

М412279
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

НИКОЛАЕВ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ

УДК 669.13:621.74.043:620.178

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ
СЕРОВОГО ЧУГУНА С ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ
ПРИ ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ

05.16.04 - Литейное производство

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1984

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель -- доктор технических наук,
доцент Васильев В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Снежной Р.Л.
кандидат технических наук
Абакумов Ю.Ф.

Ведущее предприятие -- МПО компрессорного и холодильного
машиностроения " Борец "

Защита диссертации состоится "26" марта 1984 г.
на заседании специализированного Совета К 053.15.13 в
Московском высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана
по адресу: 107005 Москва. 2-я Бауманская ул., д.5

Ваш о атью,
просим вы

С ди ту
им.

Авто .

За Учеч
специализ
доктор те
до С.

M412279

Подп. к
Л-82849

. 100экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В соответствии с решениями XXVI съезда КПСС на современном этапе своего развития машиностроение призвано повышать качество и технический уровень выпускаемой продукции за счет улучшения организации и совершенствования технологии.

Литейное производство является основной заготовительной базой отрасли компрессорного машиностроения для холодильной техники. Для удовлетворения растущей многомиллионной потребности в компрессорах широко применяется высокопроизводительный способ кокильного литья деталей из серого чугуна. Кокильные чугунные отливки имеют сравнительные низкие показатели износостойкости в условиях трения скольжения. Постоянное повышение требований к износостойкости чугунных кокильных отливок делает актуальной задачу обеспечения износостойкости целенаправленным совершенствованием литейной технологии.

Исследованиями советских и зарубежных ученых показано, что износостойкость литых деталей зависит от строения структуры материала. Наиболее общие требования к структуре сформулированы Шарпи. Количественной оценки степени соответствия гетерогенных структур правилу Шарпи не разработано. Не выработано общего мнения о количественном соотношении структурных составляющих для обеспечения наибольшей износостойкости чугуна и о характеристике для построения прогноза сравнительной износостойкости его структур. В результате, литейная технология получения износостойких чугунных деталей для узлов трения скольжения становится не всегда эффективной, что существенно повышает затраты, особенно в условиях массового производства отливок.

Предмет исследования. В работе исследована часть проблемы управления формированием структуры чугуна при литье — совершенствование технологии получения чугунных кокильных отливок с повышенной износостойкостью для узлов трения скольжения.

Целью настоящей работы была разработка технологии получения и исследование литых структур серого чугуна, обеспечивающих повышенную износостойкость кокильных отливок в условиях трения скольжения.

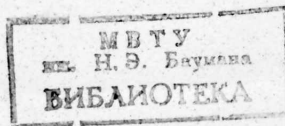
Основная научная задача, которую надо было решить для достижения поставленной цели, состояла в выявлении закономерностей влияния структуры чугуна на износостойкость кокильных отливок, а также в разработке на основе этих закономерностей методов рас-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1412279

Николаев В.Г. Разработка 1



чета, формирования и оценки гетерогенных структур с повышенной износостойкостью.

Основные методы решения поставленной научной задачи: теоретическое выявление с использованием нелинейной термодинамики и экспериментальное обоснование с применением методов математической статистики структурно-чувствительного критерия сравнительной износостойкости, выражаемого через параметры статистического распределения микротвердости, значения которой определяли методом склерометрии. Испытание и исследование гетерогенных структур методом склерометрии производили на специально спроектированной и изготовленной установке. Для расчетных работ применяли ЭВМ типов "МИР" и "НАИРИ".

