



There is shown that the created on MAZ technology and equipment of thermal processing of grit at induction heating allows to regulate the temperature of processing and to provide the solidity of grit in the specified interval taking into account the changing of the chemical composition.

*П. С. ГУРЧЕНКО, М. И. ДЕМИН, РУП «Минский автомобильный завод»,
А. И. КОМАРОВ, Институт механики и надежности машин НАН Беларуси*

УДК 621.74.042:669.187.56

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ И СТРУКТУРА СТАЛЬНОЙ ДРОБИ, ЗАКАЛЕННОЙ ИЗ РАСПЛАВА

Дробеметная и дробеструйная обработка стальных и чугунных, литых, кованных и термоупрочненных заготовок и готовых деталей по своей физической сущности отличается от всех широко известных операций изготовления деталей. Инструментом при выполнении этой операции служит поток летящей с большой скоростью на обрабатываемую поверхность стальной либо чугунной дроби. В результате ударного воздействия дроби происходит очистка обрабатываемой поверхности от пригоревших остатков формовочной и стержневой смеси, окалины, песка, старой краски, и других загрязняющих покрытий. Одновременно происходит шлифовка поверхности с устранением заусенцев, измельчение и упрочнение структуры в результате наклепа. Применяется дробеструйная обработка и для финишной обработки деталей: подготовки поверхностей деталей под гальванические покрытия, эмалирование и покраску, упрочнение наклепом торсионных валов, пружин, рессорных листов и других деталей. Для различных видов обработки при этом используются различные виды дроби. Для дробеметной очистки отливок, поковок и заготовок деталей как наиболее производительный и дешевый инструмент используется дробь с размером гранул от 1 до 3 мм.

Применяется дробь в качестве инструмента и при абразивной обработке твердых материалов. Гранулы с размером менее 1 мм (стальной металлический песок) применяют при магнитно-абразивном шлифовании поверхностей деталей. Дробь диаметром 3,5 мм и более применяется как наиболее дешевый материал (инструмент) для бурения и резки горных пород. По режущим способностям такая дробь уступает только алмазам и ею можно резать породы по свойствам, близким к последним.

От качества частиц дроби (размеров, формы, состава, структуры, твердости) зависят производительность очистки и качество обрабатываемой поверхности, величина снимаемого слоя, шерохова-

тость поверхности, величина остаточных напряжений наклепа в металле. Удельный расход дроби наряду с ее стоимостью влияет на себестоимость обработки. Повышенные абразивные свойства частиц дроби, наличие острых кромок на них ускоряют износ дробеметных агрегатов, что в свою очередь удорожает процесс обработки.

В промышленности применяют различные виды дроби: литую чугунную и стальную, колотую, рубленую из проволоки и листа. Каждый из указанных видов может отличаться химическим составом и термообработкой на различную твердость.

На Минском автомобильном заводе в сталелитейном цехе №2 освоено производство стальной литой дроби с использованием дробелитейного комплекса производительностью до 6 т/ч, разработанного в НП РУП «Институт БелНИИлит». Процесс грануляции дроби происходит при помощи центробежного гранулятора. Струя металла, вытекающая из металлоприемника через калиброванное отверстие, падает на вогнутую поверхность керамического диска гранулятора, вращающегося вокруг вертикальной оси, под действием центробежной силы растекается по его поверхности и разбрасывается в виде гранул в воду, поток которой движется по винтовой траектории навстречу гранулам дроби. При этом одновременно с грануляцией происходит закалка гранул дроби из жидкого состояния.

В результате изучения фракционного состава установлено, что дробь, производимая на МАЗе, состоит из круглой фракции на 70 %, овальной — на 25 и каплевидной — на 5 %. Дробь производства МАЗа отличается гладкой поверхностью и сферической формой. Плотность выплавляемой на МАЗе дроби составляет 7650 кг/м³, что значительно превышает нижний порог, оговариваемый ГОСТ 11964-81 (7200 кг/м³ не менее). Высокая плотность дроби свидетельствует о невысоком количестве пор и рыхлот.

Методика исследования

Для получения дроби на Минском автозаводе использовали сталь, химический состав которой приведен в табл. 1.

Образцы для исследования дроби приготавливали путем заливки дроби различной фракции (диаметром 1,0–3,5 мм) эпоксидной смолой в кольцо диаметром 25 мм с последующим приготовлением поперечного сечения шлифов. Дробь, полученную из расплава, исследовали после раз-

личных режимов термической обработки: в литом состоянии, после сушки, печного и индукционного отпуска при температурах 200, 300, 400 и 500 °С. Для получения более широкой информации о процессах, протекающих в закаленной из расплава дроби, изучали образцы дроби, подвергнутой повторной закалке с температуры 800 °С в воду и последующему отпуску при 400 °С.

Структуру закаленной из расплава и повторно закаленной дроби исследовали методами рентгеноструктурного и металлографического анализов.

Таблица 1. Химический состав исследуемой стальной литой дроби производства МАЗа

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,73	0,70	0,70	0,10	0,032	0,14	0,13	0,15
0,71	0,49	0,88	0,03	0,026	0,24	0,20	0,26
0,82	0,94	0,72	0,027	-	0,31	0,24	0,23
0,45	0,49	0,83	-	-	0,18	0,16	0,16

Качественный фазовый анализ поперечного сечения образцов дроби проводили по результатам рентгеновских съемок на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М в Cu-K_α-излучении со вторичной монохроматизацией рентгеновского пучка и оснащенном управляющим комплексом на базе компьютера. Использовали прецизионные методы рентгеноструктурного исследования. Запись образцов проводили в режиме сканирования с шагом, равным 0,1°, в интервале углов рассеяния 2θ = 20–90°. Продолжительность набора импульсов в каждой точке составляла 30 с. Расшифровку дифрактограмм проводили по картотеке PDFK [1].

Металлографические исследования проводили на микроскопах МИМ-8 и ПЛАНАР MICRO 200, а также на автоматизированном комплексе, включающем микроскоп МКИ-2М-1, видеокамеру с выходом изображения на ПК и пакет программ обработки видеоизображений IMAGE PRO PLUS, METALS PRO. Травление шлифов осуществляли в стандартном 4 %-ном растворе азотной кислоты и реактиве [2], позволяющем выявлять структурные составляющие с близкими физико-химическими свойствами. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 0,098, 0,196, 0,98 и 1,96 Н.

