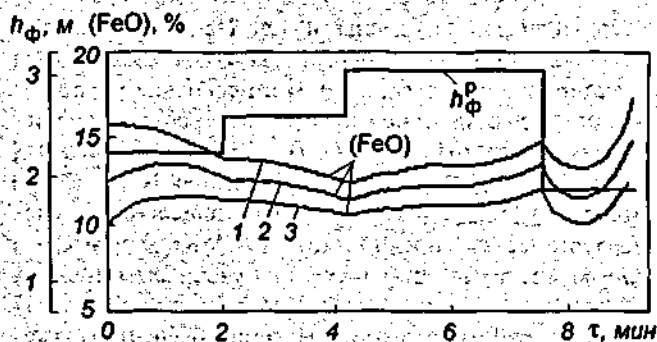


Рис. 5. Самостабилизация окисленности шлака в конвертере

ственно, что это облегчает задачу управления окисленностью шлака.

В связи с успешной практической реализацией этих результатов следует заметить в качестве положительного примера взаимосвязи науки и производства, что несмотря на большую занятость (будучи в то время главным сталеплавильщиком) Р. С. Айзатулов нашел время для серьезного знакомства с возможностями и методами математического моделирования, что позволило ему почувствовать получаемые результаты непосредственно у пульта и экрана монитора аналоговой ВМ (в то время имеющийся ЦВМ, например ЕС 1022, не давали возможности интерактивного взаимодействия). Полученные при этом программные траектории изменения управляющих воздействий были включены в технологические инструкции и сразу начали давать конкретный эффект в виде уменьшения утара металла.

В диссертации С. П. Мочалова, кроме рассмотренных выше вопросов, решавшихся совместно в двух отмеченных диссертациях [39, 40], были также рассмотрены задачи создания модели-имитатора кислородно-конвертерной плавки, которая была использована при создании тренажера "Конвертерщик" [43, 44], а затем в тренажерно-обучающей системе на основе персональных ЭВМ [45].

В 1983-87 гг. по тематике, связанной с конвертерным процессом, были выполнены еще три кандидатские диссертации [46, 47, 49], в которых самое активное участие в качестве научного консультанта принимал С. П. Мочалов. Первая из них принадлежит И. И. Ливерцу [46]. Ссылки на работы, на которых базировалась эта диссертация, уже были приведены выше [36-38]. Разработанный в этой диссертации способ контроля шлако-металлической эмульсии был использован в диссертации Е. И. Ливерца [47] в качестве одного из параметров технологического комплекса, описываемого с помощью аппарата нечетких множеств и математической модели вспенивания шлака, основанной на механизме витания капель металла и пузырьков [48].

Совершенствование математических моделей конвертерной плавки было продолжено в диссертации С. А. Шипилова [49], в которой был разработан алгоритм управления заключительным периодом продувки на основе моделей, учитывающих внутренние взаимосвязи процесса [50]. В рамках этой работы был также создан пакет прикладных программ СОД для статистической обработки опытных данных, который и до настоящего времени используется на кафедре; он был продан или передан по содружеству многим организациям.

В последующие годы также продолжались работы по тематическому описанию, управлению и оптимизации конвертерного производства. Творческую группу молодых сотрудников (выпускников кафедры), занимающихся этими вопросами, возглавлял С. П. Мочалов. Результаты этих исследований составили в последующем одну из глав его докторской диссертации. Здесь следует отметить попытку создания программного и технического обеспечения автоматизированной системы исследования управления дутьевым режимом конвертерной плавки [51], в которой участвовали В. М. Толстеньев, Е. И. Ливерц, С. В. Клемашов, В. Г. Коротких; накопление опыта по освоению и созданию прикладного программного обеспечения и инструментальных систем моделирования молодыми сотрудниками С. Ю. Красноперовым, С. Н. Калашниковым, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко, В. Г. Коротких, В. Ю. Климовым, Ю. И. Федотовой [52], что в последующем явилось основой диссертационных работ первых четырех из перечисленных сотрудников.

На период с 1984 по 1995 гг. приходятся работы по созданию методического обеспечения для ранее разработанных тренажеров и автоматизированных обучающих систем и обобщению результатов педагогического эксперимента, с упоминания о котором начиналась эта статья, тем более, что в 1986 г. произошел первый выпуск инженеров новой специализации, на основе которой отработывалась новая технология обучения. В этот период, начиная с организованного нашей кафедрой в 1984 г. межвузовского совещания-семинара [43], сотрудники кафедры активно участвовали в разного рода методических конференциях, например [53]. Наиболее широкий спектр вопросов вузовских технологий обучения был рассмотрен на межвузовских конференциях [54, 55], в труды которых включены исследования нескольких сотрудников нашей кафедры (В. П. Цымбала, С. П. Мочалова, А. Ф. Сакуна, А. Г. Падалко, В. Н. Буинцева, С. А. Шпилова, С. Ю. Красноперова, И. А. Рыбенко, В. И. Кожемяченко). Эти вопросы были обобщены в научно-методической разработке [55], где рассмотрена двадцатилетняя ретроспектива педагогического эксперимента, основой которого является концептуально-деятельностный подход в сочетании с самообучением на математических моделях-имитаторах.

Еще одним интересным направлением деятельности сотрудников кафедры в этот период было участие в создании баз физико-химических, технологических данных и математических моделей для оптимизации металлургических технологий. Три всесоюзных совещания по этому вопросу были проведены в Днепропетровске, Кургане [56] и в 1991 г. в Новокузнецке [57]. Последнее было организовано нашей кафедрой совместно с кафедрой физической химии и теории металлургических процессов при активном участии С. П. Мочалова и К. М. Шакирова. Совещание имело довольно широкое представительство и географию (Днепропетровск, Москва, Курган, Челябинск, Новокузнецк и др.), прошло на хорошем научном уровне, в нем приняли участие многие сотрудники кафедры [57]. К сожалению, из-за распада Союза и экономических сложностей следующего подобного совещания организовать не удалось, хотя некоторые из его участников продолжают личные контакты по обмену информацией.

В заключительной части статьи остановимся на новом научном направлении, которое связано с использованием в металлургии идей и принципов теории самоорганизации (синергетики). Отправной точкой здесь следует считать 1993 г., когда из популярной статьи С. П. Курдюкова и Г. Г. Малинецкого [58] мы узнали о формирующемся в науке новом научном направлении. И

поскольку ряд явлений саморегулирования и самоорганизации мы уже наблюдали раньше в существующих металлургических процессах [3, 11], интуитивно мы оказались подготовлены к достаточно быстрому переносу этих идей в металлургию. В 1994 г. на кафедре состоялся первый научный семинар по синергетике, затем было проведено еще несколько семинаров с привлечением представителей других кафедр. Два года понадобилось для более глубокого постижения фундаментальных работ этого направления (Г. Николис, И. Пригожин [12], Г. Хакен [13] и др.), появившихся к этому времени.

На основе этих работ в 1986 г. впервые в периодической литературе по металлургии (именно в данном журнале) были опубликованы статьи, посвященные изложению основных идей этой теории и их переосмыслению применительно к металлургии [59], а в 1988 г. опубликована статья А. Ф. Сакуна, С. П. Мочалова о явлениях самоорганизации в существующих сталеплавильных процессах [60]. В эти же годы эскизно было разработано большое число возможных вариантов конкретной аппаратурной и технологической реализации идей теории самоорганизации применительно к металлургии. К развитию и реализации этих идей в виде заявки на патентование в первую очередь были привлечены С. П. Мочалов и К. М. Шакиров. Идею создания опытного агрегата на Запсибе одобрили и приложили серьезные усилия для ее реализации Б. А. Кустов и Р. С. Айзатулов (в то время директор и главный инженер комбината), а директор Сибгипромеза Н. И. Михеев и начальник сталеплавильного отдела А. И. Торопов взяли силами и средствами этого института выполнить первый проект опытной установки. В течение двух лет (1987–88 гг.) было составлено весьма обстоятельное описание к патентной заявке (более 25 страниц), которая была принята патентным ведомством практически без корректировок с приоритетом от 24.11.88 г. [61]. В 1993 г. на основе международной заявки РСТ/RV/00325 этот процесс был запатентован в основных металлопроизводящих странах [62]: США, Япония, Республика Корея, страны Европы. Кроме обычных для изобретения признаков (в виде последовательности операций и добавлений элементов в конструкцию агрегата), в описании к этому патенту была включена совокупность из девяти физических эффектов, среди которых можно выделить:

- использование свойств саморегулирования реакций прямого и косвенного окисления углерода в системе под давлением;
- создание в первом реакторе условий для значительного отклонения системы гетерогенных реакций от термодинамического равновесия;
- создание в первом реакторе повышенного пульсирующего давления путем использования эффекта "самозапирания" соединительного канала в режиме критического истечения двухфазной среды;
- создание высоких удельных поверхностей контакта фаз за счет распыления потока шихты встречными струями;

использование высокого слоя шлаковой пены во втором реакторе и соединительных каналах в качестве "мокрой" газоочистки.

Реализация совокупности первых четырех эффектов позволила создать своеобразный металлургический реактор - осциллятор, который обладает свойствами универсальности, может быть использован не только в черной и цветной металлургии, но и в других технологических процессах, где продукты реакции могут представлять смесь (эмульсию или газозвесь) газообразной и конденсированной или твердой фазы. Схема этого реактора представлена на рис. 6.

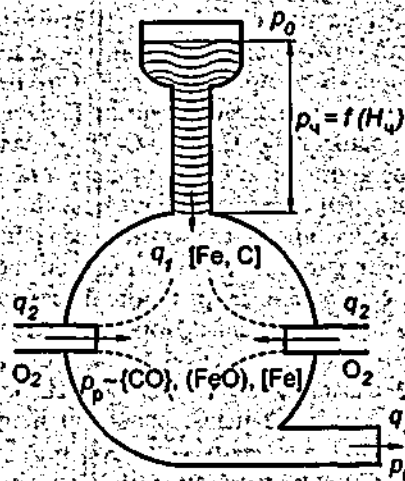
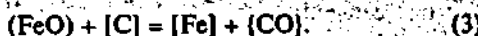


Рис. 6. Реактор-осциллятор нового непрерывного металлургического процесса.

p_0 , p_p и p_v - соответственно давление атмосферное, в реакторе и гидростатическое столба чугуна; q_1 , q_2 и q_3 - потоки чугуна, кислорода и истекающей из реактора двухфазной среды

Упрощенный механизм его действия поясним на примере продувки чугуна кислородом, хотя сейчас этот реактор используется в основном для прямого восстановления оксидов из пылевидных материалов.

При окислении железа и углерода чугуна газообразным кислородом имеют место следующие основные гетерогенные химические реакции:



Эти реакции протекают на диспергированных встречными струями микрочастицах: каплях, пузырьках, твердых частичках (при подаче в реактор пылевидных отходов). Эти частицы играют роль микрореакторов, которые в ансамбле совокупностей создают в объеме реактора поле давлений, концентраций, температур, которое в свою очередь действует по обратной связи на процессы в каждом из микрореакторов. Таким образом, здесь конкретно реализуется принцип круговой подчи-

ненности (и параметра порядка) - один из фундаментальных принципов синергетики (подробнее см. в работе [63]).

Реализация еще одного важного принципа синергетики - значительного отклонения системы от состояния термодинамического равновесия - достигается за счет выбора площади сечения соединительного канала S_x таким образом, чтобы скорость истечения двухфазного потока (q_3) находилась в нелинейной области зависимости скорости этого потока от газосодержания (α_r):

$$\alpha_r = \frac{V_{CO}}{V_{CO} + V_{KF}}, \quad q_3 = VS_x = \begin{cases} f(p_p - p_0) & \text{при } V < V_{кр}; \\ V_{кр} = f(\alpha_r) & \text{при } V > V_{кр}. \end{cases}$$

Эта зависимость иллюстрируется рис. 7 - заштрихованная область.

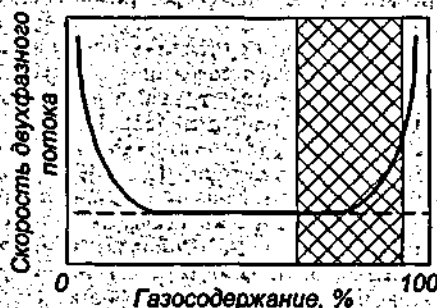


Рис. 7. Зависимость скорости двухфазного потока от газосодержания

Качественно характер изменения термодинамического потенциала в первом, втором реакторах и усреднительной емкости (устройстве доводки) - представлен на рис. 8.

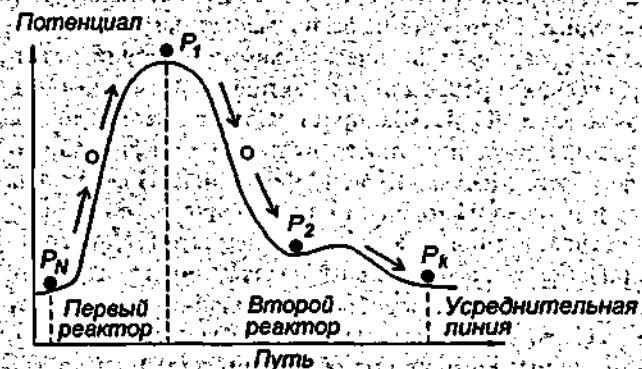


Рис. 8. Характер изменения термодинамического потенциала по ходу процесса

Основы технологии процесса и конструкции агрегата опубликованы в работах [64-66], а также рассмотрены в отдельной статье.

После краткого знакомства с процессом рассмотрим, как же развивалось это научное направление, обеспечившее создание нового металлургического процесса и агрегата. В отличие от традиционно существующих металлургических технологий и агрегатов (основы конструкции которых интуитивно определились еще в прошлом веке, и лишь в шестидесятых годах были сделаны первые попытки их математического описания) в данном случае процесс создания опытной установки велся по классической схеме разработки современных наукоемких технологий: концептуально-теоретическая постановка задачи, разработка математических моделей, в том числе пригодных для инженерных расчетов, физическое моделирование, испытание отдельных элементов процесса и агрегата в производственных условиях и, наконец, проектирование и строительство крупномасштабной установки с автоматизированным экспериментом.

Естественно, что после того как концептуально были определены описанные выше задачи и возможности использования идей и принципов теории самоорганизации, следующей важнейшей ступенью реализации этой схемы явилась необходимость создания взаимосвязанной системы математических моделей разных уровней, описывающих: материальные и энергетические потоки через агрегат в целом; процессы, протекающие внутри отдельных реакторов и на поверхностях раздела фаз; процессы в микрореакторах (микрочастицах). Эта сложная и весьма трудоемкая задача была поставлена и успешно решена в докторской диссертации С. П. Мочалова [67], что позволило быстро просчитывать, анализировать и оптимизировать различные технологические решения.

Естественно, что решение столь сложной задачи, к которой добавился еще целый ряд проблем, не под силу одному человеку. К счастью, нам удалось создать и сохранить относительно небольшой, но дружный коллектив молодых ученых, в основном выпускников нашей кафедры, которые успешно освоили арсенал современных информационных технологий и на этой основе создали свои прикладные программные и инструментальные системы моделирования. Здесь, по-видимому, немалую роль сыграло создание на кафедре упомянутой выше новой специализации, что позволило готовить инженеров-технологов нового склада мышления, не ориентированных на конкретный существующий металлургический агрегат: дому, конвертер, электропечь и т.д. Имена этих молодых сотрудников мы уже упоминали выше. Здесь мы остановимся на конкретном вкладе тех из них, кто защитил кандидатские диссертации в последние годы.

Начнем с С. Н. Калашникова, который оказался единственным настоящим математиком на кафедре, поскольку окончил Новосибирский госуниверситет. Благодаря его появлению на кафедре в 1984 г. стало возможным обеспечить грамотную математическую постановку задач. Он же, в свою очередь, достаточно хорошо вник в проблемы металлургии. В первые годы пребывания на кафедре он настолько глубоко освоил методы и средства решения сложных динамических задач на АБМ (в то время на цифровых ЭВМ решать такие задачи было трудно), что оказался (совместно с В. П. Цымбалом и В. Н. Бунищевым) автором изобретения на устройство для моделирования процессов тепло- и массопереноса [68]. В дальнейшем он сосредоточился на методах решения такого рода задач на цифровых ЭВМ применительно к различным металлургическим процессам: электрошлаковой наплавке [69], дуговой сталеплавильной печи [70] и ковшу [71], новому металлургическому процессу [72]. Исследования по моделированию гарнисажа велись в сотрудничестве с представителями ИТПМ СО РАН г. Новосибирска (А. Н. Черепановым, В. А. Поповым и др.) [72]. Совместно с С. Ю. Красноперовым он создал на основе развития Excel-приложений очень удобную для пользователей инструментальную систему моделирования краевых задач по физической постановке, близкую к аналоговой [79, 74]. Эти вопросы, а также разработка численно-ана-

литических методик и теории обобщенных функций [75] применительно к металлургическим объектам с самоорганизацией явились основой кандидатской диссертации С. Н. Калашникова [76].

В тесном контакте с С. Н. Калашниковым последние несколько лет работает С. Ю. Красноперов, который глубоко вник в проблемы компьютерного программирования, обучаясь еще на втором курсе института, а сейчас является специалистом высокого класса в области информационных технологий. Он был ведущим программистом при создании упоминавшейся выше широко распространенной тренажерно-обучающей системы "Конвертерщик" [45] и реализованной на опытной установке нового металлургического процесса на ЗСМК системы контроля отображения информации и управления. Выше уже была подчеркнута его роль в создании инструментальных систем моделирования и решения с их помощью конкретных задач [75, 74]. Обобщающим моментом в его кандидатской диссертации [77] явились разработка и применение объектно-ориентированного подхода к задачам моделирования и управления.

Практически одновременно с упомянутой выше была защищена еще одна кандидатская диссертация тоже программистом высокого класса, выпускником нашей кафедры В. И. Кожемяченко [78]. Как можно видеть из ее названия, здесь под руководством профессора С. П. Мочалова разработана еще одна инструментальная система [79], позволяющая рассчитывать технологические параметры нового непрерывного металлургического процесса во взаимосвязке с основными конструктивными параметрами, что создаст основу для автоматизации проектирования вновь создаваемых агрегатов. С помощью этой системы решен ряд задач [57, 80, 81] на всех этапах реконструкции существующей установки и проектирования установки малой производительности для литейных цехов металлургических и машиностроительных заводов.

Хотя мы подчеркивали выше, что одним из важнейших условий самоорганизации являются значительные отклонения системы от термодинамического равновесия, однако даже для определения степени отклонения от него необходимо иметь средства оперативного расчета термодинамического равновесия в зависимости от наложенных на объект управлений и ограничений. Естественно, расчеты равновесий необходимы для решения еще целого ряда задач: определения предельных возможностей различных вариантов технологий, получения данных для расчета температурного состояния и т.п. Автоматизацию этого круга задач на основе известной базы термодинамических данных "Астра", разработанной в МВТУ, одной из первых на кафедре освоила И. А. Рыбенко. Эта программная система с участием В. Ю. Климова и В. И. Кожемяченко была очень существенно доработана: дополнена базой данных о тепловых эффектах наиболее распространенных в металлургии химических реакций; Excel-приложениями, позволяющими оптимизировать варианты расчетов; удобным графическим представлением информации [57, 80]. С помощью этой программной системы, начиная с 1991 г., И. А. Рыбенко просчитаны сотни вариантов технологических режимов различных технологий для создаваемого металлургического процесса и агрегата [81, 82], в том числе: продувка чугуна с добавлением различного количества железо- и марганецсодержащих материалов, комбинированное карбо-силико-алюмотермическое получение силикомарганца, прямое получение железа из пылевидных материалов и даже возможные технологии получения черновой меди в новом агрегате. Эти вопросы явились основой кандидатской диссертации И. А. Рыбенко [83].

Заканчивая характеристику направления, связанного с математическим описанием нового процесса, отметим также работу аспирантки Л. А. Ермаковой (научный руководитель С. П. Мочалов), которая переняла у И. А. Рыбенко опыт использования описанного выше пакета и использовала его для сравнительной оценки энергетических возможностей различных технологий прямого восстановления [84], но основное содержание ее будущей диссертации связано с моделированием массообменных процессов в дисперсных частицах [74], для чего используется еще один из описанных выше пакетов.

Таким образом, для решения широкого круга вопросов, связанных с разработкой и оптимизацией нового металлургического процесса и агрегата, понадобилось создание трех крупных пакетов прикладных программ и нескольких более мелких: тепло- и массообмен, газодинамика двухфазных потоков (скорости, давления) во взаимосвязи с параметрами элементов агрегата, расчеты равновесий и оптимизация режимов статики. Добавим сюда упомянутую выше систему математических моделей [67] самого процесса, а также компьютерную систему отображения и управления [77]. Это дает основания утверждать, что разрабатываемая технология относится к разряду наукоемких, информационных.

Неслучайно, что это нашло отражение в очень малых удельных объемах новых агрегатов (в 20–30 раз меньше, чем в традиционной металлургической схеме), низкой энергоемкости и было с интересом воспринято на ряде международных конгрессов, особенно на конгрессах R'97 и R'99 Recovery, Recycling, Re-integration в Женеве [85, 86], где стенд Запсибметкомбината с видеодемонстрацией нового процесса посетили все руководители секций и семинаров, имеющих отношение к термопроцессам в металлургии. На этих же конгрессах [85, 87, 88] была представлена структура комплекса безотходных технологий на основе нового процесса, включающая наряду с переработкой металлосодержащих отходов переработку шлака в потоке, а также комплексную переработку зол ТЭЦ [87, 88] с отмагничиванием оксидов железа для переработки в процессе СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор) и возможностью дальнейшего разделения оксидов кремния и алюминия.

Параллельно с математическим моделированием велись также работы по физическому моделированию, что давало возможность проверять адекватность концептуальных и математических моделей, хотя бы по некоторым параметрам, и переносить результаты для проверки на опытной установке. Среди этих работ следует отметить исследование газо- и гидродинамических процессов на холодных моделях [80] (Ливерц Е. И., Фомичев В. П., Коколевский И. В. и др.), в которых участвовали сотрудники Института теоретической и прикладной механики СО РАН В. П. Фомичев и С. С. Кашнелсон, исследование состава и свойств дисперсных фаз, полученных при взаимодействии потока металла с газовыми струями [89] (Мочалов С. П., Цымбал В. П., Ливерц Е. И. и др.). Важное значение в исследовании кинетики совместно протекающих реакций в системе железоуглеродистый расплав – шлак – газ имели эксперименты на печи Таммана, оснащенной системой непрерывного газового анализа с компьютерным отображением информации [90] (Мочалов С. П., Телегин И. А., Шакиров К. М. и др.).

Следует также отметить направление, связанное с исследованием химического состава и свойств полученных на опытной установке материалов (металла и шлака) до и после их расплавления и выдержки в индукционной печи (Ливерц Е. И., Лубяной Д. А.), которая рассматривается нами в качестве одного из вариантов устройства для доводки металла. Сотрудничество с Д. А. Лубяным по этому вопросу, а также попытки использования им некоторых идей теории самоорганизации

для интенсификации массообменных процессов в этом агрегате [91] дали дополнительный материал для его кандидатской диссертации [92].

Среди интересных опытно-экспериментальных работ следует отметить попытку создания МГД насоса центробежно-кондукционного типа которую осуществили по договору с Запсибом сотрудники ИТПМ СО РАН С. С. Кашнелсон, В. П. Фомичев и др. Ими были разработаны математические модели для инженерных расчетов, создана лабораторная установка, испытанная на сплаве Вуда и олове. Силами проектировщиков Запсиба (Рыбушкин А. А., Суздальцев Е. В. и др.) сделан рабочий проект, по которому, в Новосибирске (ООО "Койон", Загорский В. Т.) реализована система стабилизированного питания с индуктором (основа насоса), а в Санкт-Петербурге (Институт огнеупоров) были изготовлены специализированные огнеупорные блоки. Однако довести до сборки и испытаний на стенде эти системы из-за организационных и финансовых причин пока не удалось, хотя насос получился очень компактным (массой менее одной тонны) и его можно было бы использовать для высокой гомогенизации металла в потоке при глубоком обессеривании металла или модификации ультрадисперсными порошками, что позволяет получать металл с особыми свойствами.

Заканчивая столь затянувшийся анализ сорокалетней ретроспективы развития научного направления, которое началось с первых попыток математического моделирования существующих металлургических процессов и пришло к созданию теоретических основ нового наукоемкого металлургического процесса и агрегата, необходимо остановиться на одном из важнейших вопросов, ради которого начинается любое исследование в прикладных областях науки. Речь идет, естественно, о практической реализации разработок.

Формирование основных концептуальных представлений о будущем процессе, возникших на основе постижения идей и принципов теории самоорганизации, по существу, совпало с первыми годами перестройки. Определенный энтузиазм и ощущение новизны, присущие тем годам, в какой-то мере повлияли на то, что мы решились на практическое воплощение своих замыслов, хотя и понимали, что на это потребуется не один год. Мы знали о многочисленных попытках создания непрерывных сталеплавильных процессов в нашей стране (ВНИИМетмаш, Целиков А. И. и др.; МИСиС, Роменец В. А. и др.; ДметИ, Балтизманский В. И. и др.; МГМИ, ММК, Бигеев А. М. и др.) и за рубежом (БИСРА, ИРСИД) и использовали их, в качестве аналога и прототипа. В зарубежной металлургии после спада 70–80-х годов наблюдался некоторый застой, в том числе в научных разработках, который, однако, достаточно быстро сменился устойчивым прогрессом.

Наряду с перестроечным энтузиазмом у нас также была надежда, что благодаря использованию идей теории самоорганизации нам удастся создать агрегат, имеющий существенно меньшие удельные объемы и, соответственно, капитальные затраты. В какой-то мере в последующем эти надежды оправдались. Но, по-видимому, самым главным слагаемым успешной и сравнительно быстрой реализации опытно-промышленной установки явилось создание относительно небольшого, но достаточно тесно и слаженно работающего коллектива, состоящего из ученых СибГИУ (с привлечением в необходимых случаях сотрудников ИТПМ СО РАН и др. организаций), проектировщиков Сибгипромеца, пе-

решедших затем на Запсиб, и производителей Запсиба.

О формировании научных направлений и научного коллектива уже достаточно много сказано. Остановимся на двух важнейших составляющих реализации научных разработок: коллективе проектировщиков и технологов-производственников. Как было уже отмечено ранее, первоначальный эскизный проект опытной установки был выполнен силами Сибгипромеза под руководством Н. И. Михеева и А. И. Торопова в 1990–91 гг., а в 1991 г. параллельно с рабочим проектированием начался монтаж установки на небольшой свободной площадке во втором конвертерном цехе Запсиба. Сформировавшаяся в процессе работы над новым агрегатом группа проектировщиков Сибгипромеза под руководством А. А. Рыбушкина в составе Е. В. Суздальцева, Ю. П. Фадеева, М. И. Дьякова, Е. Д. Омельченко, С. В. Тигаева и др. несколько позже, в связи с трудностями, которые испытывали проектные организации, была приглашена директором комбината Б. А. Кустовым на Запсиб в качестве отдельного подразделения – Инженерного центра производства новых технологий. Таким образом, появилась возможность очень оперативной коррекции различных конструкторских и проектных решений. Благодаря тому, что они уже в те времена освоили элементы САПРа, обсуждаемые на еженедельных совещаниях творческой группы решения через один–два дня превращались в эскизные проекты или рабочую документацию и через систему контролируемых протоколов раздавались соответствующим исполнителям.

Еще одной важнейшей составляющей процесса внедрения стало постепенное формирование с помощью руководства комбината творческой группы технологов-производственников на основе ведущих специалистов сталеплавильного производства, а также ряда отделов и лабораторий завода. Руководителями этого коллектива явились главный инженер (а позднее генеральный директор) комбината Р. С. Айзатулов и начальник сталеплавильного производства В. В. Соколов. Начиная с 1991 г. эта группа практически еженедельно собирается на совещаниях в кабинете начальника второго конвертерного цеха В. В. Липеня при его непосредственном участии. Большую роль в практической реализации конструктивных и технологических решений играет начальник цехотдела сталеплавильного производства С. В. Щипанов, а его подчиненная Т. П. Шапова за эти годы создала несколько томов протоколов, через которые ведется контроль принимаемых решений, и архив рабочей документации.

По решению руководства комбината была создана бригада по обслуживанию установки во главе с В. П. Тютюльниковым в составе В. И. Гилева, В. В. Семушкина, Н. А. Ватолина, В. В. Воронова и др. Роль этой бригады и особенно начальника установки В. П. Тютюльникова трудно переоценить. Этому небольшому коллективу пришлось участвовать в сложнейших экспериментах в условиях весьма скоротечного процесса и многое делать впервые в металлургии. Благодаря их большому производственному опыту удавалось в условиях ограниченных возможностей находить относительно простые решения в процессе постепенного совершенствования элементов конструкции установки.

Реализация, совершенствование и эксплуатация установки в условиях действующего цеха были бы невозможны без непосредственного участия специалистов производства: по механическому оборудованию – В. А. Григорьева (в начальный период строительства установки эти обязанности выполнял С. М. Шапов), электрооборудованию – В. А. Гигенова, А. Шаталова, Ю. В. Конева, энергообеспечению – Н. И. Сопова, А. Б. Пастухова, В. Г. Суетова, Е. Б. Горшкова, КИП и автоматике – А. Ф. Мельникова, В. В. Казакова, АСУ и ВТ – В. В. Кузнецова, И. В. Зудина.

В составе творческой группы принимали активное участие представители теплотехнической лаборатории – В. В. Семашин, Л. Е. Вальшина, ИЦ “Керамика” – А. П. Пресняков, ЦЗЛ – В. П. Горбачев, Л. Д. Бабенко, Э. П. Веремей, Е. М. Демченко, А. Г. Клепиков и др., а также заводских отделов главного механика – В. В. Гайдук, электрика – В. А. Блинов, метролога – А. И. Алимов, нач. цеха КИП – Н. И. Матвеев, АСУ ВТ – В. А. Лачков, оборудования – В. А. Волховицкий, отдела снабжения – А. Я. Старосельцев, технического отдела – А. А. Маслаков, В. А. Буймов, литейного цеха – В. И. Чичков, цеха изложниц – Э. С. Макаров, производственных технологий – Ю. А. Селезнев. Некоторые результаты совместной работы по созданию и совершенствованию установки и технологии представлены в трудах научно-практических конференций [80, 81, 93, 94].

Такое сотрудничество ученых, проектировщиков и производственников принесло достаточно быстрые плоды. Несмотря на ограниченные возможности, удалось уже в конце декабря 1992 г. выйти на полностью автоматизированный и компьютеризированный эксперимент с первым реактором (пока без второго реактора – отстойника). Этот эксперимент напоминал запуск ракеты, поскольку из первого реактора вылетала двухфазная струя с объемным газосодержанием порядка 98–99 % со взвешенными окисленными частицами. Этот уникальный эксперимент позволил подтвердить правильность основных концептуальных представлений о возможности создания давления в реакторе за счет критической скорости истечения двухфазного потока (был “подвешен” столб чугуна в металлопроводе высотой более четырех метров). Получены данные о скорости истечения двухфазной струи; ценнейшие данные о гранулометрическом и химическом составе вылетающих частиц и т.д.

В 1993 г. удалось выйти на эксперименты с присоединенным к первому реактору упрощенным вариантом второго реактора (рафинирующего отстойника). В одном из этих экспериментов был получен металл с весьма низким содержанием углерода (0,02–0,03 %) при содержании оксидов железа в шлаке 9–10 %.

В 1994–95 гг. в связи с остротой марганцевой проблемы были сделаны попытки прямого восстановления марганца из пылевидного концентрата путем его добавления к струе чугуна в первом реакторе. Было получено содержание марганца в металле порядка 8 % (близко к стали Гадфильда). В 1995 г. сделана попытка прямого получения марганца из пылевидных отходов (без участия чугуна) комбинированным карбо-, силико-, алюмотермическим способом. При этом получен нестандартный силикомарганец (36 % Si, 29 % Mn).

После этого появилась надежда, что таким же путем можно выйти на прямое получение железа из пылевидных отходов (омазученной окалины, шламов газоочисток т.д.). Путем термодинамических расчетов уда-

лось получить состав шихты и продувочный режим, открывающий возможность автогенного процесса. Таким образом, была подтверждена возможность прямого получения железа и других сплавов из пылевидных материалов, минуя стадию окомкования. С 1996 г. в качестве основной отработывается технология переработки окалины и конвертерных шламов; эту технологию с учетом полученных экспериментальных результатов можно считать достаточно реальной.