Научная новизна и новые научные результаты работы заключаются в том, что:

- исследовано влияние структуры чугуна на износостойкость кокильных отливок в узлах трения скольжения и установлено, что изменение износостойкости достаточно точно контролируется параметрами статистического распределения микротвердости, которые зависят от физико-механических свойств, соотношения и равномерности распределения структурных составляющих в чугунных отливках;

- теоретически выявлен и экспериментально обоснован структурно-чувствительный критерий сравнительной износостойкости гетерогенных структур, величина которого прямо пропорциональна дисперсии величин микротвердости и обратно пропорциональна квадрату ее среднего значения;

- теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что росту значения критерия сравнительной износостойкости отвечает рост износостойкости чугунных отливок, который объясняется уменьшением склонности чугуна к разрушению при пластическом деформировании в условиях трения;

- изучено при помощи машинного эксперимента влияние соотношения структурных составляющих с различными физико-механическими свойствами на величину критерия сравнительной износостойкости, получено расчетом и экспериментально подтверждено, что максимум, имеющийся на кривой зависимости величины критерия от соотношения структурных составляющих, отвечает структуре с максимальной износостойкостью в условиях трения скольжения, а алгоритм машинного эксперимента, реализованный на ЭВМ "МИР-2", позво-

ляет рассчитать наиболее износостойкую гетерогенную структуру:

- получены данные, показывающие, что совершенствование литейной технологии для получения кокильных чугунных отливок с повышенной износостойкостью необходимо вести в направлении формирования гетерогенных структур со значениями критерия сравнительной износостойкости, отвечающими его расчетному максимуму;

- аналитически о применении ЭВМ рассчитана износостойкая гетерогенная структура чугуна для подшипников компрессора и реализована технологией комплексного модифицирования расплава чугуна, направленной на повышение значения критерия сравнительной износостойкости, что снизило средний износ подшипников на 90%;

- предложено применять выявленный критерий сравнительной износостойкости для оценки в численном виде степени соответствия гетерогенных структур правилу Шарпи, т.е. применять критерий в качестве математического выражения правила Шарпи.

Полученные результаты подтверждают основные положения, выдвинутые автором для защиты. Первое состоит в том, что нелинейная термодинамика является эффективным средством анализа процесса изнашивания с целью выявления совокупности свойств материала, обуславливающих его износостойкость в условиях трения скольжения. Выводы, полученные при использовании нелинейной термодинамики, не противоречат существующим теориям о влиянии свойств материала на его износостойкость и нашли экспериментальное подтверждение для чугунных литых деталей узлов трения скольжения герметичного компрессора. Второе положение состоит в том, что повышение износостойкости чугунных кокильных отливок в узлах трения скольжения может быть достигнуто целенаправленным применением известных технологических приемов литья, воздействующих на формирование структуры. Экспериментально подтверждено, что модифицированием расплава чугуна можно обеспечить расчетное строение гетерогенной структуры с повышенной износостойкостью.

Практическая полезность работы. На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований предложен способ оценки приемов литейной технологии, направленных на повышение износостойкости деталей в узлах трения. В основу способа положен экспресс-анализ сравнительной износостойкости гетерогенных структур по величине выявленного критерия. Исследованиями в лабораторных и производственных условиях доказано,

что с помощью критерия можно спрогнозировать соотношение структурных составляющих, отвечающее повышенной износостойкости литых деталей, а комплексным модифицированием-сформировать структуры со значением критерия, близким к расчетному максимуму. Предложенный способ позволяет сократить объем длительных натурных и стендовых испытаний деталей в узлах трения при отработке технологии их изготовления.

Доказана возможность целенаправленного изменения величины критерия известным технологическим приемом управления формированием структуры - модифицированием расплава чугуна. Разработан и проверен состав комплексного модификатора, обеспечивающий формирование в кокильных заготовках подшипников компрессора структуры с требуемой величиной критерия при одновременном устранении отбела и междендритного графита в структуре чугуна. Разработана установка и методика определения критерия, которые могут быть реализованы в условиях производственных лабораторий.

