



There is summerized the experience of slugs production for the running system of automobile engines from high-test cast iron of mark VCh-40. There is shown, that graphitizing processing of melt by blend modifier on the basis of active carbon and silicon allows to elevate considerably the plastic characteristics of VCh, produced by modification in mould.

В. А. ЧАЙКИН, В. В. ИШУТИН, филиал МГОУ, г. Сафоново

УДК 621.74

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

В настоящее время наблюдается повышенный спрос на литые заготовки из высокопрочных чугунов (ВЧ). Один из путей удовлетворения потребности в них — освоение производства ВЧ в действующих литейных цехах серого чугуна.

В данной работе обобщен опыт получения заготовок для ходовой системы двигателей автомобиля из высокопрочного чугуна марки ВЧ40. Исходный чугун выплавлялся дуплекс-процессом в индукционной печи с последующей выдержкой в индукционном канальном миксере. Универсального способа производства ВЧ, удовлетворяющего специфическим условиям производства, не существует несмотря на то, что цели модифицирования во всех случаях одни и те же и сводятся к стабильному получению чугуна требуемого качества при наименьших затратах. Поэтому исследовали два пути получения ВЧ: ковшовое модифицирование (сэндвич-процесс) и внутриформенное (инмолд-процесс). Оба способа модифицирования чугуна легко вписывались в технологический процесс изготовления отливок из серого чугуна. Они достаточно просты, не требуют специального оборудования и широко применяются на практике.

Модифицирование тем и другим способами производили чугуном одной плавки с использованием сфероидизирующего модификатора ФСМг-7 фракцией 1–5 мм. Ковшовое модифицирование чугуна осуществляли в 1,5-тонных ковшах. На дно прогретого ковша засыпали модификатор ФСМг-7 в количестве 2,5% от массы жидкого металла и 0,1% ФС30РЗМ30 для стабилизации процесса. Все это прикрывали слоем чугунного скрапа. Температура заливаемого из миксера чугуна составляла 1480°C. Заполнение ковша сопровождалось значительным пирроэффектом и дымовыделением. Перед заливкой форм отбирали технологические пробы на

отбел, а анализ химического состава и механических свойств проводили после заливки форм из стандартных клиновых проб. Исследовали влияние совместного сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования на качество ВЧ, полученного обработкой расплава в ковше. Для этого в 1,5-тонный ковш загружали дополнительно 0,2 % модификатора МК-21. Комплексный модификатор МК-21 предназначен для обработки и модифицирования серого чугуна и представляет собой смесь порошков, содержащих активный углерод и кремний. Кроме того, в его состав входят кальций и алюминий. Часть графитизаторов находится в ультрадисперсном состоянии, что усиливает эффективность процесса. Количество элементов в лигатуре оптимизировано практическим путем. При этом обеспечивается высокая эффективность процесса графитизации, длительное время сохраняется модифицирующий эффект.

Графитизатор помещали на чугунный скрап. Отбел на технологической пробе при этом снижался с 7–10 до 3–5 мм.

Внутриформенное модифицирование проводили в реакционной камере литейной формы модификатором ФСМг-7 в количестве 1,4 % от ее металлоемкости. В данном случае также исследовали влияние предварительного графитизирующего модифицирования на качество получаемого ВЧ. Для этого на дно ковша загружали 0,2 % модификатора МК-21. Пробы на отбел отбирали перед заливкой форм. Отбел на технологической пробе составлял 3–5 мм без предварительной обработки и снижался до 0–1 мм после обработки расплава МК-21. Пробы для определения механических свойств и химического состава ВЧ заливали вместе с отливками. Физико-механические свойства ВЧ, полученного различными способами, приведены в табл. 1 и на рис. 1 – 3.

Таблица 1.