На ближайшее время запланированы эксперименты по переработке титано-магнетитовых концентратов [94], что может иметь большое значение для черной, цветной металлургии и оборонной промышленности. Как известно, эту проблему пытаются решить, начиная с тридцатых годов. Частичные решения ее найдены уральскими учеными и производственниками. Сейчас ставится задача практически безотходной переработки таких руд, запасы которых практически не исчерпаемы.

К сожалению, из-за финансовых трудностей, проблем с изменением собственников, угрозой банкротства и других негативных явлений, имеющих место в нашей металлургии, начиная с 1996 г., процесс доведения установки до товарного уровня несколько замедлен. Из-за того, что до сих пор не смонтирована система эвакуации продуктов сгорания, на установке разрешены лишь достаточно кратковременные эксперименты. Утешительным моментом является тот факт, что одновременно с достройкой действующей установки ведется проектирование мини-комплекса с установкой небольшой производительности порядка 20–25 тыс. т в год (в рамках реструктуризации цеха изложниц), которая может быть рекомендована для литейных цехов металлургических и машиностроительных заводов, а также может сыграть большую роль при отладке различных вариантов технологий (вплоть до получения меди), демонстраций новых технологий и продаже лицензий.

Ускорение этого процесса зависит, прежде всего, от наличия инвестиций и является настоятельной необходимостью, так как в зарубежной металлургии в настоящее время наблюдается невиданный за последние годы технический прогресс: построено или находится в разных стадиях строительства более ста установок прямого твердофазного и около тридцати установок жидкофазного восстановления. Находят все большее распространение технологии непрерывной разливки с получением заготовок, близких к готовому профилю, совмещенные с прокаткой. Появляются принципиально новые наукоемкое металлургическое оборудование и средства контроля. Большое внимание уделяется созданию материалов с высокими прочностными и другими потребительскими свойствами.

Это очень сильно контрастирует с практически остановившимся техническим прогрессом в нашей металлургии, где на устаревших мощностях заводов с полным циклом производства выпускается преимущественно заготовка, продаваемая на мировом рынке по цене, близкой к цене лома. Каких-либо существенных шагов в сторону структурной перестройки в нашей металлургии пока не наблюдается, в то время как в зарубежной металлургии идет [93–95] достаточно быстрый процесс вытеснения традиционных заводов с полным циклом, неэффективных с точки зрения сквозных энергозатрат и капитальных вложений, мини-заводами, перерабатывающими лом и сырье прямого восстановления. Огромная энергоемкость российского металлургического производства достаточно убедительно показана в обстоятельной статье Л. А. Шульца [96], где прямые затраты составляют 1245 кг у.т. на тонну проката, или 37 ГДж/т, а косвенные с учетом энергозатрат на транспорте, топливноэнергетическом комплексе и социальной сфере составляют 2436 кг у.т./т, или более 70 ГДж/т. При постоянном росте мировых цен на энергоресурсы надеяться на конкурентоспособность нашей металлургии в таких условиях не приходится. Может оказаться, что наше отставание в металлургии будет столь же велико, как в электронике. Тривиальными мерами такое отставание сократить невозможно. Реаль-

ным выходом из этой ситуации может быть только постепенная структурная перестройка [93] на основе новых наукоемких технологий [95], которые, как правило, требуют для реализации меньших затрат, чем это необходимо для поддержания в рабочем состоянии весьма громоздкого и материалоемкого существующего металлургического комплекса. Особенно это касается агрегатов, которые выработали все мыслимые и немыслимые сроки амортизации. Необходимо также думать о выпуске принципиально новых видов металлопродукции и организации новых рабочих мест.

Начиная изложение сорокалетней ретроспективы развития научных направлений, которое мы предприняли по заказу редакции для юбилейного номера журнала, мы не ожидали, что оно окажется столь пространным. Но в то же время по мере изложения росло убеждение, что такой анализ и систематизация научной предьстории может оказаться полезным как для самого авторского коллектива, так и во вне, тем более, что мы надеялись, что нам удастся на основе содержательного анализа отразить эту систематизацию в более компактной форме. Такая попытка представлена на рис. 9 в виде графа ключевых работ авторского коллектива.

С целью сжатия информации строго хронологического порядка появления работ мы не придерживались, хотя в целом временная направленность процесса учитывалась. Фамилии авторов приведены в ряде случаев не для каждой отдельной статьи, а для их ближайшей, как правило, тематической совокупности, причем приведены только наиболее часто встречающиеся фамилии.

Этот граф мы планируем положить в основу компьютерной информационной базы, которая будет иметь, по меньшей мере, три уровня обращений: данный граф (в более развитой форме), дающий наглядное представление и взаимосвязи тематических направлений и авторских коллективов; уровень полных названий и координат источников; уровень рефератов, который мы предполагаем осуществить силами студентов в рамках НИРС. Возможно, с ростом объема памяти ЭВМ, создание четвертого уровня – первоисточников, что важно в первую очередь для смежных направлений и фундаментальных работ. Мы надеемся, что наш опыт может быть использован и другими авторскими коллективами.

Ниже представлен Список ключевых работ творческого коллектива (с целью сокращения печатается без соблюдения стандартов):

1. Цымбал В.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1962. № 4, № 6; 1963. № 2.
2. Цымбал В.П. Моделирование процесса обезуглероживания стали в мартеновской печи на электронных математических машинах. Автореф. канд. дис., Новокузнецк, 1963.
3. Цымбал В.П., Масловский П.М., Марон В.Д. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1964. № 8; 1965. № 10.
4. Цымбал В.П., Киселева Т.В. Сб. "Вопросы оптимального управления в черной металлургии". – Новокузнецк, 1969.
5. Цымбал В.П., Ельцов Б.П., Хорошавин Е.Ф. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1966. № 4; 1972. № 8.
6. Отчет по научно-исследовательской хозяйственной работе. Тема 41 – 67. – Новокузнецк, 1968. Рег. № А013688.
7. Цымбал В.П., Макрушин В.В., Хорошавин Е.Ф. и др. // Бюл. ЦНИИ и ТЭИЧМ. 1972. № 23.

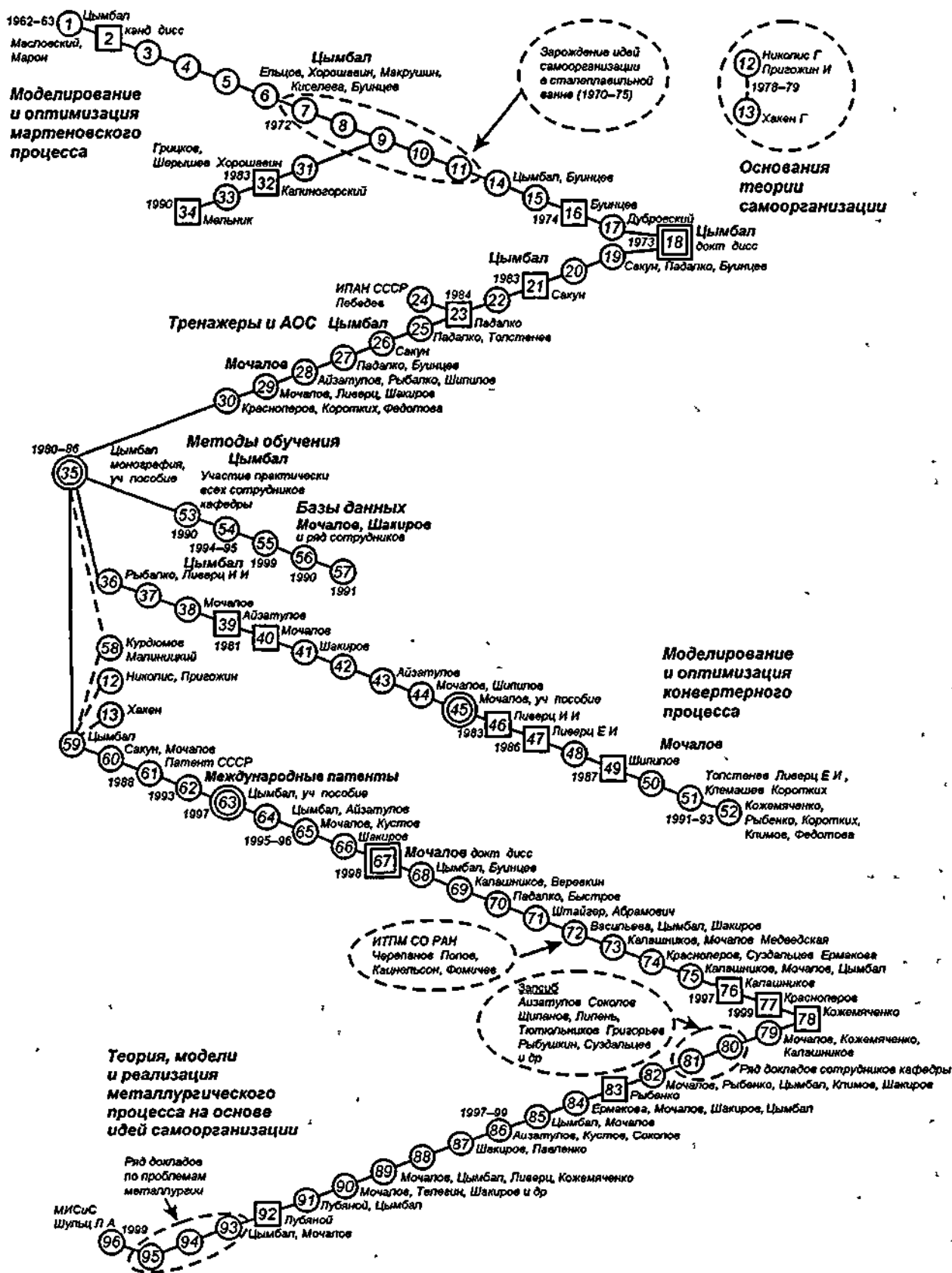


Рис 9 Граф ключевых работ развития научных направлений

8. Цымбал В.П., Макрушин В.В., Буинцев В.Н., Хорошавин Е.Ф., Киселева Т.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1972. № 10.
9. Межвузовский сб. "Автоматизация и алгоритмизация сталеплавильных процессов". Вып. 6. - Магнитогорск, 1974.
10. Межвузовский сб. "Совершенствование технологии и автоматизации сталеплавильных процессов". Вып. 13. - Магнитогорск, 1975.
11. Цымбал В.П., Плахов Г.К., Макрушин В.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 4.
12. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979. - 512 с.
13. Хакен Г. Синергетика. - М.: Мир, 1980. - 406 с.
14. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1972. № 9. № 12.
15. Межвузовский сб. "Автоматизация и алгоритмизация сталеплавильных процессов". Вып. 6. Магнитогорск. - 1974.
16. Буинцев В.Н. Последовательная идентификация основных процессов мартеновской плавки методом подстраиваемой модели. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1975.
17. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1973. № 4.
18. Цымбал В.П. Исследование и управление сталеплавильным процессом с применением математических моделей на примерах обычной и интенсифицированной мартеновской плавки. Автореф. докт. дис. Новокузнецк, 1972.
19. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1976. № 8; 1978. № 10.
20. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1981. № 6; 1982. № 4.
21. Сакун А.Ф. Совершенствование тепловых и технологических режимов мартеновских печей с использованием моделей-имитаторов и тренажеров. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1983.
22. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 10; 1981. № 2, № 4; А с. № 658552.
23. Падалко А.Г. Разработка образно-наглядных моделей металлургических процессов и их применение в АСУ ТП и обучающих комплексах. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1984.
24. Лебедев А.Н. Математическая модель восприятия и запоминания зрительной информации человеком. Отдельный выпуск / Нейрофизиологические механизмы поведения / Институт психологии АН СССР. - М.: Наука, 1982.
25. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 4.
26. А с. № 721835.
27. А с. № 750736, № 658552, № 875402, № 881773, № 913408, № 964982, № 929749, № 1005091, № 1150462, № 769579.
28. А с. № 796903, № 1088055, № 985799, № 1043720, № 1160462.
29. А с. № 943811, № 1161982, № 1541656.
30. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12.
31. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 2. № 4.
32. Калиногорский Н.А. Разработка и исследование алгоритмов управления сталеплавильными процессами с косвенным измерением возмущений. Автореф. канд. дис. М., 1983.
33. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 10; А с. № 1345168.
34. Мельник Г.Б. Разработка и внедрение методики и алгоритмов управляемого прямого поиска режимов работы металлургических агрегатов. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1990.
35. Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. Учебное пособие для вузов. - М.: Металлургия, 1986. - 240 с.
36. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 6.
37. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1980. № 8. № 12; 1979. № 8.
38. А с. № 914635.
39. Айзатулов Р.С. Исследование и разработка оптимальных режимов продувки конвертерной ванны с использованием математической модели. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1981.
40. Мочалов С.П. Исследование динамических закономерностей и оптимизация технологических режимов конвертерной плавки на основе моделей-имитаторов и тренажеров. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1981.
41. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 4; 1980. № 10; 1981. № 6.
42. Межвузовский сб. "Совершенствование технологии и автоматизации сталеплавильных процессов". Вып. 4. - Свердловск, 1982.
43. Сб. докладов научно-методического совещания-семинара "Применение в учебном процессе тренажеров и моделей-имитаторов". - Новокузнецк, 1984.
44. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1988. № 10.
45. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 10; 1981. № 12.
46. Ливерц И.И. Разработка способов контроля уровня шлако-металлической эмульсии и совершенствование шлакового режима в кислородном конвертере. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1983.
47. Ливерц Е.И. Разработка технологических режимов конвертерной плавки с целью увеличения выхода жидкой стали на основе аппарата нечетких множеств и математической модели вспенивания шлака. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1986.
48. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1983. № 10; 1985. № 2; 1986. № 2.
49. Шипилов С.А. Разработка алгоритмов управления заключительным периодом продувки конвертерной плавки на основе раскрытия внутренних взаимосвязей процесса. Автореф. канд. дис. Новокузнецк, 1987.
50. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 8; 1986. № 2. № 6. № 10; 1988. № 12.
51. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1993. № 5.
52. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12.
53. Опыт и проблемы внедрения компьютерной техники в учебном процессе. Тезисы докладов научно-практического семинара. - Челябинск. - 1990.
54. Компьютеризация учебного процесса в техническом вузе. Содержание и технология разноуровневого образования. Труды межвузовских научно-практических конференций, Новокузнецк, 1994, 1995.
55. Технология вузовского образования "Концептуально-деятельностный и самоорганизующий подходы к обучению". Научно-методическая разработка / Под ред. В.П. Цымбала. - Новокузнецк, 1999.
56. Базы физико-химических и технологических данных для оптимизации металлургических технологий. Труды второго Всесоюзного совещания. - Курган, 1990.
57. Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии. Труды Всесоюзного совещания - Новокузнецк, 1991.
58. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика - наука о самоорганизации. - М.: Знание, 1983. - 48 с. Сер. "Математика, кибернетика". № 6.

59. //Изв. вуз. Черная металлургия. 1986. № 10. № 12; 1991. № 12.
 60 // Изв. вуз. Черная металлургия. 1988 № 4.
 61. Способ непрерывного рафинирования металла и агрегат для его осуществления Пат. СССР. № 1835173.
 62 United States Patent 5,558,695,1996. European patent application 10 01.96/ Bulletin 1996/02 Заявительные пакеты Японии, Кореи.
 63. Цымбал В.П. Введение в теорию самоорганизации. С примерами из металлургии: Учебное пособие. СибГТМА. - Новокузнецк, 1997. - 251 с.
 64. International Metalworking Update 1995-96 Kensington Publications Ltd, London-Hong Kong. p. 58-61.
 65. // Металлург. 1995. № 11.
 66. // Металлы Евразии. 1996 № 8
 67. Мочалов С.П. Оптимизация технологий получения металла в струйно-эмульсионных системах на основе принципов самоорганизации. Автореф. док. дис. - Новокузнецк, 1998.
 68. А с № 1231521.
 69 // Автоматическая сварка. 1991. № 10. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12; 1992. № 2. № 4 № 9, 1994. № 4
 70. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 2
 71. // Электрика. 1997. № 3. № 6.
 72. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1994. № 12; 1996 № 12; 1997. № 6
 73 // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 8.
 74. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 10
 75. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1995. № 4.
 76 Калашников С.Н. Численно-аналитические методики определения управляющих воздействий применительно к металлургическим объектам с самоорганизацией. Автореф. канд. дис. - Новокузнецк, 1997.
 77. Красноперов С.Ю. Разработка и применение систем моделирования и управления сталеплавильными процессами на основе объектно-ориентированного подхода Автореф. канд. дис. - Новокузнецк, 1999.
 78. Кожемяченко В.И. Разработка технологических режимов непрерывных струйно-эмульсионных процессов во взаимосвязи с параметрами агрегата на основе создания инструментальной системы. Автореф. канд. дис. - Новокузнецк, 1999
 79 // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 10.

80 Структурная перестройка металлургии. экономика, экология, управление, технология Труды Международной научно-технической конференции. - Новокузнецк, 1996
 81. Современные проблемы и пути развития металлургии. Труды Международной научно-технической конференции. - Новокузнецк, 1997.
 82. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 12.
 83. Рыбенко И.А. Разработка методики и системы расчета вариантов технологии непрерывного получения металла в агрегатах струйно-эмульсионного типа. Автореф. канд. дис. - Новокузнецк, 2000
 84. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 4
 85. Recovery. Recycling. Re-integration Collected papers of the R-97 International Congress. - Geneva. - Switzerland. 1997. V. 1. P. 168-172, V. 5. P. 162-167.
 86. Recovery. Recycling. Re-integration Collected papers of the R-99 International Congress. - Geneva-Switzerland. 1999. V. 2. P. 126-131.
 87. Proceedings: 12-th International Symposium on Coal Combustion By-product (CCB) Management and Use, Prepared by American Coal Ash Association Alexandria. - Virginia, 1997. V. 2. P. 51-63.
 88. Proceedings of the Second International Conference on Environment (ICEM2) - Australia, 1998. P. 831-838.
 89. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 8.
 90. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1993. № 6. № 8.
 91. // Изв. вуз. Черная металлургия 1995. № 4.
 92. Лубяной Д.А. Исследование, разработка и реализация технологии выплавки и внепечной обработки аргоном чугуна индукционной плавки. Автореф. канд. дис. - Новокузнецк, 1994.
 93 Черная металлургия Кузбасса: пути преодоления кризиса. Материалы научно-технического совещания. - Новокузнецк, 1998
 94. Современные проблемы и пути развития металлургии. Материалы международной научно-практической конференции. - Новокузнецк, 1998.
 95. Металлургия на пороге XXI века: достижения и прогнозы Материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Новокузнецк, 1999.
 96. Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 8.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И ТЕОРИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 669.046.541.123.7:622.788.5

© 2000 г. С.Г. Меламуд, Б.П. Юрьев

РАСЧЕТ ВЯЗКОСТИ КАЛЬЦИЕВО-ЖЕЛЕЗИСТО-СИЛИКАТНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНОЙ МОДЕЛИ

К числу важнейших свойств расплава, определяющих его влияние на формирование железорудных материалов при их окисковании, относятся вязкость и поверхностное натяжение. В большинстве случаев, особенно для многокомпонентных кальциево-железисто-силикатных систем, эти параметры не определены. Ниже предпринята попытка разработать метод расчета вязкости силикатных расплавов на основе полимерной модели Мэссона-Есина.

Гипотеза о существовании кремнекислородных анионов различной сложности в силикатных расплавах была высказана еще в 1946 г. [1], а позднее – в работах [2–4]. Однако эта гипотеза носила в основном качественный характер и не позволяла рассчитывать концентрацию каждого вида анионов, определять среднюю величину комплексов и прогнозировать влияние этого комплекса частиц на свойства расплава.

Первоначально теория полимеров была применена к бинарным системам $MeO-SiO_2$ с мольной долей кремнезема (N_{SiO_2}) не выше 0,5 и учитывала лишь линейные неразветвленные цепи [5, 6]. Следующим этапом в развитии теории явился учет не только линейных, но и разветвленных цепей [7, 8] с распространением количественной теории [9] на весь диапазон содержания кремнезема, т.е. для $0 < N_{SiO_2} < 1$. Но так как все предлагаемые методы имели ряд недостатков при вычислении активностей и распределении анионов по размерам, то в работе [10] была предложена упрощенная полимерная модель без учета изомеризации. Необходимо отметить, что в перечисленных выше работах [6–10] сопоставление расчетов с экспериментом производилось главным образом на основании определения активностей компонентов расплава, поэтому в данной работе сделана попытка применения полимерной модели для расчета структурно-чувствительных свойств расплава, в частности вязкости и поверхностного натяжения.

Известно [11], что вязкость силикатных расплавов определяется в основном размером, структурой и продолжительностью жизни кремнекислородных анионов $Si_xO_y^{z-}$ и отчасти микрогруппировок $= Si^{4+}-O-Me^{n+}-O-(Si_xO_y^{z-}-Me^{n+}-Si_xO_y^{z-})$, $O^{2-}-Me^{n+}-O^{2-}$ и т.д. Строение кремнекислородных анионов микрогруппировок, а следовательно, и вязкость в сильной степени зависят от состава расплава и температуры.

Взаимосвязь вязкости η оксидных расплавов с температурой T в узком температурном интервале описывается известным уравнением

$$\eta = A \exp[E_n/(RT)], \quad (1)$$

в котором R – молярная газовая постоянная.

Для математического описания энергии активации вязкого течения расплава (E_n) сделаем следующие допущения: вероятность разрыва любой связи в расплаве определяется только долей связи; вклад энтропии активации (S_n^*) в величину E_n мал [11]; энергия взаимодействия $Me^{xx+}-O^{2-}$ принята за величину энергии, необходимой для разрыва связи $Me-O$ (Me – это Ca, Mg, Fe, Si и другие металлы), поскольку последняя обладает ионным характером [11].

При вязком течении полимера происходит согласованное перемещение всех частей, составляющих сложную молекулу [12]. Доля завершенных переходов комплексов из одного состояния равновесия в другое зависит от степени связанности друг с другом отдельных ее частей.

Допустим, что в величину E_n вносят вклад искажения (в предельном случае – разрыв) трех форм связей: $Me^{2+}-O^{2-}$ (форма E_1); $Me^{2+}-O^-$ (форма E_1') и $Si-O$ (форма E_2). Тогда можно записать, что

$$E_n = E_1 N_{O^{2-}} + E_1' N_{O^-} + E_2 N_{O^0}; \quad (2)$$

здесь E_1 , E_1' и E_2 – энергии разрыва связей “свободных”, а также концевых атомов кислорода с катионами и связей $Si-O$ в кремнекислородных анионах; $N_{O^{2-}}$ – анионная доля “свободных” ионов кислорода; N_{O^-} – доля связей катионов-модификаторов с концевыми атомами кислорода кремнекислородных анионов (O^-); N_{O^0} – доля связей $Si-O^0$; $\alpha = m_{Me_1}^{n+}/m_{Me_2}^{n+}$ – коэффициент устойчивости кремнекислородных анионов, равный отношению обобщенных моментов катионов; $m_{Me_1}^{n+} = ne/z$.

Коэффициент α показывает относительную деполимеризующую способность данного катиона (оксида) и

введен в формулу (2) в качестве эмпирического коэффициента

Возникновение концевых атомов кислорода (O^-) из мостиковых (O^0) и свободных (O^{2-}) анионов кислорода, вносимых оксидами SiO_2 и MeO , можно выразить реакцией деполимеризации [13]



Очевидно, что чем больше обобщенный момент катиона, тем сильнее интерионное взаимодействие $Me^{n+} - O^{2-}$. В этом случае константа

$$K = a_{O^0} a_{O^{2-}} / a_{O^-}^2 \quad (4)$$

равновесия процесса (3), выраженная через активности a соответствующих форм кислорода, достаточно велика и равновесие (3) будет сдвинуто вправо. Напротив, в присутствии катионов с малым обобщенным моментом реакция (3) смещена влево. Для сопоставления деполимеризующей способности катионов необходимо принять обобщенный момент одного из них в качестве эталонного. В связи с этим рассмотрим рис. 1, на котором показана взаимосвязь между вторым ионизационным по-

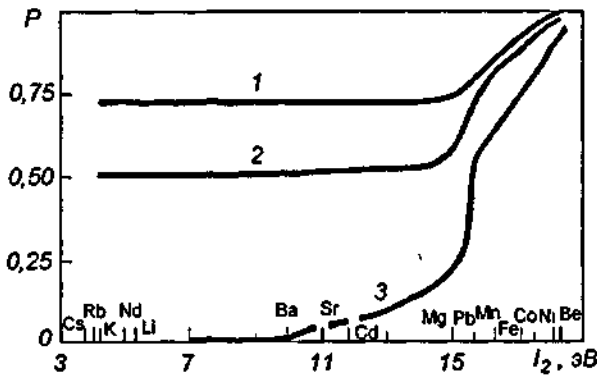


Рис. 1 Зависимость степени полимеризации от второго ионизационного потенциала образования свободного катиона для ди- (1), мета- (2) и ортосиликатных (3) составов систем $MeO - SiO_2$

тенциалом I_2 образования свободного катиона и степенью полимеризации P в орто-, мета- и дисиликатах, рассчитанной по формуле [14]

$$P = \frac{1}{2-8K} \left[1 - \frac{1-N_2}{2N_2} - 8K + \sqrt{1 + \frac{1-N_2}{2N_2} \left(\frac{1-N_2}{2N_2} + 16K - 2 \right)} \right]; \quad (5)$$

здесь значения константы K равновесия реакции полимеризации (3) заимствованы из работы [14]; N_2 - мольная доля SiO_2 .

Наибольший интерес представляет на рис. 1 кривая 2, характеризующая зависимость $P = f(I_2)$ для расплавов ортосиликатного состава. Из ее хода следует, что при потенциалах ионизации атомов металла меньше 10 эВ полимеризация кремнекислородных анионов стремится к нулю, т.е. в расплаве могут существовать в основном простейшие анионы типа SiO_4^{4-} и $Si_2O_7^{6-}$. Возможно, это присуще ортосиликатам щелочных металлов. При $I_2 > 10$ эВ степень полимеризации возрастает и стремится к единице при $I_2 = 18$ эВ. Отсюда следует, что любой оксид, в который входит катион металла, образующийся в свободном состоянии с потенциалом ионизации больше 18 эВ, будет слабо разрушать структуру расплавленного кремнезема. Из группы оксидов щелочноземельных металлов таковым является BeO . Это позволяет обобщенный момент катиона бериллия принять в качестве эталона. Тогда величина α будет равна отношению обобщенного момента $m_{Be^{2+}}$ катиона бериллия к обобщенному моменту $m_{Me^{2+}}$ соответствующего катиона Me^{2+} .

Чтобы воспользоваться уравнением (2) для оценки величины E_n , необходимы еще сведения о значениях $N_{O^{2-}}$, N_{O^-} , N_{O^0} . В двойном расплаве, состоящем из n_1 молей MeO и n_2 молей SiO_2 , ионы кислорода, вносимые оксидом MeO в количестве $n_{O^{2-}}$ молей, остаются в свободном состоянии, а вносимые в количестве n_1' молей идут на образование кремнекислородных анионов, т.е.

$$n_1 = n_{O^{2-}} + n_1' \quad (6)$$

Из стехиометрии процесса (3) имеем, что $n_1' = n_{O^-} / 2$. Подставляя эту величину в уравнение (6), получим

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n_{O^{2-}} + n_{O^-} / 2 \\ N_1 &= \frac{n_1}{n_1 + n_2} = \frac{n_{O^{2-}} + n_{O^-} / 2}{n_1 + n_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В свою очередь в силикатном расплаве число всех связей кремния с кислородом равно $4n_2$ моля, при этом на каждый мостиковый кислород приходится по две, а на концевой - по одной связи. Поэтому имеем

$$\left. \begin{aligned} 4n_2 &= 2n_{O^0} + n_{O^-} \\ 4N_2 &= \frac{4n_2}{n_1 + n_2} = \frac{2n_{O^0} + n_{O^-}}{n_1 + n_2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Число мостиковых атомов кислорода можно найти из выражения

$$P = n_{O^0} / (2n_2) \quad (9)$$

Здесь степень полимеризации P определена [14] как отношение числа мостиковых атомов кислорода, входящих во все кремнекислородные комплексы, к максимально возможному их значению. С учетом соотношений (7)–(9) мольные доли свободного, концевое и мостикового кислорода будут определяться уравнениями

$$N_{O^{2-}} = \frac{n_{O^{2-}}}{n_{O^{2-}} + n_{O^-} + n_{O^0}} = \frac{1 - 3N_2 + 2N_2P}{1 + N_2}, \quad (10)$$

$$N_{O^-} = \frac{n_{O^-}}{n_{O^{2-}} + n_{O^-} + n_{O^0}} = \frac{4N_2(1 - P)}{1 + N_2}, \quad (11)$$

$$N_{O^0} = \frac{n_{O^0}}{n_{O^{2-}} + n_{O^-} + n_{O^0}} = \frac{2N_2P}{1 + N_2}. \quad (12)$$

Подставив выражения (10)–(12) в формулу (2), получим

$$E_{\eta} = E_1 \frac{1 - 3N_2 + 2N_2P}{1 + N_2} + E_1 \frac{4N_2(1 - P)}{1 + N_2} + E_2 \left(\frac{2N_2P}{1 + N_2} \right)^{\alpha}. \quad (13)$$

Отсюда при $N_2 = 1$ (при $P = 1$) энергия активации вязкого течения определится величиной энергии разрыва связи Si—O. Действительно, по данным работы [15], в интервале температур 1900–2480 К значение E_{η} жидкого кремнезема равно 514 кДж/моль. Эта величина близка к энергии связи $E_2 = 480$ кДж/моль, что подтверждает приблизительное равенство $E_{\eta} \approx E_2$. В случае $N_2 = 0$ энергия активации вязкого течения равна энергии разрыва связей $Me^{n+} - O^{2-}$ чистых оксидов-модификаторов. К сожалению, в литературе отсутствуют сведения о величинах энергии связи $Me^{n+} - O^{2-}$ расплавленных оксидов, что лишает возможности установить истинное соотношение между E_{η} и E_1 . Сопоставление же E_{η} с E_1 твердых оксидов, как и следовало ожидать, ведет к неравенству $E_{\eta} < E_1$. Например, для расплава вюстита $E_{\eta} \approx 130$ кДж/моль [16], тогда как для твердого вюстита $E_1 = 163$ кДж/моль. Однако при плавлении оксидов-деполимеризаторов энергия связи E_1 обычно уменьшается и естественно приближается к E_{η} .

Если учесть влияние природы катиона оксида-деполимеризатора на равновесие реакции (3), то уравнение (13) в некоторых случаях можно упростить. В частности, для силикатов щелочноземельных металлов константа равновесия реакции (3), по данным работы [17], близка к нулю. Это означает, что должна быть малой и концентрация свободных ионов O^{2-} для расплавов с $N_2 > 0,33$. В связи с этим в формуле (2), а следовательно, и в выражении (13) первое слагаемое можно принять равным нулю. Тогда получим

$$E_{\eta} = E_1 \frac{4N_2(1 - P)}{1 + N_2} + E_2 \left(\frac{2N_2P}{1 + N_2} \right)^{\alpha}. \quad (14)$$

Кроме того, при $K = 0$ из формулы (5) получим

$$N_2 = \frac{1}{3 - 2P}. \quad (15)$$

Совместное решение выражений (14) и (15) приводит к уравнению вида

$$E_{\eta} = 2E_1 \frac{1 - P}{2 - P} + E_2 \left(\frac{P}{2 - P} \right)^{\alpha}. \quad (16)$$

Наконец, при $P = 0$ формула (13) принимает вид

$$E_{\eta} = E_1 \frac{1 - 3N_2}{1 + N_2} + E_1 \frac{4N_2}{1 + N_2}. \quad (17)$$

Этот случай соответствует расплавам типа $MeO - Me_2SiO_4$. Например, энергия активации вязкого течения ортосиликата кальция по расчету равна 113 кДж/моль, а полученная экстраполяцией опытных данных [18]–107 кДж/моль.

Для количественной проверки соотношения (17), а также формул (13), (14) необходимые параметры заимствованы из работ [19, 20]:

Элемент	η , Кл/м, [20]	E_1 , кДж/моль, [19]	E_1 , кДж/моль, [19]	α
Ba	0,230	121	100	4,5
Sr	0,270	125	104	3,8
Ca	0,320	134	113	3,3
Mg	0,430	167	138	2,4
Mn	0,390	150	125	2,7
Fe	0,400	163	136	2,6
Be	0,103	263	-	1,0
Si	0,157	480	-	-

Результаты расчета значения E_{η} всюду удовлетворительно согласуются с опытными данными, как это видно из рис. 2, где сопоставлены расчетные (по уравнению (13)) и опытные значения E_{η} для силикатов кальция и железа.