Реализация результатов работы. Разработанные требования к структуре чугуна деталей герметичного компрессора в установленном порядке внесены в ТУ на отливки. Внедрение в условиях мелкосерийного производства технологии модифицирования чугуна для повышения износостойкости дало на КЮЗПМ экономический эффект три руб. на тонну. Апробация комплексного модифицирования в условиях массового производства деталей компрессоров на Столбовском чугуно-литейном заводе дала экономический эффект 20 руб. на тонну литья.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на Всесоюзной и областной конференциях литейщиков (в 1981 и 1977 гг. соответственно), на зональном семинаре литейщиков (1979 г.), на конференциях НТО Машпрома (в 1977 и 1980 гг.), на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация литейного производства" МВТУ им.Н.Э.Баумана (в 1976, 1977 и 1978 гг.), на заседаниях комитета литья в металлические формы и центробежного литья ЦП и МГП НТО Машпрома (в 1980 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из вве-

дения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений, содержащих сведения о результатах химико-металлографического анализа чугуна рекламационных компрессоров, о примененных программах и математических зависимостях, примененных для машинного эксперимента, и обработки результатов исследований. Диссертация изложена на 229 страницах текста, иллюстрируется 36 рисунками, содержит 29 таблиц и включает список литературы из 498 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выявление физических свойств, контролирующих износостойкость материала, было реализовано методом обобщенного представления процессов дифференциальными уравнениями состояния термодинамической системы.

Износ является результатом протекания разнородных процессов: тепловых, деформационных, химических и т.д. Каждому процессу отвечает своя форма движения: тепловая, деформационная, химическая и т.д. Реальные процессы характеризуются взаимным превращением форм движения друг в друга согласно закону Майера. Для удобства описания процесса износа использованы параметры состояния термодинамической системы: потенциалы и обобщенные координаты. Последние в условиях реальных процессов являются функциями от потенциалов всех форм движения, присущих системе, т.е.:

$$X_i = \varphi_i(P_1; P_2; P_3 \dots P_n) \quad ; \quad i=1,2,3 \dots n,$$

где X_i - термодинамическая (обобщенная) координата i -ой формы движения; $P_1; P_2 \dots P_n$ - потенциалы форм движения системы; n - количество форм движения.

Протеканию термодинамического процесса в системе отвечает изменение обобщенной координаты состояния:

$$dX_i = \sum (\partial X_i / \partial P_j) dP_j = \sum (K_{ij} dP_j) \quad , \quad j=1,2 \dots n \quad (I)$$

где K_{ij} - термодинамическая емкость, представляющая частную производную координаты состояния - X_i по потенциалу P_j , которая и связывает взаимное влияние изменения координаты состояния с изменением потенциала.

В работе рассмотрены доминирующие процессы при изнашивании деталей в узлах трения скольжения герметичного компрессора: тепловой, химический и деформационный. Изменение координат состоя-

ния для указанных процессов согласно (I) описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} dx_1 = ds &= \left(\partial s / \partial T \right)_{\sigma, \mu} dT + \left(\partial s / \partial \sigma \right)_{T, \mu} d\sigma + \left(\partial s / \partial \mu \right)_{T, \sigma} d\mu; \\ dx_2 = de &= \left(\partial e / \partial T \right)_{\sigma, \mu} dT + \left(\partial e / \partial \sigma \right)_{T, \mu} d\sigma + \left(\partial e / \partial \mu \right)_{T, \sigma} d\mu; \\ dx_3 = dN &= \left(\partial N / \partial T \right)_{\sigma, \mu} dT + \left(\partial N / \partial \sigma \right)_{T, \mu} d\sigma + \left(\partial N / \partial \mu \right)_{T, \sigma} d\mu, \end{aligned} \quad (2)$$

где $T; \sigma; \mu$ - потенциалы соответственно тепловой деформационной, химической процессов; температура, напряжение, химический потенциал; $S; e; N$ - энтропия, обобщенная деформация, мольная доля - координаты состояния рассматриваемых процессов: индексы "1", "2", "3" - относятся соответственно к тепловому, деформационному и химическому процессу. Частные производные координат состояния по потенциалам являются термодинамическими емкостями - K_{ij} , которые раскрываются через физические свойства материала.