Особенности закалки из расплава

Методы быстрой закалки из расплава, характеризующейся скоростями более 10⁵ °С/с, что эквивалентно скорости роста твердой фазы 10² мм/с, относятся к числу перспективных технологий, обеспечивающих уникальное сочетание свойств. Быстрое затвердевание расплава сопровождается рядом структурных, морфологических и композиционных эффектов, таких, как измельчение зерна, образование новых кристаллических фаз, полное или частичное предотвращение кристаллизации, приводящее к образованию аморфных сплавов, повышение концентрации вакансий и примесей

[3, 4]. Значение этих эффектов в металлургии и технике очень велико и перспективы их использования кажутся многообещающими для создания новых или совершенствования существующих процессов и достижения высоких свойств материалов.

Преимущества технологий быстрой закалки из расплава заключаются также в снижении требований к чистоте шихтовых материалов, возможности замены в ряде случаев дефицитных и дорогостоящих компонентов менее дефицитными и дешевыми, совмещении процессов литья и закалки в одном агрегате.

Отпуск дроби при индукционном нагреве

Из-за наличия внутренних дефектов, высокой твердости, грубой структуры в литом состоянии стальная дробь обладает повышенной хрупкостью и в процессе использования быстро превращается в стальную пыль и уносится из дробеочистного оборудования вытяжной вентиляцией. Для улучшения эксплуатационных свойств на МАЗе разработаны режимы и оборудование для термообработки дроби при индукционном нагреве. Лабораторная установка показана на рис. 1. Нагрев происходит за счет одновременного воздействия трех факторов: теплового излучения разогретой поверхности трубы, контакта с ее разогретой поверхностью и воздействия высокочастотного электромагнитного поля. Время нахождения дроби в зоне нагрева составляет 5–7 мин. Индукционный нагреватель запитан от преобразователя частоты ВПЧ 100/8,0. Производительность установки термообработки стальной литой дроби зависит от температуры обработки и отнимаемой при нагреве мощности (рис. 2).

При нагреве дроби до температур 380–420 °С производительность установки составляет 600–800 кг/ч при отнимаемой мощности при нагреве 75–100 кВт.

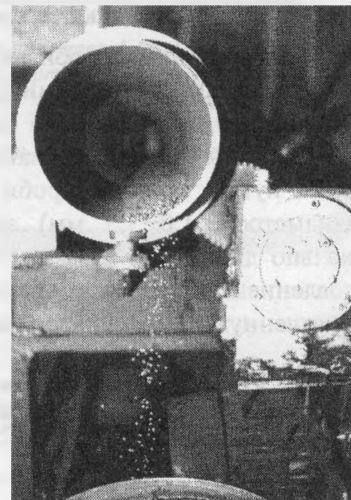
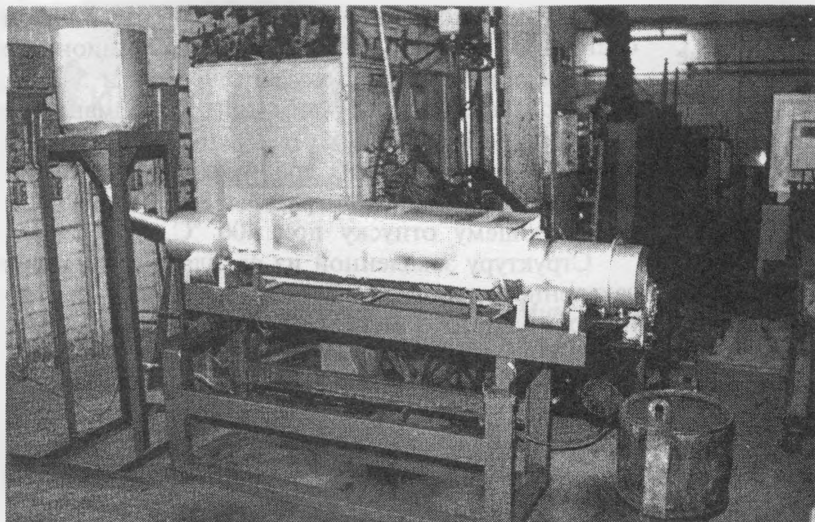


Рис. 1. Лабораторная установка для термообработки литой дроби при индукционном нагреве токами высокой частоты

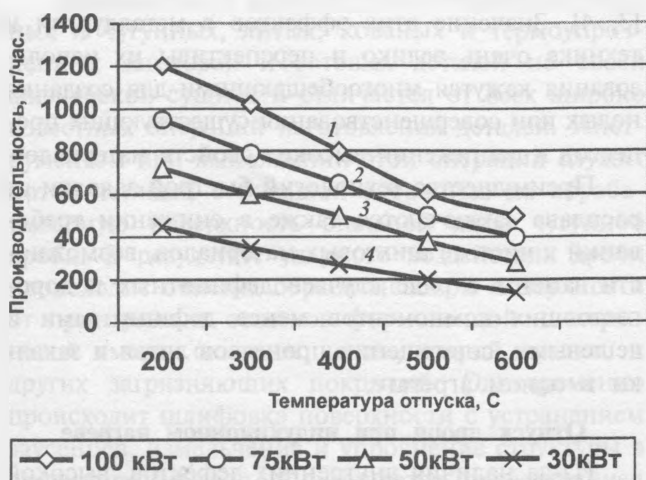


Рис. 2. Зависимость производительности установки термообработки стальной литой дроби от температуры обработки и отнимаемой при нагреве мощности: 1 – 100 кВт; 2 – 75; 3 – 50; 4 – 30 кВт

Исследование структуры дроби, закаленной из расплава

При травлении в специальном растворе [2], выявляющем структурные составляющие с близкими свойствами и составом, структура дроби, закаленной из расплава, имеет дендритное строение, при этом в пределах одного образца зерна меняются от вытянутых, столбчатых до равноосных (рис. 3–5). Диаметр столбчатых дендритов находится в диапазоне 13–40 мкм, равноосных – 16–30 мкм.