Для них рассчитанные величины E_{η} на 5–10 % отличаются от экспериментальных. Это расхождение не превышает точности эксперимента и обусловлено в основном тем, что в расчетах использовали энергии связи, присущие твердым соединениям.

Наличие характерных перегибов на кривых $E_{\eta} - N_{SiO_2}$ связано со структурными изменениями в расплавах. Для системы CaO–SiO₂ резкое изменение E_{η} происходит при 50 % (мол.) SiO₂, что обусловлено появлением в расплаве наряду с мелкими анионами типа Si₃O₆⁹⁻ большого количества сложных анионов Si_iO_{3i+1-c}^{2(i+1-c)-} (здесь $c > 1$), как следует из работы [21]. Значит интен-

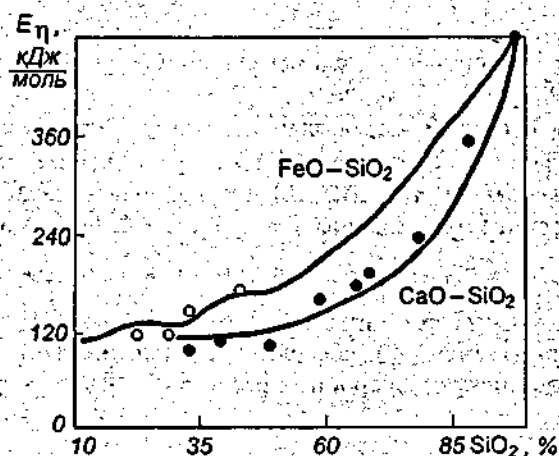


Рис. 2. Концентрационные зависимости энергии активации для расплавов FeO-SiO₂ и CaO-SiO₂.
○ и ● - опытные значения [23] и [24]; — расчет

сивный рост энергии активации вязкого течения расплавов с $N_{SiO_2} > 0,5$ связан главным образом с разрывом связей Si-O-Si. Для системы FeO-SiO₂ перегибы на кривой $E_a - N_{SiO_2}$ наблюдаются при 35 и 50% (мол.) SiO₂. Вероятно, в расплавах с содержанием кремнезема менее 35% энергия активации вязкого течения представляет собой энергию, необходимую для разрыва связей Fe²⁺-O²⁻, тогда как в расплавах, содержащих более 50% (мол.) SiO₂, она определяется разрывом связей Si-O-Si в сложных кремнекислородных комплексах. Большая величина E_a системы FeO-SiO₂ по сравнению с системой CaO-SiO₂ во всем диапазоне концентраций обусловлена преобладанием у первой при всех составах сложных кремнекислородных анионов.

Выполнение соотношения (13) позволяет связать вязкость расплава со степенью полимеризации и содержанием кремнезема. Действительно, из выражений (1) и (13) имеем

$$\ln \eta = \ln A + \frac{1}{RT} \left[E_1 \frac{2N_2P - 3N_2 + 1}{N_2 + 1} + E_1' \frac{4N_2 - 4N_2P}{N_2 + 1} + E_2 \left(\frac{2N_2P}{N_2 + 1} \right)^\alpha \right] \quad (18)$$

Для силикатов в выражении (18) заранее неизвестно значение числа A [22]. Однако поскольку величина его мало изменяется с составом расплава [23], то для двойных систем предэкспоненциальный множитель можно представить, например, в виде логарифмической функции

$$\ln A = N_1 \ln A_1 + N_2 \ln A_2, \quad (19)$$

где A_1 и A_2 - параметры в уравнении (1), соответствующие жидким оксидам SiO₂ и MeO. Следует подчеркнуть, что величина A , рассчитанная по уравнению (19), неплохо согласуется с данными, полученными в работе [24]:

SiO ₂ , % (мол.)	CaO-SiO ₂ $A \cdot 10^7$, Па·с	FeO-SiO ₂ $A \cdot 10^7$, Па·с
100	1	1
90	6	5
80	45	15
70	273	61
60	220	608
50	1440	907
40	4000	1200
30	3200	5000
20	6000	8000
10	4800	9000
	8000	

Примечание. В числителе - расчетные по уравнению (19) значения A , в знаменателе - данные работы [24].

Совместное решение уравнений (18) и (19) позволяет определять вязкость расплавов, не прибегая к опытным данным, за исключением данных об A_1 , A_2 [24] и K . В качестве примера это сделано для систем CaO-SiO₂ и FeO-SiO₂. Для них кривые $\ln \eta - N_{SiO_2}$, рассчитанные по уравнению (18), достаточно хорошо передают опытные данные (рис. 3).

Таким образом, полученное на основе полимерной модели уравнение позволяет описать изменение вязкости силикатных расплавов с их составом.

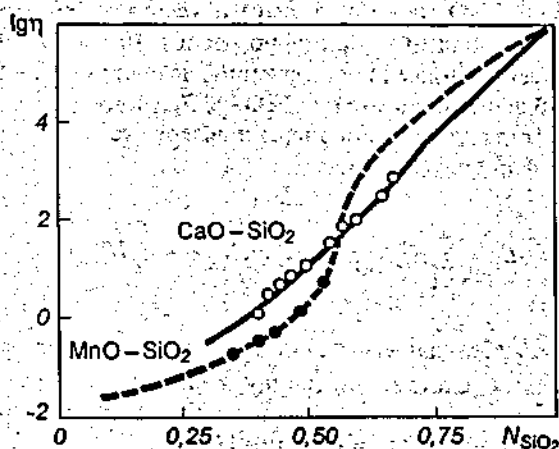


Рис. 3. Зависимости вязкости расплавов MnO-SiO₂ и CaO-SiO₂ от состава. Обозначения те же, что и на рис. 2

Используя разработанный метод, попытались применить его для расчета вязкости кальциево-силикатной системы вида $\text{CaO}-\text{FeO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)-\text{SiO}_2$, содержащей оксиды железа переменной валентности. Эта система составляет основу нерудных составляющих окискованных продуктов. В настоящее время экспериментальные данные по свойствам этой системы малочисленны. При расчете вязкости такой системы используем подход, изложенный выше для бинарных систем.

Принимая во внимание амфотерный характер оксида Fe_2O_3 , введем два следующих показателя: отношение $\text{MeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и основность жидкого шлака (MeO/SiO_2). В зависимости от величины $\text{MeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ оксид железа Fe_2O_3 будет вести себя или как сеткообразователь, или как модификатор. Исходя из стехиометрических соображений и данных работ [25, 26] отношение $\text{MeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ в первом случае должно быть больше 1,5, а во втором – меньше этой величины. Рассмотрим три основных возможных случая: первый, когда $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$, $\text{MeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1,5$; второй, когда $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$, $\text{MeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 > 1,5$, и третий, когда $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1$, $\text{MeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 > 1,5$ (суммарное содержание оксидов железа FeO и Fe_2O_3 не выше 25 % (мол.)). Учитывая, что при указанных содержаниях оксидов железа в системе $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ не наблюдается тройных соединений [27], ее в первом приближении можно рассматривать для каждого из вышеуказанных случаев как сочетание двух бинарных систем: для первого случая $\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)-\text{SiO}_2$; для второго случая $\text{CaO}-(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)$, $\text{FeO}-(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)$ и для третьего случая $\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Выбор этих систем заключается в следующем. Во-первых, из рассмотрения сразу исключаются пары $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и $\text{FeO}-\text{CaO}$, поскольку оксид железа Fe_2O_3 не образует каких-либо силикатов [27] (константа полимеризации k стремится к бесконечности), а взаимодействие оксидов CaO и FeO не полимеризует расплав. Во-вторых, учитывается координационное состояние Fe^{3+} . В третьих, берется во внимание способность данного катиона к деполимеризации сетки SiO_2 . Предпочтение отдается системе с меньшим значением константы полимеризации. Например, выбор систем $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ и $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ (третий случай) обусловлен тем, что величины k для них (примерно равные 10^{-3} и 10^{-10} соответственно) ниже таких значений для систем $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ (приблизительно 10^{-2}) и $\text{FeO}-\text{SiO}_2$ (примерно единица). Тогда для расчета энергии вязкого течения используем формулу (2) в виде

$$E_{\eta} = \sum_{i=1}^2 E_{i1} N_{iO}^2 + \sum_{i=1}^2 E_{i1} N_{iO} + E_2 N_{O^0}^2 \quad (20)$$

где каждое слагаемое двух сумм соответствует данной бинарной системе. Величину \bar{k} в каждом случае рассчитывали как для трехкомпонентной системы, представленной двумя бинарными [28]:

$$\ln \bar{k} = N_1 \ln k_1 + N_2 \ln k_2; \quad (21)$$

здесь N_1, N_2 – мольные доли оксидов-модификаторов; k_1, k_2 – константы полимеризации бинарных систем $\text{Me}_n\text{O}_m-\text{SiO}_2$.

Величину \bar{P} определяли по формуле (5) с учетом параметра \bar{k} . Для вычисления E_{η} , кроме данных, заимствованных из работ [19, 20] и приведенных выше, использованы еще величины $E_{\text{Fe}^{3+}-\text{O}-\text{Fe}^{3+}} = 210$ кДж/моль и $E_{\text{Fe}^{3+}-\text{O}} = 177$ кДж/моль [29]. Энергия вязкого течения в данном случае рассчитывается по уравнению (13) с учетом выражения (20), поскольку соотношения (10)–(12) справедливы и для тройных расплавов. Расчетная формула имеет вид

$$E_{\eta} = E_{\text{Me}_1\text{O}} \frac{1-3N_2+2\bar{P}}{1+N_2} + E_{\text{Me}_n\text{O}} \frac{1-3N_2+2\bar{P}}{1+N_2} + (E_{\text{Me}_1\text{O}^-} + E_{\text{Me}_n\text{O}^-}) \frac{4N_2(1-\bar{P})}{1+N_2} + E_{\text{Si-O}} \left(\frac{2N_2\bar{P}}{1+N_2} \right)^{\alpha} \quad (22)$$

Ниже приведены данные вычисления E_{η} (числитель) в сопоставлении с немногочисленными опытными значениями этой величины, приведенными в работе [30] (знаменатель):

$\sum \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % (мол)	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{FeO}}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	E_{η} , кДж/моль
Система $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$			
10	1,2	0	$\frac{75,3}{83,7}$
20	1,2	0	$\frac{54,3}{60,3}$
Система $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$			
17	0,5	0,72	$\frac{173,1}{157,4}$
17	0,7	0,79	$\frac{136,3}{123,9}$
17	1,0	0,79	$\frac{130,3}{144,4}$
17	1,2	0,74	$\frac{50,3}{54,8}$

Результаты расчета E_{η} удовлетворительно согласуются с опытными данными (относительная погрешность ± 10 %). Этот факт подтверждает правомерность принятой в данной работе модели, позволяющей оценивать вязкость соответствующих расплавов, как это видно из нижеприведенных данных:

$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{FeO}}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	η , Па·с
0,5	0	$\frac{240}{-}$
	0,25	$\frac{230}{-}$
	0,75	$\frac{170}{175}$

	1,00	$\frac{40}{-}$
	0	$\frac{20}{-}$
0,7	0	$\frac{140}{-}$
	0,25	$\frac{20}{-}$
	0,75	$\frac{76}{80}$
	1,00	$\frac{24}{-}$
	0	$\frac{163}{-}$
1,0	0	$\frac{117}{-}$
	0,25	$\frac{78}{90}$
	0,75	$\frac{6}{10}$
	1,00	$\frac{150}{197}$
1,2	0	$\frac{111}{-}$
	0,25	$\frac{66}{-}$
	0,75	$\frac{2}{5}$
	1,00	$\frac{2}{5}$

Примечание. В числителе – расчетные значения вязкости, в знаменателе – приведенные в работе [30] опытные значения.

Характер изменения вязкости железо-кальциево-силикатных расплавов с их основностью (CaO/SiO_2) и степенью окисления ($\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$) позволяет сделать следующие выводы. При данном отношении $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ с ростом основности расплава вязкость уменьшается. Это обусловлено заменой связей Si-O-Si в жидком шлаке, вносящих основной вклад в вязкое течение при $\text{CaO/SiO}_2 > 1$, на сочетания Si-O. Снижение окисленности шлака при данной основности также способствует падению вязкости, силикатов (см. приведенные выше данные), что связано [26] с разрушением кремне-железо-кислородных комплексов за счет выхода из их структуры групп типа $[\text{Fe}^3\text{O}_{4/2}]$.

Таким образом, применение полимерной модели дает возможность в первом приближении прогнозировать изменение вязкости гомогенного многокомпонентного расплава, содержащего оксиды железа различной степени окисленности.

Выводы. С использованием полимерной модели разработан метод расчета вязкости силикатных расплавов, содержащих оксиды железа переменной валентности и играющих важную роль в физико-химических процессах черной металлургии. Практическая реализация метода осуществлена при расчете вязкости кальциево-силикатной системы, содержащей оксиды железа и являющейся основой нерудных составляющих окискованных продуктов (в частности, железорудных окатышей).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Есин О.А. Электролитическая природа жидких шлаков. – Свердловск: Изд-во Дома техники, УПИ, 1946. – 41 с.

2. Бокрис Дж. Некоторые проблемы современной электрохимии. – М.: ИЛ, 1962. – 392 с.

3. Richardson F. The changing world of Extraction. – London University, 1958. – 152 p.p.

4. Froberg M.G. // Arch. f.d. Eisenhüttenwes. 1961. Bd. 32. S. 597–606.

5. Masson C.R. // Proc. Roy. Soc. 1965. V. A 287. P. 201–221.

6. Masson C.R. // J. Amer. Ceram. Soc. 1968. V. 51. P. 134–143.

7. Hess P.C. // Geochimica et Cosmoch. Acta. 1971. V. 35. P. 289–306.

8. Masson C.R., Smith I.B., Whiteway S.G. // Canad. J. Chem. 1970. V. 48. P. 1456–1468.

9. Baes C.R. // J. Solid State Chem. 1970. V. 1. P. 159–169.

10. Есин О.А. // ЖФХ. 1973. Т. 47. С. 2320–2323.

11. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. II. – М.: Металлургия, 1966. – 702 с.

12. Глестон С., Лейдлер К., Эйринг Э. Теория абсолютных скоростей реакций. – М.: ИЛ, 1948. – 466 с.

13. Тоор G., Samis C. // Trans. Met. Soc. AIME. 1962. V. 224. P. 878, 879.

14. Pretner B. // Berichte Buns. Ges. Phys. Chem. 1968. V. 72. P. 773–777.

15. Hofmaier G., Urbach G. // Ski. Ser. 1968. Bd. 4. S. 25–29.

16. Schenk H.S., Froberg M.G., Eohde W. // Arch. f. d. Eisenhüttenwes. 1961. Bd. 32. № 8. S. 521–523.

17. Есин О.А. // Физико-химические основы процессов цветной металлургии: Сб. науч. тр. / Уральский политех. ин-т/. – Свердловск: изд. УПИ, 1972. Вып. 104. С. 66–71.

18. Жмойдин Г.И. – В кн.: Свойства и структура шлаковых расплавов. – М.: Наука, 1970. – С. 73–93.

19. Ермолаева Е.В., Стрюк И.Г. – В кн.: Физическая химия и электрохимия расплавленных солей и шлаков. – Л.: Химия, 1969. С. 20–23.

20. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: ГИТЛ, 1957. – 491 с.

21. Есин О.А. // Физико-химические исследования металлургических процессов: Тр. вузов Российской Федерации. – Свердловск: изд. Уральского политех. ин-та, 1974. Вып. 1. С. 5–17.

22. Немилев С.В. – В кн.: Успехи реологии полимеров. – М.: Химия, 1970. С. 241–252.

23. Bockris J., Mackenzie I.D., Kitchener J.A. // Trans. Faraday Soc. 1955. V. 51. P. 1734–1740.

24. Эллот Ф.Д., Глейзер М., Рамакришна В. Термодинамика сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1969. – 252 с.

25. Минаков А.Г., Чоловский М.Ф., Щеглов М.Ф. // Вопросы химии и химической технологии / Харьковский гос. ун-т/. – Харьков: Виша школа, 1962. Вып. 29. С. 162–168.

26. Белюстин А.А., Остаевич Ю.М., Писаревский А.М. и др. // ФТТ. 1965. № 7. С. 1447–1451.

27. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 544 с.

28. Кожуров В.А. Термодинамика металлургических шлаков. – Свердловск: Металлургия, 1995. – 163 с.

29. Аппен А.А., Глушкова В.Б., Каялова С.С. // ЖНМ. 1965. № 4. С. 576–579.

30. Юсфин Ю.С., Юсупходжаев А.А., Новиков А.К. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1967. № 9. С. 17–19.

Уральский государственный технический университет. Поступила 29 марта 1999 г.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

УДК 622.785.5.022.5

© 2000 г. А.Г. Сагинор

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛОСНИКОВЫХ РЕШЕТОК ОБЖИГОВЫХ И АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН

Практика эксплуатации обжиговых и агломерационных машин конвейерного типа показывает, что интенсификация процесса окускования железорудных материалов не возможна без учета особенностей функционирования оборудования и взаимосвязи его с технологическим режимом обработки материалов.

В условиях Лебединского горно-обогатительного комбината (ЛГОК) и Орско-Халидовского металлургического комбината (ОХМК) проведены экспериментальные исследования неравномерности нагрева элементов колосниковой решетки по ширине тележки. Температурные поля определяли с помощью хромель-алюмелевых термопар и плавких пластинок, температура плавления которых была определена в электропечи.

Анализ экспериментальных данных показывает, что несмотря на конструктивные и технологические различия в оборудовании и процессах исследуемых обжиговых и агломерационных машин распределения температур по ширине тележек идентичны (рис. 1).

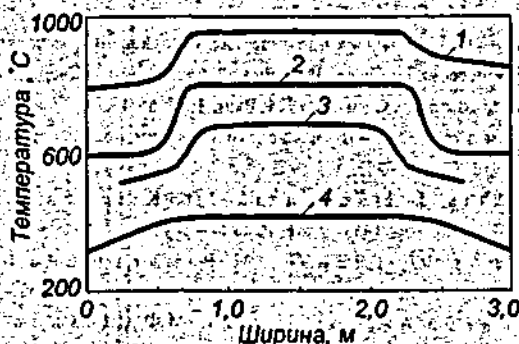


Рис. 1. Распределение температуры по ширине тележки:

1 и 4 — слоя на границе "постель" — колосник и подколосниковой балки обжиговых машин ЛГОКа; 2 и 3 — рабочей поверхности колосников обжиговых машин ЛГОКа и агломерационных машин ОХМКа

На колосниковой решетке по ширине тележки имеют место три температурные зоны: две более "холодные" расположены у бортов и в центре тележки находится третья, в которой обжиговые и агломерационные колосники нагреваются до температур 800 и 700 °C. Изменение температуры в балках рамы по ширине тележки носит плавный характер и достигает максимальных значений в центральной зоне тележки. Ширина "холодных" зон

от бортов тележки достигает 0,35 и 0,50 м для агломерационных и обжиговых машин соответственно.

Анализ решения обратной задачи нестационарной теплопроводности применительно к условиям теплообмена колосников и подколосниковых балок со слоем окатышей [1] показывает, что уменьшению нагрева расположенных в прибортовых зонах тележки колосников на 150–200 °C соответствует снижение температуры в слое на границе слой окатышей — колосник на 100–150 °C. Изменение температуры нагрева в колосниках по длине машины приведено на рис. 2.

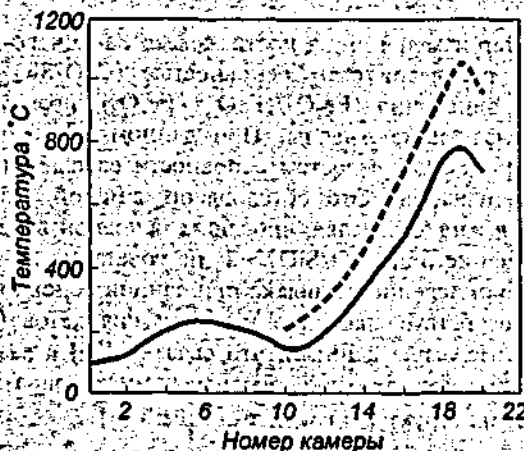


Рис. 2. Изменение температуры нагрева в колосниках (—) и в слое окатышей (---) по длине машины

Следует отметить, что при исследовании слоя окатышей методом фотографирования в прибортовых зонах расположены участки, в которых наблюдается недообжиг окатышей.

Анализ условий эксплуатации колосниковых решеток и данных работ [2, 3] показывает, что уменьшение температуры нагрева окатышей в прибортовых зонах и, как следствие, неравномерный нагрев элементов тележки по ее ширине обусловлены неравномерностью газовых потоков в слое окатышей.

Поле скоростей газового потока на обжиговых машинах в основном определяется профилем слоя окатышей, способом подвода газа в слой и разрежения в ва-

куум-камерах и слабо зависит от сегрегации окатышей и донной постели по ширине тележки [4].

На обжиговых машинах конвейерного типа ЛГОКа достигнута достаточно равномерная укладка слоя окатышей на тележку. При этом на машину подаются окатыши узкофракционного класса за счет установки перед загрузкой системы грохотов. Выполнение внутренней поверхности бортов в виде волны создает дополнительное сопротивление просасываемым газам, поэтому снижение скорости фильтрации в прибортовых зонах, обусловленное влиянием бортовой постели и условиями контакта окатышей с поверхностью бортов, незначительно. Следует отметить, что неравномерность нагрева по ширине тележки имеет место не только в зоне нахождения бортовой постели, т. е. обожженных окатышей (ширина зоны достигает 0,15–0,20 м), но и непосредственно в слое необожженных окатышей (ширина "холодных" зон достигает 0,50 м).

Таким образом, изменение давления в вакуум-камерах по ширине тележки является одной из причин, обуславливающих неравномерность поля скоростей газового потока в слое, и, как следствие, неравномерности нагрева элементов тележки.

Сопоставительный анализ работы оборудования обжиговых и агломерационных машин показывает, что основной причиной уменьшения разрежения в вакуум-камерах в прибортовых зонах тележки являются вредные подсосы из-за недостаточной герметизации машины с помощью существующих продольных уплотнений.

Полученные результаты показывают, что повышение эффективности работы продольного уплотнения машины является одним из условий равномерного распределения потока газов по ширине тележки и, следовательно, уменьшения неравномерности нагрева элементов тележки обжиговой или агломерационной машины.

Выводы. Проведен комплекс экспериментальных исследований по изучению взаимосвязи температурных режимов эксплуатации колосниковой решетки и теплового режима обработки слоя. Установлена неравномерность нагрева элементов колосниковой решетки по ширине тележки. Проанализирована взаимосвязь работы продольного уплотнения обжиговой машины с неравномерностью нагрева элементов тележки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткаченко А.С., Сагинор А.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1986 № 6. С. 141–144
2. Теплотехнические расчеты агрегатов для окускования железорудных материалов / С.В. Базилевич, В.М. Бабошин, Я.Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1979 – 207 с.
3. Кузнецов Р.Ф., Майзель Г.М., Антуганова Я.Л. // Черная металлургия: Бюл. НТИ. 1974 № 14. С. 36–38.
4. Кузнецов Р.Ф., Майзель Г.М., Белоцерковский Я.Л. // Металлург. 1974. № 7. С. 17–19.

– Государственная металлургическая академия Украины (г. Днепропетровск) Поступила 5 октября 1999 г

МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ

УДК 669.18

© 2000 г. В.Б. Охотский

КИПЕНИЕ СТАЛИ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ

Исследование процессов, протекающих при разливе и затвердевании кипящей стали, осуществляется на протяжении значительного периода [1–3]. Использование положений термодинамики и кинетики физико-химических процессов, гидродинамики, тепло- и массопереноса позволяет создать количественное описание этого процесса.

В кипящей стали на различных этапах ее производства содержание кремния изменяется в значительных пределах [4–6]. Несмотря на неоднократное [7–11] возвращение к этому вопросу единого мнения относительно влияния содержания кремния на формирование слитка кипящей стали не выработано.

На рис. 1 представлены данные о содержании кислорода в выплавленной стали в зависимости от содержания кремния и углерода.

Точками показаны фактические значения содержания кислорода в стали перед раскислением в сталепла-

вильном агрегате и после него в ковше, а также при кипении стали в изложнице и в затвердевшем слитке.

Если предположить, что в системе Fe–Si–O равновесное содержание кислорода определяется составом неметаллических включений, и учесть их состав [1, 9], то можно принять следующее: активность в них кремнезема a_{SiO_2} может изменяться в пределах от 0,4 до 1,0.

На рис. 1, а представлены равновесные линии содержания кислорода при $a_{SiO_2} = 0,4$ (сплошная линия) и $a_{SiO_2} = 1,0$ (пунктирная линия) и температуре стали в агрегате и ковше 1620 °С и в изложнице 1520 °С. Основные шлаки обычно насыщены оксидами кальция и магния [12, 13], а содержание кислорода может определяться составом футеровки агрегата или ковша (кислая или основная) [14], поэтому на рис. 1 нанесены линии для кислой футеровки (III), для футеровки из обожженного доломита (IV) и оксида кальция (V).

На стадии выплавки стали в кислом агрегате содержание кислорода в металле определяется состоянием равновесия с футеровкой и насыщенным кремнеземом шлаком [15]. Для основных сталеплавильных шлаков [5, 8] содержание кислорода в выплавленной стали при содержании кремния менее 0,01 % и углерода менее 0,04 % также, очевидно, находится в равновесии с футеровкой и насыщенными оксидами кальция и магния шлаком.

После раскисления в печи или ковше сталь содержит кислород, который при концентрации кремния более 0,01 % находится в равновесии с кремнием. При более низких концентрациях кремния концентрация кислорода определяется, очевидно, кремнеземсодержащей футеровкой ковша (рис. 1, а) [4, 5, 7–9]. Содержание углерода не определяет окисленность металла на этой стадии его производства (рис. 1, б). В изложнице содержание кислорода в стали практически сразу становится близким к равновесному с углеродом и остается в таком состоянии на протяжении всего процесса кипения [3, 16].

Главной задачей организации процесса кипения является обеспечение достаточной толщины беспузыристой корки δ^* . Беспузыристая корка толщиной 1 см формируется на начальном этапе затвердевания в течение 20 с, т. е. практически еще в процессе наполнения изложницы сталью.

Принято считать, что сотовые пузыри начинают формироваться, когда скорость затвердевания металла становится больше скорости роста пузыря. Скорость

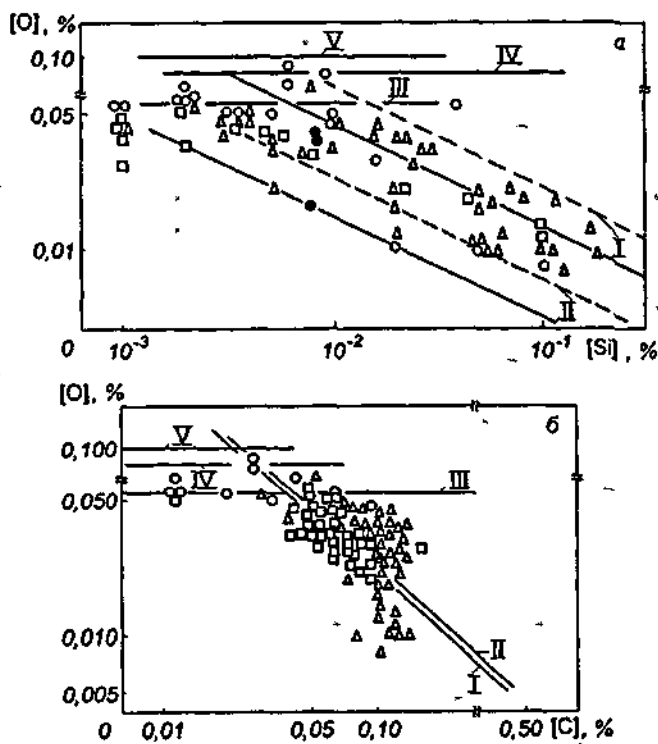


Рис. 1 Расчетные (линии) и фактические (точки) зависимости содержания кислорода в кипящей стали на разных стадиях ее получения от содержания кремния (а) и углерода (б)
I и O – в агрегате, II и Δ – в ковше, □ – в изложнице, ● – в слитке

роста пузыря определяется внешним массопереносом углерода и кислорода в металле к поверхности образующегося пузыря [3]. Интенсивное движение металла в зоне формирования пузырей вызвано их отрывом от фронта затвердевания и всплыванием. Следовательно, можно предположить, что рост пузыря определяется интенсивностью газовыделения в пузырь, приблизительно пропорциональной разнице равновесного с металлом давления выделения монооксида углерода и фактической его величины в пузыре [3, 16]. В этом случае коэффициент внутреннего массопереноса монооксида углерода β_{CO} может быть рассчитан по модели Хигби [17]: $\beta_{CO} = (4 D_{CO}/\pi\tau)^{1/2}$, где D_{CO} – коэффициент молекулярной диффузии монооксида углерода; τ – время от начала образования пузыря.

Удельная интенсивность образования монооксида углерода определяется формулой

$$i_{CO} = (\beta_{CO}/RT)(p_{CO}^* - p_{CO}), \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура; p_{CO}^* и p_{CO} – равновесное с металлом и в пузыре парциальные давления монооксида углерода.

Так как рост пузыря определяется поступлением в него монооксида углерода, изменение его размера D во времени можно описать уравнением

$$\partial D = 2^2 \cdot 22,400 (D_{CO}/\pi\tau)^{1/2} (p_{CO}^* - p_{CO}) \partial\tau / (273R). \quad (2)$$

Проинтегрируем уравнение (2) от $D = 0$ при $\tau = 0$ до $D = D_{отр}$ при $\tau = \tau_{отр}$, где $D_{отр}$ и $\tau_{отр}$ – отрывной диаметр и продолжительность образования пузыря. После преобразований получим выражение

$$\tau_{отр} = \left[273\pi^{1/2} R D_{отр} / 2^3 \cdot 22,400 D_{CO}^{1/2} (p_{CO}^* - p_{CO}) \right]^2.$$

В условиях формирования пузырей на фронте затвердевания $D_{отр} \approx 0,9$ см [17].

При периодическом формировании минимальная скорость роста пузыря приходится на момент, предшествующий его отрыву. Если к этому моменту слой металла над пузырем имеет толщину h , то в соответствии с формулой (2) скорость роста пузыря определяется по выражению

$$\partial D/\partial\tau = 2^2 \cdot 22,4 D_{CO}^{1/2} \times (k_{CO}[C][O] - 1 - \rho_m g h / 9,81 \cdot 10^5) / (273\pi^{1/2} \tau^{1/2}), \quad (3)$$

где k_{CO} – константа равновесия реакции $[C] + [O] \rightarrow \{CO\}$; ρ_m – плотность жидкого металла; g – гравитационное ус-

корение; $[C]$ и $[O]$ – фактические концентрации углерода и кислорода в стали.

Скорость роста пузыря должна быть больше скорости затвердевания S . Воспользуемся полученным, например, в работе [18] уравнением затвердевания кипящей стали общего вида $\delta = k_5 \tau^{1/2} - \delta_0$, где k_5 и δ_0 – постоянные. Необходимо принять во внимание, что $h = v\tau$, где v – скорость подъема жидкого металла в изложнице. После преобразований неравенства $\partial D/\partial\tau > S$ можно записать следующее неравенство неявного вида относительно толщины беспузыристой корки δ^* :

$$k_{CO}[C][O] - 1 - \rho_m g v (\delta^* + \delta_0)^2 / 9,81 \cdot 10^5 k_5^2 > \left[k_5^2 D_{отр} R^2 273^2 / 16 (\delta^* + \delta_0)^2 22,4^2 D_{CO} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Анализ показывает, что значение δ^* пропорционально произведению $([C][O])^{1/2}$ и обратно пропорционально скорости подъема металла в изложнице $v^{1/2}$, что и было найдено ранее опытным путем [19, 20].

На рис. 2, а показаны результаты работ [19–22], в которых не указана скорость разливки стали.