Способ модифи- цирования	Механические свойства				Химический состав, %							Микроструктура
	σ_B , МПа	δ , %	КС, кДж/м ²	НВ	C	Si	Mn	Cr	P	S	Mg	
В ковше	510,9	2,7	150	229	3,68	3,1	0,34	0,15	0,047	0,023	0,065	ШГд45-90, ШГф3-4, ШГр2, ШГ6, П45(Фе55), Ц10
В ковше, с МК-21	505,7	5,39	200	201	3,71	3,05	0,33	0,15	0,047	0,022	0,069	ШГд45, ШГф4, ШГр2, ШГ6, П45(Фе55)
В форме	491,5	16,1	480	179	3,55	2,71	0,34	0,15	0,043	0,026	0,087	ШГд25, ШГф5, ШГр1, ШГ12, П20(Фе80)
В форме, с МК-21	485,6	20,1	600	163	3,58	2,68	0,32	0,14	0,045	0,025	0,088	ШГд15-25, ШГф5, ШГр1, ШГ12, П15(Фе85)

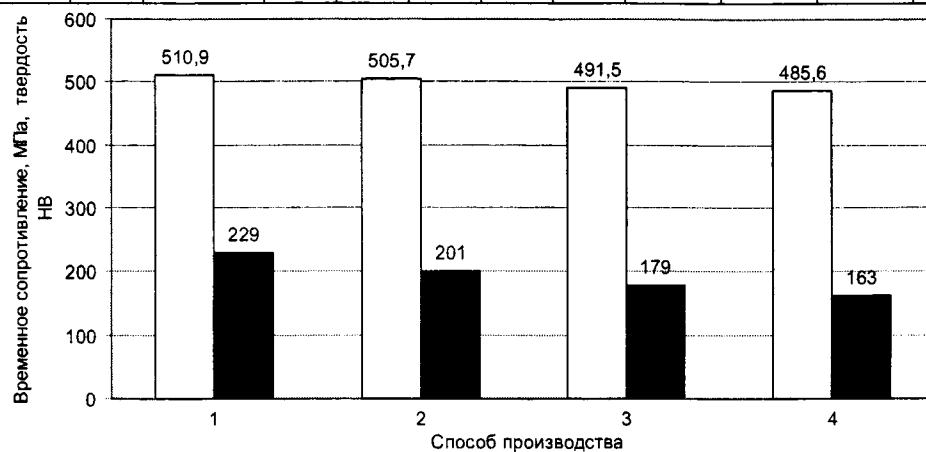


Рис.1. Средние значения механических свойств: □ – временное сопротивление, МПа; ■ – твердость НВ; 1 – сфероидизирующее модифицирование в ковше; 2 – сфероидизирующее и графитизирующее модифицирование в ковше; 3 – сфероидизирующее модифицирование в форме; 4 – сфероидизирующее модифицирование в форме, графитизирующее в ковше

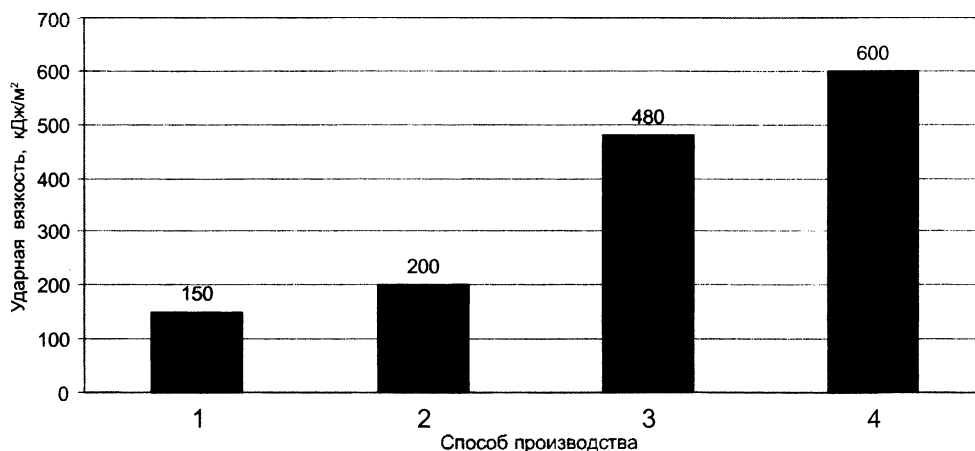


Рис.2. Средние значения ударной вязкости: 1 – сфероидизирующее модифицирование в ковше; 2 – сфероидизирующее и графитизирующее модифицирование в ковше; 3 – сфероидизирующее модифицирование в форме; 4 – сфероидизирующее модифицирование в форме, графитизирующее в ковше

