

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛИТЬЯ

На правах рукописи

УДК 669.13:669.26:669.71:621.891:620.18

ИЗЮМОВА Татьяна Константиновна

РАЗРАБОТКА ИЗНОСОСТОЙКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ И ХРОМИСТЫХ  
ЧУГУНОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР  
В ДЕФОРМИРОВАННЫХ СЛОЯХ

Специальность 05.16.01 - "Металловедение и термическая  
обработка металлов"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1993

№ 28.278

Диссертация на правах рукописи

Работа выполнена в Институте проблем литья АН Украины

Научный руководитель-доктор технических наук,  
профессор КИРИЕВСКИЙ Борис Абрамович

Научный консультант-доктор технических наук,  
профессор МАРКОВСКИЙ Евгений Адамович

Официальные оппоненты:

- 1. Доктор технических наук, профессор  
ОШКАДЕРОВ Станислав Петрович
- 2. Кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник  
ТИХОНОВИЧ Вадим Иванович

Ведущая организация: Мариупольский металлургический институт /г. Мариуполь/

Защита состоится " 26 " ноября 1993г.  
на заседании специализированного совета Д.016.20.01 при  
Институте проблем литья АН Украины по адресу:  
252680, ГСП, Киев-142, проспект Вернадского, 34/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института проблем литья АН Украины

Автореферат разослан " 23 " октября 1993г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд. техн. наук

Е.Г. Афандилянц

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00810616 (M)

АВ - 28, 270  
3

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшей задачей современного материаловедения является снижение металлоемкости деталей и узлов машин, повышение ресурса их работы. Особое место в ее решении занимают износостойкие материалы. Повышение износостойкости может быть достигнуто как за счет конструктивной модернизации деталей, так и путем усовершенствования существующих и создания новых сплавов. Следует отметить, что на сегодняшний день в производстве машиностроительной продукции преобладают литые износостойкие сплавы, уровень износостойкости которых не всегда отвечает предъявляемым требованиям. Проблема повышения износостойкости является по-прежнему актуальной, а разработка новых литых износостойких материалов представляет собой важную народно-хозяйственную задачу. Многочисленные исследования, выполненные в последние годы, позволили качественно по-новому подойти к ее решению. Установлено, что определяющими в поведении сплавов в процессе изнашивания являются не только комплекс свойств и особенности их исходной структуры, но и то структурное состояние, которое формируется в поверхностном слое изнашиваемых деталей, т.н. "вторичная" структура.

Формирование "вторичных" структур зависит как от параметров деформирования в процессе изнашивания, так и от исходной структуры. Известные данные по влиянию состава, свойств и структуры на износостойкость материала могут быть использованы при исследовании особенностей формирования "вторичных" структур в их взаимосвязи с износостойкостью.

Целью работы явилась разработка износостойких материалов для деталей, изнашивающихся в условиях воздействия абразива /в т.ч. абразивной эрозии/ и трения скольжения при повышенных температурах, изучение особенностей формирования "вторичных" структур и исследование их связи с износостойкостью, а также установление влияния отдельных технологических параметров на эти особенности.

Наиболее перспективными применительно к условиям абразивного изнашивания являются алюминиевые /промежуточной группы/ и

хромистые чугуны. Они характеризуются высокой устойчивостью исходной структуры при деформировании /включая и повышенные температуры/, высокой окалинстойкостью, их структура в определенной степени соответствует правилу Шарпи для износостойких материалов. Несмотря на столь существенные преимущества, объем использования этих чугунов незначителен, что связано, прежде всего, с их низкой технологичностью, которая определяется химическим составом сплавов, режимами термической обработки, а также параметрами используемых технологических процессов. Оптимизация химического состава сплава производится с учетом влияния различных легирующих элементов на структуру, износостойкость и технологические свойства. Перспективно легирование чугунов элементами, способствующими формированию метастабильной структуры сплава, повышению ее склонности к управляемому превращению при деформировании.

#### Основные задачи исследования:

1. Исследовать влияние легирующих и модифицирующих элементов, в т.ч., Al, Mn, V, Cu, Zr и др., режимов термической обработки на структуру и комплекс механических, специальных и технологических свойств алюминиевых и хромистых чугунов. Установить их оптимальные составы для различных условий изнашивания.
2. Исследовать закономерности формирования структуры сплавов системы Fe - Cr - Cu - C с равномерно распределенными дисперсными включениями твердой /карбидной/ и мягкой /медистой/ фаз.
3. Изучить процессы образования "вторичных" структур в поверхностных слоях чугунов после воздействия абразива и трения скольжения, а также влияние химического состава, характеристик структуры и параметров деформирования /P, T / на фазовые превращения и перераспределение легирующих элементов в поверхностных слоях.
4. Разработать методику и определить влияние параметров деформирования на значения температур фазовых превращений в исследуемых сплавах.

### Методы исследования.

Разработана методика для определения влияния параметров деформирования на температуру фазовых превращений в сплавах /на основе аппарата Холла/. Используются методы оптической и электронноскопической металлографии, рентгенографии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов, стандартные и специальные методики по определению механических свойств, износостойкости в различных условиях изнашивания, окалинности.

### Научная новизна.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость износостойкости хромистых чугунов от характеристик "вторичной" структуры материала. Установлено, что в условиях абразивной эрозии реализуется только  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$  превращение, а при трении скольжения - и диффузионное перераспределение элементов. Установлена количественная связь между давлением и обрабатываемой  $\gamma_g / \alpha_g /$  - фазой. Уточнены ее параметры.

2. Теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность фазового превращения в поверхностных слоях хромистых чугунов при температурах  $T \geq 973$  К и давлениях  $P \geq 0,7$  Па. Установлена связь между содержанием хрома в сплаве и температурой фазового превращения при высоком давлении.

3. Разработан новый класс хромомедистых чугунов, отличающихся высокой износостойкостью в условиях трения скольжения и удовлетворительной обрабатываемостью. Исследованы закономерности формирования избыточных включений медистой фазы, их влияние на структуру и свойства чугунов.