Условием обеспечения долговечности работы детали при установившемся режиме трения является достижение динамического равновесия протекающих процессов, т.е. минимального изменения свойств материала, обеспечивающих его износостойкость:

$$dx_i \rightarrow 0. \quad (3)$$

Анализом системы термодинамических уравнений (2) с учетом (3) была выделена характеристика $(\Delta Q/V)$, которая может быть представлена, как отношение работы деформирования поверхностного слоя к объему деформированного материала. Согласно В.К. Григоровичу такая характеристика по физическому смыслу и размерности отвечает микротвердости материала. Следовательно, в случае гомогенной системы (материала с гомогенной структурой) микротвердость может быть использована для оценки износостойкости материала. Применение микротвердости при исследовании перлитной составляющей или гетерогенной структуры чугуна в целом, содержащей хаотично расположенные разнотвердые составляющие, осложнено тем, что нарушается закон подобия отпечатков Кирпичева-Ника. В этом случае микротвердость теряет смысл физической константы материала, а, следовательно, не может служить однозначной характеристикой структуры.

Для сохранения за микротвердостью смысла физической константы материала при исследованиях гетерогенных структур применяли метод склерометрии, реализованный на специально спроектированной установке. На подготовленную поверхность шлифа наносили трек с помощью нагруженного индентора — стандартной алмазной пирамиды, установленной ребром по ходу перемещения. По результатам замеров ширины трека рассчитывали микротвердость и параметры ее статистического распределения.

Анализ условий применимости законов распределения непрерывных случайных величин и экспериментальные данные показали, что достаточно точно распределение микротвердости в структурных составляющих чугуна описывается законом гамма-распределения. Анализ характеристик гамма-распределения показал, что относительный показатель эксцесса — β_2 функционально связан со средним статистическим значением и дисперсией исследуемой величины: $\beta_2 = 3 + 6(D/\bar{X}^2)$. Тогда при исследовании микротвердости:

$$\beta_2 = 3 + 6\left(\frac{D}{\bar{H}_m^2}\right), \quad (4)$$

где $\bar{H}_m$ — среднее статистическое значение микротвердости; D — дисперсия величин микротвердости. Если для каждой из составляющих металлической основы чугуна (перлита и феррита) распределение микротвердости описывается гамма-распределением, то суммарная кривая распределения микротвердости смешанной структуры не является гамма-распределением. Поэтому применяли в исследованиях параметр β , численно равный β_2 , но не являющийся относительным показателем эксцесса. Оставив вид его записи через параметры статистического распределения микротвердости, сохранили физическую картину связи свойств структуры с параметром β . Параметр β связан через среднюю микротвердость с физико-механическими свойствами и соотношением составляющих структуры чугуна, а через дисперсию микротвердости — с равномерностью распределения и соотношением составляющих. Таким образом, β отразил наиболее важные требования к износостойкой структуре: гетерогенность и равномерность распределения более твердой структурной составляющей.

Предоставленную картину связи β с требованиями правила Шарпи применили при выборе модифицирующих элементов для изготовления кокильных чугунных отливок подшипников компрессора. Были выбраны графитизирующие, перлитостабилизирующие и выравнивающие структуру модифицирующие элементы: Ba, Ae,

Ca, Ce, Si и PBM. Формировали феррито-перлитную структуру, у которой дисперсия микротвердости выше, чем у чисто перлитной или чисто ферритной структуры. Связь между параметром β и износостойкостью литых чугунных деталей подтверждали методом корреляционного анализа. Статистическую значимость коэффициента корреляции оценивали по критерию F-статистики. Основным назначением критерия β стало выявление из ряда сравниваемых структур с различными физико-механическими свойствами и соотношением структурных составляющих наиболее износостойкой.