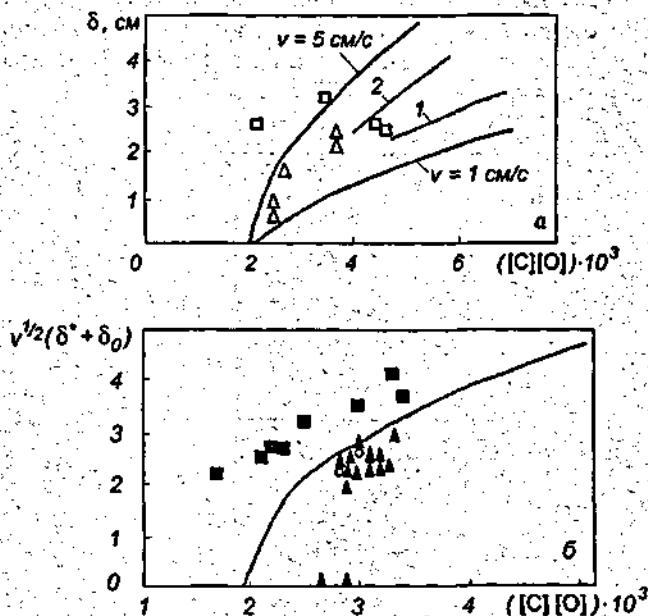


Рис. 2. Толщина беспузыристой корки в явном виде (а) и гидродинамико-теплофизическая характеристика (б), определенные по данным работ [19] (1), [20] (2) и по формуле (4) при $v = 1$ и $v = 5$ см/с, а также по данным работ [22] (□), [21] (Δ), [23] (●), [25] (▲) и [24] (■)

Экспериментальные данные сопоставлены с рассчитанными по формуле (4) величинами толщины беспузыристой корки при различной скорости подъема жидкого металла в изложнице. Нетрудно заметить соответствие этих данных: и характера, и количественных показателей зависимости.

На рис. 2, б представлены результаты работ [23–25], для которых известна скорость разливки, и уравнение (4) в виде зависимости $v^{1/2}(\delta^* + \delta_0)$ от $([C][O])$. Принимая во внимание неточность определения содержания кислорода в разливаемом металле, полученное соответствие расчетных и экспериментальных данных при разливке в изложницы можно считать удовлетворительным.

Экспериментальные точки работы [24], проведенной на МНЛЗ, располагаются выше расчетной линии, возможно в связи с тем, что при непрерывной разливке другие закономерности затвердевания [18]. Тем не менее наблюдается качественное соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Согласно выражению (3) кипение возможно лишь на определенной глубине $h_{кип}$ от поверхности металла в изложнице. Эта величина может быть найдена при условии, что выражение, стоящее в скобках, больше нуля. Таким образом, можно записать следующую зависимость:

$$h_{кип} = (k_{CO}[C][O] - 1)9,81 \cdot 10^5 / (\rho_M g) \quad (5)$$

Расчеты по формуле (5) показывают (рис. 3, а), что при обычной величине произведения $[C][O]$ величина $h_{кип}$ в металле, находящемся в изложнице [23], меньше высоты слитка.

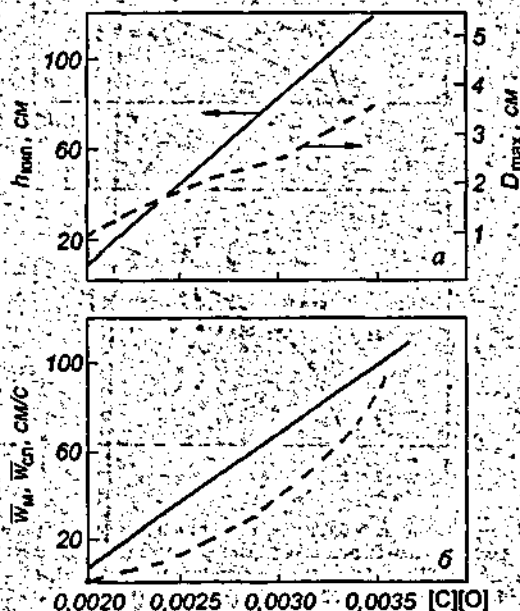


Рис. 3. Параметры гидродинамических процессов при кипении: а — $h_{кип}$, рассчитанная по формуле (5), и D_{max} ; б — \bar{w}_M и $\bar{w}_{ср}$, рассчитанная по формуле (6).

Следовательно, в процессе подъема металла в изложнице ещё во время разливки кипение на глубине, большей $h_{кип}$, прекращается.

В процессе всплывания пузырей, оторвавшихся от фронта затвердевания и имеющих первоначальный размер $D_{отр}$, реакция окисления углерода растворенным в металле кислородом на поверхности пузырей продолжается. Барботаж пузырей вызывает восходящий поток металла вдоль фронта затвердевания, скорость которого можно найти из условия равенства потенциальной энергии пузыря в момент отрыва и кинетической энергии движения жидкого металла [26]. При барботаже инертного газа его источники находятся на определенной глубине, а при кипении стали в изложнице пузыри отрываются от ряда мест, находящихся на расстоянии l друг от друга по вертикали и t по горизонтали в пределах $h_{кип}$.

Потенциальная энергия отрывающегося от фронта затвердевания одиночного пузыря определяется уравнением

$$E_1 = \pi D_{отр}^3 \rho_M g h_{отр} / (6 \tau_{обр}),$$

где $h_{отр}$ — глубина места отрыва.

Суммарная потенциальная энергия $E_{пот}$ всех пузырей, которые отрываются на расстоянии x от нижнего края зоны кипения от числа мест $n = x/l$, определяется выражением

$$E_{пот} = \pi D_{отр}^3 \rho_M g h (h_{кип} - x/2) / (12 \tau_{обр}).$$

Кинетическая энергия металла в барботажной зоне в пределах ширины потока t , равной расстоянию между двумя соседними точками отрыва пузырей по горизонтали, определяется так:

$$E_{кин} = \rho_M \bar{w}_M^2 t b_{бар} / 2,$$

где $b_{бар}$ — толщина барботажного потока (по данным работы [26] $h_{бар}/x = 0,2$); \bar{w}_M — средняя по толщине барботажного потока скорость движения металла.

Из условия $E_{пот} = E_{кин}$ можно определить скорость движения металла в барботажном потоке на расстоянии x от нижней границы зоны кипения.

Пузырь, оторвавшийся в данном месте от фронта затвердевания, движется со скоростью $(\bar{w}_M + u)$, где u — скорость всплывания пузыря. В результате реакции углерода и кислорода на поверхности пузыря объем пузыря увеличивается, растет скорость его всплывания. Одновременно увеличивается и скорость движения металла в барботажной зоне.

Если предположить, что так же, как и при формировании пузыря, интенсивность газовыделения в пузырь пропорциональна разнице давлений $(p_{CO} - p_{CO})$, то удельная интенсивность этого процесса может быть рассчитана по уравнению (1). В этом уравнении необ-

ходимо принять во внимание движение пузыря и согласно модели Кронига и Бринка [17] учесть, что $\beta_{CO} = 2,5(4D_{CO}/\pi t)^{1/2}$. Изменение диаметра пузыря во времени может быть рассчитано по уравнению, аналогичному уравнению (2), но только численным методом, так как скорость всплывания пузыря и скорость движения металла \bar{w}_m изменяются во времени.

Такие расчеты были выполнены для обычно встречающегося на практике диапазона величины $[C][O] = 0,00200 - 0,00035$ [23] для кипящей стали в пределах высоты зоны кипения, определяемой по формуле (5).

На рис. 3, а показано изменение величины $h_{квп}$ и максимального диаметра пузыря при выходе его на поверхность ванны слитка D_{max} . Эти пузыри имеют чашеобразную форму, отношение поперечного размера к эквивалентному диаметру составляет 1,583 [17]. При этом максимальный диаметр пузыря при выходе его на поверхность ванны составляет 1,6-6,3 см при общей толщине барботажного потока $b_{бар} = 1,6-24$ см. Наблюдаемая толщина ранта кипения составляет 4,0-11,5 см [3].

На рис. 3, б показано изменение средней по толщине зоны барботажа скорости движения металла \bar{w}_m при выходе на поверхность ванны слитка. Высота образующегося при этом буруна определяется формулой $h_{бур} = \bar{w}_m^2/2g \cdot 0,66$, где 0,66 - коэффициент усреднения скорости по энергии потока при профиле Шлихтинга. В этом случае расчетная величина $h_{бур}$ достигает 7 см, это значение близко к наблюдаемому [3].

При циркуляции жидкости в ограниченном пространстве площади поперечного сечения восходящего и нисходящего потоков равны [17]. Исходя из этого условия скорость нисходящего потока в объеме ванны слитка ниже зоны кипения составляет

$$\bar{w}_{сж} = 2\bar{w}_m \left[ab - (a - b_{бар})(b - b_{бар}) \right] / (ab), \quad (6)$$

где a, b - размеры сторон прямоугольного слитка.

Результаты расчетов по данной формуле применительно к листовому слитку массой 18 т [27] представлены на рис. 3, б. Поскольку в работе [27] состав кипящего металла не приводится, то можно сопоставить только порядок величины экспериментальных (10 см/с) и расчетных (1-80 см/с) данных.

Сопоставление массовой скорости расходования углерода и кислорода на образование монооксида углерода при формировании и всплывании пузыря с массовой интенсивностью их поступления в ванну слитка в результате ликвации при затвердевании стали показывает, что первая на 1-2 порядка больше второй. В этих условиях можно предположить, что исходные концентрации углерода и кислорода в металле, поступающем в изложницу, быстро приходят в равновесие с выделением удельного объема монооксида углерода ΔV_1 . В процессе кипения кислород и углерод, которые ликвидируют из образующихся кристаллов металла, поступают

как в межзеренные пространства, так и в объем ванны слитка. В первом случае они остаются в затвердевшем металле, а во втором полностью расходуются на образование монооксида углерода.

Содержания углерода и кислорода в поступающем в изложницу металле составляют C_n и O_n ; после расходования кислорода и углерода на образование монооксида углерода эти содержания становятся равновесными. В этом случае можно рассчитать, например, снижение содержания кислорода в металле

$$\Delta O = (4C_n/6 + O_n/2) - \left[(4C_n/6 + O_n/2)^2 - 4C_n O_n/3 + 4k_{CO}/3 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Так же можно рассчитать равновесную концентрацию оставшегося в металле кислорода $O^* = O_n - \Delta O$ и, соответственно, равновесную с ней концентрацию углерода $C^* = 1/k_{CO} O^*$. В этом случае $\Delta V_1 = \Delta O \cdot 22400/16 \cdot 100$.

Можно предположить, что при затвердевании элементарного объема металла половина его площади поверхности направлена в сторону объема ванны слитка и, соответственно, ликвация на этой поверхности обеспечивает поступление ликвидирующих элементов в объем ванны металла слитка и его сегрегацию. Ликвация же по второй половине поверхности становится межзеренной (междендритной).

При достаточно длительном кипении уравнение затвердевания стремится к виду $\delta = 0,323\tau^{1/2}$ [28]. Если пренебречь величиной поверхности затвердевания в донной части слитка по сравнению с боковой и предположить, что вследствие интенсивного перемешивания при кипении ликвидирующие примеси, в том числе кислород, быстро перемещаются с жидкой частью слитка, то увеличение концентрации кислорода за время $\delta\tau$ составит

$$\delta O \approx (a + b - 4k_8\tau^{1/2})k_8 O^* (1 - k_O) \delta\tau / (a - 2k_8\tau^{1/2})(b - 2k_8\tau^{1/2}), \quad (8)$$

где k_O - коэффициент ликвации кислорода.

Численное решение уравнения (8) позволяет определить тот удельный объем газа ΔV_2 , который выделится после удаления первичного удельного объема ΔV_1 и установления равновесных концентраций кислорода O^* и углерода C^* .

При выполнении условий $k_O = 0,67$ и $k_C = 0,17$ [29] газообразование лимитируется ликвацией кислорода при $C^* > 0,04\%$. При $C^* < 0,04\%$ в уравнении (8) должны использоваться значения δC и C^* .

Расчеты по формулам (7) и (8) проведены применительно к условиям эксперимента [16], а полученные расчетные значения $\Delta V_p = \Delta V_1 + \Delta V_2$ сопоставлены с фактическими данными ΔV_ϕ и показаны на рис. 4.

Нетрудно заметить, что эти значения близки между собой. Это говорит о правомерности составленной модели газовыделения, основанной на ликвации примесей при затвердевании.

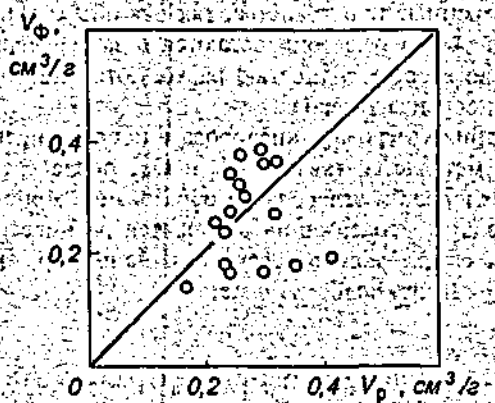


Рис. 4. Удельный объем выделившегося монооксида углерода: — линия равных значений; O — экспериментальные данные [16]

После окончания кипения при естественном образовании моста или механическом накрывании слитка крышкой ликвидирующие элементы вызывают сегрегацию. Вследствие роста концентрации углерода и кислорода давление выделения монооксида углерода периодически будет превосходить равновесное давление, создаваемое внутри жидкой части слитка, и кипение будет возобновляться, что способствует размешиванию ликвидирующих примесей и развитию сегрегации. Такое возобновление кипения существует (по крайней мере один раз) и вызывает образование зоны вторичных пузырей. В соответствующем месте по сечению слитка нарастание концентрации углерода прекращается, очевидно, как в связи с ускорением его размешивания в объеме металла, так и благодаря его расходованию на образование монооксида углерода.

По уравнению (8) можно рассчитать процесс сегрегации примесей при затвердевании слитка кипящей стали. Такие расчеты в работе [3] применительно к условиям затвердевания 8,3-т слитка стали марки 10кп показали, что максимально достигаемые в результате сегрегации концентрации должны составлять 0,530 % C, 0,128 % S и 0,091 % P. Фактические максимальные концентрации имеют значения 0,410, 0,238 и 0,120 % соответственно.

В результате межзеренной (междендритной) ликвиции содержание кислорода может достигать равновесного с оксидами железа значения в соответствии с реакцией $[Fe] + [O] \rightarrow (FeO)$. Содержание кислорода при температуре солидуса составляет около 0,1620 %, что соответствует концентрации 0,0108 % кислорода в исходном металле. Эта величина близка к концентрации кислорода в полуспокойной стали, что, очевидно, является причиной образования междендритных пузырей малого диаметра (1–2 мм). При затвердевании кипящей стали междендритные пузыри, вероятно, коалесцируют с пузырями, образующимися на фронте затвердевания, и удаляются из междендритного пространства. При затвердевании перераскисленной кипящей и полуспокойной стали в отсутствие формирования пузырей

на фронте затвердевания междендритные пузыри не удаляются.

Выводы. Составлены модели образования пузырей и безпузыристой корки выделяющегося газа, перемешивания жидкой части слитка при кипении стали в изложнице. Результаты расчетов по моделям и экспериментальные данные находятся в качественном и количественном соответствии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубров Н.Ф. Структура слитка кипящей стали. — Свердловск — М.: Metallurgizdat, 1950. — 61 с.
2. Ойкс Г.Н. Производство кипящей стали. — М.: Metallurgizdat, 1955. — 235 с.
3. Коновалов Р.П. Слиток кипящей стали. — М.: Metallurgiya, 1986. — 176 с.
4. Левин С.Л. // ДОМЭЗ. 1933. № 2–3. С. 34–58.
5. Metcchell J. // JISI. 1942. V. 146. P. 2. P. 295–326.
6. Swinden, T. // JISI. 1942. V. 146. P. 2. P. 345–356.
7. Dorney D.E. // J. Metals. 1970. V. 22. № 7. P. 42–51.
8. Taffner K., Trömel G. // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1972. № 5. S. 379–387.
9. Harkness B., Nicholson A., Murray J.D. // JISI. 1971. V. 209. P. 9. P. 692–713.
10. Нечкин Ю.М., Явойский В.И., Шишкин Ю.И., Зинковский И.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 3. С. 34–37.
11. Денисов В.А., Кривошеков Б.Е., Власов Н.Н. // Металлург. 1980. № 1. С. 25, 26.
12. Охотский В.Б., Терешенко В.С., Серик В.К. — В кн.: Тезисы научных сообщений V Всесоюзной конференции по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 251–253.
13. Охотский В.Б., Шрамко А.Ф., Годинский К.А. — В кн.: Тезисы научных сообщений V Всесоюзной конференции по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 86–88.
14. Белов Б.Ф., Новохатский И.А., Вольперт О.П. и др. // Изв. АН СССР. Металлы. 1975. № 1. С. 67–70.
15. Афанасьев С.Г. Исследование бессемеровского процесса. — М.: Metallurgizdat, 1957. — 110 с.
16. Шюрман Э., Хадисаросо П., Петер О. // Черные металлы. 1965. № 2. С. 3–15.
17. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. — М.: Metallurgiya, 1993. — 150 с.
18. Ашендорф К.-К., Коелер Э., Шроер Г., Абель Б. // Черные металлы. 1962. № 20. С. 3–12.
19. Ковалев Г.М., Куликов И.В., Беликов Л.К. и др. // Проблемы сталного слитка: Науч. тр. / ИИЛ АН УССР. — М.: Metallurgiya, 1965. № 4. С. 321–326.
20. Явойский В.И., Лузгин В.П., Вишкарев А.Ф. Окисленность стали и методы ее контроля. Metallurgiya, 1975. — 285 с.
21. Крупман Л.И., Климов Ю.В., Лихобаба А.В. и др. — В кн.: Усовершенствование процессов разлива стали. — М.: Metallurgiya, 1981. С. 104–107.

22. Казачков Е.А. // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. 1988. № 1. С. 14–16.
23. Нильс П., Беккер Ф., Тиль А. // *Черные металлы*. № 17. 1965. С. 3–12.
24. Сауткин Н.И., Сергиенко В.С., Травин О.В., Рутес В.С. // *Сталь*. 1969. № 12. С. 1088–1092.
25. Арыченков В.П., Рабинович Е.И., Узненко А.М. // *Проблемы стального слитка*: Науч. тр. / ИПП АН УССР. – М.: *Металлургия*, 1974. № 5. С. 415–418.
26. Охотский В.Б. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1993. № 2. С. 14–16; № 4. С. 5–8.
27. Беляев Ю.П. // *Сталиплавленное производство*: Труды ДОННИИЧМ. – М.: *Металлургия*, 1969. № 19. С. 107–114.
28. Охотский В.Б. // *Процессы литья*. 1995. № 4. С. 31–39.
29. Номига Н., Мори К. // *Trans. ISI of Japan*. 1979. V. 19. № 8. P. 796–801.

Государственная металлургическая академия Украины. Поступила 15 июня 1999 г.

**Московский государственный институт стали и сплавов
(технологический университет)**

Энерго-экологический факультет

Интеллектуальные ресурсы

15 – 17 ноября 2000 г. проводят

научно-практическую конференцию

**«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПЕЧНОЙ АГРЕГАТ –
ОСНОВА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
МЕТАЛЛУРГИИ XXI ВЕКА»**

и тематические выставки:

«Достижения МИСиС в высоких технологиях»

«Измерения температуры в металлургии»

Основные проблемно-тематические направления:

- Энергосберегающие технологии в плавильных печных агрегатах;
- Энергосбережение в нагревательных и термических печах и машиностроении;
- Автоматизация управления технологическими процессами в металлургии;
- Теплофизические процессы в материаловедении и металлургии

Ответственный секретарь: проф. Беленький Анатолий Матвеевич

Контактный телефон: (095) 230-46-10; 230-46-81.

Тел./Факс: (095) 230-46-10; 230-45-61.

E-mail: furnace@rusmet.ru

ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ

УДК 669.168

© 2000 г. О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина

ПОЛУЧЕНИЕ МАЛОФОСФОРИСТЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ИЗ РУД И ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ¹

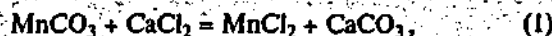
Запасы марганцевых руд в России невелики: они в десятки раз меньше, чем их запасы на Украине, хотя только черная металлургия Российской Федерации потребляет марганца в 2–3 раза больше, чем вся Украина. Кроме того, значительная часть месторождений марганца в России имеет небольшие запасы этого элемента; так, из четырнадцати месторождений Российской Федерации двенадцать относительно мелких расположены в Свердловской области (Полуночная группа). Общие запасы таких месторождений составляют только 50 млн. т [1]. Единственное крупное месторождение марганца (Усинское) находится в Кемеровской области и имеет запасы примерно 100 млн. т. К сказанному необходимо добавить, что основные запасы марганца как Усинского, так и уральских месторождений представлены карбонатными рудами, относящимися к классу труднообогатимых бедных. Полученные из таких руд концентраты при механических способах обогащения пригодны лишь для производства рядовых марганцевых сплавов с довольно высоким содержанием фосфора (примерно 0,40–0,50 %).

Россия омывается двумя океанами, на дне которых, как известно, сосредоточены запасы марганца, в сотни раз превышающие его запасы на суше [1]. Они представлены конкрециями с содержанием 0,70–50 % Mn, 0,8–32 % Fe, 0,04–2,5 % Ni, 0,01–2,6 % Co, 0,014–1,9 % Cu. За рубежом (США, Великобритания, Франция, Япония и др.) активно ведутся исследования по химической переработки конкреций с применением соляной, уксусной, щавелевой и других кислот, сернистого газа, аммиачных и других растворов². К сожалению, в России и странах СНГ исследования ведутся в основном в направлении переплава конкреций на шлак. В металл при этом извлекаются лишь кобальт, никель и медь, а марганец в значительной степени обесценивается. Между тем в ценностном выражении марганец благодаря более высокому содержанию в конкреции практически не уступает вышеперечисленным цветным металлам, при этом возможно высокое извлечение не только последних, но и марганца, если использовать комплексную гидromеталлургическую переработку конкреций.

¹ Работа выполнена по гранту № 84 по фундаментальным проблемам металлургии Министерства общего и профессионального образования РФ.

² Способы переработки конкреций. Отчет ВЦПУ (Киевский филиал) № 13035 (рег. номер ВЦПУ 03516187).

Единственный перспективный метод получения высококачественных малофосфористых концентратов из руд Российской Федерации – химическое обогащение. Применительно к карбонатным рудам Усинского месторождения эффективным способом его осуществления является кальцийхлоридный [2]. В основу способа положены обменные реакции



По этому способу расходуется лишь недефицитная известь, а основной растворитель – хлористый кальций – в ходе осаждения концентрата по реакции (2) полностью регенерирует. Другим достоинством способа является то, что в насыщенном растворе хлористого кальция растворяются лишь карбонаты MnCO_3 и MgCO_3 , основные же примеси – фосфор, сера, кремнезем – не растворяются, а при температуре не ниже 220 °С растворившиеся соединения железа подвергаются полному гидролизу. Поэтому сложной операции очистки раствора от примесей не требуется, а в концентрате их практически нет (в нем содержится примерно 0,5 % SiO_2 , 0,02–0,5 % Fe, 0,002–0,08 % P, серы – следы). Содержание примесей в растворе может быть и более низким. Оно определяется только их содержанием в используемой для осаждения марганца извести [3].

Недостатком процесса является необходимость его осуществления в автоклавах при температуре 160–240 °С. В настоящее время автоклавные процессы осуществляют непрерывным способом, что позволяет уменьшить энергетические затраты, а сам процесс сделать экологически чистым.

Несмотря на то что способ предложен почти 50 лет назад, многое в его осуществлении неясно. Так, совершенно не изучены вопросы растворения в насыщенном растворе хлористого кальция кислородных соединений марганца, влияния различных примесей в хлористом кальции, например хлоридов магния, железа и других. Целью настоящей работы и было восполнить эти пробелы.

Исследования проводили на многокамерной автоклавной установке МКА-8-75, вмещающей одновременно восемь автоклавов объемом 75 см³ каждый, которые закрепляются в металлической рамке, с целью переме-

шивания раствора в муфельной печи, вращающейся со скоростью 80 оборотов в минуту. Для выщелачивания использовали насыщенный раствор технического хлористого кальция с содержанием около 96,6 % CaCl₂. Другие хлориды были класса ЧДА. Водный раствор хлорида железа (II) готовили растворением мягкого железа в соляной кислоте.

Методика эксперимента была следующей: навеску растворяемого материала (обычно 7 г) загружали в автоклав, после чего заливали 50–65 мл растворителя, автоклавы закрывали, закрепляли во вращающейся рамке и поднимали температуру *t* в печи до заданной, с момента достижения которой отсчитывали продолжительность τ выдержки. После окончания опыта автоклавы извлекали из камеры и охлаждали до температуры 80–90 °С, после чего раствор фильтровали с использованием бумаги с желтой полосой, остаток промывали, сушили при 105 °С и анализировали. Извлечение марганца оценивали по массе «хвостов» и содержанию марганца в них. Всего было проведено три серии опытов. В первой из них изучали условия растворения чистых оксидов, во второй – чистых карбонатов, в третьей – железомарганцевых конкреций и руд различного состава

Химический состав железомарганцевых конкреций и марганцевых руд приведен ниже:

Материал	ЖМК	R _{Ус}	R _{Ушк}	R _{Тн}	R _П	Анзф	Ш _{Мл}
Содержание, %							
Mn	35,03	22,60	50,62	43,95	41,65	44,39	16,76
MnO ₂	34,03	-	52,12	49,38	42,52	23,58	-
Fe ₂ O ₃	8,82	20,5*	10,20	7,43	6,07	4,55	-
SiO ₂	16,96	12,02	12,60	16,75	26,31	20,86	30,00
Al ₂ O ₃	5,61	9,26	2,88	2,55	4,67	2,78	5,00
CaO	3,29	1,13	1,64	3,91	1,98	8,23	48,00
MgO	-	0,53	0,56	-	0,97	1,13	5,00
BaO	-	7,20	-	0,18	0,93	-	-
Na ₂ O + K ₂ O	Н о	Н о	-	1,90	2,90	Н о	Н о
P ₂ O ₅	Н о	0,29**	0,12	0,42	0,44	0,60	-
Влага	-	-	Н о	6,20	1,93	Н о	-
ППМ	22,4	11,48	Н о	18,32	11,98	3,90	-

Примечание. Принятые обозначения ЖМК – железомарганцевые конкреции, R_{Ус}, R_{Ушк}, R_{Тн} и R_П – руды родохрозитовая Усинская, месторождения Ушкатын III, Тыньинская и Полуночная, Анзф – агломерат Никопальского завода ферросплавов, Ш_{Мл} – шлак металлического марганца, ППМ – потери при прокаливании, Н о – не определялось, * – содержание железа общего, ** – содержание фосфора

Основные результаты первой серии экспериментов по установлению влияния условий опыта и состава раствора на полноту растворения чистых оксидов (гидроксидов) характеризуется следующими данными:

Оксид	Растворитель	Условия опыта			K _{Мп} , %	ФСП
		C, %	t, °C	τ , ч		
MnO	CaCl ₂	48,0	215	3,0	3,7	Н о
То же	То же	48,0	200	2,0	43,9	То же

---	---	41,7 2,6	220	2,0	19,5	---
---	---	40,9 4,6	220	2,0	36,8	---
---	---	40,2 9,6	220	2,0	72,4	---
---	MgCl ₂	36,4	105–215	4,5	50,6	---
---	FeCl ₂	29,3	220	2,5	99,2	MnO, Fe ₂ O ₃
Mn ₂ O ₃	CaCl ₂	48,0	220	2,0	2,1	Н о
То же	MgCl ₂	37,0	220	3,0	6,6	Mn ₂ O ₃
---	FeCl ₂	29,3	220	2,5	99,6	Fe ₂ O ₃
MnO ₂	CaCl ₂	48,0	200	2,0	0	Н о
То же	То же	48,0	200	2,0	15,6	То же
---	MgCl ₂	37,0	220	3,0	8,8	Mn ₂ O ₃
---	FeCl ₂	29,3	220	2,1	99,5	Fe ₂ O ₃
---	CaCl ₂	41,7 2,6	220	2,0	23,0	Н о
---	То же	40,9 4,8	220	2,0	46,5	То же
---	---	40,2 9,6	220	2,0	90,3	---
Mn(OH) ₂	---	48,0	200	2,0	2,3	---
То же	MgCl ₂	37,0	220	2,0	66,0	---
---	FeCl ₂	29,3	210	3,5	93,1	MnO, Fe ₂ O ₃

Примечание. В числителе и знаменателе – соответственно концентрации C растворителя и примеси хлорида железа FeCl₂. Звездочка – факт наличия в качестве примеси 1 г древесного угля, K_{Мп} – извлечение марганца, ФСП – фазовый состав продуктов

Результаты второй серии экспериментов по установлению влияния состава растворителя и других условий опыта на растворение карбонатов представлены ниже:

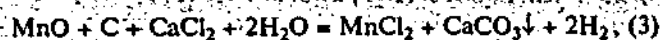
Карбонат	Растворитель	C, %	t, ч	K _{Мп} , %	ФСП
MnCO ₃	CaCl ₂	48,0	2,0	87,7	Н о
Температура 220 °С					
То же	MgCl ₂	36,7	2,8	79,3	То же
---	FeCl ₂	29,3	2,0	76,9	---
---	CaCl ₂	41,7 2,6**	2,0	89,1	---
---	CaCl ₂	40,9 4,8**	2,0	92,9	---

FeCO ₃	MnCl ₂	<u>42,5</u>	2,0	1,8	---
То же	CaCl ₂	<u>37,7</u> 6,6-11,6	2,0	41,4	---
MgCO ₃	MnCl ₂	<u>42,5</u>	2,5	99,6	MnCO ₃
То же	CaCl ₂	<u>38,0</u> 6,6-11,6	2,5	67,3	(CaCO ₃ , MgCO ₃ , MnCO ₃)
CaCO ₃	MnCl ₂	<u>42,5</u>	2,5	90,3	MnCO ₃
То же	FeCl ₂	<u>29,3</u>	2,5	98,2	FeCO ₃
---	MgCl ₂	<u>37,0</u>	2,1	90,9	MgCO ₃
Температура 225 °С					
F _{Mn}	CaCl ₂	<u>49,5</u>	2,3	87,7	H ₂ O

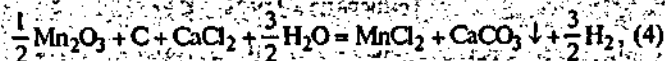
Примечание. Звездочкой (*) обозначено содержание в растворе примеси MnCl₂, двумя звездочками (**) – содержание примеси FeCl₂. Остальные обозначения те же, что и принятые ранее.

Из приведенных данных видно, что чистые оксиды MnO, Mn₂O₃, MnO₂ и гидроксид Mn(OH)₂ в насыщенном растворе хлористого кальция практически не растворяются. Наличие небольших количеств марганца в растворе в некоторых опытах с чистыми оксидами, по-видимому, связано с присутствием в техническом хлориде кальция примесей других хлоридов. В хлориде марганца растворяются только монооксид и гидроксид марганца, а в хлористом железе растворяются, причем достаточно полно, все оксиды и гидроксиды марганца, причем менее полно, чем другие соединения марганца, растворяются гидроксиды.

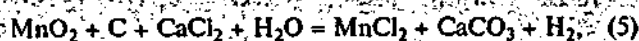
Введение в шихту восстановителя (древесного угля) заметно улучшает условия растворения оксидов (особенно MnO) и гидроксидов марганца в хлориде кальция. Последнее, по-видимому, объясняется тем, что при этом углерод окисляется до диоксида, а растворение идет по реакциям



$$\Delta G^{\circ}(3) = 120080 - 179,5T + 19,15T \lg a_{\text{MnCl}_2} \text{ Дж/моль};$$



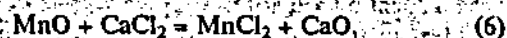
$$\Delta G^{\circ}(4) = 59730 - 179,5T + 19,15T \lg a_{\text{MnCl}_2} \text{ Дж/моль};$$



$$\Delta G^{\circ}(5) = -38540 - 149,87T \text{ Дж/моль}.$$

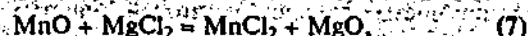
Правда, с этой точки зрения условия растворения высших оксидов MnO₂ и Mn₂O₃, как следует из величины энергии Гиббса реакций (4), (5), должны быть

заметьно лучше, чем для оксида MnO по реакции (3). Между тем из опытных данных, приведенных выше для чистых оксидов, следует обратное, поэтому нельзя, по-видимому, исключить и прямого взаимодействия оксида MnO с хлоридом CaCl₂ по реакции

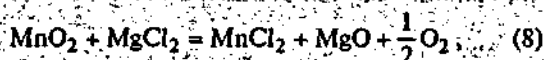


Реакция (6) при этом должна сопровождаться связыванием извести с какой-либо примесью, присутствующей в пустой породе руды. В противном случае появление по реакции (6) свободной извести будет способствовать осаждению марганца из раствора в виде гидроксида по реакции (2). В общем механизм растворения оксидов и особенно MnO в присутствии восстановителя остается недостаточно ясным.