4. Установлено, что повышение механических, специальных и технологических свойств алюминиевых чугунов промежуточной группы /9,0...14,0 % Al/ может быть достигнуто легированием марганцем и модифицированием такими элементами, как цирконий, селен, кальций, кадмий. Определены оптимальные составы и режимы термической обработки для различных условий изнашивания.

### Практическая ценность.

Разработаны алюминиево-марганцевые чугуны, обладающие высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения, в том числе и при повышенных температурах.

Разработаны хромомедистые чугуны с повышенной износостойкостью в условиях трения скольжения и удовлетворительной обрабатываемостью резанием в литом состоянии.

Предложены оптимальные составы хромованадиевых чугунов, отличающихся высокой износостойкостью при абразивном изнашивании.

Разработаны рекомендации по выбору износостойких материалов для конкретных условий изнашивания, а также технологические процессы получения из них литых заготовок.

Ресурс отливок из разработанных чугунов в 2...10 раз превышает этот показатель для отливок из традиционно используемых отечественных материалов и в 2,0...2,5 раза - образцов, изготавливаемых иностранцами фирмами.

### Реализация результатов работы в промышленности.

Разработанные составы алюминиевых и хромистых чугунов широко использованы в промышленности для деталей, эксплуатирующихся в различных условиях изнашивания, в том числе деталей дробетов, волочильного, насосного оборудования, бетоносмесителей, пневмотранспорта абразивных материалов, дизелей и др.

Многолетняя эксплуатация литых заготовок на таких предприятиях Украины, как з-д "Днепроспецсталь" /г.Запорожье/, з-д "Океан", ЧСЗ /г.Николаев/, з-д "Залив" /г.Керчь/, ХСПО /г.Херсон/, а также на предприятиях СНГ, в т.ч. Киреевском заводе ограждающих конструкций, СКТБ "Дезинтегратор" /г.Таллинн/, АСПО /г.Астрахань/ и др., подтвердила высокую износостойкость и надежность их работы. Экономический эффект от внедрения этих материалов составил 882,3 тыс. рублей в год /в ценах 1990 года/.

### На защиту выносятся следующие положения:

1. Закономерности образования исходной и "вторичной" структур легированных чугунов и их влияние на механические, технологические свойства и износостойкость.
2. Закономерности формирования включений избыточной высокомедистой фазы в структуре хромистых чугунов; принципы управления их формой, размерами, характером и плотностью распределения,

количественная взаимосвязь содержания меди, износостойкости и технологичности чугунов.

3. Износостойкость материалов определяется как исходной, так и "вторичной" структурами. В зависимости от условий изнашивания определяющими в формировании "вторичных" структур являются либо фазовые превращения /абразивная эрозия/, либо фазовые превращения и перераспределение легирующих элементов в поверхностных слоях. Выбор легирующих добавок должен производиться с учетом их влияния на исходную и "вторичную" структуру.

4. Целесообразность использования разработанных износостойких технологичных алюминиевомарганцевых, хромистых и хромо-медистых чугунов в промышленности для изготовления деталей и узлов, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения.

#### Апробация работы.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на республиканской конференции "Литые износостойкие материалы, их разработка и применение" /г.Киев, 1980г./, международной научно-технической конференции "Антифрикционные и износостойкие чугуны" /г.Винница, 1992г./, на семинаре европейской экономической комиссии ООН "Новые материалы и их применение в машиностроении" /г.Киев, 1992г./.

Отдельные технические решения, представленные в работе, экспонировались на Выставке достижений народного хозяйства СССР /бронзовая медаль/.

#### Публикации.

По теме диссертации опубликовано 6 работ, получено 13 авторских свидетельств.

#### Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, изложенных на 262 страницах машинописного текста, включая 37 таблиц, 63 рисунка, библиографии из 260 наименований и 20 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность проблемы и дается обоснование направления исследования - создание износостойких сплавов для деталей, подвергающихся воздействию абразива и трению скольжения, на основании изучения закономерностей формирования "вторичных" структур в поверхностных слоях, влияния технологических параметров на них и установления их связи с износостойкостью. Сформулированы цель работы, задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме диссертации. На основании анализа имеющихся в литературе данных по влиянию различных условий деформирования на фазовые превращения в поверхностных деформируемых слоях, а также изменения механических и специальных свойств различных сплавов сделан вывод о преобладающем влиянии на износостойкость "вторичных" структур. Они определяются как фазовыми превращениями, так и изменением химического состава за счет интенсификации диффузионных процессов при деформировании. Наряду с этим отмечается, что данные по изменению химического состава поверхностных слоев изнашиваемых деталей из легированных чугунов весьма малочисленны и противоречивы, не установлено влияние условий изнашивания, содержания легирующих элементов на изменение химического состава и полноту фазовых превращений в деформируемых слоях.

Сформулированные закономерности по влиянию исходной структуры, свойств, химического состава сплавов, особенностей деформирования при различных видах изнашивания на фазовые превращения позволяют сделать вывод о перспективности хромистых и алюминиевых /промежуточной группы/ чугунов как высокоизносостойких для определенных условий изнашивания материалов. Наличие упрочняющих фаз в их структуре, возможность фазовых превращений при деформировании, высокие окалино- и жаростойкость - все это обеспечивает высокую износостойкость этих сплавов. В то же время низкая технологичность существенно ограничивает возможности использования указанных чугунов и требует усовершенствования их составов.

Во второй главе описаны используемые в работе методики

исследований. Изучение структуры сплавов как исходной, так и "вторичной" производили с помощью оптических микроскопов МИМ-8, "Неофот-2", а также электронного микроскопа ЭМ-125К. Исследование структуры поверхностных слоев, деформированных трением, осуществляли по "косым" шлифам. Определение элементного состава микрообъемов сплавов, исследование распределения химических элементов как качественно, так и количественно, проводили с помощью локального спектрального анализа на лазерном спектральном микроанализаторе ЛМА-10 /локальность анализа 20...40 мкм/, локального рентгеноспектрального анализа на электронно-зондовом микроанализаторе MAP-3, установке "Сомека MS-46" и на растровом электронном микроскопе S 4-10, оснащенный рентгеновским энергодисперсным микроанализатором "Link system-290".