Механизм, объясняющий рост износостойкости чугуна с увеличением значения критерия β строили на физическом представлении влияния равномерности распределения структурных составляющих на разрушение материала поверхностных слоев при деформировании. Склонность материала к разрушению оценивали по величине составляющей — E_d энергетического баланса при склерометрировании. Составляющая — E_d определялась по экспериментальным данным испытаний. Расчетная формула для E_d была выведена из условий энергетического и силового баланса при взаимодействии индентора с материалом образца.

Машинным экспериментом спрогнозирована гетерогенная структура с максимальной износостойкостью в условиях трения скольжения. Получение требуемого значения критерия β за счет формирования соответствующей структуры чугуна обеспечивали комплексным модифицированием его расплава.

Металлографический анализ структур произведен на PBMax фирм "Opton" и "Leitz" (ФРГ), отечественных металлографических микроскопах и твердомере ЛМТ-3, а оценка распределения составляющих — на системе автоматического анализа изображений "OMNICON 3000TM" (ФРГ). В основу анализа изображений положен метод программного сканирования изучаемого поля шлифа с учетом цвета и тональности структурных составляющих, а также количественной оценки характера распределения и количества изучаемой составляющей.

Испытания на изнашивание в производственных условиях проведены на стендах, а в лабораторных — на машине трения СМЦ-2М. Обработка результатов экспериментов произведена с помощью стандартных формул математической статистики.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на чугунах, отвечающем по химическому составу марке СЧ 15 по ГОСТ 1412-79. Чугун плавил в коксовой вагранке с холодным дутьем. Изменением состава комплексного модификатора формировали структуру с различными параметрами статистического распределения микротвердости. Среднее значение микротвердости чугуна изменялось в пределах 1,36...2,12 ГПа при изменении дисперсии микротвердости 0,1129...0,4186 ГПа². Длина графитовых включений изменялась в пределах от 5 до 300 мкм.

Влияние модифицирования на износостойкость подшипников. Из заготовок экспериментальных плавок изготовили и испытали на стенде подшипники компрессора. Сравнение результатов испытаний серийных и опытных подшипников показало снижение среднего износа опытных подшипников до 10...20% от среднего износа серийных. Средняя величина износа (среднее квадратическое отклонение износа) для сравниваемых подшипников составили соответственно: опытные - 1,4...3,0 мкм (0,0...1,0), серийные - 13...14 мкм (12...13). Износ стального контр-тела не изменился. Примененный для количественной оценки выявленной характеристики ($\Delta Q/V$) параметр β показал статистически значимый коэффициент корреляции (-0,84) при корреляционном отношении 0,86. Наиболее износостойкие структуры испытанного чугуна характеризовались содержанием перлита в пределах 25...45%.

Связь полученных результатов испытаний на изнашивание и значений параметра β представили уравнением гиперболического вида:

$$W = \frac{A}{\beta} + B \quad (5)$$

или через статистические параметры распределения микротвердости (4):

$$W = A \left(\frac{\bar{H}_M^2}{D} \right) + B, \quad (6)$$

где W - износ, мкм; β - безразмерный параметр; A и B - численные коэффициенты, определяемые по результатам экспериментов, в случае подшипника компрессора равные $A = 160,6$, $B = -45,36$. Периоды пуска и остановки компрессора характеризуются условиями несовершенной смазки. Испытания модифицированного чугуна для подшипников в условиях несовершенной смазки подтвердили харак-

тер связи параметра β с изнашиваемостью: рост средней твердости чугуна (уменьшение значения β) приводит к снижению его износостойкости и сопровождается ростом износа стального контр-тела. То, что параметр надежно контролирует изменение свойств структуры, обеспечивающих износостойкость чугуна, явилось основанием для применения его в качестве критерия при построении прогноза сравнительной износостойкости гетерогенных структур в условиях трения скольжения.