Дендритное строение характерно и для структуры повторно закаленной дроби (рис. 4), а также последующего отпуска в области температур 300–500 °С (рис. 5).

Однако по сравнению с закалкой дроби из расплава в воду (см. рис. 3) в случае ее повторной закалки дендритная структура более дисперсная (см. рис. 4). Так, в последнем случае диаметр

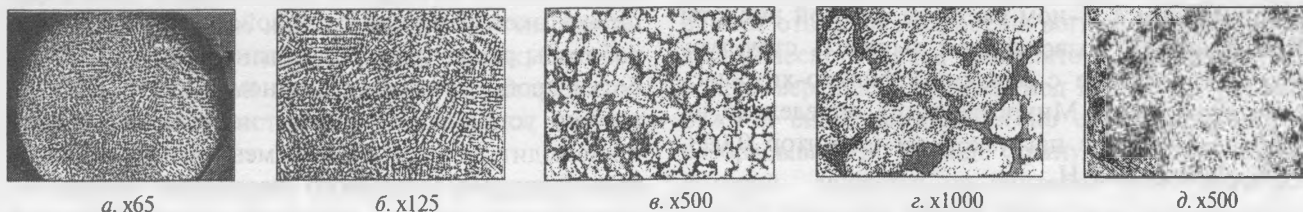


Рис. 3. Микроструктура закаленной из расплава в воду дроби: а, б, в, з – травление в реактиве [2]; д – травление в 4 %-ном HNO_3

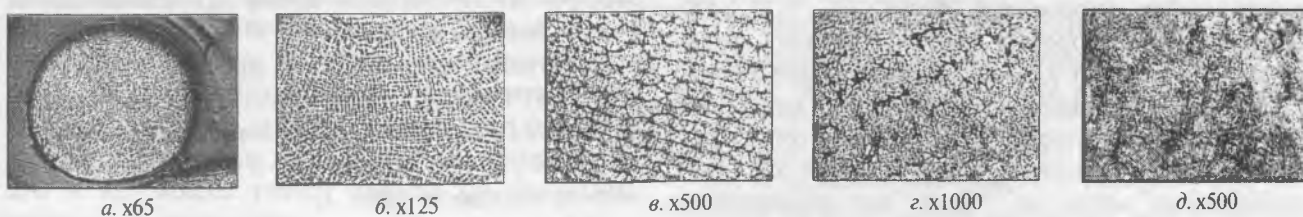


Рис. 4. Микроструктура дроби после повторной закалки: а, б – травление в реактиве [2]; в, з – травление в 4 %-ном HNO_3 ; д – травление в 4 %-ном HNO_3

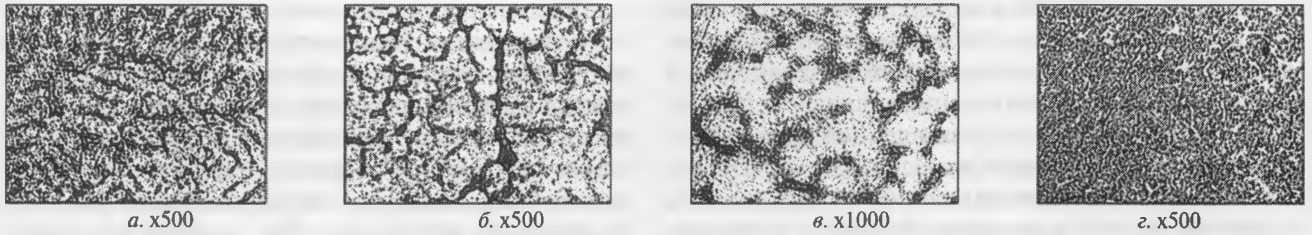


Рис. 5. Микроструктура быстрозакаленной дроби после отпуска в печи в течение 20 мин: *а* – при 300 °С; *б, з* – при 400 °С; *в* – при 500 °С; *а–в* – травление в реактиве [2]; *з* – травление в 4 %-ном HNO_3

вытянутых столбчатых зерен находится в пределах 13–20 мкм, равноосных – 6–20 мкм. Внутри дендритов наблюдаются мелкие равноосные зерна, что указывает на протекание рекристаллизационных процессов в повторно закаленной дроби.

Микроструктура закаленной из расплава в воду дроби после травления в 4 %-ном HNO_3 представляет собой дисперсный мартенсит неравномерной травимости в объеме зерен и по междендритным поверхностям (рис. 5, *з*). Подобный эффект наблюдали [5] для ряда быстрозакаленных сплавов. По мнению авторов [5], эффект неравномерной травимости структурных составляющих в объеме зерен и вдоль междендритных поверхностей связан с различием интенсивности образования в этих областях соответствующих фаз, их состава и формы. При этом сделано заключение, что междендритные поверхности, образованные в быст-

розакаленных материалах, играют роль катализаторов выделений. Учитывая результаты работ [5, 6], наблюдаемые светлые составляющие вдоль междендритных поверхностей можно объяснить различием состава и морфологии мартенсита, сформированного на этих границах и в объеме зерен.

Кроме того, как показали результаты измерения микротвердости, ее величина в светлой структурной составляющей несколько выше, чем в теле зерна. В первом случае микротвердость составляет 7300 МПа, во втором – 6900 МПа. Это позволяет предположить, что в мартенсите, сформированном по границе зерен, концентрация углерода выше, чем в теле зерна.

В структуре закаленной из расплава дроби наряду с мартенситом присутствуют мелкие избыточные карбиды и аустенит (рис. 6, 7).