Фазовый состав опытных сплавов определяли с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре УРС-50И-М и ДРОН-0,5 в К- $\alpha$  излучении железа. Для исследования механизма и параметров фазовых превращений разработана специальная методика с использованием аппарата Холла.

Механические свойства определяли в соответствии со стандартными методиками.

Износостойкость в условиях абразивного изнашивания определяли по изменению массы образцов, перемещающихся по вулканическому кругу в среде кварцевого песка. Износостойкость при абразивной эрозии определяли на установке ЦУК-1 при различных углах ... атаки с использованием в качестве абразива дробы ДЧЛ и ДСР, в условиях трения скольжения - на установке МИ-1М по схеме "вкладыш-ролик" в водной среде, а также на испытательном стенде, обеспечивающем условия, максимально приближающиеся к реальным условиям эксплуатации деталей проточной части питательных насосов.

Эрозионно-кавитационную стойкость материалов определяли с использованием ультразвукового генератора УЗГ13-1,6/22 в водной среде по потере массы образцов.

Определение окалиностойкости производили по изменению удельной массы образца после определенного количества циклов нагрев-охлаждение.

В третьей главе приведены результаты исследований по повышению износостойкости и технологичности алюминиевых чугунов промежуточной группы /9,0...20,0 % Al/. Низкая технологичность этих сплавов обусловлена, в первую очередь, особенностями структуры, состоящей из легированного алюминием феррита и упрочняющей  $\gamma'$ -фазы / $\text{Fe}_3\text{Al C}_x$ /. Расположение этой фазы в матрице зависит от химического состава чугуна: она находится или в виде изолированных включений, или сплошного каркаса. Увеличение износостойкости и технологичности обеспечивается повышением вязкости матрицы и изменением формы, дисперсности, характера распределения  $\gamma'$ -фазы. Регулирование фазового состава матрицы осуществляется дополнительным легированием аустенитообразующими элементами и, в первую очередь, марганцем.

Исследовано влияние марганца, алюминия, углерода на структуру и комплекс механических, специальных и технологических свойств алюминиевых чугунов. Установлено, что ввод марганца в количестве 10,0...28,0 % в чугун с массовой долей алюминия 9,0...14,0 % способствует измельчению структуры и особенно заметному диспергированию эвтектики, количество которой увеличивается до 85-90%. С увеличением массовой доли марганца существенно уменьшаются количество и размеры включений  $\gamma'$ -фазы в междендритных промежутках. При массовой доле марганца более 28% по границам зерен аустенита появляются игольчатые выделения фаз типа  $\text{FeAl}_3$ ; /Mn, Fe/  $\text{Al}_6$ , что приводит к заметному охрупчиванию сплавов. Установлено, что более высокие значения ударной вязкости /3,0...3,5 Дж/см<sup>2</sup>/ достигаются в сплавах с 20,0...28,0 % марганца. Эти значения ~ в 5 раз превышают аналогичные показатели белых алюминиевых чугунов.

Данные, представленные в таблице I, подтверждают количественную зависимость между содержанием марганца, ударной вязкостью и твердостью чугунов.

При массовой доле марганца 20,0 % и более существенно увеличивается износостойкость чугунов при трении скольжения /рис. I/. Для условий абразивной эрозии оптимальным является 10,0...15,0 % марганца.

Таблица I

Влияние марганца на механические свойства алюминиевых чугунов

№ п/п	Массовая доля элемента, %				Ударная вязкость, КС, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость, HRC <sub>3</sub>
	C	Si	Mn	Al		
1.	1,60	0,47	0,5	11,6	0,7	52,0
2.	1,60	0,38	7,0	13,2	0,8	51,0
3.	1,57	0,58	10,5	10,5	1,3	48,5
4.	1,50	0,82	13,0	13,8	2,5	44,0
5.	1,58	0,54	20,2	9,0	3,5	44,5
6.	1,56	0,57	27,5	10,0	3,5	45,0
7.	1,64	0,50	30,8	12,2	1,2	47,5

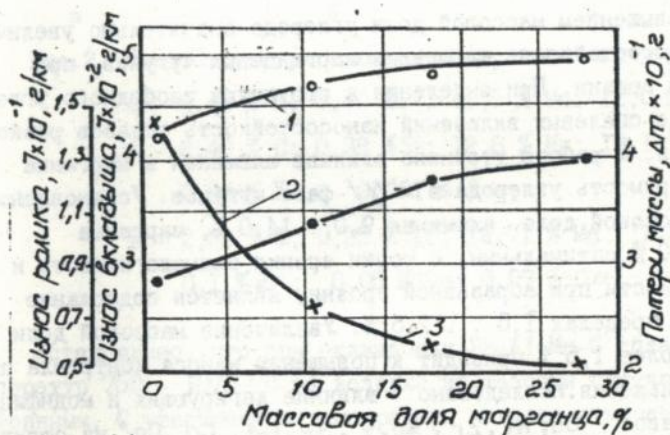


Рис. I. Влияние марганца на износостойкость Fe-Al-Mn-C сплавов в условиях трения скольжения при  $P = 10$  МПа,  $V_{ск} = 1$  м/с /1,2/ и абразивной эрозии при  $\alpha = 30^\circ$  /3/.

I - износ вкладыша; 2 - износ ролика.

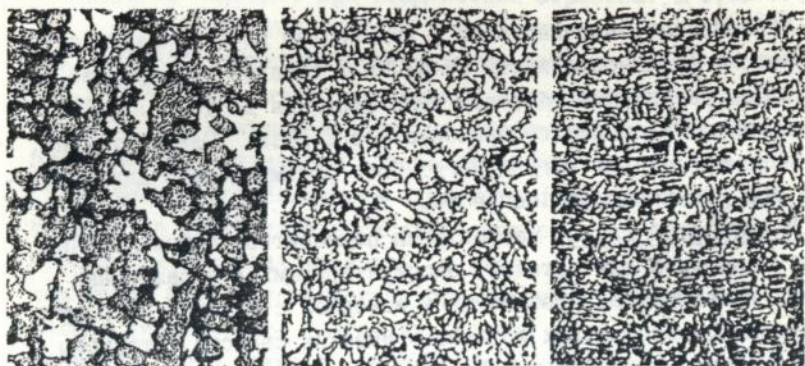
Установлено, что массовая доля алюминия в алюминиево-марганцевых чугунах должна находиться в пределах 9,0...14,0 %. При большем его содержании резко снижаются значения ударной вязкости.