Оценка склонности гетерогенных структур модифицированного чугуна к разрушению при деформировании посредством величины E_g позволила объяснить механизм роста износостойкости с увеличением значения критерия β . Наиболее износостойкие структуры показали наименьшие значения E_g . Коэффициент корреляции равнялся 0,82 при корреляционном отношении 0,94, т.е. чем меньше склонность материала к разрушению при деформировании, тем выше износостойкость. Склонность материала к разрушению тем ниже, чем более равномерно будут в его объеме распределены напряжения, возникающие при локальных деформациях поверхностных слоев при трении. В наибольшей степени это обеспечивается в структурах с равномерным распределением составляющих. Такие гетерогенные структуры при оценке через параметры статистического распределения микротвердости должны иметь высокую дисперсию микротвердости, которой отвечают повышенные значения критерия β . С учетом полученной связи β с износостойкостью, последняя также возрастет. Следовательно, росту критерия β отвечает формирование структуры с низкой склонностью к разрушению при деформировании в условиях трения. Необходимо отметить, что на деформирование металлической основы чугуна влияют и включения графита. Реализация на экспериментальной установке пластического деформирования тонких поверхностных слоев образцов выявила различие во взаимодействии металлической основы чугуна с включениями графита различных размеров. Фрактография треков склерометрирования показала, что пластически деформируемая матрица чугуна в подавляющем числе случаев полностью закрывала мелкопластинчатому междендритному графиту доступ в зону трения индентора о материал. Влияние этих включений на процесс трения существенно ограничивалось. Иное дело включения пластинчатого графита с толщиной пластин свыше 3...5 мкм. Такие включения пластически деформируемая матрица не в состоянии изолировать. Их фрагменты

10

выкрашиваются, попадают в зону трения, играя роль дополнительной смазки. Кроме того, такие включения могут быть механической границей развития процесса схватывания чугуна при его пластическом деформировании в узле трения.

Способ оценки приемов литейной технологии повышения износостойкости чугунных кокильных отливок. В основу способа положена связь критерия β с износостойкостью чугуна в условиях трения скольжения (5). Приемы литейной технологии признаются наиболее эффективными для повышения износостойкости литых деталей, если обеспечивают рост величины критерия β , т.е. способствуют формированию структуры с равномерным распределением разнотвердых составляющих, характеризующейся повышенными значениями дисперсии микротвердости. Методом склерометрии исследовали чугун, обработанный комплексным модификатором в количестве 1,2...1,5% от массы расплава. Результаты исследования сопоставляли с результатами машинного эксперимента по расчету соотношения структурных составляющих, обеспечивающего максимальную износостойкость гетерогенной структуры. В алгоритм вводились данные экспериментально определенной твердости феррита и перлита модифицированного чугуна. Дисперсию микротвердости изменяли в пределах 2500...360000 МПа². Расчетom получено, что максимум критерия β , имеющийся на кривой зависимости β его величины от соотношения структурных составляющих отвечает значениям 3,4...3,7. Эксперименты показали, что отлитые подшипники с максимальной износостойкостью имеют значения критерия β в пределах 3,48...3,64, т.е. совпадают с расчетным диапазоном величин β для обеспечения максимальной износостойкости. Разработанную технологию комплексного модифицирования с применением Ba, Al, Ca, Ce, Si и PbM рекомендовали для получения чугунных подшипников компрессора с максимальной износостойкостью при литье в кокиль. Эффективное применение выявленного критерия сравнительной износостойкости в способе оценки технологических приемов литья обусловлено рядом преимуществ критерия β : тесная корреляция с износостойкостью гетерогенных структур в условиях трения скольжения; высокая структурная чувствительность; возможность экспресс-контроля величины критерия в условиях заводской лаборатории.

Основные требования к структуре чугуна подшипников герметичного компрессора для повышения их износостойкости. Органи-

зация структуры чугуна должна отвечать требованиям правила Шарпи. В гетерогенной структуре с мягкой ферритной основой должен быть сформирован перлит в виде изолированных включений, равномерно распределенных в отливке.