Что касается участия других хлоридов в растворении оксидов марганца, то механизм процесса, по-видимому, более прост:



$$\Delta G^{\circ}(7) = -53010 + 3,36T \text{ Дж/моль};$$

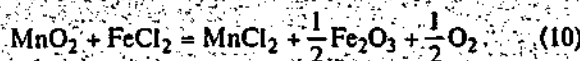
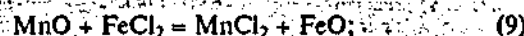


$$\Delta G^{\circ}(8) = 76940 - 101,13T \text{ Дж/моль}.$$

Так, реакция (7) в условиях опыта термодинамически возможна; тогда как реакция (8) при 200–240 °С невозможна, поскольку при этих температурах $\Delta G^{\circ}(8) \gg 0$, что хорошо совпадает с результатами опытов (см. данные исследований по растворению чистых оксидов).

Что касается хлорида железа FeCl₂, то при высоких его концентрациях практически полное извлечение марганца из оксидов объясняется выпадением в осадок оксида железа Fe₂O₃, что подтверждает и рентгеновский анализ. По этим причинам растворение оксидов MnO, Mn₂O₃, MnO₂ и гидроксида Mn(OH)₂ в насыщенном растворе хлорида железа идет практически до конца.

В некоторых опытах первой серии экспериментов рассматривалось влияние добавок хлорида железа (II) в насыщенный раствор хлорида кальция. По результатам этих опытов можно констатировать, что извлечение марганца в раствор зависит от концентрации хлорида железа. Оксиды марганца растворялись в соответствии с реакциями



Результаты второй серии экспериментов позволяют сделать вывод, что большинство рассмотренных карбо-

натов довольно хорошо растворяется в насыщенных растворах хлоридов; некоторым исключением из этого правила являются карбонаты железа: они, как это следует из опытов, либо не растворяются, либо переходят в раствор в значительно меньшей степени. Последнее, по-видимому, связано с гидролизом хлоридов и других соединений железа при высоких температурах [4]. Вместе с тем приведенные сведения указывают на то, что растворение большинства карбонатов происходит только в том случае, когда получающиеся растворы отличаются пониженной активностью хлорида, растворяющего карбонат. Исключение, по-видимому, относится лишь к дихлориду железа, в котором растворение обычно возможно даже при довольно высокой активности последнего. Что касается самого карбоната железа, то его растворение затрудняется влиянием не только термодинамических свойств продуктов реакции, как это, например, имело место для опытов с растворением карбоната железа $FeCO_3$ в насыщенном растворе хлорида марганца $MnCl_2$, но и отмеченной выше высокой склонностью образующихся хлоридов железа к гидролизу.

В третьей серии экспериментов обнаруженные в первой и второй сериях опытов результаты проверялись на природных материалах: железомарганцевых конкрециях и рудах различных месторождений. Технологические показатели переработки этих материалов при использовании раствора хлористого кальция с добавками других солей и восстановителя приведены ниже:

Материал	C, %	K_{Mn} , %	Материал	C, %	K_{Mn} , %
ЖМК	48,0	3,2	$P_{Тн}$	48,0	4,3
	41,7	61,3		41,7	65,1
	2,6			2,6	
	41,7	57,3		40,9	93,2
	2,6*			9,8	
	40,9	76,4		40,2	98,6
	4,8			9,6	
$P_{Ушк}$	40,2	97,6	$P_{П}$	41,7	68,8
	9,6			2,6	
	48,0	3,9		41,7	65,3
	-			2,6	
$P_{Ушк}$	48,0	28,4	A_{H3O}	40,9	72,0
	41,7	53,4		4,8	
	2,6			41,7	62,9
	40,9	68,9		2,6	
$P_{Ус}$	4,8		$Ш_{Mn}$	40,9	86,3
	48,5	87,7		4,8	
	-			-	

Примечание. Условия опыта: $t = 220^\circ C$, $\tau = 2 ч$, * - присутствие в качестве примеси 2 г древесного угля.

Приведенные данные в основном получены при изучении условий выщелачивания марганца из материалов с размером частиц 120 мкм и менее, а на рис. 1-3 - при выщелачивании тех же материалов с размерами частиц не более 20 мкм.

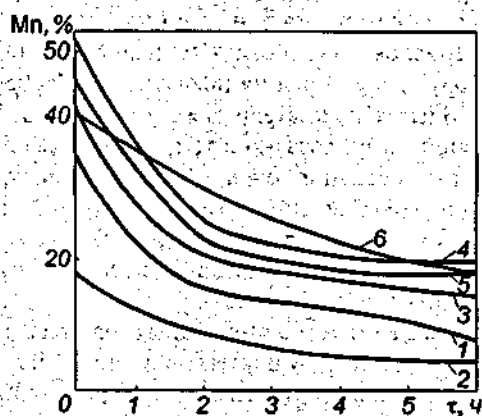


Рис. 1. Влияние длительности выщелачивания в хвостах раствором, содержащим 41,7 % $CaCl_2$ и 2,6 % $FeCl_2$, на содержание марганца в хвостах: 1 - железомарганцевых конкреций; 2 - шлака металлического марганца; 3 - никопольского агломерата; 4, 5 и 6 - руд месторождений Ушкаты III, Тынинского и Полуночного

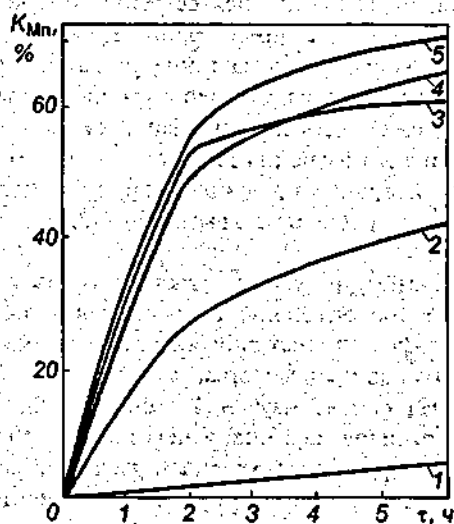


Рис. 2. Влияние длительности выщелачивания на извлечение марганца из руды месторождения Ушкаты III при обработке ее раствором, содержащим: 1 - 48 % $CaCl_2$; 2 - 48 % $CaCl_2$ и древесный уголь; 3 - 41,7 % $CaCl_2$, 2,6 % $FeCl_2$ и древесный уголь; 4 - 41,7 % $CaCl_2$ и 4,8 % $FeCl_2$

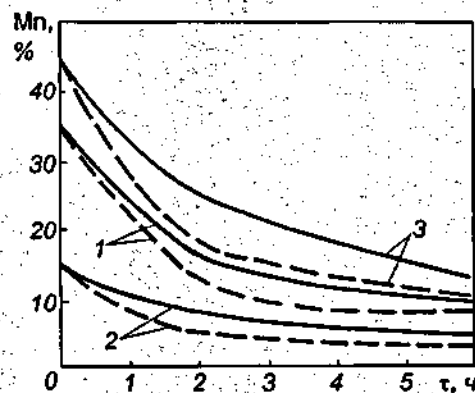


Рис. 3. Влияние на остаточное содержание марганца в хвостах железомарганцевых конкреций (1), шлака металлического марганца (2) и никопольского агломерата (3) при обработке их растворами, содержащими: — 41,7 % $CaCl_2$ и 2,6 % $FeCl_2$; --- 40,9 % $CaCl_2$ и 4,8 % $FeCl_2$

Как видно из сравнения этих данных, при использовании материалов значительно меньшей крупности не удалось получить улучшения показателей. Наоборот, в некоторых опытах показатели даже ухудшились. Последнее, по-видимому, связано с тем, что перемешивание материалов, особенно очень тонкого помола, по принятой методике (вращение рамки с постоянной скоростью) происходит неудовлетворительно. Тем не менее результаты третьей серии опытов позволяют сделать целый ряд важных наблюдений.

Опыты, проведенные на природных материалах, в основном подтвердили результаты, полученные на чистых материалах. Видно, что введение в растворитель микродобавок хлоридов железа, а в шихту — восстановителя (древесного угля) позволяет использовать этот способ для выщелачивания марганца не только из карбонатных, но и из оксидных (окисленных) руд различного состава. С использованием этих новых подходов процесс можно эффективно использовать даже для выщелачивания марганца из искусственно полученного материала, например, агломерата, в котором, как известно, значительная часть марганца связана в силикаты. Способ, как видно из рисунков и приведенных выше данных, может быть использован также для извлечения марганца и получения высококачественных концентратов из отвальных продуктов, например отвального шлака или из пыли от закрытых руднотермических печей.

Таким образом, результаты третьей серии опытов могут стать технологической основой для разработки новых, более эффективных способов переработки руд и некоторых отходов производства.

Выводы. На основе изучения теоретических основ растворения оксидов марганца и некоторых карбонатов в насыщенных растворах хлоридов кальция, магния, марганца и железа установлен механизм влияния не-

которых примесей, особенно хлоридов железа, на процесс растворения. Выявлены новые возможности для совершенствования и интенсификации процесса извлечения различных соединений марганца в высококачественные марганцевые концентраты. Разработаны технологические основы нового процесса химического обогащения железомарганцевых конкреций, карбонатных, смешанных и окисленных руд. Выявленные закономерности растворения различных соединений марганца в насыщенных растворах хлорида кальция с микродобавками в шихту восстановителей могут быть использованы для разработки более совершенной и эффективной технологии гидрометаллургической переработки железомарганцевых концентратов и руд различного состава, в том числе оксидно-карбонатных, в высококачественные химические концентраты, а также для разработки технологических основ и технологических приемов извлечения марганца из отходов производства (шлаков, рассыпающихся пылей от газоочистки руднотермической печей и аглоустановок, шламов обогащения и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасик М.И., Лякишев Н.А., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. — М.: Металлургия, 1988. — 784 с.
2. Шамовский Л.Н. — В кн.: Исследования по прикладной химии. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 39—49.
3. Толстогузов Н.В., Селиванов И.А., Прошунин И.Е. — В кн.: Теория и практика металлургии марганца. — М.: Наука, 1990. С. 106—111.
4. Фурман А.А. Неорганические хлориды (химия и технология). — М.: Химия, 1980. — 416 с.

Сибирский государственный индустриальный университет. Поступила 10 сентября 1999 г.

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669.018.75:669.017.7

© 2000 г. Ю. Ф. Иванов, С. Ф. Гюсов, В. П. Ротштейн

ОБЪЕМНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ СТАЛИ 110Г13 СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В исследованиях [1-3] было показано, что обработка твердосплавного материала WC-сталь 110Г13 низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком приводит к существенной модификации его структуры, фазового состава и механических характеристик. Целью настоящей работы является исследование структурно-фазового состояния и механических характеристик облученной стали 110Г13 (связующей фазы в твердом сплаве WC-сталь 110Г13).

Сталь 110Г13 состава 1,2 % С, 12,6 % Мн, 0,97 % Ni, 0,32 % Si, 0,29 % Cr, 0,005 % S, остальное – железо закаливали от 1100 °С (выдержка 40 мин) в воде. После закалки материал имел аустенитную структуру, размер зерна составлял примерно 63 мкм. Испытуемые образцы в форме цилиндра толщиной 10 и диам. 20 мм облучали низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком со следующими параметрами: энергия электронов 30–40 кэВ, плотность энергии пучка электронов 22 Дж/см², длительность импульса 2,5 мкс, число N импульсов обработки 1 и 10, интервал между импульсами 10 с. Механические испытания состояли в определении микротвердости H_{μ} на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,1 Н. Зеренную и субзеренную структуру, а также фазовый состав изучали методами металлографии, рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов. Методики исследований подробно рассмотрены в работе [1].

Анализ полученных результатов показывает, что уже однократное воздействие низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком (рис. 1, а) сопровождается ощутимым изменением микротвердости материала: во-первых, ранее механически однородный образец (кривая 1) становится слоистым с квазипериодическим расположением упрочненных слоев (кривая 2), максимальные значения микротвердости в 1,3–1,45 раза выше микротвердости исходного состояния; во-вторых, среднее значение микротвердости (кривая 3, усреднение проводили полиномом второй степени) возрастает по мере увеличения расстояния x (удаления) от поверхности облучения; в-третьих, минимальные ("фонные") значения микротвердости (кривая 4) достигают наибольшего значения в центральной части образца и также несколько (в 1,1 раза) превышают микротвердость исходного состояния.

Увеличение числа импульсов до десяти (рис. 1, б), качественно не изменяя картины, заметно усиливает эффект квазипериодического упрочнения стали Гадфильда.

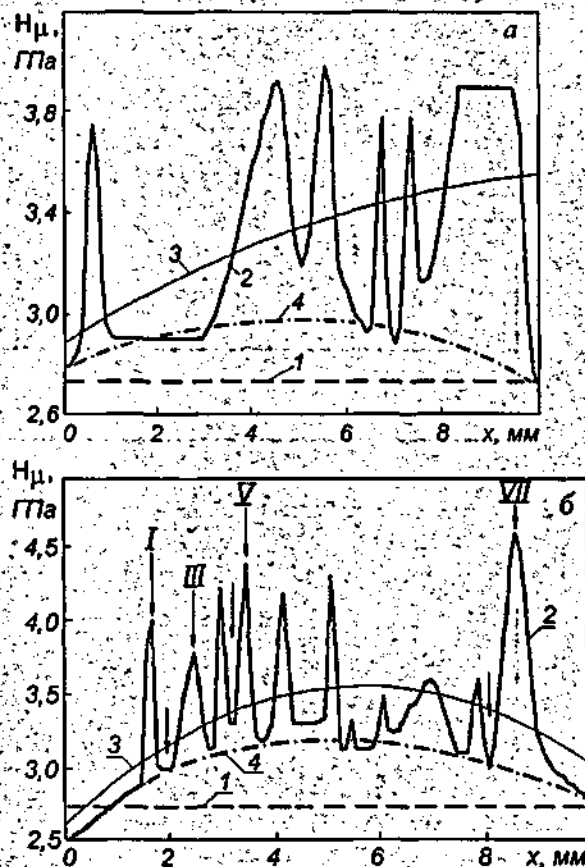


Рис. 1. Зависимость микротвердости стали Гадфильда от расстояния до поверхности облучения:

1 и 2 – в исходном и облученном состояниях; 3 – аппроксимация зависимости микротвердости облученной стали полиномом второй степени; 4 – "фонные" значения микротвердости

Сопоставляя результаты, представленные на рис. 1, а и 1, б, можно отметить, что увеличивается число упрочненных слоев (с шести при $N = 1$ до девяти при $N = 10$); возрастает значение микротвердости в максимумах (выше исходной микротвердости в 1,6–1,7 раза) и минимумах ("фон"). Фонные значения микротвердости нарастают к центру образца, достигая значений, превосходящих исходную микротвердость в 1,2 раза. Аппроксимация зависимости микротвердости от расстояния до поверхности облучения полиномом второй степени показывает, что в процессе импульсной обработки упрочняется практически весь объем образца.

Таким образом, воздействие низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком на сталь Гадфильда приводит к формированию слоев с повышенной микротвердостью по всей глубине материала. В максимумах микротвердости стали превышает ее значения для стали в исходном состоянии в 1,6–1,7 раза.

Исследования фазового состава и дефектной субструктуры выявленных слоев проводили методами дифракционной электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. С этой целью из образца, про-

шедшего многоимпульсную обработку низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком ($N = 10$), были вырезаны тонкие пластинки, параллельные поверхности обработки (области исследования указаны на рис. 1; б стрелками). Характерные электронно-микроскопические изображения дефектной субструктуры указанных областей стали приведены на рис. 2.

Отчетливо видно, что в пиках микротвердости наблюдается хорошо развитая дислокационная субструктура, которую по морфологическому признаку можно

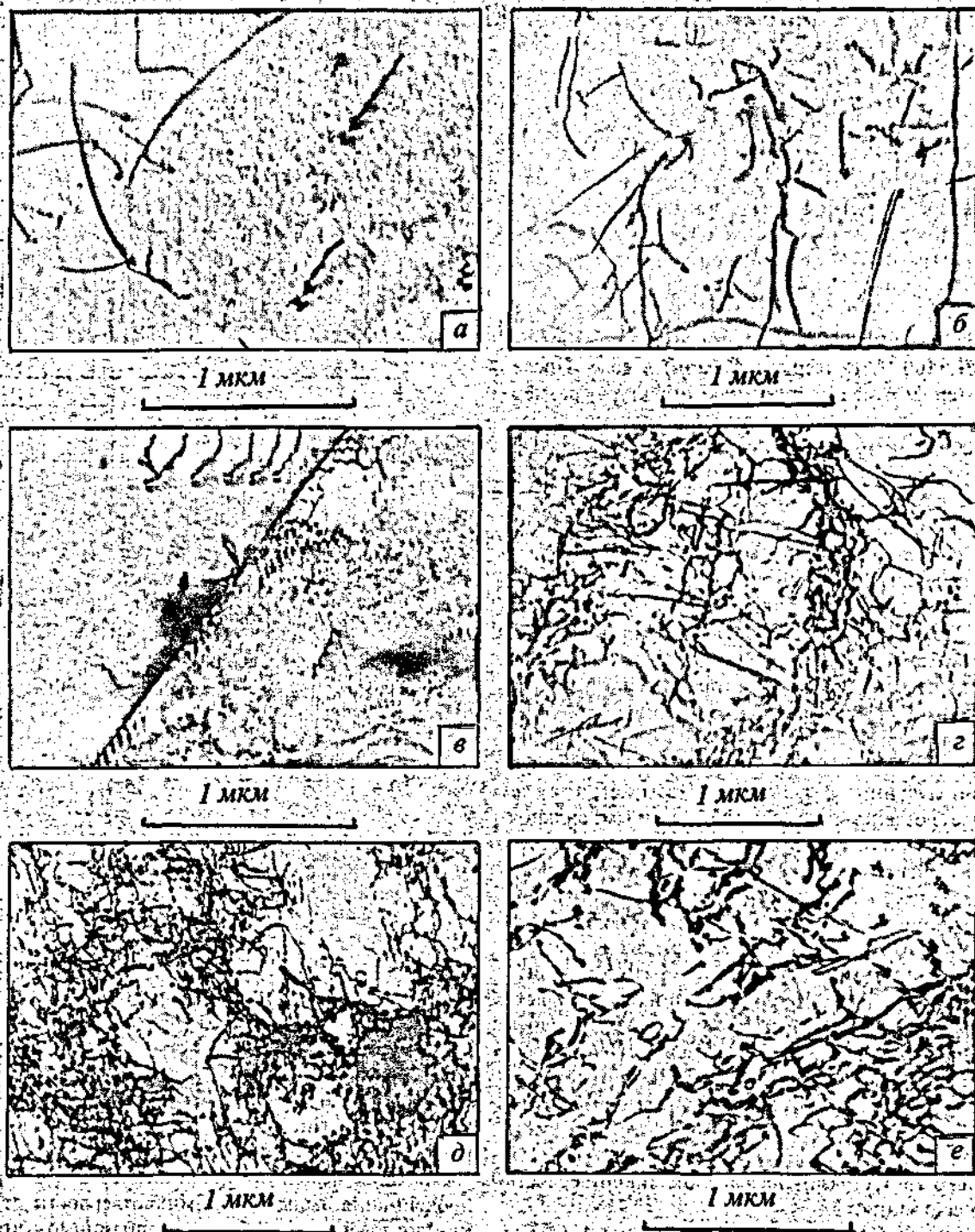


Рис. 2. Дислокационная субструктура в стали Гадфильда в исходном состоянии (а), в области пиков I (б), III (с), V (д) и VII (е), а также между пиками I и III (ф). Номера пиков микротвердости соответствуют рис. 1, б

отности к сетчатой (рис. 2, б, е) и ячеисто-сетчатой (рис. 2, г, д) [4]. В областях стали, расположенных между пиками микротвердости, субструктура представлена дислокационным хаосом (рис. 2, в) и подобна структуре исходного состояния (рис. 2, а). Скалярная плотность ρ дислокаций в максимумах микротвердости достигает $(1,5-2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, что на порядок превышает плотность дислокаций между максимумами микротвердости и в исходном состоянии. Сопоставляя эти результаты с теми, что приведены в работах [5, 6] и получены при исследованиях стали Гадфильда, деформированной в условиях квазистатического растяжения и прокатки, можно заключить, что плотности дислокаций примерно $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответствует степень деформации приблизительно 5%.

Послойный анализ дислокационной субструктуры облученных образцов позволил выявить корреляцию между поведением скалярной плотности дислокаций и значением микротвердости материала (рис. 3, кривая 1).

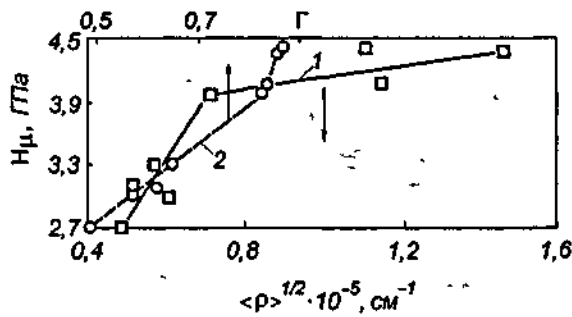


Рис. 3. Связь микротвердости с величиной $\langle \rho \rangle^{1/2}$ (1), а также с шириной дифракционного максимума рефлекса (111) γ -фазы (2) облученной стали Гадфильда

Отчетливо видно, что корреляционная кривая при $H_u \approx 4$ ГПа делится на два участка, различающихся наклоном. Возможная причина немоной зависимости H_u от $\langle \rho \rangle^{1/2}$ была выявлена при послойных рентгеноструктурных исследованиях облученных образцов.

Полагали, что субструктурные превращения в материале находят свое отражение в изменении профиля дифракционных максимумов исходного γ -твердого раствора [7]. Анализировали ширину Γ дифракционного максимума (111) γ -фазы. Представленные на рис. 3 (кри-

вая 2) результаты свидетельствуют о коррелированном изменении данного параметра с ростом микротвердости. В слоях материала, микротвердость которых превышает 4 ГПа, обнаружено $\gamma \rightarrow \epsilon$ мартенситное превращение. При этом с ростом H_u от 4,2 до 4,6 ГПа доля ϵ -фазы увеличивается с 1 до 5%. Сопоставляя поведение кривых 1 и 2 на рис. 3, можно заключить, что мартенситный механизм деформации стали является конкурирующим механизмом пластической деформации путем движения дислокаций – включение мартенситного механизма деформации приводит к снижению скорости накопления дислокаций.

Выводы. Проведенные механические испытания и структурно-фазовые исследования показали, что облучение поликристаллов стали Гадфильда низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком приводит к объемному квазипериодическому упрочнению образцов толщиной примерно 10 мм. Эффект упрочнения усиливается с ростом числа импульсов воздействия в интервале от 1 до 10. Области повышенной микротвердости характеризуются высокой по сравнению с исходным состоянием плотностью дислокаций и присутствием продуктов мартенситного $\gamma \rightarrow \epsilon$ превращения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов Ю.Ф., Гньюсов С.Ф. // Изв. вуз. Физика. 1996. № 8. С. 104–110.
2. Гньюсов С.Ф., Иванов Ю.Ф. // Металлы. 1998. № 5. С. 95–99
3. Иванов Ю.Ф., Гньюсов С.Ф. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 10. С. 59–63.
4. Конева Н.А., Козлов Э.В. // Изв. вуз. Физика. 1982. № 8. С. 3–14
5. Ламбакахар О.О., Паскаль Ю.И. // Изв. вуз. Физика. 1973. №7. С. 26–30.
6. Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Козлов Э.В. – В кн.: Дислокационная и доменная структура и деформационное упрочнение сплавов – Томск: изд. Томского госуниверситета, 1984. С. 72–80.
7. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М: Атомиздат, 1977. – 480 с.

Томский государственный архитектурно-строительный университет. Поступила 24 мая 1999 г.

УДК 669.162.275.142

© 2000 г. В.К. Афанасьев, Г.В. Туева, О.С. Максуюкова, И.М. Лаврова

ОБ АНОМАЛИИ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ДОМЕННОГО ЧУГУНА

Интерес к изучению линейного расширения доменного чугуна [1] обусловлен тем, что до настоящего времени из-за низких механических свойств он не считается перспективным самостоятельным конструкционным материалом. Как правило, специальные свойства (износостойкость, коррозионная стойкость, жаропрочность, магнитные свойства и др.) достигаются за счет большого количества дорогостоящих легирующих элементов [2]. С целью превращения доменного чугуна в высококачественный материал многоцелевого назначения [3], в настоящей работе с помощью дифференциального dilatометра Шевенара определяли коэффициент линейного расширения (α) чугуна после различных видов обработки его расплава. На рис. 1 приведены результаты анализа, необходимого в связи с тем, что отливки получают из чугуна, пребывающего длительное время в одной разогретой емкости.

Из рис. 1, а видно, что выстаивание при обычной для литейного производства температуре $t = 1400^\circ\text{C}$ приводит к появлению аномалии, выражающейся в незначительном увеличении значений коэффициента линейного расширения чугуна при температурах испытания $200 - 300^\circ\text{C}$. Это явление исчезает, если температуру выстаивания расплава снизить до 1300°C (рис. 1, б).

Как правило, выстаивание расплава неизбежно при термоциклировании, необходимом для поддержания температуры заливки. Для изучения влияния термоциклирования проведен эксперимент, заключающийся в разогреве и охлаждении расплава в интервале $1350 - 1550^\circ\text{C}$ и при температуре 1300°C – твердожидкое состояние. Из приведенных на рис. 2 результатов такого эксперимента видно, что высокотемпературная циклическая обработка несмотря на различие в количестве циклов незначительно влияет на коэффициент линейного расширения во всем диапазоне температур испытания (рис. 2, а).

Чем ниже температура циклической обработки, тем более ярко выражена аномалия (рис. 2, б). Один цикл обработки предусматривал нагрев до максимальной температуры, выдержку 15 мин, охлаждение до минимальной температуры и выдержку при ней 15 мин, последующий разогрев до максимальной температуры и заливку в алюминиевый кокиль.

Для придания чугуна нужных свойств часто используется обработка расплава различными веществами, предусматривающая повышение механических свойств за счет изменения объемной доли структурных составляющих. Результаты влияния обработки расплава чугуна при 1400°C свинцовистым силумином А1–20 % Si–1 % Pb в количестве 0,3 % от массы расплава и А1–30 % Si–20 % Pb в количестве 0,6 % от массы расплава

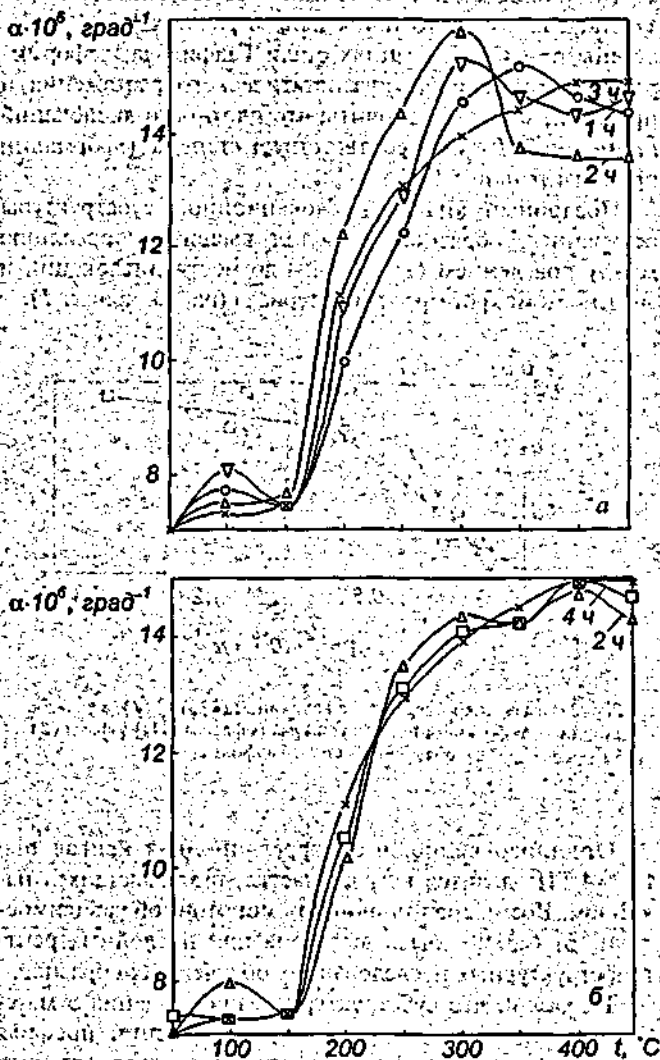


Рис. 1. Влияние времени выстаивания расплава доменного чугуна при 1400°C (а) и 1300°C (б) на его линейное расширение: x – без выстаивания; цифры у кривых – время выстаивания

(рис. 3, а), а также кварцевым песком¹ в количестве 1, 2 и 3 % от массы расплава (цифры у кривых на рис. 3, б) свидетельствуют от том, что аномалия линейного расширения резко усиливается, особенно в случае обработки расплава веществами, содержащими кислород.

¹ Пат. 2130084. Способ термоциклической обработки чугуна / В.К. Афанасьев, М.В. Чибряков, А.Н. Прудников, М.К. Сарлин // Изобретения. 1999. № 13. С. 455.

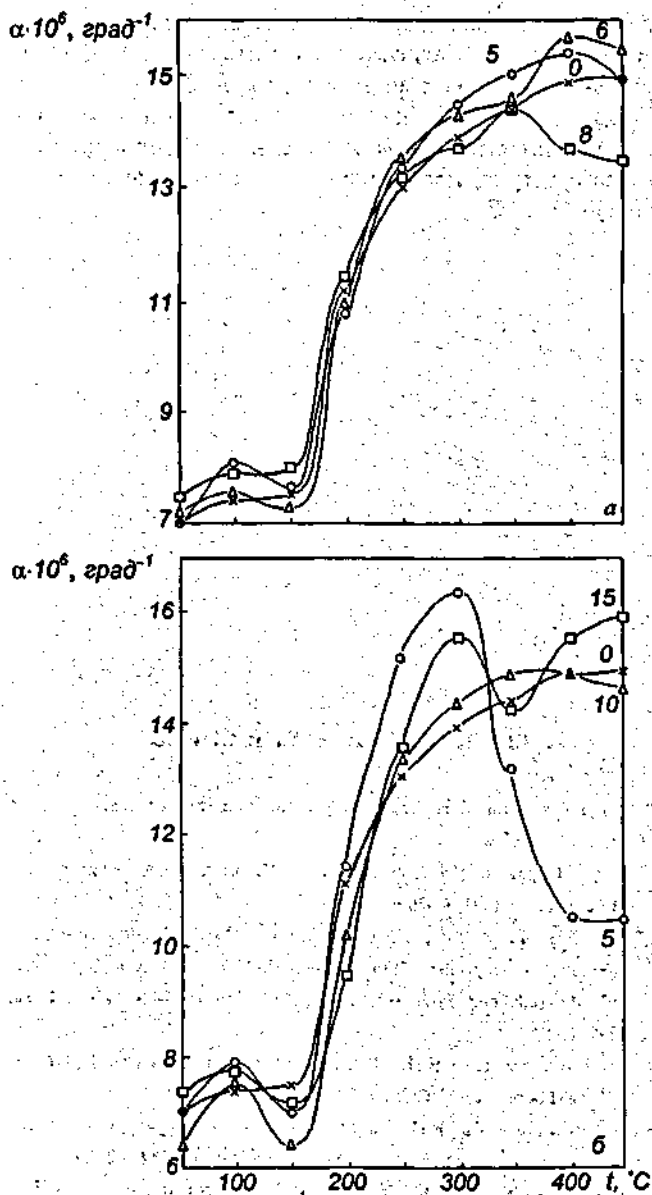


Рис. 2. Влияние циклической обработки расплава в интервале 1350–1550 °С (а) и при 1300 °С (б) на линейное расширение доменного чугуна. Цифры у кривых – число циклов

Для первоначального объяснения этого явления можно привлечь известные [4–6] результаты работ, свидетельствующие о сильном влиянии элементов внедрения, особенно водорода, на свойства чугуна. Ранее [6–8] в этом же температурном интервале было выявлено аномальное поведение коэффициента линейного расширения алюминия и его сплавов. Поскольку оно объяснялось присутствием водорода, в настоящей работе было сделано такое же предположение. С целью его подтверждения для наводороживания расплава чугуна на его поверхность при 1200 °С укладывали восемь тампонов, а при 1400 °С – восемь и три (нижняя кривая) тампонов влажного асбеста (рис. 4, а).