Увеличение массовой доли углерода в Fe-Al-Mn-C сплавах от 0,4 до 2,5 % /при 9,0...14,0 % Al; 12,0...15,0 % Mn/ вызывает изменение формы, размеров, характера распределения включений упрочняющей фазы, увеличение их количества от 3 - 5 % при 0,4 % C до 50 - 60 % при 2,5 % C и микротвердости. Твердость сплавов возрастает соответственно от 30 до 53 HRC<sub>2</sub>, а ударная вязкость снижается до 2,0 Дж/см<sup>2</sup>. При увеличении массовой доли марганца в сплавах до 20,0...28,0 % влияние углерода аналогично, ударная вязкость этих сплавов на 20 - 30 % выше.

Установлено, что при массовой доле углерода более 1,7 % и марганца более 20,0 % в структуре чугунов кроме  $\gamma'$ -,  $\alpha$ -фаз, содержится аустенит, что обуславливает существенное повышение их пластичности.

С повышением массовой доли углерода значительно увеличивается износостойкость алюминиево-марганцевых чугунов при абразивной эрозии. При выделении в структуре свободного углерода в виде спелых включений износостойкость сплавов резко уменьшается. В работе уточнено влияние алюминия и марганца на растворимость углерода в  $\alpha$ - $\gamma$ -фазе чугунов. Установлено, что при массовой доле алюминия 9,0...14,0 %, марганца 10,0...15,0 % оптимальным, с точки зрения технологичности и износостойкости при абразивной эрозии, является содержание углерода в пределах 1,5 ... 2,5 %. Увеличение массовой доли углерода более 1,5 % приводит к повышению износа контртела при трении скольжения. Исследовано влияние легирующих и модифицирующих добавок /Cu, Ni, Zr, Mo, V, Se, Ge, Cd, Ca/ на структуру, механические и специальные свойства алюминиево-марганцевых чугунов. Установлено, что оптимальным является модифицирование цирконием, селеном, кальцием /а.с. № II6723I/. Совместный ввод добавок /Zr+Se/, /Zr+Se+Ca/ приводит к образованию термодинамически прочных соединений, которые способствуют дисперсности и однородности структуры /рис.2/

Значения ударной вязкости модифицированных чугунов составляют 9,0 ... 12,5 Дж/см<sup>2</sup>, износостойкость чугунов в условиях абразивной эрозии и трения скольжения повышается на 20 - 30 %.



а

б

в

Рис.2 Микроструктура алюминиевомарганцевых чугунов.  $\times 100$

а - 2,42 % С; 0,40 % Si; 11,5 % Mn; 12,0 % Al;

б - 2,40 % С; 0,38 % Si; 12,8 % Mn; 12,1 % Al;

0,04 % Zr ; 0,001 % Se;

в - 2,35 % С; 0,35 % Si; 12,71 % Mn; 12,5 % Al;

0,1 % Zr ; 0,05 % Se; 0,07 % Ca .

Установлено, что при охлаждении Fe-Al-Mn-C сплавов с температур 750 - 1070 °С на воздухе их фазовый состав остается постоянным. С увеличением температуры нагрева отмечается растворение и коагуляция включений  $\gamma'$ -фазы, они приобретают округлую форму. При этом  $\sim$  в 2 раза повышается ударная вязкость. Закалка с температуры 1150 °С существенно изменяет структуру и фазовый состав чугунов, увеличивая количество аустенита и обеспечивая равномерное распределение в структуре дисперсных включений  $\gamma'$ -фазы. Это способствует значительному повышению пластических характеристик и технологических свойств сплавов. Значения ударной вязкости достигают 20 Дж/см<sup>2</sup>. Сниже-

ние твердости до 34 ... 38 HRC<sub>3</sub> позволяет производить обработку отливок режущим инструментом. Термическая обработка обеспечивает повышение износостойкости сплавов в условиях трения скольжения на 15 - 30 %. Максимальной износостойкостью отличаются сплавы с массовой долей углерода 1,5 ... 1,8, марганца - 17,0 ... 25,0 %.

Установлено, что марганец в количестве до 7 % практически не влияет на окалиностойкость Fe-Al-Mn-C сплавов при нагреве до 1000°C. При увеличении массовой доли марганца до 13,0 ... 15,0 % окалиностойкость снижается примерно в 2 раза. Следовательно, алюминиевомарганцевые чугуны могут быть рекомендованы для эксплуатации при температурах менее 1000 °C.

В четвертой главе рассмотрены перспективы использования хромистых чугунов для деталей, эксплуатирующихся в различных условиях изнашивания, требования к исходной структуре и уровню механических, специальных и технологических свойств. Уточнены пути получения инвертированной структуры чугуна, определены перспективные системы легирования, модифицирования и режимы термической обработки.

Исследовано влияние углерода на структуру и свойства хромистого чугуна с массовой долей хрома 15,0 ... 20,0 %. Установлено, что высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания / в т.ч. и абразивной эрозии/ характеризуются чугуны эвтектического и близкого к нему составов. Расчетным путем, исходя из предпосылки сплошности карбидной сетки в структуре, установлено, что оптимальными, с точки зрения получения максимальной износостойкости, являются чугуны с массовой долей углерода около 2,9 %, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Молибден несколько повышает износостойкость чугуна при увеличении массовой доли до 1,6 %. Существенное влияние на структуру и свойства хромистых чугунов оказывают ванадий и титан. Ввод ванадия в количестве до 3,0 % обеспечивает заметное измельчение структуры, в т.ч. первичных карбидов. При массовой доле ванадия 0,9 ... 3,0 % наблюдается равномерное распределение карбидов ванадия и хрома, образующих эвтектики. В этом случае структура является инвертированной, полностью соответствующей правилу Шарпи. При увеличении содержания ванадия карбиды укрупняются, форма их трансформируется в "звездчатую" либо типа "кленовых

листьев". Анализ полученных результатов показал, что для работы в условиях абразивного изнашивания целесообразно использовать хромованадиевые чугуны с массовой долей ванадия до 3,5 %. Увеличение массовой доли ванадия свыше 3,5 % нежелательно вследствие снижения износостойкости из-за выкрашивания крупных карбидов при воздействии абразива.