Соотношение и физико-механические свойства структурных составляющих должны обеспечить значение критерия β , отвечающего достижимому расчетному максимуму. Достижение максимальных значений критерия достигается технологическими приемами литья, повышающими дисперсию величин микротвердости при одновременном снижении ее среднего значения. Максимум критерия β для подшипников компрессора достигается в сером чугуне марки СЧ 15 с микротвердостью перлита и феррита: 2400...2500 и 900...1850 МПа соответственно. Максимуму износостойкости отвечает содержание перлита 25...45% при длине пластинчатого графита в пределах 40...150 мкм.

3. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБЫВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технология комплексного модифицирования чугуна была опробована на Столбовском чугуно-литейном заводе, выпускающем детали герметичных компрессоров, и Кизилортовском заводе полиграфических машин для тонкостенных чугунных деталей. Комплексная проверка результатов исследования проводилась в условиях массового производства герметичных компрессоров на Кировском машиностроительном заводе им. XX Партсъезда. Проверялась закономерность установленной связи износостойкости чугуна в условиях трения скольжения с величиной β . Корпус, палец и шатун герметичного компрессора работают в условиях трения скольжения, отличающихся от условий работы подшипника. Эти детали отличаются по конфигурации и массе, следовательно, в них формируются различные структуры с различающимися соотношениями структурных составляющих. Применение при литье деталей комплексного модификатора, разработанного для подшипников, привело к формированию в них структур, которые показали различную износостойкость при стендовых испытаниях. Характер взаимосвязи величины критерия β с износом литых деталей подчинился общему уравнению (5) связи износа с β . Экспериментально определяемые коэффициенты уравнения получились равными: для корпуса компрессора $A = 441,8$, $B = -128,91$; для пальца $A = 418,5$, $B = -121,92$; для шатуна $A = 2229,4$, $B = -659,8$. Статистически значимые коэффици-

енты корреляции: для подшипника $(-0,83)$; для пальца $(-0,88)$; для корпуса $(-0,84)$; для шатуна $(-0,80)$. Средние величины износа деталей компрессора из модифицированного чугуна распределились в соответствии с достигнутым в их структуре значением критерия β . Наименьшая величина среднего износа отвечала подшипникам (для которых разработан модификатор) — $1,1$ мкм при наибольшем среднем значении критерия β . С уменьшением среднего значения критерия β увеличивались величины средних износов: корпус — $1,5$ мкм, палец — $2,6$ мкм, шатун — $6,8$ мкм. Уменьшение величины критерия β для литых деталей компрессора в сравнении с его значениями для подшипника связано с мерой отклонения условий формирования структуры в сравниваемых деталях. Гетерогенные структуры, имевшие значения β , близкие к расчетному максимуму, показали износы, близкие к нулевым. Полностью подтвердилась структурная чувствительность выявленного критерия сравнительной износостойкости. Примененная технология комплексного модифицирования, способствующая повышению дисперсии величин микротвердости, оказала положительное влияние на рост износостойкости деталей герметичного компрессора. Средний износ подшипников уменьшился на 90%, пальцев — на 78%, корпусов — на 32%, шатунов — на 46%.

Изменение условий формирования структуры и условий трения скольжения не оказало влияния на характер связи величины износа чугуна с критерием β , т.е. выявленная взаимосвязь закономерна для гетерогенных структур, работающих в условиях трения скольжения. Стабильность коэффициентов корреляции для различных деталей на уровне $0,80 \dots 0,85$ является основанием для применения зависимости (5) при прогнозировании сравнительной износостойкости гетерогенных структур.

Разработанный способ оценки приемов литейной технологии с использованием величины β нашел экспериментальное подтверждение. На основании результатов промышленной проверки в ТУ на отливки герметичного компрессора в установленном порядке внесены соответствующие изменения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Получено с помощью аппарата нелинейной термодинамики и экспериментально подтверждено, что для условий установившегося режима трения износостойкость литых деталей обуславливается

структурой. Сопротивление гетерогенной структуры износу достаточно точно контролируется параметрами статистического распределения величин микротвердости в отливках.