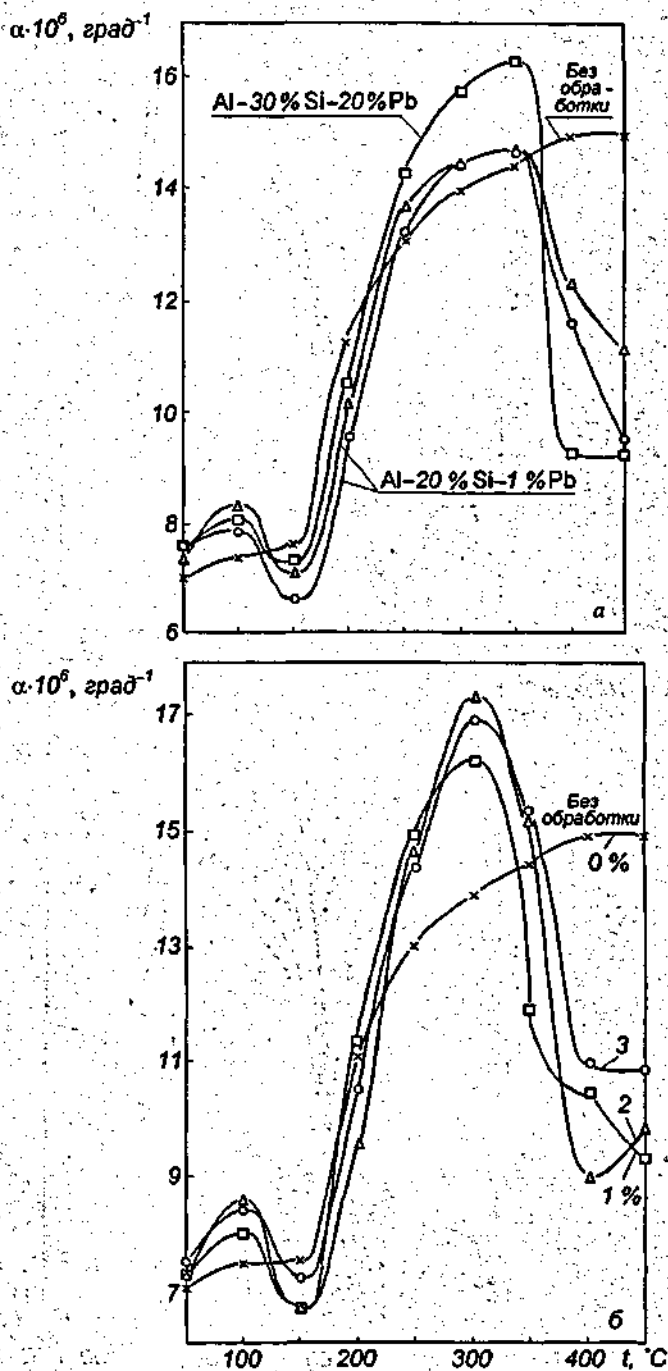


Рис. 3. Влияние обработки расплава свинцовистым силицидом (а) и кварцевым песком (б) на линейное расширение чугуна

Применили и другой метод наводороживания, заключающийся в использовании 5 % шихты, подвергнутой электролитической обработке в 20 %-ной серной кислоте¹ (рис. 4, б). Видно, что эта широко известная и применяемая в литейном производстве обработка расп-

¹ А.с. 527479 СССР. Способ подготовки шихты / В.К. Афанасьев, Н.В. Гришков, В.И. Никитин // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1976. № 33. С. 84.

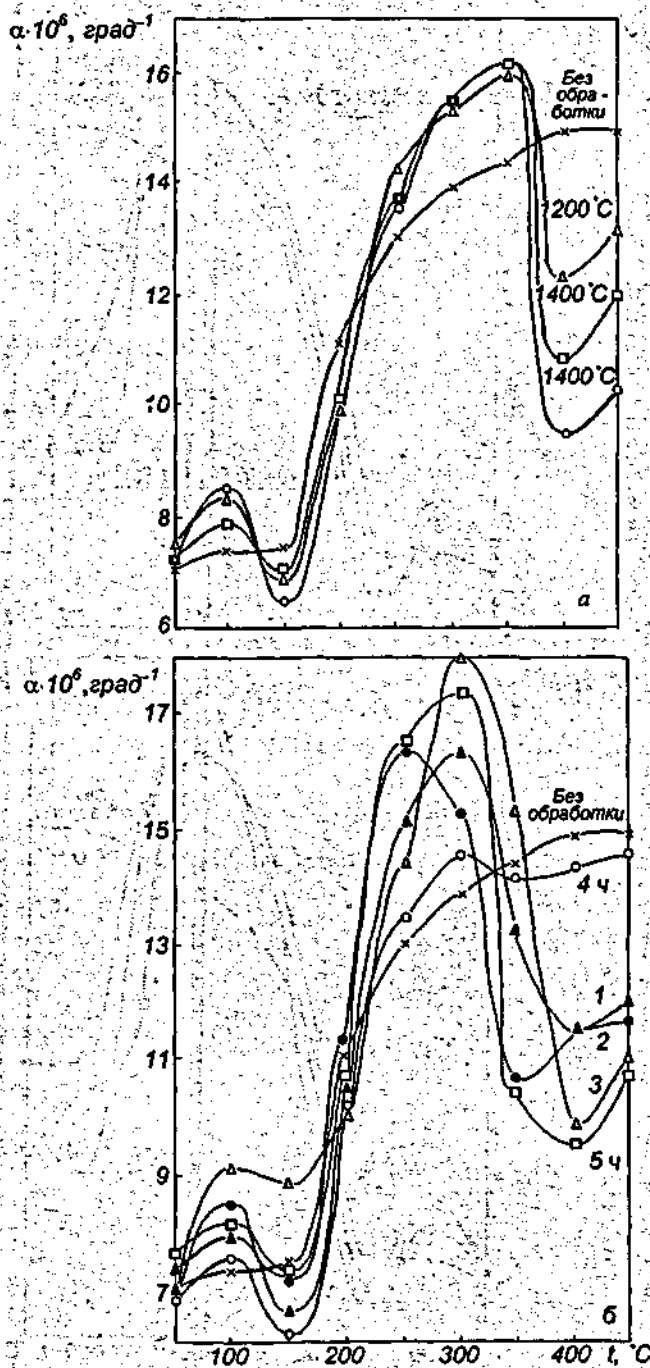


Рис. 4. Влияние наводороживания расплава влажным асбестовым тампоном (а) и электролитического наводороживания шихты (б) на линейное расширение доменного чугуна. Цифры у кривых – время электролитической обработки

лава в наибольшей мере усиливает аномалию, что дает полное основание считать ее в интервале 200–300 °С результатом присутствия водорода в расплаве.

Выводы. Обнаружена обусловленная изменением газонасыщенности аномалия линейного расширения доменного чугуна, проявляющаяся в интервале температур 200–300 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новикова С.Н. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 292 с.
2. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана, А.А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
3. Afanasiev V.K., Chibryakov M.V. – In: Russian-chinese international symposium: "Fundamental Problems of Developing Advanced Materials and Processes of the XXI Century". – Baikalsk: Russia, 1999. P. 199.
4. Лакомский В.И., Явойский В.И. Газы в чугунах. – Киев: Гостехиздат УССР, 1960. – 175 с.
5. Шаповалов В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
6. Афанасьев В.К., Ухов В.Л., Солоненко А.Н. // Изв. АН СССР. Металлы. 1975. № 5. С. 189–191.
7. Прогрессивные способы повышения свойств доменного чугуна / В.К. Афанасьев, Р.С. Айзатулов, Б.А. Кустов, М.В. Чибряков. – Кемерово: Кузбассиздат, 1999. – 258 с.
8. Афанасьев В.К. // ФизХОМ. 1977. № 4. С. 67–75.

Сибирский государственный индустриальный университет. Поступила 31 августа 1999 г.

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.785.6:621.43-242.3.004.62

© 2000 г. О.В. Кудряков, В.И. Овчинников

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ДВИГАТЕЛЯ

Проблема повышения износостойкости поршневых маслоъемных и компрессионных колец для двигателей внутреннего сгорания стоит очень остро прежде всего из-за того, что упрочняющая технологическая операция, являясь заключительной, не должна изменять размеры кольца, его конфигурацию и пружинные свойства. Существующая технология изготовления маслоъемных колец среднего и малого диаметров исключает возможность упрочняющей операции в качестве промежуточной. Это связано с износом обрабатывающего инструмента и, главным образом, со спецификой окончательного размерного шлифования, которое предусматривает чрезвычайно малое поле допуска.

В работе исследовали возможность повышения износостойкости колец методами термоупрочнения, для которых вопрос стабильности размеров является весьма актуальным.

Эксперименты проводили на маслоъемных поршневых кольцах наружным диаметром $D = 76,0$ мм, радиальной толщиной $a = 2,50$ мм и высотой $b = 3,93$ мм. Кольца были изготовлены из отливок перлитного серого чугуна следующего химического состава: 3,14–3,20 % С; 3,10–3,30 % Si; 0,43–0,56 % Mn; 0,06–0,10 % P; не более 0,04 % S; 0,38–0,45 % Ni; 0,36–0,43 % Cu. Исходная микроструктура исследуемых колец показана на рис. 1, а; графит равномерно распределенный, тонкопластинчатый завихренный или хлопьевидный (допускаются включения точечного графита в виде розеток и колоний не более 30 % площади шлифа), металлическая основа – сорбитообразный перлит со следами отбела, фосфидная эвтектика располагается равномерными включениями в виде разорванной сетки.

Технология производства таких колец не предусматривает упрочняющей термообработки, поэтому твердость готовых колец составляет $HV 250-280$.

Поиск оптимальных режимов упрочняющей объемной термической обработки лимитируется жесткими размерными требованиями: поле допуска для размера высоты кольца для заключительной технологической операции – шлифования составляет 15 мкм. Исходя из общеизвестных представлений задача объемного термоупрочнения таких изделий путем непрерывной закалки является нерешаемой, так как по справочным данным при эвтектоидном содержании углерода в металлической матрице увеличение размера высоты кольца в результате закалки должно составлять 1,2 %, т.е. должно превысить поле допуска в три раза.

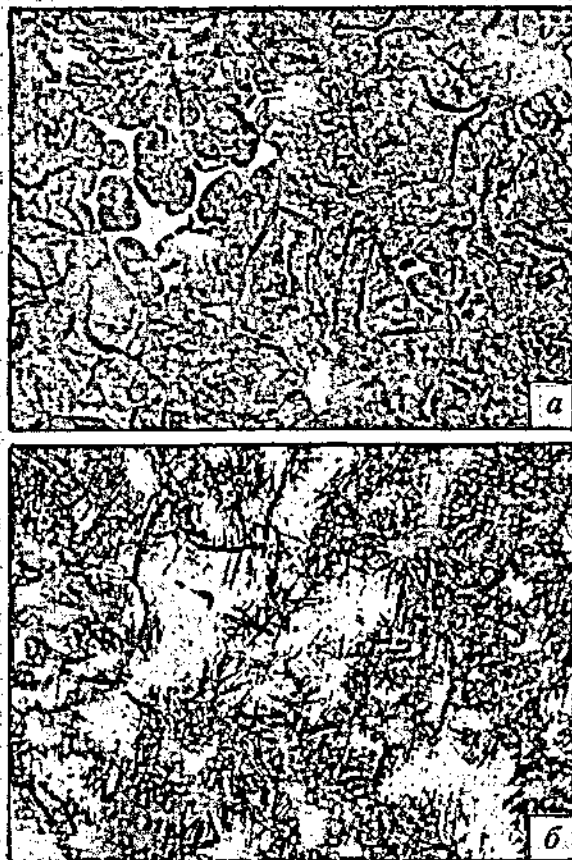


Рис. 1. Микроструктура поршневых колец в исходном состоянии без термообработки, $\times 350$ (а) и после изотермической закалки на бейнит при 300°C , $\times 650$ (б)

Теоретически существует три возможности уменьшения объемных изменений при закалке, а именно: в чугуном изделии металлическую матрицу можно значительно перенасытить углеродом (по сравнению с эвтектоидной концентрацией), что ведет к образованию большого количества остаточного аустенита ($A_{ост}$) в закалочной структуре, на долю мартенсита (M) будет приходиться меньше объема изделия; второй путь – использование магнестрикционного эффекта превращения аустенита в мартенсит; третий – изотермическая закалка на бейнит.

Исследования предусматривали статистическую обработку данных по твердости HV и по размеру высоты

кольца *b*. Твердость измеряли на приборе Виккерса при нагрузке 300 Н, а высоту кольца *b* — на вертикальном длиннере, погрешность которого составляла 1 мкм. Каждая партия состояла из 60 колец. Измерения твердости и высоты кольца проводили до термической обработки и после нее в трех точках. В приводимых экспериментальных данных показаны средние величины твердости *HV* и средняя разность размеров высоты кольца *f* до термообработки и после нее.

Опыты проведены по указанным выше трем направлениям уменьшения размера *b* при объемной закалке, их результаты можно представить и объяснить следующим образом.

1. Нагрев колец осуществляли в соляной ванне при 900–920 °С в течение 1–2 мин, охлаждение проводили в холодном с температурой 20 °С и в горячем с температурой 65 °С индустриальном масле, а затем кольца подвергали отпуску при различных значениях температуры отпуска (*t*_{отп}). Данные измерений представлены ниже:

<i>t</i> _{отп} , °С	0	200	300	400	500
<i>HV</i>	435	413	392	342	281
	459	450	385	330	277
<i>f</i> , мкм	21,2	—	20,1	19,4	—
	24,1	—	21,3	20,8	—

Примечание. В числителе и знаменателе показаны значения при охлаждении в индустриальном масле при температурах 20 и 65 °С.

Закалочная структура металлической матрицы состоит из троостомартенсита и остаточного аустенита. Повышением температуры нагрева под закалку удается насытить металлическую матрицу углеродом, что приводит к большим количествам *A*_{ост} в структуре закалки и снижает увеличение объема с 1,2 (для мартенсита эвтектоидной концентрации) до 0,5 %. По-видимому, в это сокращение объемного расширения вносит свой вклад и "мягкая" охлаждающая среда. При охлаждении в холодном масле содержание *A*_{ост} выше, чем при охлаждении в горячем масле. Об этом говорят значения *HV* и *f* для свежезакаленных колец при *t*_{отп} = 0 °С. При медленном охлаждении большее количество *A*_{ост} успевает участвовать в превращениях.

Отпуск несколько снижает значения *f* за счет распада мартенсита, однако это снижение выглядит несоизмеримым с уровнем падения твердости. Так, при *t*_{отп} = 400 °С твердость достигает предельно допустимых для упрочнения минимальных значений, а при *t*_{отп} = 500 °С становится равной твердости до закалки.

Главной особенностью этих режимов термоупрочнения оказывается нестабильность объемных изменений колец. Статистическая обработка данных показывает, что исследуемый метод не обеспечивает обычно приемлемый в машиностроении уровень надежности ($\sigma = 0,05$ и $P = 0,95$): почти половина значений не соответствует критерию Стьюдента. На основании этого следует заключить, что для таких ажурных изделий, как поршневые кольца, непрерывная закалка с последующим отпуском не может быть рекомендована в качестве упрочняющей технологии.

2. Попытка уменьшить объемные изменения колец за счет явления магнитострикции основана на материале работ ряда авторов [1, 2]. Основная мысль этой методики состоит в том, что магнитострикцию (уменьшение объема в результате потери магнитных свойств) в сталях можно наблюдать только в небольшом температурном интервале выше точки магнитных превращений. Поиск этого температурного интервала и посвящены проведенные исследования.

Экспериментальные кольца нагревали под закалку до температуры закалки *t*_{зак} в соляной ванне в течение 1–2 мин, охлаждали в холодном масле при температуре 20 °С. При этом получены следующие данные:

<i>t</i> _{зак} , °С	840	860	880	900
<i>HV</i>	266	343	414	453
<i>f</i> , мкм	7,7	18,9	19,7	21,1

Из приведенных данных следует, что при нагреве до температуры 840 °С закалки не происходит, уровень твердости не меняется. При закалке с более высоких температур магнитострикционный эффект либо не обнаруживается вообще, либо оказывается совершенно незначительным по сравнению с объемными изменениями в результате фазовых превращений.

Таким образом, и второе направление исследований не принесло результатов, которые могут быть использованы в практике термической обработки для стабилизации размеров поршневых колец.

3. Изотермическая закалка на бейнит. Целью экспериментов этого направления является поиск оптимальной температуры изотермической выдержки, так как остальные параметры режима закалки определены на предыдущих стадиях работы: нагрев под закалку в соляной ванне при 900–920 °С в течение 1–2 мин. Для экспериментов были подготовлены закалочные ванны из расплава щелочей КОН и NaOH в различных пропорциях, обеспечивающих устойчивую температуру изотермической выдержки (*t*_б). Получены следующие результаты:

<i>t</i> _б , °С	220	250	280	320
<i>HV</i>	454	458	364	351
<i>f</i> , мкм	20,8	18,3	9,6	6,6

Эти данные свидетельствуют о том, что бейнитное превращение возможно в пределах 270–330 °С. С точки зрения стабилизации размеров изделия более предпочтительной оказывается верхняя часть указанного интервала 300–320 °С. По мере снижения средних значений параметра *f* более стабильным становится соответствие значений *f* статистическим критериям оценки, что обеспечивает принятый уровень надежности $P = 0,95$. Это позволяет с достаточной уверенностью корректировать технологические припуски на 6–8 мкм, обеспечивая повышение твердости колец на *HV* 60–100 (5–10 HRC) по сравнению с термически необработанными. Одним из косвенных фактов, говорящих в пользу закалки при 300–320 °С, может служить также уменьшение количества остаточного аустенита с 20,2 % при

280 °С до 10,7 % при 320 °С. Дальнейшее повышение температуры изотермической закалки нецелесообразно, так как уровень твердости при этом постепенно снижается, а статистические отклонения размеров высоты кольца f не опускаются ниже 5–6 мкм.

Итак, как и следовало ожидать, объемная термическая обработка в любом виде с повышением твердости ведет к изменению (увеличению) размеров изделия в результате фазовых превращений. Правильный выбор параметров изотермической закалки позволяет оптимизировать сочетание твердости (не менее $HV 340$) и увеличения размеров (0,15–0,20 %) колец. При этом обеспечивается удовлетворительная стабильность результатов. Структура металлической матрицы чугуна после изотермической закалки по оптимальным режимам представляет собой мелкоигольчатый бейнит и 10–15 % остаточного аустенита (рис. 1, б).

Непрерывной закалкой с последующим отпуском подобной оптимизации твердости и размерной точности добиться не удастся. Кроме того, большое увеличение размеров (0,5 %) имеет очень нестабильный характер статистического распределения и не может гарантировать высокий уровень надежности результатов. Таким образом, в качестве технологической операции объемного термоупрочнения поршневых колец можно рекомендовать только изотермическую закалку на бейнит по указанному выше оптимальному режиму, которая позволяет повысить срок службы колец в 1,84 раза по сравнению с термически необработанными (данные стендовых испытаний).

Несмотря на полученное существенное повышение износостойкости, изотермическая закалка на бейнит в силу известных причин (ухудшение экологии, нестабильность закалочных растворов, повышение себестоимости изделий) не всегда устраивает производителей. Кроме того, сохраняющаяся необходимость корректировки припусков на механическую обработку также вызывает у производителя скепсис. Эти обстоятельства подводят к необходимости применения для поршневых колец двигателя поверхностной термоупрочняющей технологии. При этом фазовые превращения испытывает лишь небольшой слой изделия. При лазерной обработке упрочненный слой обычно находится в пределах 50–100 мкм. Такая глубина испытывающего фазовые превращения слоя не может дать заметного коробления кольца или изменить его пружинные свойства, а объемные изменения составят не более 1–2 мкм.

У масляеъемных поршневых колец износу под действием трения о внутреннюю поверхность цилиндра двигателя подвергаются только наружные масляеъемные буртики кольца. Поэтому упрочнению следует подвергать только эти трущиеся поверхности. Схема лазерного облучения приведена на рис. 2.

Термоупрочнение осуществляли на лазерной технологической установке "Квант-16" в автоматическом импульсном режиме со следующими параметрами: длительность импульса 3–7 мс, энергия излучения $E = 15 - 20$ Дж, diam. пятна $d = 2 - 4$ мм, коэффициент перекрытия пятен $(0,3 - 0,5)d$, удельная поверхностная энергия $q = 20 - 36$ кДж/см², скорость обработки 10–50 имп./мин.

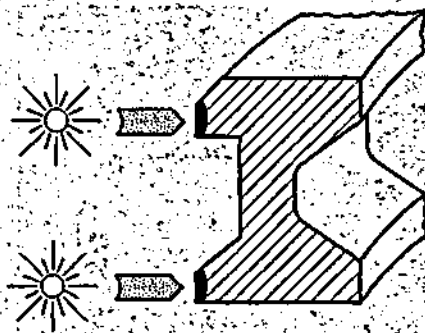


Рис. 2. Схема лазерной обработки поршневых масляеъемных колец

Эффект поверхностного упрочнения наглядно демонстрируется разницей в отпечатках уколов микротвердости (рис. 3).

Хорошо просматривается и глубина упрочненного слоя h , которая в общем случае составляет 40–200 мкм (при глубине обработки более 80 мкм появляется оплавление поверхности).

Прирост микротвердости после лазерного воздействия составляет 2400–5400 МПа (измерения проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г), а значение твердости упрочненной поверхности находится на уровне $HV 540 - 700$. Верхний предел твердости достигается в случае, когда удастся растворить графитные включения. Ощутимый эффект упрочнения наблюдается практически при любых режимах лазерной обработки. Однако глубина закалки менее 40 мкм неэффективна, так как такой слой легко выкрашивается при трении, особенно при шероховатой поверхности. С другой стороны, режимы обработки, дающие оплавление поверхности, для облучения поршневых колец не подходят, так как дают чрезвычайно разветвленный рельеф поверхности (рис. 3, а), а с ним и большую шероховатость, что неприемлемо для поршневых колец. Таким образом, эффективные режимы лазерного упрочнения поршневых масляеъемных колец должны быть ограничены глубиной закалки 40–80 мкм.

Микроструктура зоны лазерного воздействия в сером чугуне отличается большой неоднородностью (рис. 3, б), наблюдается чередование светлых и темных участков. Это следствие того, что на разном расстоянии от графитных включений металлическая матрица насыщается углеродом до разного уровня. Наибольшее насыщение происходит на участках рядом с графитом, где по достижении эвтектической концентрации возможно микрооплавление матрицы. По мере удаления от графитного включения насыщенность матрицы углеродом меняется, на этом пути можно наблюдать целый ряд структур: аустенитоцементитную, аустенитомартенситную, мартенситную и троостомартенситную. Существенный вклад в наблюдаемую структурную гетерогенность вносит присутствие в исходной металлической матрице элементов отбела — эвтектического ледебурита и цементита.

В условиях многофазности и сверхвысоких скоростей лазерного нагрева фазовые переходы и структурные



Рис. 3. Микроструктура поверхностных слоев поршневых колец после лазерного облучения:
 а - с оплавлением по режиму $L = 10$, $E = 19,5$ Дж при глубине слоя 140 мкм (слабое травление), $\times 250$; б - без оплавления по режиму $L = 25$ и $E = 19,5$ Дж при глубине слоя 50 мкм (стандартный реактив с добавками $FeCl_3$ при температуре 70 °С), $\times 400$; в - без оплавления по режиму $L = 20$ и $E = 16,5$ Дж при глубине слоя 70 мкм (стандартное травление 4 %-ным спиртовым раствором HNO_3 при температуре 20 °С) $\times 400$

трансформации становятся существенно неравновесными. Основной движущей силой этих процессов являются дефекты кристаллического строения. Механизмы их взаимодействия определяют специфику массопереноса, организованного по законам синергетики [3-5]. Одним из таких механизмов является "контактное плавление", способное создавать непрерывный структурный ряд в зоне лазерного воздействия без формирования четких межфазных границ, которые выявлялись бы травлением (белый слой на рис. 3, а).

Исходные структурная и химическая неоднородности являются причиной формирования крайне неровной (по сравнению, например, со стальными изделиями) границы между исходным металлом и зоной лазерного воздействия.

Обобщить результаты проведенных исследований можно в виде номограммы параметров лазерного облучения поршневых маслосъемных колец из серого чугуна, приведенной на рис. 4.

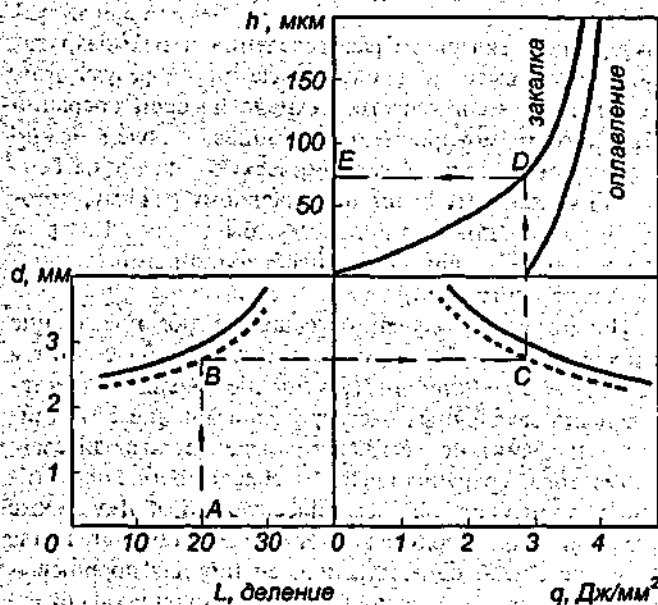


Рис. 4. Номограмма выбора режимов лазерного термоупрочнения поршневых колец и определения глубины зоны лазерного воздействия при $E = 16,5$ Дж (---) и $E = 19,5$ Дж (—)

Номограмма оптимизирует выбор режимов лазерного термоупрочнения поршневых колец: задаваясь лишь значениями энергии излучения E и количеством делений лимба барабана оптической головки лазера L , можно определить диаметр пятна d , удельную энергию q и, главное, глубину заделки $h_{зак}$. Таким образом, по номограмме можно определить, будет ли поверхность изделия оплавлена и какой величины получится упрочненный слой.

Ломаная линия $ABCDE$ на рис. 4 представляет собой пример пользования номограммой и предлагает режим термоупрочнения без оплавления поверхности со следующими параметрами: $E = 16,5$ Дж; $L = 20$ делений; $d = 2,7$ мм; $q = 2,84$ Дж/мм²; $h_{зак} = 70$ мкм; $h_{опл} = 0$.

Критическое значение удельной энергии, которое является границей между оплавлением и закалкой, составляет $2,9 \text{ Дж/мм}^2$. Интервал режимов лазерного термоупрочнения поршневых маслосъемных колец оказывается достаточно узким и заключен в промежутке глубиной заковки $40-80 \text{ мкм}$, что соответствует удельной поверхностной энергии облучения $2,0-2,9 \text{ Дж/мм}^2$. Предпочтение следует отдавать режимам с более высокой удельной энергией, дающим большую твердость и глубину упрочненного слоя.

По данным стендовых испытаний поршневых колец, подвергнутых лазерной обработке по режиму *ABCDE* номограммы (рис. 4), увеличение их срока службы составило 1,91 раза по сравнению с термически необработанными.

Выводы. Исследованы возможности повышения износостойкости поршневых колец путем объемной и поверхностной термообработок. Непрерывная объемная закалка поршневых колец с последующим отпуском не обеспечивает стабильности размерных изменений, что не дает возможности надежно корректировать технологические размерные припуски. Изотермическая закалка на бейнит при температурах $300-320 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивает твердость колец с $250-280 \text{ HV}$ и обеспечивает стабильное изменение размеров на $0,15-0,20 \%$. Это существенно повышает износостойкость колец и

позволяет вносить гарантированные размерные корректировки в технологию их производства. Лазерное упрочнение поршневых колец с оплавлением поверхности недопустимо, поэтому эффективная глубина лазерной заковки лежит в пределах $40-80 \text{ мкм}$. Этот параметр определяет технологические режимы упрочнения, обобщенные в номограмме. Стендовые испытания показали близкие значения износостойкости поршневых колец, упрочненных изотермической закалкой на бейнит и лазерным облучением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. - М.: Металлургия, 1983. - 528 с.
2. Геллер Ю.А., Моисеев В.Ф., Арутюнян С.Б. // Метод. 1974. № 1. С. 4-10.
3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 206 с.
4. Хакен Г. Синергетика. - М.: Мир, 1980. - 240 с.
5. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. - М.: Наука, 1992. - 159 с.

Донской государственный технический университет. Поступила 25 ноября 1999 г.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746.4

2000 г. А.Ф. Милев, Ж.В. Киктева

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ НА ЗАПОЛНЯЕМОСТЬ ФОРМ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК

Технологический процесс получения тонкостенных отливок с развитой горизонтальной поверхностью осложняется проблемой заполнения полости минимального сечения. Понятие тонкостенной отливки включает в себя определенное соотношение геометрических размеров (длины L и толщины δ отливки), скорости подъема металла в полости формы v_2 и скорости движения фронта кристаллизации по толщине отливки $v_{кр}$. Исходя из положения, что полость формы может быть заполнена металлом при условии $L/v_2 < \delta/v_{кр}$, степень тонкостенности отливки можно выразить соотношением $Lv_{кр}/\delta v_2 < 1$.

Характерной особенностью процесса заполнения литейных форм тонкостенных отливок является его кратковременность. Заполнение горизонтальной поверхности формы происходит в этом случае открытым потоком, покрывающим только нижнюю часть полости. Затем открытый поток поднимается до соприкосновения с верхней поверхностью формы, закрытым потоком завершая заполнение полости. При этом существенно меняются условия охлаждения потоков расплава. В процессе заполнения горизонтальной полости формы тонкостенной отливки благодаря интенсивному теплоотводу от потока расплава и его небольшому теплосодержанию перегрев расплава практически теряется к моменту окончания процесса заполнения. Качественное заполнение тонкостенной отливки гарантируется отсутствием намораживания твердой фазы, кристаллизующейся на стенках формы в процессе движения расплава.

В общем случае заполняемость форм тонкостенных отливок характеризуется степенью завершенности этого процесса. Заполняемость является результатом совместного действия ряда факторов: гидродинамических и тепловых условий течения расплава и его свойств. Интенсивность теплообмена в литейной форме зависит в первую очередь от свойств материала формовочной смеси, является определяющей в создании благоприятных тепловых условий течения расплава.

Влияние теплофизических характеристик материала формовочной смеси на заполняемость форм тонкостенных отливок расплавом серого чугуна оценивали по залитым образцам различной толщины 2, 4, 6, 8, 10 и 12 мм в формах из различных смесей. Песчано-глинистая формовочная смесь (Ф1) содержала 90 % кварцевого песка, 10 % глины. Влажность смеси составляла 4-6%. Быстротвердеющая смесь (Б1), отверждаемая по CO_2 -

процессу, содержала 94 % кварцевого песка и 6 % жидкого стекла. Модуль жидкого стекла $SiO_2/Na_2O - 2,8$, плотность $1,50 \text{ г/см}^3$. Состав быстротвердеющей смеси, отверждаемой по CO_2 -процессу, на основе шамотного порошка (Ш1): 94 % шамотного порошка, 6 % жидкого стекла. Плотность жидкого стекла $1,53 \text{ г/см}^3$, модуль $SiO_2/Na_2O - 3,0$.

Контроль температуры заливаемого металла осуществляли с помощью термопары при выпуске металла из печи. Ниже представлены значения теплофизических характеристик¹ исследуемых формовочных смесей:

Смесь	Теплофизические характеристики		
	λ_{ϕ} , Вт/(м·К)	c_{ϕ} , Дж/(кг·К)	b_{ϕ} , Вт·с ^{1/2} /(м ² ·К)
Ф1	1,28	1080	1510
Б1	1,08	1280	1487
Ш1	0,32	1200	807

Примечание. λ_{ϕ} , c_{ϕ} и b_{ϕ} - теплопроводность, теплоемкость и теплоаккумуляция формовочной смеси.

