

Д. Н. ХУДОКОРМОВ, д-р техн. наук,
Д. А. ХУДОКОРМОВ, канд. техн. наук,
А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук (БНТУ)

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ГРАФИТИЗАЦИИ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЧУГУНА

Процесс формообразования графитных включений оказывает существенное влияние на теплопроводность чугунов. Форма графитных включений и теплопроводность имеют особое значение в чугунных изделиях, подвергающихся при эксплуатации износу под действием трения скольжения. Типичным представителем таких изделий являются гильзы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Форма, размеры и распределение графитных включений совместно с теплопроводностью оказывают решающее влияние на износ гильзы. Кроме того, теплопроводность материала гильзы сказывается на теплообменных процессах в работающем двигателе, его термодинамических характеристиках и в конечном итоге его КПД. Поэтому при производстве гильз ДВС равное внимание уделяется как форме графитных включений, так и теплопроводности чугуна в целом. Так, высокопрочные чугуны (ВЧ) с шаровидным графитом (ЧШГ), обладающие хорошими механическими свойствами, до сих пор не находят применения в производстве гильз ДВС именно по причине малой теплопроводности. Чугуны же с вермикулярным графитом (ЧВГ), занимающие по теплопроводности и механическим свойствам промежуточное положение между ЧШГ и чугунами с пластинчатым графитом (ЧПГ), применяются в данной области лишь эпизодически, в основном в рамках выполнения научно-исследовательских программ или производства экспериментальных изделий. Поэтому сведения о пригодности ЧВГ для изготовления гильз ДВС весьма ограничены. Кроме того, в настоящее время ЧВГ вообще находится преимущественно в стадии изучения, с чем и связаны скудность и в некоторых случаях определенная противоречивость сведений о его механических свойствах.

На первоначальном этапе выполненного исследования изыскивалась возможность повышения теплопроводности высокопрочных чугунов путем увеличения доли включений графита вермикулярной формы в общем числе включений. Измерялась теплопроводность ВЧ одинакового химического состава и с однотипными металлическими основами (в данном случае – ферритными), но с разным соотношением включений вермикулярного (ВГ) и шаровидного (ШГ) графита. Результаты приведены в табл. 1.

Увеличение доли ВГ действительно приводит к существенному росту теплопроводности. Так, при количестве ВГ около 80% теплопроводность чугуна достигает 46 Вт/(м·К), тогда как у чугуна, содержащего 100% ШГ,

она не превышает 35 Вт/(м·К). Но получение ВЧ с таким количеством ВГ уже может представлять определенные технологические трудности и не всегда возможно. В то же время из табл. 1 видно, что зависимость теплопроводности от количества включений ВГ имеет ярко выраженный нелинейный характер, т. е. более чувствительна именно к повышенному содержанию ВГ. Кроме того, теплопроводность исходного чугуна, имеющего структуру ферритного ЧПГ, составляет более 60 Вт/(м·К). Следовательно, ЧВГ по теплопроводности все-таки ближе к ЧШГ, чем к ЧПГ, а значит, его пригодность как материала для гильз ДВС может вызывать сомнение.

Таблица 1

Влияние соотношения количества включений ВГ и ШГ на теплопроводность ВЧ

Количество включений ВГ, %	0	26	44	55	64	71	77
Теплопроводность, Вт/(м·К)	35	37	38	40	41	43	46

Среди причин, вызывающих снижение теплопроводности чугуна при сфероидизации в нем графитных включений, принято называть уменьшение протяженности теплопроводящей фазы, каковой является графит. Таким образом, в ВЧ возрастает роль металлической основы как теплопроводящего компонента. Среди всех элементов, содержащихся в металлической основе чугунов, наибольшее влияние на теплопроводность оказывает кремний. Вместе с тем в ЧШГ воздействие кремния на графитизацию в отличие от ЧПГ значительно меньше, и оценка его влияния на графитизацию упрощается. Поэтому в ходе выполненного исследования весьма целесообразным представилось изучение изменения теплопроводности чугунов с различным содержанием кремния. Для исключения влияния на теплопроводность фазового состава и дисперсности фазовых составляющих в образцах путем отжига получали ферритную металлическую основу. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние содержания кремния на теплопроводность ЧШГ