Титан образует карбиды и карбонитриды, способствует диспергированию структуры; оптимальная добавка титана составляет 0,2 - 0,3 %. При этом абразивная износостойкость повышается на 20 %; при большем содержании титана наблюдается снижение пластичности, ухудшение обрабатываемости чугуна.

Никель, стабилизируя аустенит, препятствует  $\gamma \rightarrow \alpha_2$  превращению, в результате несколько снижается износостойкость, но повышается ударная вязкость, в связи с чем легирование никелем может быть рекомендовано при изготовлении отливок, испытывающих динамические нагрузки. Данные испытаний позволили заключить, что замена никеля марганцем в количестве 3,0...5,0% обеспечивает достаточно высокий уровень износостойкости и технологических свойств.

Оптимальным режимом термической обработки с учетом данных износостойкости и технологичности является нагрев до температуры 1050 °С и охлаждение на воздухе или в масле. Структура чугуна состоит из метастабильной аустенитной матрицы с дисперсными включениями вторичных карбидов и эвтектики. Термическая обработка вызывает повышение износостойкости чугуна на 10 - 15 %. Реализация  $\gamma \rightarrow \alpha_2$  превращения при деформировании поверхностных слоев отливок под воздействием абразива увеличивает износостойкость сплава.

Разработан принципиально новый класс износостойких чугунов, в структуре которых наряду с карбидной фазой содержатся равномерно распределенные дисперсные включения округлой формы легкоплавких металлов, в частности, меди /рис.3/. Исследовано формирование включений избыточной медистой фазы в структуре хромистых чугунов, легированных медью в количествах, превышающих предел ее растворимости в аустените. Определено влияние химического состава, температуры, длительности выдержки расплава на количество, геометрические размеры включений, характер их распределения. Установлено, что наличие медистых

включений способствует измельчению первичных карбидов /рис.4/.

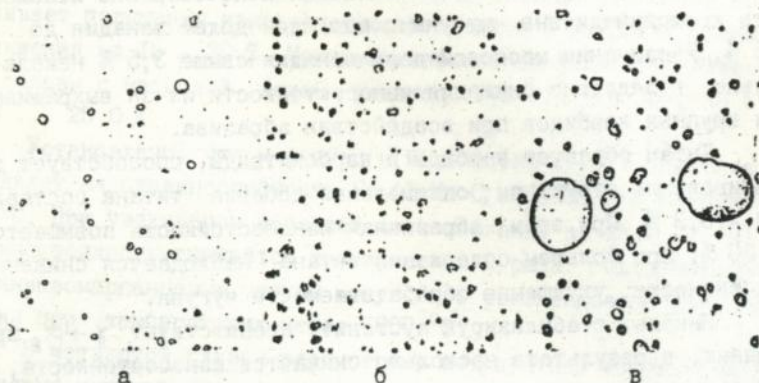


Рис. 3. Включения медистой фазы в хромистых чугунах, содержащих: а - 11,2 % Cu; б - 14 % Cu; в - 20,0 % Cu. x 100



Рис. 4. Структура хромистого чугуна с включениями медистой фазы /3,5 % C; 0,6 % Si; 0,8 % Mn; 16,0 % Cr; 21 % Cu/. x 100

Установлено, что с точки зрения получения оптимального комплекса свойств и экономичности, массовая доля меди в чугуне должна находиться в пределах 9 ... 14,0 %.

Разработанные составы хромомедистых чугунов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав хромомедистых чугунов

№ п/п	Массовая доля элемента, %					
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Fe
1.	1,0 - 2,2	0,5 - 1,5	0,5 - 0,8	8,0-20,0	10,2-32,0	ост.
2.	2,7 - 3,5	0,3 - 1,5	0,3 - 1,5	10,0-20,0	8,5-28,0	ост.

Присутствие в структуре этих чугунов включений медистой фазы обеспечивает механизм "безыносного" трения, тем самым повышает износостойкость в условиях трения скольжения, эрозионно-кавитационного изнашивания в 2 ... 10 раз /рис.5 /. Хромо-медистые чугуны удовлетворительно обрабатываются режущим инструментом в литом состоянии.

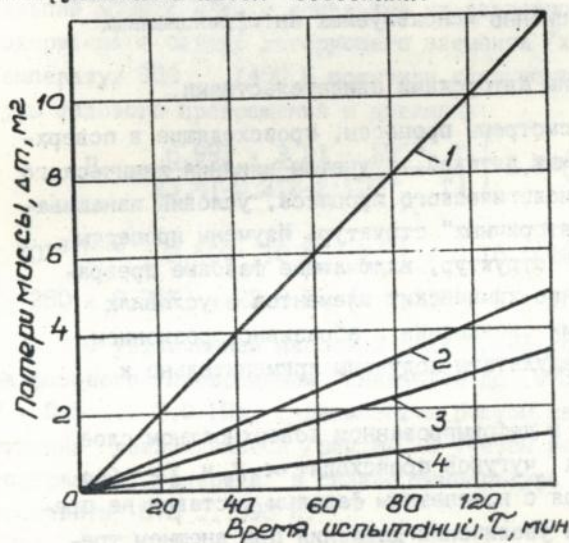


Рис.5. Кинетика кавитационно-эрозионного изнашивания:  
 1 - серый чугун СЧ25;  
 2 - кавитационно-эрозионно-стойкая сталь 55ГС2А;  
 3 - сталь 38ХМЮЛ;  
 4 - чугун ІЗОХІ5Д9.