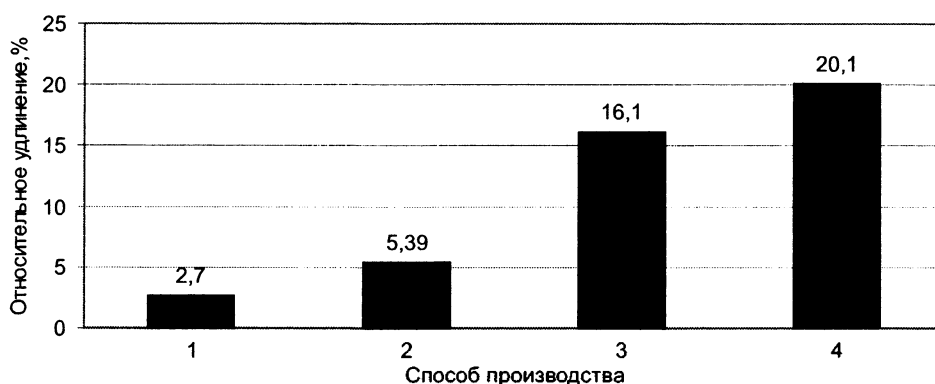


Рис.3. Средние значения относительного удлинения: 1 – сфероидизирующее модифицирование в ковше; 2 – сфероидизирующее и графитизирующее модифицирование в ковше; 3 – сфероидизирующее модифицирование в форме; 4 – сфероидизирующее модифицирование в форме, графитизирующее в ковше

Как видно из рисунков, модифицирование в форме благодаря эффекту позднего модифицирования благоприятно сказывается на микроструктуре ВЧ, значительно повышает его пластические характеристики, ударную вязкость, сохраняя при этом высокие прочностные характеристики и умеренную твердость. Этот способ позволяет получить марку ВЧ40 без термообработки. Особенно эффективно внутриформенное модифицирование в сочетании с предварительной графитизирующей обработкой расплава. Это обусловило применение этого способа как основного при производстве отливок ходовых систем автомобиля из ВЧ40. Ковшовое модифицирование применяли для получения штучных литых заготовок и мелких серий преимущественно из ВЧ50.

Внутриформенное модифицирование использовали на заводе на протяжении ряда лет, поэтому имелась возможность получения обширного экспериментального материала. Для более глубокого изучения процесса использовали методы математической статистики и регрессионного анализа. Вычисления проводили с помощью программы STATISTICS & ANALYSIS. Для определения стабильности качественных показателей чугунов вычисляли основные статистические характеристики исследуемых переменных величин. Для наглядности массивы распределения исследуемых факторов изображали на гистограммах.

Основные статистические характеристики механических свойств приведены в табл. 2 и на рис. 4 – 7.

Таблица 2.

Механические свойства	Основные статистические характеристики						
	среднее значение	размах колебаний	средне-квадрат. отклонение	дисперсия	коэффициент вариации, %	асимметрия	эксцесс
Предел прочности, МПа	484,7	240	46,54	2166	9,5	-0,076	-0,27
Относительное удлинение, %	14,09	16,5	3,13	9,85	22,5	-0,18	0,58
Ударная вязкость, кДж/м ²	484,3	750	135,63	18396	28	0,30	0,55
Твердость НВ	163,13	64,0	12,29	151,27	7,3	-0,18	-0,24