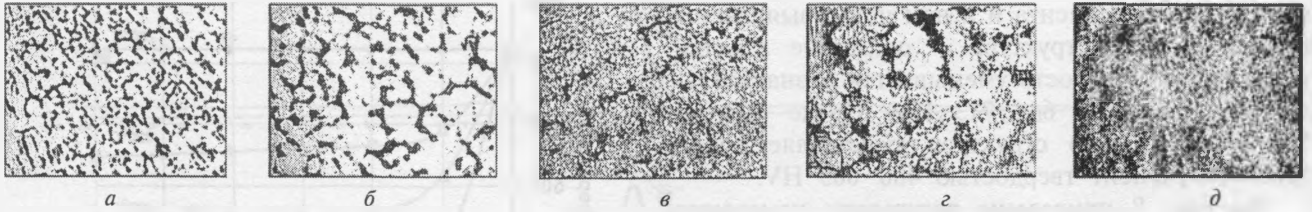


Рис. 6. Микроструктура закаленной из расплава дроби: *а, б, д* – после отпуска при 400 °С при индукционном нагреве 4 мин; *в, з* – после отпуска при 400 °С в печи в течение 20 мин; *а–з* – травление в реактиве [2]; *д* – травление в 4 %-ном HNO_3

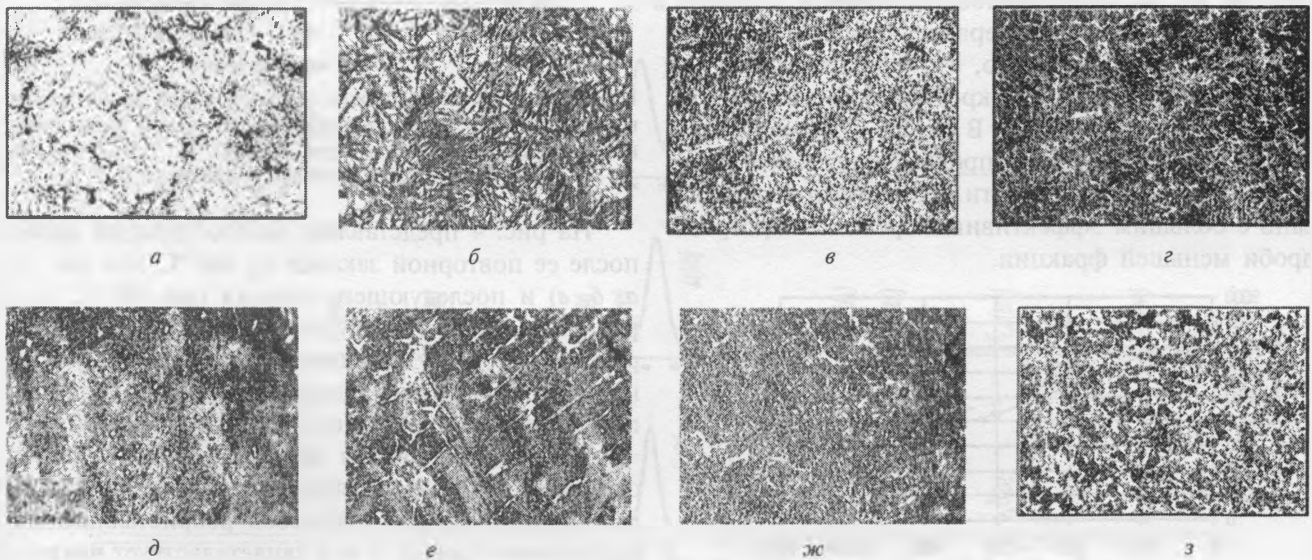


Рис. 7. Микроструктура стальной литой дроби производства МАЗа: *а* – дробь после литья, твердость 666–810 HV; *б* – сушка при 150–200 °С, твердость 644–713 HV; *в–з* – отпуск при 280–320 °С, твердость 480–603 HV; *д–ж* – отпуск при 380–420 °С, твердость 423–549 HV; *з* – нормализация при 820 °С. Травление 4 %-ным раствором HNO_3 . $\times 500$

Наличие аустенита в закаленной из расплава в воду дроби следует связывать с положением мартенситной точки, что является характерной особенностью быстрозакаленных сплавов [6].

Микроструктура быстрозакаленной дроби, подвергнутой последующему отпуску в печи в течение 20 мин при температуре 300 °С (см. рис. 5, а), состоит из отпущенного мартенсита и карбидов. Отпуск при температуре 400 °С (см. рис. 5, б, г, 6) и 500 °С (см. рис. 5, в) приводит к формированию в структуре соответственно троостита и сорбита. Наряду с этими структурными составляющими в обоих случаях присутствуют карбиды, которые выявлены также рентгеноструктурным анализом (рис. 6, 7). Необходимо отметить, что неравномерность травимости, выявляемая как специальным травителем, так и 4 %-ным HNO_3 по телу бывшего аустенитного зерна и его границам, остается как после повторной закалки, так и после последующего отпуска даже при температуре 500 °С.

Из анализа структуры видно, что грубая структура крупноиглочатого мартенсита, формируемая при закалке в воду из жидкого состояния, претерпевает при отпуске полный или частичный распад в зависимости от температуры. Непосредственно после закалки из расплава (рис. 7, а) структура имеет вид слаботравящегося мартенсита с включениями карбидов и твердостью 669–810 НВ. В процессе сушки 150–200 °С происходит частичный отпуск мартенсита и в нем четко выявляется грубоиглочатая структура – следствие закалки из расплава. Твердость уменьшается незначительно и составляет 644–713 НВ. После отпуска 300 °С (рис. 7, в, г) структура представляет собой троостомартенсит твердостью 480–603 НВ.

На рис. 8 приведены результаты измерения микротвердости литой дроби диаметром 1,0 и 2,5 мм с содержанием углерода 0,73% после закалки из расплава термообработанной в печи в течение 20 мин в интервале температур 200–400 °С. Из рисунка видно, что фракция дроби не оказывает влияния на микротвердость закаленной из расплава литой дроби. В случае отпуска уменьшение диаметра дроби сопровождается некоторым снижением микротвердости, скорее всего это связано с большим эффективным временем прогрева дроби меньшей фракции.