Алюминиевомарганцевые и хромистые чугуны разработанных составов были использованы для изготовления деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения. Проведены испытания, позволившие определить уровень износостойкости реальных отливок в зависимости от их химического состава и условий эксплуатации. Характер зависимостей влияния различных технологических факторов /легирования, модифицирования, термической обработки/ на износостойкость деталей аналогичен зависимостям, полученным при лабораторных испытаниях.

Установлено, что для таких отливок, как дробебетные лопатки, била дезинтеграторов, колена пневмопроводов, эксплуатирующихся в условиях абразивной эрозии, использование разработанных сплавов повышает их ресурс в 2 - 2,5 раза по сравнению с отливками ведущих зарубежных фирм и в 2 ... 10 раз - отечественного производства. Например, ресурс дробебетных лопаток из хромистого чугуна достигает 520 ... 600 часов, отливки из алюминиево-

ганцевого чугуна при трении с абразивом - 700 часов, что в 4 - 5 раз превышает ресурс деталей из серого чугуна.

Применительно к трению скольжения перспективными являются хромомедистые чугуны. Испытания деталей уплотнений мощных насосов, гильз дизелей убедительно подтвердили сказанное. Ресурс отливок более, чем в 2 раза превышает аналогичный показатель деталей из традиционно используемых антифрикционных материалов.

Разработки защищены авторскими свидетельствами.

В пятой главе рассмотрены процессы, происходящие в поверхностных слоях изнашиваемых деталей, с учетом влияния химического состава, параметров технологического процесса, условий изнашивания на характеристики "вторичных" структур. Изучены процессы формирования "вторичных" структур, включающие фазовые превращения и перераспределение химических элементов в условиях деформирования при трении скольжения и абразивно-эрозионном изнашивании. Основные результаты получены применительно к хромистым сплавам.

Подтверждено, что в деформированном поверхностном слое исследуемых легированных чугунов происходят  $\alpha \rightarrow \gamma_2$  и  $\gamma \rightarrow \alpha_2$  превращения, глубина слоя с измененным фазовым составом не превышает 45 - 90 мкм. При увеличении давления при внешнем трении от 1 до 25 МПа количество  $\gamma_2$ -фазы в поверхностном слое хромистых чугунов с исходной структурой / М + К / повышается до 40 - 75 %, а с дальнейшим увеличением - до 50 МПа - уменьшается до значений количества остаточного аустенита в исходной структуре. Изменение скорости скольжения от 2 до 12 м/с менее заметно влияет на процесс  $\alpha \rightarrow \gamma_2$  превращения, количество  $\gamma_2$ -фазы при этом увеличивается на 10 ÷ 15 %. Аустенит деформации /  $\gamma_2$  / с параметром решетки, равным 0,361-0,362 нм, и микротвердостью  $H_{\mu} = 8000 - 9000$  МПа способствует повышению износостойкости легированного чугуна.

Изучен механизм фазового превращения в структуре поверхностного слоя. Температура фазового превращения, температурный интервал устойчивости области существования  $\gamma$ -фазы во многом определяется величиной приложенного внешнего давления. Выполнен расчет фактических давлений в локальных объемах пятен

касания. Полученные данные использованы при определении термодинамического потенциала образования фаз.

С использованием известных методик определена реальная температура на поверхности изнашиваемого материала.

Определяя термодинамические потенциалы как разность энтальпий  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз и используя их зависимость от давления и содержания в сплаве легирующего элемента /хрома/, для диапазона температур 900 ... 1400 К получили следующую зависимость температуры фазового превращения и давления:

$$P = \frac{6,991 + 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot T}{23,4(-0,312 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot T)} \cdot \left[ 0,84(5688 - 12,95T + 9,853 \cdot 10^{-3} T^2 - 2,509 \cdot 10^{-6} \cdot T^3) + 0,16 \cdot (460 + T) \right] + 0,16 \cdot 0,84 (-280 + 0,75T) + 23,9 P (-0,312 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot T).$$

С увеличением массовой доли хрома до 15 - 17 % температура фазового превращения снижается до 973...1023 К при  $P = 0,5 \dots 1,0$  ГПа, с дальнейшим ростом массовой доли - соответственно увеличивается /рис.6/. С учетом реальных значений содержания углерода в сплаве температура превращения может составить 873 ... 893 К.

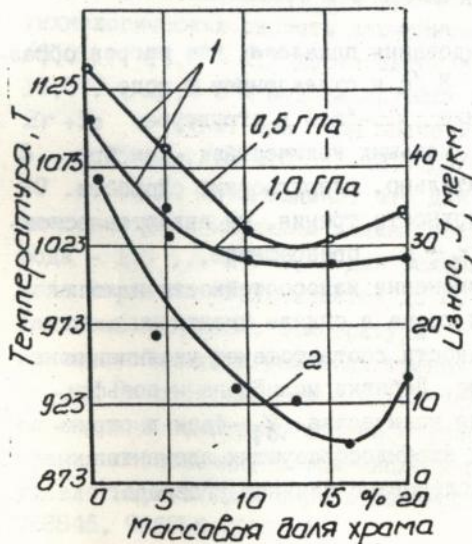


Рис.6. Влияние давления на температуру превращения в Fe - Cr сплавах /1/ и износоустойчивость в зависимости от содержания хрома /2/.

Полученные расчетные данные проверяли с использованием моделирующих процессов - всестороннего гидростатического сжатия при повышенных температурах с использованием установки Холла, а также в условиях сверхбыстрого импульсного нагрева со скоростями 1000... 2000 К/с.