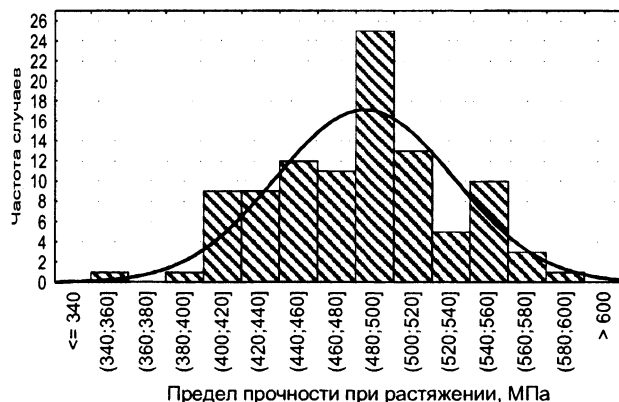


Рис. 4. Гистограмма предела прочности при растяжении с наложенной плотностью нормального распределения

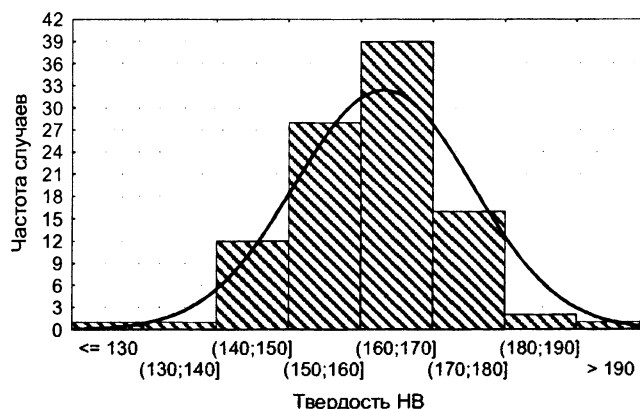


Рис. 5. Гистограмма твердости с наложенной плотностью нормального распределения

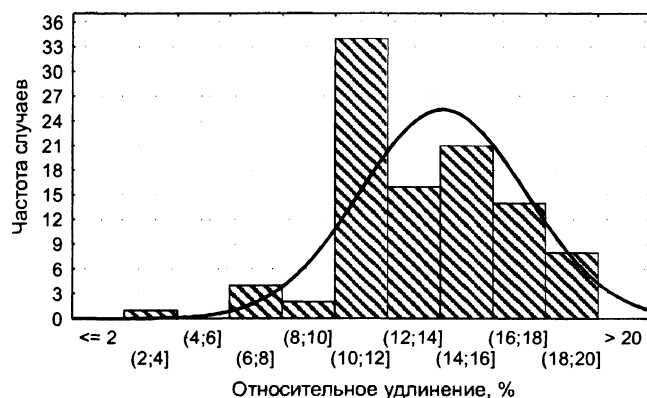


Рис. 6. Гистограмма относительного удлинения с наложенной плотностью нормального распределения

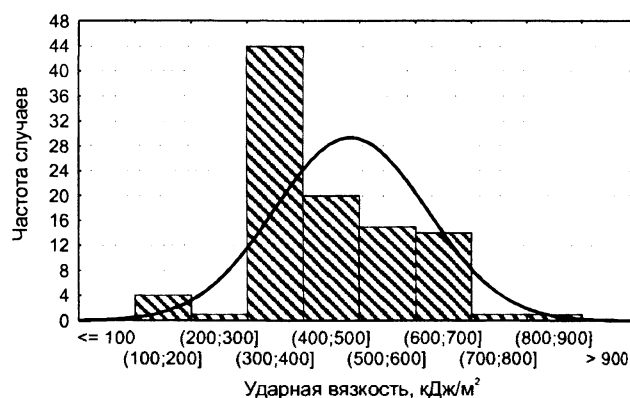


Рис. 7. Гистограмма ударной вязкости с наложенной плотностью нормального распределения

Как видно, показатели однородности различных механических свойств ВЧ отличаются. Наибольшая стабильность у твердости чугуна. Ее массив больше всего приближается к нормальному распределению. Достаточно стабилен и предел прочности при растяжении. Вместе с