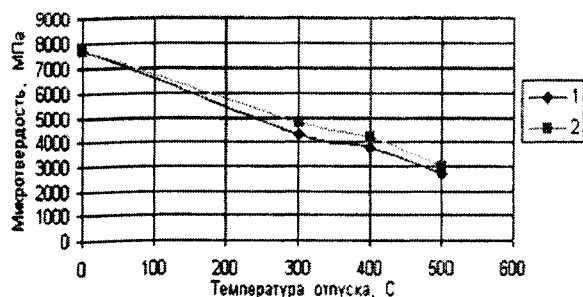


Рис. 8. Зависимость твердости дроби от температуры отпуска в печи при выдержке 20 мин: 1 – фракция дроби 2,5 мм; 2 – 1,0 мм

Уже в процессе первых 5–7 мин индукционного нагрева до температур 280–320 °С происходит частичный распад мартенсита, из него выделяются мелкодисперстные карбиды, тетрагональность мартенсита уменьшается и это приводит к снижению хрупкости дроби. Структура представляет собой мартенсит отпущенный (см. рис. 7, в, г). Твердость дроби при этом остается высокой – 480–600 НВ и более. После нагрева до 380–420 °С формируется троостомартенситная структура твердостью 423–549 НВ (см. рис. 7, д–ж). При нагреве до 420–450 °С в процессе дальнейшего распада мартенсита формируется дисперсная трооститная структура твердостью менее 400 НВ. Твердость дроби, как и структура, интенсивно изменяется в первые минуты нагрева, а затем падение твердости замедляется. На рис. 9 показано изменение твердости в процессе отпуска при индукционном нагреве. Быстрое изменение структуры и твердости в первые минуты является особенностью протекания процессов термообработки при индукционном нагреве в созданной установке. Это обусловлено быстрым прогреванием всей массы дроби под одновременным воздействием радиационного и контактного теплообмена с нагретой трубой, электромагнитного поля высокой частоты и быстрого непрерывного перемешивания дроби в процессе нагрева.

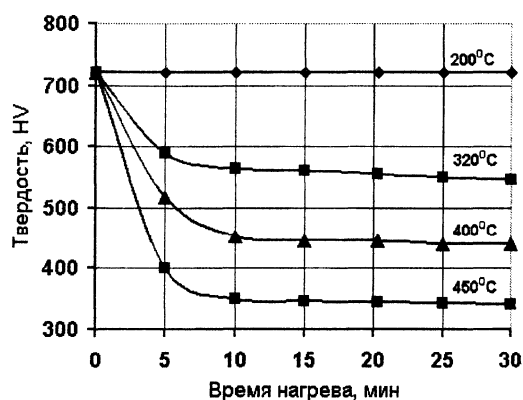


Рис. 9. Изменение твердости стальной литой дроби производства МАЗа в процессе термообработки при индукционном нагреве после сушки при 200–240 °С: 1 – $T=200$ °С; 2 – 320; 3 – 400; 4 – 450 °С

На рис. 4 представлена микроструктура дроби после ее повторной закалки от 800 °С (см. рис. 4, а, б, в) и последующего отпуска при 400 °С (см. рис. 4, г). Как и в случае дроби, закаленной из расплава в воду, микроструктура дроби после повторной закалки представляет собой мартенсит и избыточные карбиды (см. рис. 4, в), после отпуска – троостит и карбиды (см. рис. 4, г). Следует отметить, что повторная закалка дроби сопровождается протеканием процессов рекристаллизации аустенитного зерна, о чем свидетельствует появление в структуре мелких зерен. Несмотря на перикристаллизацию при травлении раствором [2], четко выявляется дендритный характер структуры.

При этом после повторной закалки неравномерность травления по телу и границам зерна несколько сглаживается. Выравнивание травления усиливается с ростом температуры отпуска, однако сохраняется и при температуре 500 °С. При травлении 4%-ным раствором HNO₃ структура имеет вид троостита равномерного травления с отдельными включениями слаботравящейся структурной составляющей (см. рис. 6, д, 7).

Рентгеноструктурные исследования структуры стальной литой дроби, сформированной в процессе отпуска

На рис. 10 в качестве примера представлены фрагменты дифрактограмм дроби после закалки из расплава в воду и после отпуска при температурах 200–500 °С.

Результаты рентгеновской съемки закаленной из расплава дроби (рис. 10, а) показали, что для этого состояния дифрактограмма характеризуется наличием отражения (110), принадлежащего α -железу, линии (111) остаточного аустенита, количество которого, согласно проведенной оценке, составляет 15% и повышенным уровнем фона со стороны малых углов рассеяния 2θ вследствие присутствия в структуре дроби дисперсных избыточных карбидов и некоторой степени аморфиза-

ции, что является особенностью полученной структуры дроби в результате высоких скоростей кристаллизации дроби, закаленной из жидкого состояния.

Как следует из рис. 10, а, профиль линии (110) достаточно размыт (уширение $\beta = 15,38 \cdot 10^{-3}$ рад), а ее максимум смещен в сторону больших углов рассеяния (средний параметр решетки составляет 0,28703 нм). Эти дифракционные эффекты свидетельствуют о значительном уровне искажений кристаллической решетки вследствие высоких внутренних напряжений, связанных с аустенитно-мартенситным превращением, приводящим к перестройке ОЦК в ОЦКТ решетку.

Согласно полученным данным, сушка дроби не оказывает заметного влияния на характер дифракционной картины и структуру закаленной из расплава дроби. На степень искаженности решетки и уровень внутренних напряжений закаленной из расплава дроби не оказывает также существенного влияния и отпуск при температуре 200 °С. Из рис. 10, б и табл. 2 видно, что размытие профиля линии (110) и ее угловое положение остаются практически такими же, как и для закаленного состояния (рис. 10, а), регистрируется также линия (111) остаточного аустенита, содержание которого составляет 12%.