Содержание кремния в металле, %	1,44	1,90	2,50	2,78	3,45	4,11	4,48
Теплопроводность, Вт/(м·К)	40	37	35	34	32	30	31

Анализ полученных данных убедительно показывает, что, понизив концентрацию кремния, можно существенно увеличить теплопроводность чугуна. Кроме того, дальнейшее повышение последней возможно при увеличении объемной доли и общей протяженности теплопроводящей фазы, которой является графит в чугуне. Таким требованиям удовлетворяют в определенной степени многие марки передельных чугунов, содержащих около 4% углерода и 0,5 – 1% кремния. В обычных условиях эти чугуны кристаллизуются чаще всего с образованием половинчатых структур. В некоторых зонах слитка наблюдаются весьма обширные области белого чугуна даже в том случае, если слиток массивный (чущка массой 10 – 20 кг). Повышенная склонность к отбелу объясняется малым содержанием кремния, являющегося большим графитизатором, чем углерод. В ходе исследования намеренно получали отливки из передельного чугуна с «отбеленной» структурой. Такие отливки подвергались графитизирующему отжигу. Было установлено, что высокий углеродный эквивалент данного сплава способствует резкому сокращению длительности графитизирующей стадии отжига, а повышение температуры еще более ускоряет процесс, так что его длительность не превышает 20 мин (табл. 3).

Таблица 3

Длительность отжига отливок из исследуемого чугуна в зависимости от температуры графитизирующей стадии

Температура графитизирующей стадии отжига, °С	Длительность, мин
950	120 – 160
1000	60 – 90
1050	40 – 70
1100	15 – 20

Металлографическое исследование нетравленных образцов выявило, что повышение температуры отжига не только сокращает его длительность, но и оказывает влияние на форму образующихся включений углерода отжига. С повышением температуры отжига снижается степень их компактности вплоть до пластиноподобной формы (при 1100 °С).

Анализ приведенных в справочной литературе диаграмм изотермического распада переохлажденного аустенита чугунов подобного химического состава позволил выбрать режимы термической обработки отливок из белого чугуна, обеспечивающие получение отожженного чугуна с заданным типом металлической основы – перлитной или ферритной. Неко-

торые механические свойства и теплопроводность отожженного чугуна с перлитной и ферритной металлической основой в зависимости от температуры графитизирующей стадии отжига представлены в табл. 4.

Таблица 4

Некоторые механические свойства и теплопроводность отожженного чугуна в зависимости от температуры графитизирующей стадии отжига

Температура графитизирующей стадии отжига, °С	Чугун с ферритной металлической основой			Чугун с перлитной металлической основой		
	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Теплопроводность, Вт/(м·К)
950	365	10	57	450	5	49
1000	348	8	59	425	3	50
1050	318	5	60	415	2	52
1100	260	2	63	365	Менее 1	54

В практике автомобилестроения чаще всего используются именно перлитные чугуны. Они находят применение и в производстве гильз ДВС, и при изготовлении тормозных дисков, барабанов и т. д. Перлитная металлическая основа обеспечивает чугуну большую прочность и как следствие хорошую износостойкость. Используемым в производстве гильз ДВС ЧПГ придают перлитную металлическую основу именно для повышения их прочностных свойств. Однако износостойкость ЧПГ остается небольшой. Содержащийся в сплаве пластинчатый графит, хотя и выполняет функцию твердой смазки, способствует выкрашиванию металлической основы в процессе трения. Для упрочнения перлитной металлической основы в гильзовые ЧПГ вводят большое количество легирующих элементов, снижая тем самым теплопроводность. Так, теплопроводность гильзового чугуна не превышает 47 Вт/(м·К), тогда как теплопроводность нелегированного ЧПГ может достигать 60 Вт/(м·К). Прочность же при растяжении самых высококачественных гильзовых чугунов составляет 250 – 300 МПа. По сравнению с названными величинами прочность полученного чугуна достигает 400 МПа и сочетается с теплопроводностью 50 Вт/(м·К). Это дает основание считать разработанный чугун и способ его получения весьма перспективным и для производства деталей, в которых наряду с определенным комплексом механических свойств затребована высокая теплопроводность.