Заполняемость залитых образцов оценивали по следующим геометрическим параметрам: длина L , ширина B и площадь S образца. На рис. 1 представлены зависимости изменения длины и ширины залитых образцов от их толщины в формах из различных смесей.

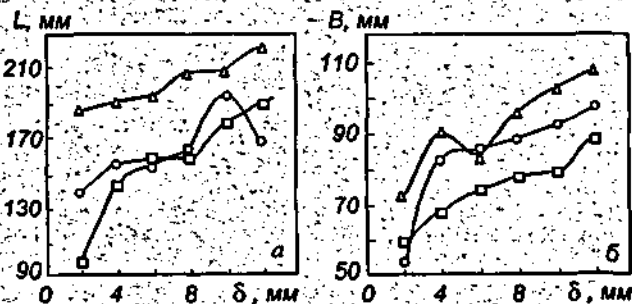


Рис. 1. Изменение длины (а) и ширины (б) образцов, полученных в формах исследуемых составов.

○ и Δ - быстротвердеющая смесь, отверждаемая по CO_2 -процессу на основе песка и шамота; □ - песчано-глинистая смесь

¹ Чистяков В.В. Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. - М.: Машиностроение, 1990. - 224 с.

Длина образца в 1,5–1,7 раза больше его ширины, т.е. очевидна направленность заполнения полости формы тонкостенной отливки. Наибольшие значения длины и ширины отливки получены при литье в шамотную форму.

В начальный промежуток времени расплав чугуна движется сплошным фронтом, но с течением времени конфигурация фронта потока изменяется, образуются отдельные языки-протоки, которые устремляются в глубь формы (рис. 2).

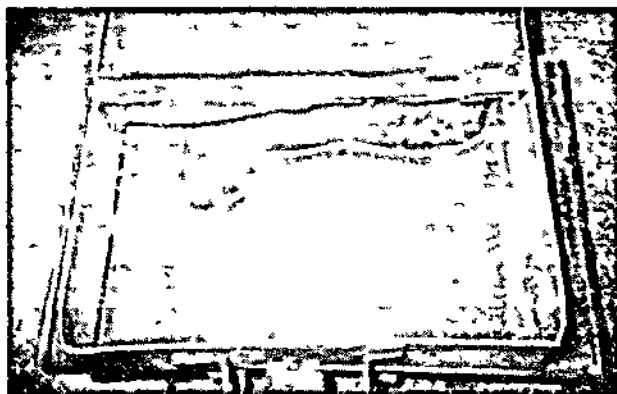


Рис 2 Заполнение полости формы тонкостенной отливки расплавом чугуна

Образование такого протока обуславливается достаточным запасом теплоты в расплаве. Изменение конфигурации фронта потока характеризуется температурным перепадом по его сечению, в результате чего основные части расплава охлаждаются и происходит их остановка. Чем выше скорость теплоотвода формы, тем быстрее происходит остановка расплава.

Теснота связи в уравнениях характеризуется коэффициентом корреляции R .

На основе статистической обработки результатов исследований получены следующие уравнения регрессии, описывающие влияние теплофизических характеристик материала формы на их заполнение при $\delta = 2$ мм:

$$\left. \begin{aligned} L &= 215,52 - 83,86 \lambda_{\phi} & R &= 0,96; \\ L &= 128,27 + 0,03 c_{\phi} & R &= 0,94; \\ L &= 266,59 - 0,09 b_{\phi} & R &= 0,92; \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} B &= 76,67 - 16,65 \lambda_{\phi} & R &= 0,96; \\ B &= 14,08 + 0,05 c_{\phi} & R &= 0,94; \\ B &= 90,69 - 0,02 b_{\phi} & R &= 0,92. \end{aligned} \right\} (2)$$

Из анализа уравнений следует несколько выводов. С увеличением теплопроводности и теплоаккумуляции материала формы заполнение полости ухудшается, о чем свидетельствуют отрицательные значения коэффициентов при переменных в соответствующих уравне-

ниях. Большие значения свободных членов в уравнениях регрессии, описывающих изменение длины заполнения по сравнению с шириной, подтверждают идею о направленности продвижения расплава в продольном направлении. Об этом говорит и отношение длины образца к его ширине. Так, для форм из смесей Б1 и Ш1 отношения длины к ширине составляют 2,5, и лишь для смеси Ф1 – 1,7. При увеличении толщины отливки эти отношения остаются больше 2,0, но несколько снижаются.

С увеличением толщины образца характер заполнения формы изменяется. При этом снижается влияние теплопроводности смеси на длину потока и возрастает ее влияние на ширину. Это видно по эмпирическим уравнениям изменения длины и ширины образцов от теплопроводности при разной толщине образца, а именно:

при $\delta = 4$ мм

$$\left. \begin{aligned} L &= 205,92 - 48,7 \lambda_{\phi} & R &= 0,98; \\ B &= 96,91 - 18,7 \lambda_{\phi} & R &= 0,98; \end{aligned} \right\} (3)$$

при $\delta = 10$ мм

$$\left. \begin{aligned} L &= 217,65 - 28,1 \lambda_{\phi} & R &= 0,96; \\ B &= 124,3 - 22,46 \lambda_{\phi} & R &= 0,96. \end{aligned} \right\} (4)$$

Сравнение коэффициентов при переменной теплопроводности в уравнениях (1–4) показывает, что в уравнениях длины по мере увеличения толщины образца происходит снижение коэффициентов и весьма значительное: для толщины 4 мм в 1,7 раза, а для толщины 10 мм в 3,0 раза. Поэтому получение протяженных тонкостенных отливок в формах с высокой теплопроводностью затруднено, их можно получать в шамотных или других формах с низкой теплопроводностью смесей.

В уравнениях ширины образца с увеличением толщины стенки отмечается увеличение коэффициента при переменной, но не столь значительное, как снижение коэффициентов в уравнениях длины образца. Увеличение коэффициентов в уравнениях ширины и длины образца составляет 1,10 и 1,35 раза.

Следует отметить, что абсолютные значения коэффициентов при теплопроводности для длины и ширины образца по мере роста толщины сближаются. При толщине в 2 мм отличие составляло 5,00, при толщине 4 мм – 2,60, а при толщине 10 мм – 1,25.

Многофакторные уравнения регрессии, отражающие влияние толщины образца, теплопроводности и теплоемкости материала формы на параметры ее заполнения имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} L &= 292 - 10,55 \lambda_{\phi} + 0,05 c_{\phi} + 1,57 \delta - 0,06 \lambda_{\phi} \delta & \text{при } R &= 0,89; \\ B &= 119,5 - 13,71 \lambda_{\phi} + 0,05 c_{\phi} + 2,92 \delta - 0,07 \lambda_{\phi} \delta & \text{при } R &= 0,89 \end{aligned} \right\} (5)$$

Проточность заполнения полости литейной формы вдоль длинной стороны панели следует из анализа уравнений регрессии (5), она обуславливается высокими значениями свободного члена в уравнении длины образца. Одинаковые и низкие значения коэффициентов при теплоемкости в обоих уравнениях указывают на незначительное влияние данной теплофизической характеристики на параметры заполнения формы.

Выводы. Установлено, что вследствие кратковременности процесса заполнения форм тонкостенных отливок определяющее влияние на остановку потока расплава оказывает теплопроводность материала формы. В случае затруднений с заполняемостью форм для практического применения рекомендуется использовать шамотную облицовку форм тонкостенных отливок. При увеличении толщины стенки отливки до 10 мм и более влияние теплопроводности материала формы на заполняемость существенно снижается и становится не так заметно, как при толщине 2 и 4 мм.

Магнитогорский государственный технический университет. Поступила 15 декабря 1999 г.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ, ПРОЖИВАЮЩИХ ЗА РУБЕЖОМ!

**ВЫ МОЖЕТЕ ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ НА ДАННОЕ ИЗДАНИЕ
ПО КАТАЛОГУ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»**

«RUSSIAN NEWSPAPERS & MAGAZINES-2001».

Тел.: /007 095/ 195 6677, 195 6418

Факс: /007 095/ 195 1431, 785 1470

E-mail: ovs@rosp.ru

Web site at <http://www.rosp.ru>

ATTENTION OF FOREIGN SUBSCRIBERS!

**YOU CAN SUBSCRIBE TO THIS EDITION
THROUGH THE «ROSPCHAT» AGENCY CATALOGUE**

«RUSSIAN NEWSPAPERS & MAGAZINES-2001».

Phone: /007 095/ 195 6677, 195 6418

Fax: /007 095/ 195 1431, 785 1470

E-mail: ovs@rosp.ru

Web site at <http://www.rosp.ru>

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.01

© 2000 г. В.К. Афанасьев

НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТАЛЛУРГИИ¹

Часть I—XX век

Планета Земля — ничтожно малая частица космоса, полностью подчиняющаяся его законам. Волевым поведением человека вопреки законам космоса (предполагается, что это было не раз) гибельно для цивилизации.

Один из больших видов деятельности человека — современная металлургия. Глазами металлурга планета Земля — это крупногабаритная шарообразная отливка, кристаллизующаяся в условиях $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении $1,3 \cdot 10^{18}$ Па. Можно считать, что пока застыла очень малая часть отливки, образовав так называемую земную твердь; выделившиеся при кристаллизации газы, удерживаемые магнитным полем Земли, составляют ее атмосферу. При таком допущении следует полагать, что "земная твердь", расположенная на "земной жидкости", представляет собой первичный шлак, не созданный человеком, а являющийся продуктом жизнедеятельности окружающего нас, но от нас независимого материального мира. Геологами, петрографами, археологами и др. "первичные шлаки" разделены на два вида:

— те, из которых можно извлечь нужный человеку элемент, называются рудой;

— те, которые не являются для людей предметом производственного интереса, называются пустой породой.

Накопленный опыт изучения химического состава земных первичных шлаков позволяет сделать главное заключение — это азотокислородные соединения с подавляюще малым содержанием водорода. Водород, выделяющийся при кристаллизации земной жидкости, удаляется в космос и пополняет запасы межзвездного газа, и уже на высоте 100 км атмосфера Земли почти полностью состоит из водорода [1, 2].

Металлургия многие века получает необходимые человеку металлы с помощью единственно возможного способа — восстановления естественных шлаков до металлического состояния потерянными ими же водородом. Присутствие его в качестве основного восстановителя зачастую завуалировано: например, получение железных сплавов (чугуна, стали) предполагает наличие кальция, который имеет большое средство к водороду; все электролизные процессы получения металлов предусматривают осаждение их на концентрирующем водород катоды и т.д. Практически происходит так, что для получения монолитного металлического состояния

нужного вещества в него вновь вводят водород, поскольку монолитное состояние вещества — это его соединения с элементами H—N—O .

Общепринятый путь получения металлов повторяет природные процессы: дегазацию расплава при выстывании, всплывание на поверхность сопутствующих элементов и их соединений, т.е. образование шлака. Такой шлак, являющийся делом рук человека, называется вторичным. В сознании металлурга укрепилась основная подавляющая мысль — такой шлак надо отправлять в отвал как не пригодный для дальнейшего получения металлов. Таким образом на поверхности земли накопилось большое количество отходов металлургического производства, которые оказывают очень вредное влияние на экологию, сокращая жизненное пространство. Попытки переработки и полезного применения вторичных шлаков в деятельности металлургов весьма скромны и часто вредны (например, использование шлакобетонов). Во вторичных шлаках, полученных грубо и практически мгновенно по сравнению с первичными, формировавшимися в течение сотен и тысяч лет, не успевают пройти разделительные процессы, и поэтому концентрация вредных элементов (галогенов, элементов группы серы и фосфора) в них гораздо больше.

Итак, многомиллионные "запасы" вторичных шлаков на поверхности Земли — это первое преступление человека перед окружающей нас природой. А если учесть образование побочного продукта металлургического производства — отходов военной и "мирной" атомной энергетики, — складирование в сухих и водных участках Земли продуктов разложения радиоактивных элементов, дороговизну и малоперспективность создаваемых технологий переработки отходов технической деятельности человека, то перспективы вырисовываются далеко не радужные.

С глубокой древности известно, что чистый металл имеет низкие свойства по сравнению со сплавом. "Бронзовый" век предшествовал "железному", который длится уже много веков. Затем появилась технология легирования, предусматривающая введение в металлическую основу всех доступных элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Усложнение химического состава сплавов часто не позволяет достигнуть поставленной цели, но оно упорно применяется и причем в расширяющихся масштабах. Это влечет за собой резкое повышение стоимости металлических изделий.

Свойства же многих сплавов и способы их получения, экспериментально подобранные в XIX и начале

¹ В порядке обсуждения.

XX века, остались лучшими, чем у сплавов, разработанных впоследствии. Примером этому могут служить нержавеющая сталь 18-8, сталь Гадфильда, быстрорежущая сталь, магнитные материалы и многое другое. На примере получения таких материалов следовало бы ожидать создания рабочей теории легирования, которая позволила бы упростить, удешевить, оптимизировать составы сплавов и повысить их свойства. Однако этого не случилось, и, к сожалению, до сих пор создание новых сплавов, как и сотню лет назад, происходит методом проб и ошибок. Практика же легирования и увеличение объема производства металлов и сплавов потребовали разработки новых месторождений, строительства заводов (в том числе и ферросплавных), новых электростанций для электролиза и прочего. Все это привело к резкому повышению стоимости изделий и ухудшению экологической обстановки и, что самое главное, не дало возможности создать новые металлические материалы со "сверхсвойствами". К настоящему моменту развития цивилизации нет материалов дешевых и доступных для создания принципиально новых устройств, несмотря на выдающиеся достижения конструкторской мысли. Наибольшее достижение металлургии XX века – космические материалы, но они тоже созданы методом проб и ошибок в той сфере науки и производства, где стоимость изделий очень высока и где она играет второстепенную роль, – в военно-промышленном комплексе.

Итак, результаты победившего пути создания материалов – легирования – можно считать вторым крупнейшим преступлением человека перед природой на планете Земля.

Наши предшественники, оставившие нам два приёма современной металлургии – получение металлов и сплавов и их легирование – эмпирически закладывали научные основы создания материалов, а мы не смогли завершить эту работу и познать тайну формирования химических, физических и механических свойств. Итог плачевный – XX век заканчивается при полном отсутствии рабочей теории получения металлов и сплавов. Это означает, что наши последователи будут увеличивать количество отходов, строить электростанции, заводы по производству новых легирующих элементов, ферросплавов и лигатур; в конечном итоге это приведет к еще большему увеличению озонной дыры, отравлению окружающей среды, гибели флоры, фауны и нас самих.

Часть II – XXI век

В 1993 г. один из выдающихся металлургов нашего времени В. И. Баптизманский в журнале "Изв. вуз. Черная металлургия" опубликовал [3] статью "Пути развития черной металлургии". Это одна из последних попыток зрелых и опытных металлургов заглянуть в сравнительно недалекое будущее одного из самых главных, если не самого главного, видов жизнедеятельности человека на Земле. Оно видится им следующим образом:

1 – замена мартеновского процесса на кислородно-конвертерный;

2 – замена обычной разливки стали на непрерывную;

3 – широкое применение ковшовой обработки металла;

4 – полезное использование шлаков и отходящих газов.

В. И. Баптизманский отмечает: "В целом по техническому уровню производства черная металлургия СНГ отстает от промышленно развитых стран примерно на 15–20 лет, хотя на отдельных предприятиях, в первую очередь на комбинатах Ново-Липецком и "Азовсталь" применяются технологии мирового уровня и даже превышающие его. Как уменьшить и ликвидировать этот разрыв? Данный вопрос следует рассматривать в тактическом и стратегическом плане и временном аспекте".

Основной концепцией развития сталеплавильного производства является повышение качества стали. Этот объект наиболее близок В. И. Баптизманскому. Достижение высокого качества видится ему в производстве "... особенно низколегированного и с малым содержанием серы (наиболее вредная примесь), фосфора, азота, неметаллических включений" металла. Другими словами, сера, фосфор, азот, кислород и элементы, образующие так называемые неметаллические включения, переводятся в ранг бесполезных и чаще всего вредных.

Новыми технологиями, на взгляд В. И. Баптизманского, на первом этапе являются: "применение пылеугольного топлива в доменных печах; непрерывной разливки стали только в конвертерных цехах, ковшовой облагаживающей обработки металла порошкообразными десульфураторами, вакуумом, аргоном (наиболее дешевый способ); в области прокатки – замена наиболее устаревших станов и расширение применения термической обработки металла с прокатного нагрева и выпуска изделий с покрытиями". Этот этап применения "эффективных, но традиционных, широко известных технологий не обеспечит нам уменьшение разрыва в техническом уровне между черной металлургией СНГ и металлургией развитых стран; на этом пути можем только отстать. Поэтому на втором этапе развития металлургии нужно идти самостоятельно или вместе с иными фирмами на пути широкого исследования и затем использования принципиально новых процессов, которые только начали применяться или находиться в стадии разработки и даже идеи¹". "В дальнейшем, по нашему мнению, по мере увеличения производства электроэнергии (в основном, по-видимому, по линии атомной энергетики) доменную плавку и производство чугуна начнут заменять прямым бескоксовым производством стали из железорудного материала на основе использования в качестве восстановителей водорода и монооксида углерода..."

В заключение В. И. Баптизманский считает, что "на первом этапе развития следует внедрять технологии, которые могут дать наибольший результат, особенно по качеству металла, при минимальных затратах. На втором этапе модернизации черной металлургии нужно

¹ Здесь и далее подчеркнuto мною – В. К. Афанасьев.

идти по пути широкого исследования и затем использования новых процессов."

Видение В. И. Баптизманским будущего черной металлургии в определенной мере, особенно на втором этапе, является пророческим. Этот этап должен быть очень коротким по времени, необходимы не долговременная выдача идей и результатов исследований и в далеком неособозримом будущем внедрение их в жизнь, а немедленные действия. Эти действия должны базироваться на совершенно иных представлениях, чем те, с которыми мы вступаем в XXI век. Новые представления вначале подспудно, а затем более явно зарождались и развиваются уже на протяжении многих веков. Свидетельством тому служит гигантское количество публикаций, новые идеи обсуждаются на международных конгрессах. Эти представления в далеком начале базировались на всемирном эфире, затем — на флогистоне, наконец, появилась периодическая система элементов, а водород, азот, кислород считаются основой материального мира.

Материалы с применением бывших элементов, которые в конце XX века считались "вредными", станут основными материалами в XXI веке. Интенсивная разработка новых металлических сплавов, технологии их получения и обработки предусматривает применение водорода, азота, кислорода, серы, фосфора и других бывших "вредных" элементов в качестве основных легирующих добавок. Это приводит к получению материалов более высокого качества при более низкой себестоимости.

Эволюционные процессы развития сознания человека вообще и металлурга в частности требуют воплощения в практической деятельности. Этот выход уже идет с нарастающей скоростью. Обыденным стало применение азота в качестве легирующего элемента для многих металлических сплавов; все чаще и чаще для легирования алюминиевых и некоторых других сплавов применяется водород, а кислород является неотъемлемым элементом в протекании многих крупнейших металлургических процессов (электрошлакового переплава, электрошлакового литья, кислородно-конвертерного производства и др.). Судя по патентной литературе последних лет, среди веществ, применяемых для обработки расплава, увеличивается доля воздуха, водяного пара, углеводородов, паров различных водных растворов. Возможно, что это возвращение к хорошо забытому старому. Так, например, автор известного металлургического приема Бессемер продувал чугунный расплав водяным паром. В области обработки расплава металлургии опытным путем через преодоление многих трудностей приходят к логическому завершению изысканий — они стали применять в своем производстве водород, азот и кислород, которые присутствуют в металлических изделиях вплоть до их разрушения. В 1980 году В. И. Шаповалов защитил пионерскую докторскую диссертацию на тему "Взаимодействие водорода как легирующего элемента с железоуглеродистыми сплавами, железом и некоторыми его аналогами", в которой он подвел итог большого количества работ и пришел к выводу о решающей роли водорода в формировании

свойств железных сплавов, железа, никеля, кобальта, хрома и меди. К сожалению, преподавание материала о сильном и подчас решающем влиянии водорода, азота и кислорода на свойства металлов и сплавов практически не входит в учебные планы и учебники для студентов металлургических и машиностроительных специальностей. Поэтому естественно, что, опираясь на полученные в учебных заведениях знания, только что родившийся металлург, воспитанный на старых взглядах, затратит многие годы на то, чтобы прийти самостоятельно к изложенной выше истине.

Основной, идейной, творческой и практической платформой в металлургии XXI века должна быть следующая во многих аспектах созревшая и бурно развивающаяся позиция: творцами всех свойств материи являются водород и две его разновидности: азот и кислород, — а остальные элементы — носителями этих трех. При таком подходе следует ожидать решения многих важнейших вопросов, доставшихся нам в наследство от XX века. Это правомочно хотя бы потому, что Земля является субмикроскопической частью необозримого материального мира, в котором газообразные (звезды), жидкие (части взорвавшихся звезд), жидко-твердые (планеты) и твердые (остывшие планеты и их остатки) живут и умирают в межзвездном газе, который состоит из водорода [1]. Важнейшие вопросы, которые следует решать в срочном порядке во избежание дальнейшего развития надвигающейся экологической катастрофы, следующие:

1. Необходимо полностью очистить поверхность Земли от отходов технической деятельности человека с помощью главного восстановителя — водорода, вводить замкнутное производство черных и цветных металлов и сплавов с переработкой собственных шлаков до пригодного для последующего получения металлов и сплавов состояния;

2. Уйти от электролизных процессов получения металлов (меди, никеля, алюминия магния и др.), поскольку, помимо загрязнения окружающей среды и очень высокой стоимости за счет потребления гигантского количества электроэнергии, они ухудшают свойства металла;

3. При получении металлов и сплавов принять на вооружение "теорию" и практику образования зародышей и их роста в мировом океане, так как эта практика способна потрясти воображение любого разумного человека;

4. При создании сплавов постоянно увеличивать использование водорода, азота и кислорода в качестве основных легирующих элементов;

5. Разработать новые процессы получения и обработки металлов и сплавов с позиций ведущей роли водорода в формировании служебных и технологических свойств, что позволит получать дешевые материалы с необычайно высоким уровнем физических, химических и механических свойств; например, доменный чугун станет высококачественным материалом многоцелевого назначения, сплавы алюминия с кремнием, кремния с алюминием и др. станут основными легкими сплавами с очень низким (порядка $(0 \dots 1) \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$) коэффициентом

том линейного расширения и обязательно – сжимающимися при нагреве; на этой платформе будут устранены белые пятна в вопросах электричества, магнетизма, полиморфных превращений, природы выделений промежуточных фаз, фазовых превращений и других свойств сплавов;

6. Активизировать познание периодической системы элементов, построенной по "семерке" и до сих пор не понятой до конца, поскольку все попытки вывести по ней какие-либо закономерности заканчиваются появлением многих исключений; имея дело с глобальным законом, металлурги по сути используют лишь символы элементов "электронного построения" и продолжают выдавать "на гора" все более сложные композиции. В то же время практика показывает, что мы имеем дело с великим еще не раскрытым законом.

Перечисленные выше и другие вопросы, находящиеся на различных стадиях решения, составляют основное научное направление работы кафедры физики металлов Сибирского государственного индустриального университета. Название этому направлению – "Основ-

ные закономерности влияния элементов внедрения на свойства металлов и сплавов".

Выводы. Естественно, что приведенные соображения никогда не будут полными. В то же время они отражают весьма злободневные элементы поиска и претворения в жизнь выхода из так называемых "научно-технической революции" и "энергетического кризиса", и поэтому хотя бы частичное решение этих вопросов позволит перейти на более высокий уровень жизнедеятельности человека на Земле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика космоса (маленькая энциклопедия) / Под ред. Р.А. Сюкяева – М.: Советская энциклопедия, 1986. – 783 с.
2. Галактионова Н.А. Водород в металлах – М.: Металлургия, 1967. – 304 с.
3. Баптизманский В.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1993. № 8. С. 1–3.

Сибирский государственный индустриальный университет. Поступила 6 декабря 1999 г.

УДК 669.01

© 2000 г. Б. А. Кустов

ОТКЛИК НА СТАТЬЮ В. К. АФАНАСЬЕВА "НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТАЛЛУРГИИ"

Статья В. К. Афанасьева "Некоторые итоги и перспективы металлургии" затрагивает видение автором итогов в XX веке и перспектив в XXI веке. Выскажу свое мнение на утверждение автора, что на поверхности планеты Земля накопилось большое количество отходов металлургического производства, которые оказывают очень вредное влияние на экологию, т. е. сокращают жизненное пространство.

Если говорить о металлургических отходах, то их надо разделять на некоторые группы – это не классическое понятие, а предположение лично мое (без претензии на какую-либо аксиому). К первичным надо отнести отходы, которые образуются при добыче железной руды, после ее переработки в концентрат и при производстве его в агломерат. Вторая группа – отходы в виде доменных и сталеплавильных шлаков. К третьей группе надо отнести отходы в виде улавливаемой пыли от аспирационных систем. Обычно эти отходы с территорий металлургических предприятий по трубопроводам поступают в пруды-отстойники, занимая при этом большие площади. К четвертой группе относятся окалина прокатного производства (чаще всего промасленная) и чистые оксиды железа метизных цехов.

Надо четко понимать, что можно сделать с этим огромным количеством отходов, образуемых на металлургических предприятиях. Ориентировочно в России ежегодно образуется 50–60 млн. т отходов. Можно себе представить, какое количество отходов накопилось в

России, если привести всего два примера. На шламовых полях аглофабрики Кузнецкого металлургического комбината (КМК) находится 40 млн. т отходов, Мундыбашской аглофабрики – 70 млн. т. Проведенные опыты показывают, что в отходах содержится 15–20 % железа.

Имеющиеся технологии позволяют максимально перерабатывать отходы второй, третьей и четвертой групп, возвращать выделяемое железо обратно в шихту доменного или сталеплавильного процессов. Так сложились обстоятельства, что переработкой отходов первой группы в России практически не занимаются. Несложные расчеты показывают, что если применить соответствующие технологии по переработке шламовых полей аглофабрик КМК и Мундыбаша, можно получить до 20–25 млн. т железорудного сырья с содержанием железа 50–55%. Какое это ценное мероприятие, можно понять, если узнать, что Абаканское рудоуправление в Красноярском крае производит в год около 1 млн. т железорудного сырья с содержанием 41–44 % Fe. К сожалению, бытует мнение, что отходы шламовых полей нельзя перерабатывать на 100 %. Это не совсем так. Экспериментально установлено, что при переработке шламов можно выделить железо, кварцевый песок и глинистую составляющую. Последние компоненты так необходимы в строительной индустрии и, как известно, добычей их занимаются специально, эксплуатируя лишний раз матушку-природу.

Если вспомнить, что существуют огромные отвалы в ферросплавном производстве, из которых можно извлечь дорогостоящие кремний и марганец, то картина защиты природы будет наиболее полной. Но если о переработке металлургических и ферросплавных отходов кое-что известно и ими уже занимаются, то есть отходы, с которыми пока ничего не делается. Речь идет об отходах коксохимических производств и сточных вод метизных цехов. Сложность их переработки состоит в наличии кислот (соляной и серной), и пока практически такие отходы не перерабатываются. Вот где широкое поле деятельности для теоретиков и практиков!

Такова реальная картина по переработке отходов металлургического производства. Надо сказать, что кризис в металлургии (в первую очередь в добыче железорудного сырья) толкает на усердное внедрение уже имеющихся технологий по извлечению железа и поиску новых процессов. Это позволит резко улучшить экологию, вернуть природе занятые территории, получить дешевое металлургическое сырье.

Несколько слов о применении новых технологий в производстве металлов. Считается совершенно правильным расширенное применение в XXI веке термической обработки металла с прокатного нагрева. Есть принци-

пиально новые процессы, которые позволяют получать прокат с меньшими затратами, но с высокими механическими свойствами. На Запсибметкомбинате внедрена арматурная сталь классов А400С и А500С. Сталь класса А400С, в отличие от используемой для изготовления арматуры класса А-3 стали 35ГС и 25Г2С, полностью соответствует требованиям европейских норм EN 10800, DIN 488 и т. п. По заключению ГОССТРОЯ России арматурная сталь класса А400С по служебным свойствам превосходит сталь марок 35ГС и 25Г2С и может полностью заменить ее в строительстве. Это дешевая, высокоэкономичная, с малым содержанием марганца сталь.

Таким образом, я хотел бы развеять пессимизм некоторых авторов, которые не видят прогресса в развитии металлургии. Я привел всего два конкретных примера, по которым необходимо продолжать вести имеющиеся наработки. Считаю, что, участвуя в дискуссии, обращаю внимание на то, что уже достигнуто и что можно использовать в XXI веке. Кроме этого, в первую очередь надо давать знания на эту тему студентам технических вузов, которым решать проблемы в XXI веке.

Сибирский государственный индустриальный университет. Поступила 24 января 2000 г.

УДК 669.01

© 2000 г. Е.В. Протопопов, А.Л. Николаев

ОТКЛИК НА СТАТЬЮ В. К. АФАНАСЬЕВА "НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТАЛЛУРГИИ"

Обсуждаемая статья представляет попытку переосмыслить многовековой путь, пройденный металлургией, и наметить "важнейшие вопросы, которые следует срочно решать во избежание надвигающейся экологической катастрофы", в которую, по мнению автора, вклад вносит современная металлургия. Проблема безусловно важна, и можно приветствовать любые оценки и пути ее решения специалистами различных областей знания.

Не оспаривая отдельные положения статьи, на наш взгляд, не всегда бесспорные, не можем согласиться с утверждением, что многомиллионные запасы вторичных шлаков металлургии на поверхности Земли и традиционная практика получения многих необходимых материалов посредством легирования являются двумя крупнейшими преступлениями человека перед природой, которые он начал совершать еще в "бронзовом" веке. Не было и до настоящего времени нет других эффективных способов промышленного получения металлов с разнообразными свойствами без "этих преступлений".

Панацеей от этих неблагоприятных фактов деятельности металлургов автор видит в водороде и двух его разновидностях: азоте и кислороде. Мы согласны с "сильным и подчас решающим влиянием водорода, азота и кислорода на свойства металлов и сплавов", ко-

торое всемирно учитывается и используется в металлургическом производстве. Эти газы все более широко используются в технологии получения железа прямого восстановления, металлургических сплавов и порошков и их обработке. При этом получение кислорода и азота не вызывает побочных явлений, а получение водорода связано с использованием невозобновляемого источника - природного газа, запасы которого ограничены. Рекомендация "с помощью водорода полностью убрать с поверхности Земли отходы технической деятельности человека", по нашему мнению, абсурдна из-за непомерных энергозатрат и невозможности селективного извлечения металлов. Более рационально использование их для получения новых материалов. Нужно принимать во внимание, что отходы, как пустая порода при добыче металлов из руд, шлаки металлургического производства в основном состоят из силикатов. И как раз эти силикаты необходимо в первую очередь превращать в сырье для получения керамики и строительных материалов. С одной стороны, это обещает большие выгоды, так как сырье не надо добывать, оно в готовом виде ждет своего потребителя А с другой стороны - его утилизация является мерой борьбы с загрязнением окружающей среды.

К сожалению, в статье В. К. Афанасьева не нашли отражения вопросы, связанные с перспективами спла-

вов Al с Si, Si с Al и др., в разработке которых он добился многообещающих результатов. В частности, эти два элемента в сумме составляют 36 % массы физически доступного слоя Земли против 4,6 % железа. Между тем более 95 % всех металлических изделий, конструкций самых разнообразных машин, транспортных путей производятся из железорудного сырья. Ясно, что такая практика расточительна с точки зрения как исчерпания ресурсов железа, так и энергетических затрат на первичную обработку железорудного сырья.

Приведенные цифры свидетельствуют о больших возможностях использования алюминия и кремния в создании металлических материалов ближайшего будущего. Разработка необходимых технологий выплавки и получения соответствующих сплавов, способных конкурировать с чугуном, сталью и другими материалами из железорудного сырья, – задача для металлургов XXI века.

Сибирский государственный индустриальный университет. Поступила 9 февраля 2000 г.

УДК 669.01

© 2000 г. С.М. Рябых

ОТКЛИК НА СТАТЬЮ В. К. АФАНАСЬЕВА "НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТАЛЛУРГИИ"

Ознакомившись с рукописью статьи профессора В. К. Афанасьева "Некоторые итоги и перспективы металлургии", считаю нужным высказать свое мнение.

Надо всячески приветствовать стремление крупного ученого и патриота своей науки – металлургии – В. К. Афанасьева высказать принципиально новый "металлургический" подход к глобальным проблемам:

- образование планеты Земля, как гигантской отливки;
- ее трансформация в ходе охлаждения и дегазации;
- образование горных пород как первичных шлаков;
- отравление окружающей среды вторичными шлаками – отходами металлургии.