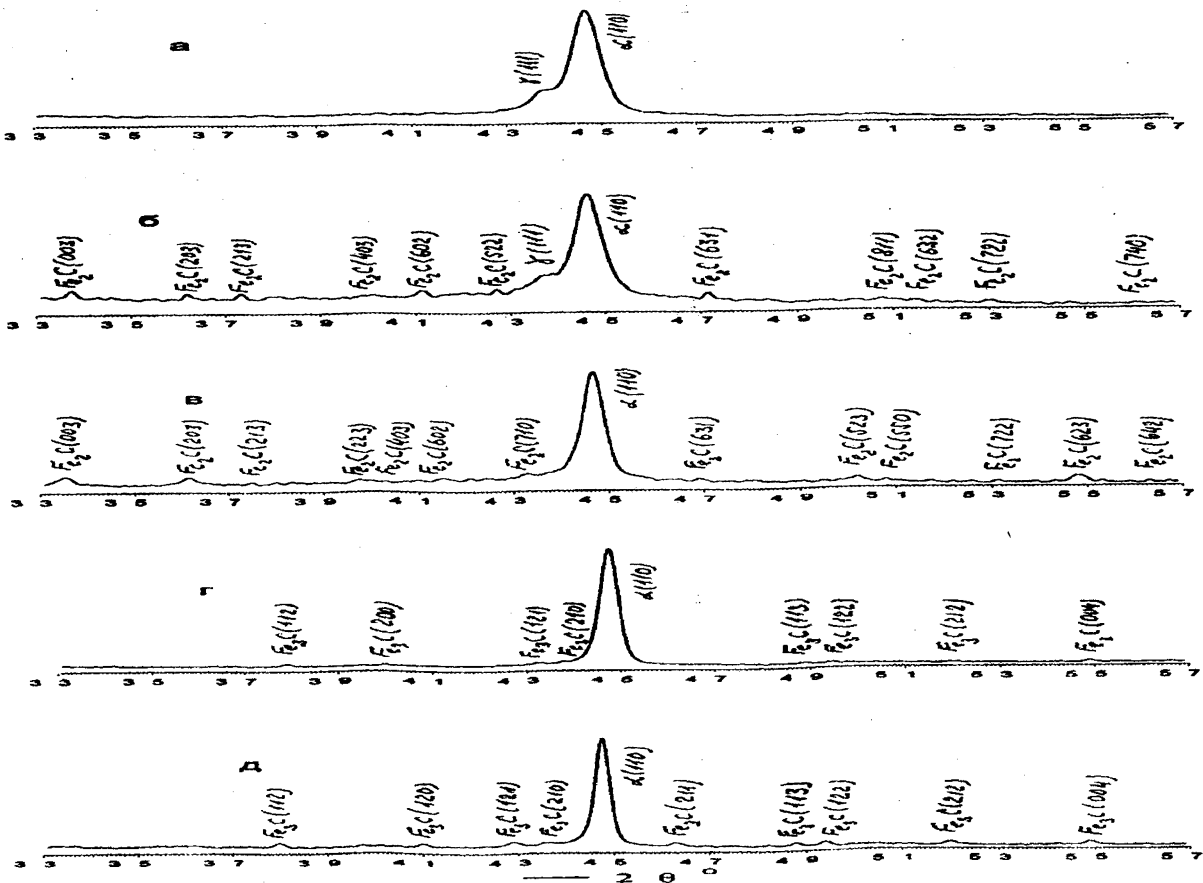


Рис. 10. Фрагменты дифрактограмм дроби после закалки из расплава в воду (а) и последующего отпуска при 200 °С (б), 300 °С (в), 400 °С (г), 500 °С (д)

Таблица 2. Дифракционные параметры линии (110) α -железа, фазовый состав дробы после различных режимов термической обработки

Термическая обработка	Уширение β , 10^{-3} рад	Средний параметр решетки, нм	Фазовый состав
Закалка из расплава в воду (Т1)	15,38	0,28703	Мартенсит, аустенит, избыточные карбиды
Повторная закалка от 800 °С в воду (Т2)	23,85	0,28737	Мартенсит, избыточные карбиды
Т1 + отпуск при 200 °С	14,96	0,28702	Отпущенный мартенсит, аустенит, метастабильный карбид ϵ -Fe ₂ C
Т1 + отпуск при 300 °С	10,78	0,28642	Отпущенный мартенсит, метастабильный карбид ϵ -Fe ₂ C
Т1 + отпуск при 400 °С	6,10	0,28611	Троостит, цементит Fe ₃ C
Т1 + отпуск при 500 °С	5,17	0,28581	Сорбит, цементит Fe ₃ C
Т2 + отпуск при 400 °С	6,50	0,28,581	Троостит, цементит Fe ₃ C

Вместе с тем, на дифрактограмме (рис. 10, б) регистрируется система отражений, принадлежащая, как показал выполненный анализ, метастабильному карбиду типа ϵ -карбид, имеющему формулу, близкую к Fe₂C [7].

Повышение температуры отпуска закаленной из расплава дробы до 300 °С сопровождается сужением профиля линии (110) и смещением ее максимума в сторону больших углов рассеяния (рис. 10, в). При этом значения уширения этой линии и периода ее решетки уменьшаются и составляют соответственно $10,78 \cdot 10^{-3}$ рад и 0,28642 нм (табл. 2). Последнее указывает на уменьшение степени искаженности решетки. Отпуск дробы при 300 °С приводит к полному превращению аустенита, о чем свидетельствует отсутствие на дифрактограмме отражения (111) γ -железа. Как и в случае отпуска при 200 °С, на дифрактограмме, полученной для 300 °С, регистрируются достаточно интенсивные максимумы карбида ϵ -Fe₂C.

Отпуск дробы при температуре 400 °С сопровождается заметным снижением уровня внутрен-

них напряжений и тетрагональных искажений решетки, на что непосредственно указывают уменьшение ширины линии (110) α -железа, дальнейшее смещение ее максимума в сторону больших углов рассеяния, приводящего к уменьшению периода решетки (рис. 10, г, табл. 2) до значения 0,2858 нм, характерного для ОЦК решетки. Следует отметить, что на дифрактограмме, полученной для этой температуры отпуска, регистрируются отражения от Fe₃C. Подобная дифракционная картина наблюдается и в случае отпуска дробы при 500 °С (рис. 10, д).

На основании полученных результатов можно заключить, что отпуск закаленной из расплава дробы при температурах 400–500 °С сопровождается значительным уменьшением степени искаженности кристаллической решетки и карбидным превращением ϵ -Fe₂C \rightarrow Fe₃C.

На рис. 11, а, б приведены дифрактограммы, полученные при съемке образцов после повторной закалки дробы при температуре 800 °С и последующего отпуска при 400 °С.