Установлено, что для исследуемых сплавов при давлении свыше 700 МПа и температуре более 973 К имеют место фазовые превращения. Количество  $\gamma_2$ -фазы зависит от обоих параметров, с их ростом в условиях гидростатического сжатия количество  $\gamma_2$ -фазы увеличивается / табл.3 /

Таблица 3

Влияние давления и температуры на фазовый состав  
поверхностных слоев трения

№ п/п	Давление, МПа	Температура, К	Содержание фаз, %	
			$\alpha$	$\gamma_2$
1.	$10^{-4}$	293	100	-
2.	0,7	773	100	-
		973	84	16
3.	2,5	293	100	-
		793-813	84	16
		973	77	23
4.	3,75	773-800	77	23

Рентгеноскопические исследования показали, что нагрев образцов со скоростью 1500...2000 К/с и охлаждением в воде несколько увеличивает содержание  $\gamma$ -фазы в структуре чугуна, однако, в значительно меньших количествах, чем при деформировании трением. Следовательно, сверхвысокие скорости нагрева локальных объемов поверхности трения, не являются основным фактором, способствующим  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращению.

Полученные зависимости изменения износостойкости и количества  $\gamma_2$ -фазы от массовой доли хрома в сплаве идентичны по характеру: повышение износостойкости соответствует увеличению содержания  $\gamma_2$ -фазы в структуре. Добавки молибдена и вольфрама до 3 % приводят к увеличению количества  $\gamma_2$ -фазы в структуре. Аналогично и влияние этих карбидообразующих элементов на износостойкость чугунов. Исследовано влияние углерода:

установлено, что при увеличении массовой доли от 0,35 до 1,15 % количество  $\gamma_9$ -фазы в слое возрастает с 26 до 58 %, с дальнейшим увеличением содержания углерода количество  $\gamma_9$ -фазы несколько снижается / до 48 - 49 %/.

Полученные данные позволили сделать вывод, что элементы, способствующие образованию  $\gamma_9$ -фазы в поверхностном слое при трении, повышают износостойкость сплава. Применительно к условиям трения скольжения в структуре поверхностного слоя реализуются и фазовые превращения, и изменение химического состава сплава, применительно к условиям абразивно-эрозионного изнашивания - только фазовые превращения.

Отмечено образование  $\alpha_9$ -фазы в количестве около 20 % на глубину до 20 мкм при деформировании в условиях абразивной эрозии высокомарганцевистой стали.

Исследовано перераспределение хрома в поверхностных слоях и влияние легирующих элементов на этот процесс. Установлено, что хром диффундирует в поверхностные слои металла; эффективно замедляют диффузию хрома никель при массовой доле 2 %, ниобий при массовой доле 1 % и ванадий при массовой доле 1,5 %.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что повышение механических, специальных и технологических свойств алюминиевых чугунов промежуточной группы /9,0 ... 14,0 % Al/ достигается введением марганца в пределах 10,0 ... 28,0 % и модифицирующих добавок /Zr + Se; Zr + Cd; Zr + Se + Ca/. При этом значения ударной вязкости повышаются в 5 ... 15 раз /до 9,0 ... 12,5 Дж/см<sup>2</sup>/, износостойкости - на 20 ... 25 %. Установлено, что для условий абразивной эрозии массовая доля марганца должна составлять 10,0 ... 15,0 %, углерода - 1,5 ... 2,5 %, а для условий трения скольжения - массовая доля марганца увеличивается до 20 - 28 %. Закалка алюминиево-марганцевых чугунов с температуры 1150 °C повышает их износостойкость в условиях трения скольжения на 15 - 30 %.

Разработаны новые алюминиево-марганцевые чугуны, отличающиеся высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения, в том числе и при повышенных температурах, и удовлетворительной обрабатываемостью /а.с. № 639960, 724594, 768846, 986956, 1167231/.

2. Установлено, что высокой износостойкостью в условиях абразивной эрозии характеризуются хромистые чугуны /I5,0 ... 20,0 % С / эвтектического или близкого к нему составов. Повышению износостойкости способствует ввод титана, бора в количестве 0,1 ... 0,3 %, молибдена 0,5 ... 1,6 % / а.с. № 729273/, повышение технологичности - ввод 3,0 ... 5,0 % марганца. / а.с. № 755880/. Легирование хромистых чугунов ванадием в количестве 0,9 ... 3,5 % обеспечивает получение инвертированной структуры, содержащей карбиды ванадия и хрома и, как следствие, достижение максимальной износостойкости.

3. Установлено, что наличие в структуре избыточных дисперсных, равномерно распределенных медистых включений способствует реализации механизма "безыносного" трения, повышает износостойкость хромистых чугунов в 2 ... 10 раз.

Исследованы особенности формирования включений высокомедистой фазы в зависимости от технологических параметров. Установлено, что для получения оптимальной структуры в условиях гравитационного и центробежного литья содержание меди в чугунах должно находиться в пределах 9,0 ... 14,0 %. Разработан новый тип износостойких хромистых чугунов с удовлетворительной обрабатываемостью в литом состоянии /а.с. № I689420, I68942I/.

4. Установлено, что в условиях абразивно-эрозионного изнашивания в поверхностном слое сплавов имеют место фазовые превращения  $\alpha \rightarrow \gamma_g$ ;  $\gamma \rightarrow \alpha_g$ ; а при трении скольжения имеет место еще и перераспределение элементов и, как следствие, изменение химического состава.

5. Износостойкость хромистых чугунов зависит от количества  $\alpha_g(\gamma_g)$  фазы во "вторичной" структуре. Установлено, что характер зависимостей количества этих фаз и износостойкости от массовой доли углерода /0,35 ... 2,0 % / и легирующих элементов / 10,0 ... 25,0 % Cr; 0,5 ... 4,0 % Mo; 0,5 ... 3,0 % W; 0,1 ... 2,0 % V; 0,5 ... 6,0 % Mn / идентичны: элементы, способствующие образованию  $\alpha_g(\gamma_g)$ -фазы в поверхностном слое, увеличивают износостойкость сплава.