Все это очень оригинально, интересно, но отнюдь не бесспорно, поэтому далее – при общем весьма положительном мнении – я остановлюсь на аспектах статьи, по которым хотел бы подискутировать.

1. Автор в начале статьи утверждает, что планета Земля подчиняется законам космоса, но не воле человека, но тут же противоречит себе, говоря, что волевое поведение человека губительно для цивилизации. Видимо, есть и то, и другое. Перед определенными силами природы человек бессилён, но теперь он накопил достаточно знаний и средств для созидательной и разрушительной деятельности в масштабах планеты Земля, а в недалеком будущем – и в масштабах планетарной солнечной системы. Концепция "ноосферы", блестяще развитая В. И. Вернадским, вряд ли может быть подвергнута сомнению.

2. Утверждая, что планета Земля – это кристаллизующаяся отливка, автор негласно полагает, что существует лишь одна модель образования планет – выброс из звезды массы вещества, из которой далее сформировались планеты. Ведь, если есть отливка, то перед этим был расплав. Более принятой является другая

модель: образование планет при конденсации холодного пылевого облака, в ядре которых происходят экзотермические процессы, и, следовательно, разогрев идет изнутри. Таким образом, имеются два разных подхода к судьбе планет: либо охлаждение горячей планеты снаружи, либо разогрев холодной планеты изнутри. Становится только на одну позицию вряд ли целесообразно – ведь строгого экспериментального подтверждения нет.

3. "Вторичные шлаки", по терминологии В. К. Афанасьева, или отходы производства, по общепринятой терминологии, – это не только отходы металлургических производств. Другие виды производств загрязняют окружающую среду ничуть не хуже. Достаточно указать, что добыча 1 т угля сопровождается выносом около 5 т отнюдь не безобидных твердых отходов и выбросом до 20 м³ метана. Энергетики и химики тоже не отстают, очень велики выбросы автотранспорта – все это большой набор токсикантов, аллергенов, канцерогенов. Металлурги тут занимают достойное место, но отнюдь не преобладающее.

4. К предлагаемым автором шести важнейшим проблемам металлургии, подлежащим решению в срочном порядке, на мой взгляд, следует добавить развитие общей теории, связывающей фундаментальные характеристики атомов металлов с макросвойствами получаемых материалов. Автор об этом говорит в статье, но почему-то не вводит эту проблему в число важнейших.

В целом статья очень важна, интересна, наличие дискуссионных моментов отнюдь не снижает ее ценности.

Кемеровский государственный университет. Поступила 9 февраля 2000 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА

Посвящается 95-летию со дня рождения
и 60-летию с начала работы в
Сибирском металлургическом институте
Г. М. Голузина

© 2000 г. А. С. Сорокин

Г. М. ГОЛУЗИН В СИБИРСКОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

В тяжелые годы Великой Отечественной войны в г. Сталинск (ныне г. Новокузнецк) был эвакуирован из г. Ленинграда один из выдающихся математиков Геннадий Михайлович Голузин.

Выдающиеся научные заслуги профессора, доктора физико-математических наук Г. М. Голузина были отмечены первой премией Ленинградского университета за 1946 г. и Сталинской (государственной) премией за 1947 г. Научные работы Г. М. Голузина и его учеников создали крупную школу теории функций комплексного переменного. Большинство его работ относится к вопросам оценок экстремальных задач для различных классов аналитических функций комплексного переменного. В этом направлении он достиг весьма глубоких результатов. Даже простое перечисление результатов многочисленных и богатых содержанием работ Геннадия Михайловича Голузина по различному кругу вопросов, потребовало бы слишком большого объема. Отметим, что перу его принадлежит ряд работ в других направлениях теории функций комплексного переменного и математической физики. Особенно значимы исследования Г. М. Голузина по конформному отображению многосвязных областей на области канонического типа и работы, связанные с решением задачи Дирихле для уравнения Лапласа в круговых конечносвязных областях или в областях, ограниченных сферами.

Как пишет академик В. И. Смирнов, исключительно продуктивным в научном отношении был последний десятилетний период жизни Г. М. Голузина, начавшийся в г. Сталинске в металлургическом институте на кафедре высшей математики.

Г. М. Голузин был принят на работу в Сибирский металлургический институт 3 сентября 1942 г. Он был избран профессором кафедры высшей математики этого института и проработал в этой должности до 8 сентября 1943 г.

Отметим, что за все время существования нашего вуза это единственный случай, когда на кафедре высшей математики работал математик с мировым именем, профессор, доктор физико-математических наук, автор монографии по современным вопросам теории

функций комплексного переменного. Работая на кафедре высшей математики, он читал лекции в двух потоках первого курса и вел практические занятия в двух группах. Помимо занятий со студентами, Г. М. Голузин руководил математическим семинаром, созданным при кафедре для повышения квалификации преподавателей. Под его руководством выполнялись научные исследования работниками кафедры. Первый руководитель института отмечал высокую квалификацию Г. М. Голузина и считал его весьма ценным сотрудником. Г. М. Голузин, работая в СМИ, подготовил к печати в математическом сборнике АН СССР большие статьи: "О лемме Шварца" и "О средних значениях гармонических функций на софокусных эллипсоидах с приложениями к гидромеханике". Эти работы вышли из печати в 1945 и в 1946 гг. Результаты, полученные Г. М. Голузиным в этих и последующих работах, признаны выдающимися научными достижениями.

Результатом научной и педагогической деятельности Г. М. Голузина явилась его книга "Геометрическая теория функций комплексного переменного". Во время печатания ее первого издания, после продолжительной и тяжелой болезни, профессор Геннадий Михайлович Голузин скончался 17 января 1952 г. Второе издание монографии Г. М. Голузина вышло из печати в 1966 г. под редакцией академика В. И. Смирнова. Всего у Г. М. Голузина издано около 60 научных трудов.

Геннадий Михайлович Голузин был человеком исключительной скромности и оставил о себе яркую память как о выдающемся ученом и обаятельном человеке.

В 1996 г. научная общественность отметила 90-летие со дня рождения Г. М. Голузина. Сообщения о достижениях научной школы учеников Геннадия Михайловича за последнее время опубликованы в обзорных статьях Г. В. Кузьмина "Методы геометрической теории функций, I, II" // Алгебра и анализ. 1997. Т. 9. Вып. 3. С. 41–103; Вып. 5. С. 1–50.

Сибирский государственный индустриальный университет. Поступила 8 февраля 2000 г.

МЕТРОЛОГИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 620.175:538.54

© 2000 г. В.Н. Орлов, О.В. Герасимова

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ В МЕТАЛЛ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА

Внедрение в металл жесткого индентора шаровой формы (при определении твердости по методу Бринелля) приводит к резко неоднородному уплотнению и упрочнению металла в очаге деформирования и вне его [1], а зона пластической деформации имеет достаточно большие размеры. В то же время в технологической практике находят применение другие схемы пластического деформирования металла профильным инструментом. В первую очередь это относится к процессу внедрения в металл конических выступов резьбонакатного инструмента при пластическом формообразовании метрического резьбового профиля.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования деформационного поля при внедрении в пластичный металл конического индентора, который выполнен с профилем метрической резьбы с углом конуса $\alpha = 30^\circ$. Образцы прямоугольного сечения высотой H_0 изготовлены из пластичной стали марки Ст 3.

При вдавливании индентора в металл (рис. 1) получается отпечаток диаметром d , глубина внедрения индентора H , высота наплыва металла h .

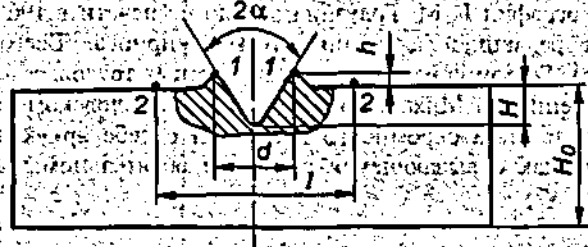


Рис. 1. Схема течения металла при вдавливании конического индентора и характеристики деформационного процесса

Выделенная зона контроля l соответствует вершине кольцевого наплыва, где имеет место локализация деформаций. Граница зоны пластической деформации определяется с помощью неразрушающего электроиндуктивного метода [2, 3]. В этом случае включенный в электрическую цепь высокочастотного генератора гармонических колебаний индуктивный датчик устанавливается на образец с выдавленным углублением и перемещается вдоль продольной оси до предельного поло-

жения (зона контроля 2). В этом положении датчика электропроводность металла не изменяется.

Длина деформационного поля l соотносится с диаметром отпечатка d при внедрении индентора. Для сопоставления данных используется относительная глубина отпечатка H/H_0 . Как показывает анализ опытных данных, только благодаря сравнению относительных размеров можно установить взаимосвязь геометрических характеристик деформационного процесса (в общем случае отношение H/H_0 зависит от высоты образца). Это подтверждается экстремальным характером изменения и других характеристик процесса внедрения индентора при изменении именно относительной глубины внедрения.

На рис. 2 приведены графики зависимости осевого напряжения $\sigma = 4P/\pi d^2$ и относительной электропро-

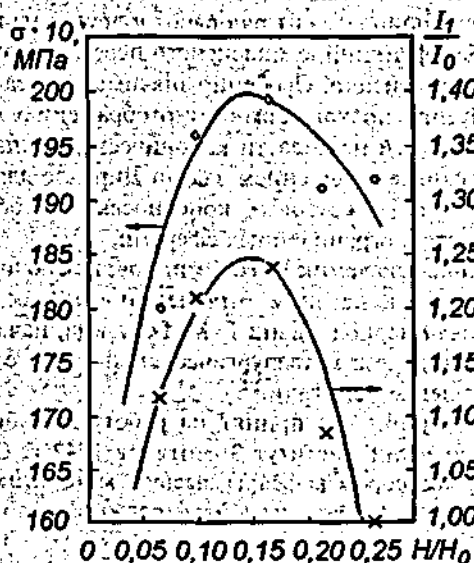


Рис. 2. Изменение напряжения (O) и относительной электропроводности (X) металла при внедрении конического индентора

водности I_1/I_0 от относительной глубины внедрения индентора, где P – сила деформации; I_1 и I_0 – сила тока в приборе-регистраторе (микроамперметре) при контроле деформированных образцов и образцов в исходном состоянии.

На рис. 3 показаны графики зависимости относительных высоты наплыва h/H и длины деформационного поля l/d от глубины внедрения индентора.

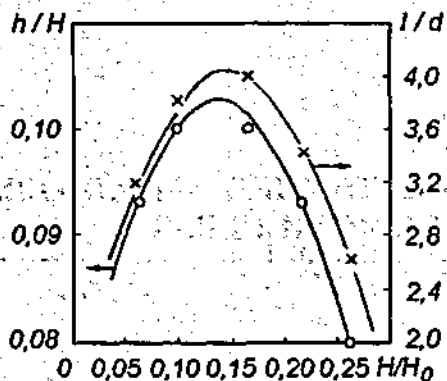


Рис. 3. Изменение относительных высоты наплыва (O) и длины пластической зоны (x) в зависимости от глубины внедрения конического индентора

На графиках можно выделить экстремальную зону деформирования, которая соответствует глубине внедрения конического индентора H/H_0 , равной 0,15. Это свидетельствует о достаточно сложном характере деформационного процесса при внедрении конического индентора в отличие от процесса деформирования металла шаровым индентором.

Анализ опытных данных показывает, что глубина распространения пластической зоны h_1 связана с глубиной внедрения индентора H линейной зависимостью $h_1 = 3,5H$. Необходимо отметить, что экстремальный характер изменения осевого напряжения получен при использовании величины относительной глубины отпечатка, при увеличении глубины внедрения индентора нагрузка непрерывно возрастает (количественная оценка может описываться параболической зависимостью $P = 0,4 H^2$).

Оценка деформационного процесса в относительных единицах позволяет выделить две фазы деформи-

рования металла, а именно: при небольшой глубине внедрения индентора все параметры процесса непрерывно возрастают, происходит уплотнение и упрочнение металла на локальном уровне, что адекватно отражается на характере пластического течения металла. Второй фазе деформирования соответствует уменьшение всех характеристик, с помощью которых оцениваются пластическое течение и упрочнение металла. По-видимому, причина — частичное торможение поля деформаций из-за достижения "порога" упрочнения при определенной глубине внедрения индентора. Происходит своего рода "размывание" поля пластической деформации из-за прогрессирующего упрочнения металла на интегральном уровне. Определяющие характеристики этого процесса (диаметр и глубина отпечатка) изменяются интенсивно, что влияет на характер изменения напряжений и геометрических характеристик (см. рис. 2, 3).

Выводы. Полученные закономерности распространения пластической зоны при внедрении в металл индентора конической формы подтверждают установленный в работе [4] факт наложения и взаимодействия деформационных полей при обработке металла многопрофильным деформирующим инструментом. Это необходимо учитывать при проведении процессов чеканки, выдавливания шлицев и накатывания метрической резьбы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
2. Герасимов В.Я. // Черная металлургия: Бюлл. НТИ. 1993. № 11. С. 28, 29.
3. А. с. 1837222 СССР. Устройство для вихретокового контроля / В.Я. Герасимов // Изобретения. 1993. № 32. С. 53.
4. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. — М.: Машиностроение, 1969. — 504 с.

Курганский государственный университет. Поступила 25 ноября 1999 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.73.073:621.73.043.002

© 2000 г. П.Н. Беспалов

ШТАМП С РАЗЪЕМНОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВКИ РЫЧАГА КЛАПАНА АВТОМОБИЛЯ ВАЗ

Для одновременной реализации преимуществ и полугорячей штамповки, и безоблойной штамповки в закрытых штампах разработана конструкция штампа с разъемной матрицей (рис. 1).

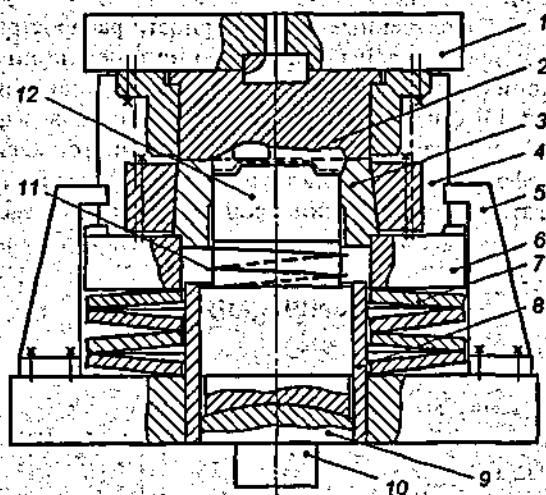


Рис. 1. Конструкция штампа с разъемной матрицей

Данная конструкция обеспечивает получение заготовки детали сложной геометрической формы, значительно уступающей по шероховатости поверхности и точности заготовкам, полученным холодной объемной штамповкой с минимальной последующей обработкой резанием.

В качестве схемы деформирования при штамповке заготовки рычага клапана автомобиля ВАЗ принята схема деформирования одним пуансоном в матрице с поперечным разъемом при расположении пуансона в нижней полуматрице. При обработке чертежа заготовки изменены размеры и форма некоторых элементов детали (рис. 2), штамп выполнен с горизонтальной плоскостью разъема матрицы.

Полуматрицы 2 и 3 закреплены на верхней 1 и промежуточной 6 плитах. Пуансон 12 установлен в стакане 8 нижней плиты штампа на самоустанавливающейся опоре 9. Центрирование верхней полуматрицы осуществлено при помощи направляющих колонок 4. Пружинами 11 нижняя полуматрица досылается в крайнее верхнее положение, определяемое двумя Г-образными ограничителями 5. Этой же пружиной пуансон прижат к опоре.

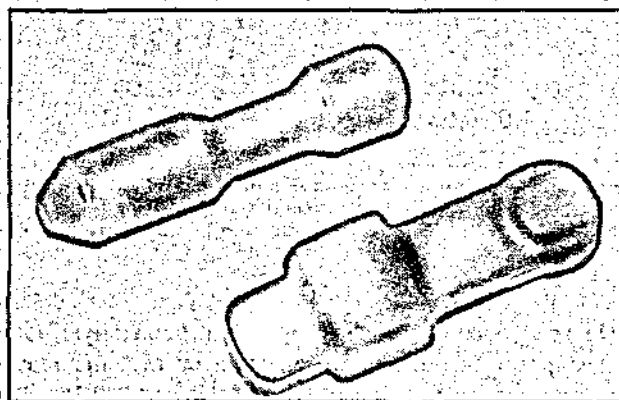


Рис. 2. Образцы заготовок

Блок тарельчатых пружин 7 обеспечивает необходимое усилие прижима полуматриц при деформировании.

Штамп работает следующим образом: нагретая до определенной температуры исходная заготовка укладывается в открытую полость. Полость образована боковыми поверхностями ручья нижней полуматрицы, находящейся в крайнем верхнем положении, и верхнего рабочего торца пуансона, находящегося в крайнем нижнем положении. Во время рабочего хода ползуна прессы верхняя полуматрица смыкается с нижней, и они вместе перемещаются вниз, пуансон деформирует заготовку, а блок тарельчатых пружин сжимается и создает необходимое усилие прижима полуматриц. При обратном ходе ползуна срабатывает механизм выталкивания прессы. Нижний выталкиватель 10 штампа воздействует на опору, пуансоном выталкивает поковку из нижней полуматрицы, обеспечивая ее удаление. Усилие выталкивания воспринимается Г-образными ограничителями.

Отличительной особенностью предложенного штампа являются совмещенные с конструктивными элементами детали компенсационные полости, частично заполняемые расчетным "избытком" металла в последнюю очередь. Следовательно, отпадает необходимость удаления избытка металла.

Штамп предназначен для использования на кривошипно-коленном прессе модели К0034. Изготовление опытно-промышленной партии заготовок позволило снизить себестоимость их изготовления на 25 % с одновременным улучшением качества.

Юргинский филиал Томского политехнического университета.
Поступила 30 августа 1999 г.

ПАМЯТИ БОРИСА ИЗРАИЛЕВИЧА МЕДОВАРА

19 марта 2000 г. на 84 году жизни умер выдающийся ученый в области металлургии и технологии металлов академик Национальной академии наук Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины Борис Израилевич Медовар.

Б. И. Медовар родился 29 марта 1916 г. в Киеве, окончил Киевский политехнический институт. С марта 1941 г. и до конца своей жизни он работал в Институте электросварки АН Украины. Только в годы Великой Отечественной войны он прервал научную работу – 26 июня 1941 года Б. И. Медовар уходит добровольцем на фронт. Его участие в боевых действиях на Юго-Западном направлении, на Крымском, Южном и Северо-Кавказском фронтах отмечено боевыми наградами.

В 1943 г. Б. И. Медовара по ходатайству академика Е. О. Патона отзывают с фронта для работы в Институте электросварки, который в то время находился на Урале в Нижнем Тагиле. Здесь он активно включается в работу ученых, все усилия которых были сосредоточены на усовершенствовании сварочной техники и технологии, обеспечивающих бесперебойное производство многих тысяч танков Т-34 для фронта.

В 1944–1951 годах Б. И. Медовар разрабатывает технологию скоростной автоматической сварки под флюсом, которая была использована для решения важного народнохозяйственного задания – создания отечественного производства сварных стальных труб большого диаметра. Он принимает активное участие в восстановлении разрушенного войной хозяйства Украины, во внедрении автоматической сварки в машиностроительную отрасль.

В 50-е годы Б. И. Медовар создает теоретические основы металловедения и металлургии сварки аустенитных сталей и сплавов. Выполненный им цикл работ по исследованию δ -феррита, взаимосвязи структуры и свойств сварных соединений, влияния двухфазной структуры сварных швов на сопротивление горячим трещинам и межкристаллитной коррозии нашел широкое признание специалистов и был отмечен премией АН СССР имени Д. К. Чернова. Предложенные Б. И. Медоваром для сварки высоколегированных сталей и сплавов флюсы, не содержащие в своем составе окисных соединений, до настоящего времени успешно применяются в промышленности. Такие флюсы за рубежом появились и нашли применение лишь много лет спустя.

Монография Б. И. Медовара "Сварка хромоникелевых аустенитных сталей" выдержала три издания (1954, 1958, 1966) и стала настольной книгой для многих специалистов, занимающихся сваркой высоколегированных сталей и сплавов.

Имя Б. И. Медовара неразрывно связано с разработкой известного сейчас во всем мире метода получения высококачественного металла – электрошлакового переплава. Этот метод положен в основу созданной в нашей стране новой отрасли металлургического производства – специальной электрометаллургии. Уни-



кальные специализированные цеха ЭШП, построенные на комбинате "Азовсталь", заводах "Днепроспецсталь", "Красный Октябрь" и Ново-Краматорском машиностроительном, не имеют равных в мире.

В 60-е годы Б. И. Медовар с сотрудниками проводит теоретические и экспериментальные исследования физико-химических, электротехнических характеристик электрошлаковых процессов, разрабатывает математическую и физическую модели ЭШП и на их базе автоматическую систему управления технологией переплава, работает над созданием различного специального оборудования для ЭШП, занимается всесторонним изучением качества электрошлакового металла, что способствовало развитию многих процессов электрошлаковой технологии, которые нашли затем широкое применение в металлургическом и машиностроительном производстве.

Среди значительных работ, выполненных Б. И. Медоваром в 70-е годы, ведущее место занимают комплексные исследования свойств литого электрошлакового металла, которые однозначно доказали, что по химической и физической однородности, стабильности механических характеристик он не уступает кованому металлу открытой выплавки. Результаты этих исследований положены в основу технологии электрошлакового литья, которые были внедрены в промышленность при производстве сосудов высокого давления, корпусов запорной арматуры атомных и тепловых электростанций, коленчатых валов судовых дизелей, бандажей цементных печей, труб и трубных заготовок, штампового инструмента, прокатных валков и многих других изделий машиностроения. Технология ЭШП получила признание во всем мире.

В 80-годы, на основе проведенных под научным руководством Б. И. Медовара фундаментальных и при-

кладных исследований, создан новый класс конструкционных металлических материалов с заданной анизотропией структуры. В 1990 году эти работы были отмечены премией АН Украины имени Е. О. Патона.

С конца 80-х и в 90-е годы Б. И. Медоваром вместе с сотрудниками созданы научные основы азотирования сталей и сплавов непосредственно из газовой фазы при дугошлаковом переплаве (ДШП), в том числе под давлением, и предложены различные технологические схемы этого процесса. В этот же период под его научным руководством разработан принципиально новый электрошлаковый процесс с жидким металлом (ЭШП ЖМ), открывающий новые возможности для совершенствования непрерывного литья, наплавки и сварки.

По инициативе и при содействии Б. И. Медовара создан и уже почти 30 лет издается журнал "Проблемы специальной электрометаллургии", в редколлегии которого он многие годы был заместителем главного редактора. Журнал в полном объеме переиздается на английском языке под названием "Advances in Special Electrometallurgy" издательством "Rieckensky Science Publishing Co" (Великобритания).

Б. И. Медовар – автор более 2000 научных работ, в том числе более 30 монографий. Многие его труды из-

даны за рубежом. Ему принадлежит более 1000 зарубежных патентов на изобретения, под его руководством электрошлаковые технологии внедрены в Японии, Швеции, Франции, Индии и других странах.

Много сил и энергии Б. И. Медовар отдавал подготовке и воспитанию научной смены. Еще в начале 60-х годов он основал и возглавил известную в мире научную школу по электрошлаковой технологии. Среди его учеников более 80 докторов и кандидатов наук. Б. И. Медовар был человеком большой души и кипучей энергии, умел создать в научных коллективах атмосферу уважения и активной доброжелательности.

Заслуги ученого отмечены орденом Ленина, орденом Отечественной войны II степени, двумя орденами Трудового Красного Знамени и многочисленными медалями. Борис Израилевич является лауреатом Ленинской премии (1963 г.), Государственных премий СССР (1950 и 1986 г.) и УССР (1978 г.) и премии Совета Министров СССР (1984 г.). Он избирался депутатом Верховного Совета УССР двух созывов.

Соратники, ученики и последователи Б. И. Медовара навсегда сохраняют в своих сердцах светлую память об этом прекрасном человеке, выдающемся ученом, организаторе науки и производства.

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА МОРОЗОВА

Ушел из жизни ветеран войны и труда, доктор технических наук, почетный профессор ЮУрГУ, лауреат Ленинской премии Александр Николаевич Морозов.

Выдающийся инженер, ученый мирового масштаба, блестящий экспериментатор и прекрасный организатор научных исследований, автор талантливых монографий – он хорошо известен металлургам нашей страны и за рубежом.

А. Н. Морозов родился 25 июня 1912 года в Санкт-Петербурге. После окончания в 1935 г. Ленинградского политехнического института был направлен на Ижорский завод и, по приглашению академика М. М. Карнаухова, поступил в аспирантуру. В 1938 году после защиты диссертации остался работать на кафедре металлургии ЛПИ ассистентом, затем доцентом; занялся оборудованием лаборатории газового анализа и разработкой методики определения содержания газов в стали.

С начала Великой Отечественной войны Александр Николаевич ушел добровольцем в армию, участвовал в тяжелых боях, был ранен, пережил плен. После демобилизации в 1945 году он вернулся в ЛПИ.

В 1952 г. А. Н. Морозов переехал в г. Челябинск, где начался новый плодотворнейший этап в его творческой биографии. Возглавив создаваемую в Челябинском политехническом институте кафедру металлургии стали, он нацелил коллектив на проведение специальных исследований по растворимости газов в стали, улучшению качества стальных слитков, использованию

радиоактивных изотопов в экспериментах, некоторым проблемам мартеновской плавки.

В 1958 г. А. Н. Морозов был назначен заместителем директора организуемого в Челябинске научно-исследовательского института металлургии и активно включился в работу по комплектованию его коллектива, а с 1970 по 1979 год он работал его директором.

Под руководством и с участием А. Н. Морозова в институте были изучены важные закономерности растворимости газов в шлаках, решены многие вопросы в области спецметаллургии, электросталеплавильного и ферросплавного производств, развернуты работы по созданию машины огневой зачистки металла.

В 1976 г. за разработку экологически чистой технологии получения пентаоксида ванадия из ванадийсодержащих конвертерных шлаков он был удостоен Ленинской премии.

В 1989 году А. Н. Морозов возвращается в Челябинский политехнический институт на кафедру металлургии стали, в 1995 г. ученый совет Челябинского государственного университета (ЧПИ) присвоил ему звание почетного профессора.

А. Н. Морозов был автором большого числа статей, организатором обсуждения проблемных вопросов развития черной металлургии.

Все знавшие Александра Николаевича Морозова навсегда сохраняют о нем светлую память.

СОДЕРЖАНИЕ

Попова М.В. Кафедра физики металлов.....	3
Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Кафедра теплофизики и промышленной экологии.....	5
Долинский В.А. Кафедре металлургии чугуна 70 лет.....	7
Софроменков А.Ф. Кафедра металлургии, оборудования и технологии термической обработки металлов Сибирского государственного индустриального университета.....	8
Кулагин Н.М. Кафедра физической химии и теории металлургических процессов к 70-летию СибГИУ.....	10
Цымбал В.П. От первых математических моделей до нового непрерывного металлургического процесса.....	12

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И ТЕОРИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Расчет вязкости кальциево-железисто-силикатных систем с использованием полимерной модели.....	26
--	----

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

Сагнвор А.Г. Особенности температурного режима эксплуатации колосниковых решеток обжиговых и агломерационных машин.....	32
---	----

МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ

Охотский В.Б. Кипение стали при затвердевании.....	34
--	----

ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д. Получение малофосфористых концентратов из руд и железомарганцевых конкреций.....	40
--	----

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ

Иванов Ю.Ф., Гусков С.Ф., Ротштейн В.П. Объемное упрочнение поликристаллов стали 110Г13 сильным электронным пучком.....	45
Афанасьев В.К., Туева Г.В., Максимова О.С., Лаврова И.М. Об аномалии линейного расширения доменного чугуна.....	48

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Кудряков О.В., Овчинников В.И. Повышение износостойкости поршневых колец двигателя.....	51
---	----

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Маллев А.Ф., Киктева Ж.В. Влияние свойств материала формочной смеси на заполняемость форм тонкостенных отливок.....	56
---	----

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

Афанасьев В.К. Некоторые итоги и перспективы металлургии.....	59
---	----

Кустов Б.А. Отклик на статью В.К. Афанасьева "Некоторые итоги и перспективы металлургии".....62

Протопопов Е.В., Николаев А.Л. Отклик на статью В.К. Афанасьева "Некоторые итоги и перспективы металлургии"..... 63

Рябых С.М. Отклик на статью В.К. Афанасьева "Некоторые итоги и перспективы металлургии"64

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА

Сорокин А.С. Г.М. Голузин в Сибирском металлургическом институте.....65

МЕТРОЛОГИЯ. КОНТРОЛЬ

Орлов В.Н., Герасимова О.В. Изменение деформационного поля при внедрении в металл конического индентора.....66

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Беспалов П.Н. Штамп с разъемной матрицей для полугорячей штамповки заготовки рычага клапана автомобиля ВАЗ.....68

Памяти Бориса Израилевича Медовара..... 69

Памяти Александра Николаевича Морозова.....71

CONTENTS

Popova M.V. Chair of Physics of Metals 3

Samokhvalov G.V., Chernysh G.I. Chair of Heat Transfer and Industrial Ecology 5

Dolinskij V.A. The 70th anniversary of Chair of Metallurgy of Cast Iron 7

Sofrosbenkov A.F. Chair of Physical Metallurgy, Equipment and Technology of Heat Treatment of Metals at Siberian State Industrial Univ..... 8

Kulagin N.M. Activity of Chair of Physical Chemistry and Theory of Metallurgical Processes, devoted to 70th anniversary of Siberian State Industrial Univ.....10

Tsybmal V.P. From the first mathematical models to new continuous metallurgical process.....12

PHYSICAL CHEMISTRY AND THEORY OF METALLURGICAL PROCESSES

Melamed S.G., Yur'ev B.P. Calculating the viscosity of calcium-iron-silicate systems with the use of polymer model.....26

METALLURGY OF CAST IRON

Saginov A.G. Particularities in temperature conditions of operation of fire grates at the roasting and sintering machines32

METALLURGY OF STEEL

Okhotskij V.B. Boiling of steel during solidification.....34

ELECTROMETALLURGY OF STEEL AND FERROALLOYS

Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D. Production of low-phosphorus concentrates from ores and iron-manganese nodules.....40

PHYSICS OF METALS

Ivanov Yu.F., Gulyasov S.F., Rotshtejn V.P. Volumetric strengthening of polycrystals of steel of 110G13 grade with high-current electron beam.....45

Afanas'ev V.K., Tueva G.V., Maksyukova O.S., Lavrova I.M. About anomaly of linear expansion of blast furnace cast iron48

PHYSICAL METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF METALS

Kudryakov O.V., Ovchinnikov V.I. Improvement in wear resistance of piston rings of engine..... 51

FOUNDRY

Milyaev A.F., Kikteva Zh.V. Influence of properties of the moulding sand material on degree of filling-up the thin-walled casting moulds.....56

GENERAL PROBLEMS OF METAL INDUSTRY

Afanas'ev V.K. Some results and prospects of metal industry 59

Kustov B.A. Response to V.K. Afanas'ev article on 'Some results and prospects of metal industry'..... 62

Protopopov E.V., Nikolaev A.L. Response to V.K. Afanas'ev on 'Some results and prospects of metal industry'63

Ryabykh S.M. Response to V.K. Afanas'ev article on 'Some results and prospects of metal industry'..... 64

EDUCATIONAL AND PROCEDURAL WORK

Sorokin A.S. G.M. Goluzin at Siberian Metallurgical Institute65

METROLOGY. MONITORING

Orlov V.N., Gerasimova O.V. Variation of deformation field during introducing the conical indenter into metal..... 66

BRIEF COMMUNICATIONS

Bespalov P.N. Press tool with sectional die for semi-hot forging of VAZ automobile valve lever billet 68

ANON

In memory of Boris Izrailevich Medovar.....69

In memory of Alexandr Nikolaevitch Morozov.....71

Сдано в набор 17.05.2000 Подписано в печать 27.07.2000 Формат 60×88¹/₈ Бум офсетная № 1
Офсетная печать Усл. печ. л. 9,0. Уч - изд. л. 10,5. Тираж 370 экз. Заказ 420

Оригинал-макет изготовлен ООО "ЭЛИОТ"
117419, Москва, 2-ой Донской пр-д, д. 96

Отпечатано с готового оригинал-макета в ППП "Типография "Наука"
121099, Москва, Шубинский пер., 6