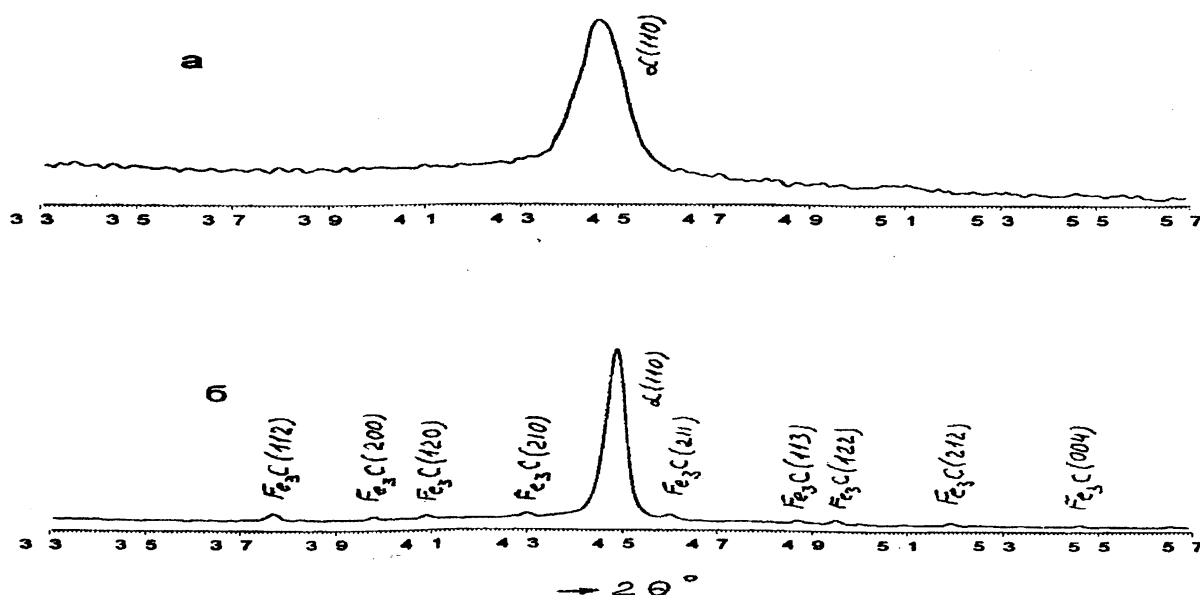


Рис. 11. Фрагменты дифрактограмм дробы после повторной закалки (а) и последующего отпуска при 400 °С (б)

Анализ дифрактограмм прежде всего показывает, что в структуре повторно закаленной дроби аустенит не обнаруживается. Вследствие этого в повторно закаленной дроби уровень внутренних напряжений и тетрагональных искажений решетки значительно выше, чем у закаленной из расплава. Этот вывод подтверждается значительным уширением линии (110) α -железа, величина которого в первом случае составляет $23,85 \cdot 10^{-3}$ рад, во втором — $15,38 \cdot 10^{-3}$ рад.

О более высоком уровне искажений в случае повторно закаленной дроби свидетельствуют также данные о периоде решетки, которая для этой дроби имеет более высокие значения (табл. 2). Эти факторы обуславливают более высокие значения микротвердости для повторно закаленной дроби по сравнению с закалкой из расплава. В первом случае она составляет 8100 МПа, во втором — 7200 МПа.

Особенности структурных превращений в процессе отпуска стальной литой дроби при ее индукционном нагреве

В ходе проведения опытных работ по отладке режимов термической обработки при индукционном нагреве была установлена зависимость твердости и структуры обрабатываемой дроби от температуры и длительности нагрева (см. рис. 9).

Установлено, что для различных партий дроби твердость после отпуска при температуре 400 °С при индукционном нагреве в течение 5 мин составляет 423–549 НВ, твердость дроби после печного отпуска при температуре 400 °С в течение 20 мин — 418–540 НВ. Таким образом, отпуск при одинаковой температуре при печном и индукционном нагреве обеспечивает идентичные твердость и структуру, но за более короткое время индукционного нагрева.

Нагрев при термообработке дроби производят со свободным доступом в зону нагрева окружающего атмосферного воздуха, который при температуре термической обработки обладает значительными окислительными свойствами. Благодаря малому времени нагрева образование окалины на поверхности не успевает происходить, а образуется тонкая оксидная пленка, которая в дальнейшем предохраняет дробь от коррозии. Термообработанная по разработанному способу дробь имеет серо-синий или фиолетовый цвет и в

последующих защитных покрытиях не нуждается, в то время как все известные производители дроби для предохранения от коррозии производят ее дополнительную обработку в специальных пассивирующих растворах.

При непрерывном вращении барабана под действием силы трения о стенки сыпучий материал принимает вид смещенного на некоторый угол в сторону вращения сегмента, интенсивно перемешивается под действием гравитационных сил и вибраций, благодаря чему температура нагрева частиц в потоке материала по глубине сегмента выравнивается.

Под комбинированным воздействием всех источников тепла и непрерывного интенсивного перемешивания время нагрева резко сокращается, что и обеспечивает более высокую производительность заявляемого устройства.

Установка, созданная на МАЗе для термообработки дроби, в сотни раз дешевле барабанных печей, занимает меньше производственных площадей, требует меньше энергоресурсов. Например, электропечь для отпуска дроби при температуре нагрева 180–220 °С и производительности 250 кг/ч потребляет 18 кВт электроэнергии. Это соответствует затратам электроэнергии $3,6 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч на нагрев 1 кг дроби на 1 °С. При температуре нагрева 380–420 °С и производительности 600–800 кг/ч потребление электроэнергии составляет 50 кВт. Это соответствует затратам электроэнергии $1,56 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч на нагрев 1 кг дроби на 1 °С. Таким образом, КПД нагрева повышается в 2,31 раза.