2. Аналитически выявлен и экспериментально обоснован структурно-чувствительный критерий сравнительной износостойкости, функционально связанный с отношением дисперсии микротвердости к квадрату среднего значения микротвердости. Критерий сравнительной износостойкости может служить для численной оценки соответствия гетерогенных структур правилу Шарпи, представляя математическое выражение этого правила.

3. Экспериментально установлено, что максимальная величина критерия для повышения износостойкости достигается в гетерогенных структурах серого чугуна при равномерном распределении структурных составляющих и формировании более твердой составляющей в виде отдельных включений. Склонность чугуна с такой структурой к разрушению в условиях трения скольжения снижается, способствуя росту износостойкости кокильных отливок.

4. Разработан способ экспресс-оценки сравнительной износостойкости гетерогенных структур, использующий метод склерометрии. Обосновано применение склерометрии при оценке величины критерия. Спроектирована и изготовлена установка, в которой применены режимы и приемы склерометрирования, позволившие сохранить за микротвердостью смысл физической константы материала при исследовании гетерогенных структур.

5. Разработан и реализован на ЭВМ "МИР-2" алгоритм расчета влияния соотношения структурных составляющих с различными физико-механическими свойствами на величину критерия сравнительной износостойкости. Расчетом показано и экспериментально подтверждено, что максимум, имеющийся на кривой зависимости величины критерия от соотношения структурных составляющих, отвечает гетерогенной структуре с максимальной износостойкостью.

6. Исследованиями в лабораторных и производственных условиях показано, что с помощью предложенного критерия можно прогнозировать структуру с соотношением составляющих, обеспечивающим повышение износостойкости чугунных кокильных отливок в узлах трения. Экспериментально подтверждено, что рассчитанная на ЭВМ износостойкая структура может быть сформирована в отливках комплексным модифицированием расплава чугуна. Разработаны состав модификатора и технология его введения, обеспечивающие по

вышение износостойкости чугунных деталей герметичного компрессора.

7. Разработаны основные требования в структуре кокильных отливок подшипников из чугуна для повышения их износостойкости в узле трения компрессора, реализация которых не ухудшает износостойкости стального контр-тела.

8. Требования к структуре чугуна литых деталей в установленном порядке внесены в ТУ на кокильные отливки для герметичного компрессора.

9. Предложен способ оценки приемов литейной технологии, направленных на повышение износостойкости, позволяющий совершенствовать литейную технологию на основе экспресс-анализа сравнительной износостойкости по величине критерия. Использование критерия позволяет сократить объем длительных и дорогостоящих натурных испытаний узлов трения при отработке технологии.

10. Экономический эффект от опробования и внедрения разработанной технологии на ряду заводов Минлегпищемаша в зависимости от мощности литейного цеха составил 3...20 руб. на тонну литья.

По материалам диссертации опубликовано 9 работ, основные из которых:

1. Николаев В.Г. Установка для экспресс-анализа износостойкости литых структур. - В кн.: Улучшение качества чугунного литья. - Саратов: Государственный Саратовский университет, 1978, с.89-91.

2. Николаев В.Г. О влиянии графитовых включений на износостойкость чугунных подшипников скольжения. - Литейное производство, 1980, № II, с.17-18.

3. Николаев В.Г., Васильев В.А. Повышение износостойкости деталей холодильной техники. - Литейное производство, 1980, № 4, с.6.

4. Николаев В.Г., Васильев В.А., Громов А.В. Повышение качества чугунных кокильных отливок. - В кн.: Опыт повышения качества отливок и эффективность литейного производства. Сплавы на основе железа. - Л.: ДДНП, 1979, с.78-81.

5. Демьянов Е.Д., Николаев В.Г. Влияние физико-механических свойств чугунных отливок на износостойкость. - Тез. докл. XXVI Всесоюзной н.т.к. литейщиков. - М.: 1981, с.100-103.