5. Исследован механизм фазового превращения в поверхностных слоях с учетом реальных параметров деформирования при изнашивании /Р,Т/. Подтверждено, что и при изнашивании хромистых

чугунов фазовые превращения в поверхностном слое происходят бездиффузионным путем. Теоретически определено влияние содержания хрома в чугуне на температуру фазового превращения при  $P=0,5 \dots 1,0$  ГПа: до 15,0 ... 17,0 % хрома температура фазовых превращений снижается до 973 ... 1023 К, при более высоком содержании хрома вновь возрастает. Экспериментально подтверждено, что при давлении  $P \geq 0,7$  ГПа и температуре  $T \geq 973$  К в структуре хромистого чугуна образуется  $\gamma$ -фаза, причем, с ростом давления и температуры в условиях гидростатического давления ее количество увеличивается.

7. Разработка новых износостойких алюминиево-марганцевых, хромомедистых, хромистых чугунов и их использование в производстве отливок позволили повысить ресурс деталей дробебетного оборудования отечественного и зарубежного производства, дезинтеграторов, пневмотранспорта абразивных материалов, валковых дробилок, оборудования по производству электродов, а также деталей мощных насосов, дизелей и др. Ресурс отливок из разработанных материалов в 2 ... 2,5 раза превышает аналогичный показатель для отливок ведущих иностранных фирм и в 2 ... 10 раз - отечественного производства.

Внедрение разработанных материалов на предприятиях Украины и стран СНГ /з-д "Днепроспецсталь", г.Запорожье; заводы "Океан", ЧСЗ, г.Николаев; завод "Залив", г.Керчь; ХСПО, г.Херсон; СКТБ "Дезинтегратор", г.Таллинн; АСПО, г.Астрахань и др./обеспечило получение экономического эффекта в размере 882,3 тыс. рублей в год / в ценах 1990 г./.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Влияние легирующих элементов и термической обработки на абразивную стойкость хромистых чугунов /Б.А.Кириевский, Л.Г. Смолякова, Т.К. Изюмова // Литые износостойкие материалы. -Киев: Ин-т проблем литья АН УССР, 1978. -С.45-48.

2. А.с. 639960 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, Л.П. Миронов, С.С. Затуловский, В.П.Кораблин. -Опубл. 30.12.78, Бюл.№ 48.

3. А.с. 648652 СССР, МКИ С 22 С 38/60. Сталь /Б.А.Кириевский, Т.К. Изюмова, П.П. Дончук, П.М. Яковенко. -Опубл.25.02.79, Бюл. №7.

4. А.с. 724594 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, П.П. Дончук, П.М. Яковенко. - Оpubл. 30.03.80, Бюл. № 18.

5. А.с. 729273 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, В.И. Бичинский, В.В. Зубик, С.П. Куликов. - Оpubл. 25.04.80, Бюл. № 15.

6. А.с. 755880 СССР, МКИ С 22 С 37/06. Чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, С.П. Куликов, Л.П. Орлов, А.Д. Клипов, Ю.И. Роматовский. - Оpubл. 15.08.80, Бюл. № 30.

7. А.с. 768846 СССР, МКИ С 22 С 38/06. Сплав на основе железа /Т.К. Изюмова, Б.А. Кириевский, Е.А. Марковский, Е.П. Шухин. - Оpubл. 07.10.80, Бюл. № 37.

8. Изюмова Т.К. Исследование специальных свойств алюминиевых чугунов промежуточной группы // Литые износостойкие материалы. - Киев: Ин-т проблем литья АН УССР, 1981, -С.15-17.

9. А.с. 918329 СССР, МКИ С 22 С 38/34. Сталь /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, Е.А. Марковский. - Оpubл. 04.07.82, Бюл. № 13.

10. А.с. 986956 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун /Е.А. Марковский, Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова. - Оpubл. 07.01.83, Бюл. № 1.

11. А.с. 1167231 СССР, МКИ С 22 С 38/14. Сплав на основе железа / Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, Н.В. Чантурия, В.В. Зубик, В.А. Гриднев. - Оpubл. 15.07.85, Бюл. № 26.

12. А.с. 1611975 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, И.А. Солоров, И.П. Солдатов. - Оpubл. 07.12.90, Бюл. № 45.

13. А.с. 1689420 СССР, МКИ С 22 С 37/06. Износостойкий чугун / Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, В.Н. Зоц, Б.Н. Захарченко, Л.Н. Трубаченко. - Оpubл. 07.11.91, Бюл. № 41.

14. А.с. 1689421 СССР, МКИ С 22 С 37/06. Износостойкий чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, И.А. Солоров, И.П. Солдатов. - Оpubл. 07.11.91, Бюл. № 41.

15. А.с. 1708911 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун /Б.А. Кириевский, Т.К. Изюмова, В.М. Винарский, В.Н. Зоц, Р.А. Мытс, В.Ильвес. - Оpubл. 30.01.92. Бюл. № 4.

16. Кириевский Б.А., Изюмова Т.К. Совершенствование состава, структуры и свойств хромистых чугунов //Литейное производство. - 1992. -№ 9. -С.17-19.

17. Кириевский Б.А., Изюмова Т.К. Износостойкие Fe-Al-C сплавы с удовлетворительной технологичностью // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. "Антифрикционные и износостойкие чугуны", 15-17 сент. 1992 г. - Виннига: Виннигский политехн. ин-т., 1992. -С.50-51.

18. Кириевский Б.А., Изюмова Т.К. Хромистые чугуны. Оптимизация состава и условий кристаллизации //Аннотация стендовых докладов участников семинара европейской экономической комиссии ООН "Новые материалы и их применение в машиностроении", 13-16 окт.1992г. -Киев: ИПМ АН Украины, 1992. -С.113-114.

19. Кириевский Б.А., Изюмова Т.К. Хромистые чугуны. Перспективы совершенствования их структуры и свойств //Процессы литья -1993.-№4.-С.123-128.

Подп. в печ. 15.10.93 . Формат 60x84/16. Бум. офс.  
Печ. офс. Усл. печ. л. 14 . Усл.кр.-отт. 14 .  
Уч.-изд.л. 11 . Тираж 100 экз. Заказ 1244 .

---

Институт проблем материаловедения  
им. И.Н.Францевича АН УССР.  
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

Участок оперативной полиграфии  
Института проблем материаловедения  
им. И.Н.Францевича АН УССР.  
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

463397

AB 28.278

**AB 28.278**