Испытания механических свойств стальной литой дроби производства Минского автозавода

Испытаниями прочности, определенной статической нагрузкой сжатия до разрушения гранул диаметром 2,5–3,0 мм на испытательной универсальной машине ZD 10/90, установлено, что прочность литой дроби производства МАЗа при сжатии до разрушения для фракции 2 мм составляет 4500–6250 Н. При этом гранулы дроби закаленной из расплава разрушаются хрупко (рис. 12, а), а с увеличением температуры отпуска повышается доля пластической деформации перед разрушением гранулы (рис. 12, б–е). Усилие разрушения при этом изменяется в пределах погрешности значений эксперимента.

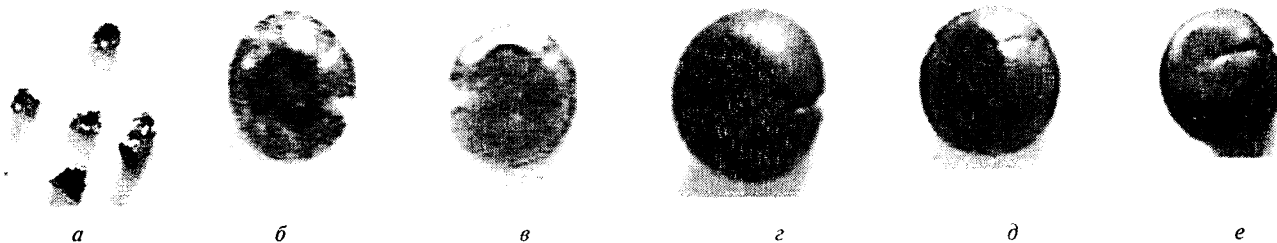


Рис. 12. Вид гранул дроби, разрушенных при механических испытаниях на сдавливание на разрывной машине: а — гранулы в состоянии закалки из расплава; б–е — после отпуска с индукционным нагревом (б, в — при 300 °С; г, д — при 350; е — при 400 °С)

Производственные испытания термообработанной дроби, выполненные в цехе серого чугуна, сталелитейном цехе №1, термическом цехе Минского автозавода при очистке отливок и заготовок деталей автомобиля в очистной дробеметной камере, а также на операции очистки рамы автомобиля перед покраской показали, что стойкость термообработанной на твердость 450–540 HV дроби по сравнению с литой увеличилась в 3–5 раз.

Выводы

Морфология структуры литой дроби представляет собой дендритное строение в виде удлиненных, столбчатых и равноосных кристаллов.

Микроструктура закаленной из расплава дроби представляет собой мартенсит, состав и форма которого в объеме зерна и вдоль междендритных поверхностей различаются. По границам зерна мартенсит имеет значительную степень аморфизации, вызванной высокой скоростью кристаллизации. Наряду с этим в структуре содержатся мелкие избыточные карбиды и остаточный аустенит (до 15 %).

Микроструктура повторно закаленной дроби состоит из мартенсита, избыточных карбидов и характеризуется более высоким уровнем внутренних напряжений и степени искаженности кристаллической решетки по сравнению с закаленной из расплава.

Отпуск закаленной из расплава дроби при температурах 400–500 °С сопровождается значительным уменьшением степени искаженности кристаллической решетки и карбидным превращением $\epsilon\text{-Fe}_2\text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$.

Структура повторно закаленной дроби и после отпуска при температурах до 350 °С более дисперсная по сравнению с закаленной из расплава, а после отпуска при температурах 400 °С и более структуры и твердость закаленной из расплава и закаленной с повторного нагрева практически одинаковы. Таким образом, очевидно, что операция повторной закалки с применением отпуска 400 °С и более экономически нецелесообразна.

Отпуск при температуре 350–400 °С полностью снимает внутренние напряжения в гранулах дроби при сохранении высоких значений твердости (4000–5000 МПа), более высокая температура отпуска приводит к дальнейшему снижению твердости.

Отпуск при индукционном нагреве в течение 5 мин до температур 350–400 °С по структуре и твердости соответствует отпуску при печном нагреве до этих же температур. Термообработка дроби при индукционном нагреве позволяет в 3–5 раз по сравнению с литым состоянием повысить стойкость дроби при очистке заготовок. Процессы

отпуска при индукционном нагреве наиболее интенсивно протекают и практически завершаются в первые 5–7 мин нагрева.

Созданные на МАЗе технология и оборудование термообработки дроби при индукционном нагреве позволяют регулировать температуру обработки и обеспечивать твердость дроби в заданном интервале с учетом изменения химического состава. При этом отпадает необходимость выплавки стали специального состава и становится возможным использование для производства дроби плавок стали как соответствующих, так и несоответствующих требованиям по химическому составу для производства отливок машиностроительных деталей.

Индукционный нагрев при термообработке дроби производят со свободным доступом в зону нагрева окружающего атмосферного воздуха, который при температуре термической обработки обладает значительными окислительными свойствами. Благодаря малому времени нагрева воздействие окислительной среды приводит к образованию тонкой оксидной пленки, которая в дальнейшем предохраняет дробь от коррозии. Термообработанная при индукционном нагреве дробь имеет серо-синий цвет и в последующих защитных покрытиях не нуждается.

Содержание углерода 0,3–0,4 % обеспечивает минимальное количество трещин (8–10 % для фракции 1,0–1,5 мм). С увеличением углерода количество гранул с трещинами повышается до 50–80 % при $C = 0,7\text{--}0,8\%$. При этом количество трещин пропорционально величине фракции.

Твердость для литого состояния тем выше, чем больше содержание углерода (до 0,85). С увеличением температуры отпуска до 400 °С твердость выравнивается для всех партий дроби и составляет 450–530 HV.

Литература

1. Powder diffraction file data cards. Inorganic section. Sets 1–34. Swarthmore, PA, 1948–1984.
2. Патент 1169432. Россия.
3. Быстрозакаленные металлы // Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Кантора. М.: Металлургия, 1983.
4. Быстрозакаленные металлические сплавы // Материалы V Междунар. конф. / Под ред. С. Штиба, Г. Варлимонта. М.: Металлургия, 1985.
5. Реймент Дж., Кантор Б. Быстрозакаленные вольфрамовые стали // Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Кантора: М.: Металлургия, 1983.
6. Хоникомб Р.У. Быстрозакаленные кристаллические сплавы // Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Кантора. М.: Металлургия, 1983. С. 58–66.
7. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.И., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982.