тем показатели вариации относительного удлинения и особенно ударной вязкости значительно выше и требуют стабилизации. Для решения этой задачи произвели статистическую обработку химического состава ВЧ. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Химический состав, мас. %	Основные статистические характеристики						
	среднее значение	размах колебаний	среднеквадрат. отклон.	дисперсия	коэффициент вариации, %	асимметрия	эксцесс
Углерод	3,59	1,31	0,20	0,04	5,57	0,67	2,22
Кремний	2,76	1,87	0,42	0,18	15,2	-0,95	-0,35
Марганец	0,31	0,28	0,06	0,00	19,3	0,21	-0,52
Хром	0,14	0,14	0,03	0,00	21,8	-0,91	0,83
Фосфор	0,47	0,069	0,01	0,00	21,0	0,53	1,51
Сера	0,24	0,051	0,007	0,00	31,38	2,60	10,96
Магний	0,89	0,14	0,03	0,00	33,7	0,075	-0,43

Как видно из таблицы, наиболее стабильно в ВЧ содержание углерода. Однородность концентраций других элементов значительно ниже и ее необходимо повышать. В данном случае наибольший интерес представляет собой установление влияния химического состава чугуна на его механические свойства для определения эффективных путей воздействия на них. Чугуны, являясь высокоуглеродистыми сплавами, реагируют на вносимые элементы прежде всего или усилением склонности к отбелу, или улучшением графитообразования. Причем изменение структуры чугунов в процессе легирования происходит как при эвтектическом, так и при эвтектичном превращениях. Для установления зависимостей между механическими свойствами и химическим составом использовали метод множественной регрессии. Адекватность построенных моделей проверяли, анализируя остатки, и по соответствующим критериям.

Уравнения регрессий имеют следующий вид:

$$\sigma = 442,2 - 39 C + 4,7 Si + 256 Mn + 328 Cr + 339 P - 474 S + 405 Mg,$$

$$\delta = 7,75 + 2,21 C + 1,4 Si - 8,6 Mn - 22,5 Cr + 16,8 P - 57 S + 11,6 Mg,$$

$$HB = 131 - 5,12 C + 0,43 Si + 82,2 Mn + 120 Cr + 30 P + 161 S + 7,84 Mg,$$

$$KC = 552 + 37 C + 56 Si - 413 Mn - 1343 Cr - 891 P - 1850 S + 572 Mg.$$

Анализ остатков подтвердил адекватность полученных уравнений.

Из анализа уравнений следует, что углерод уменьшает прочность и твердость, но увеличивает пластичность и ударную вязкость ВЧ. Это связано с тем, что он является графитообразующим элементом на первой и второй стадиях кристаллизации. Кремний является также активным графитизатором. Его графитизирующее действие проявляется на двух стадиях кристаллизации. Поэтому рост ударной вязкости и относительного удлинения естественен за счет ферритизации матрицы. Увеличение прочности и твердости вызвано легированием феррита. Как графитизатор, работает и

фосфор, увеличивая прочность и относительное удлинение. Однако фосфидная эвтектика повышает твердость и снижает ударную вязкость. Магний оказывает положительное влияние на все механические свойства ВЧ. Это связано с увеличением степени сфероидизации графитных включений. Отрицательное влияние на механические свойства оказывает сера. Причины ее вредного влияния общеизвестны. Сера связывает магний, чем дестабилизирует процесс модифицирования, образует скопления неметаллических включений, что в свою очередь ухудшает механические свойства ВЧ. Карбидообразующие элементы марганец и хром повышают прочность и твердость и снижают пластичность и вязкость ВЧ. Особенно сильное влияние оказывает хром.

Для определения элементов, оказывающих решающее влияние на механические свойства чугунов, устанавливали значимость коэффициентов регрессии и исключали из уравнений элементы, имеющие незначительное влияние на свойства чугуна методом пошаговой регрессии. Уравнения принимали вид

$$\sigma = 465 - 36,7 C + 219 Mn + 323 Cr + 394 Mg,$$

$$\delta = 8,49 + 2,31 C + 14 Si - 9,6 Mn - 22,5 Cr - 57 S + 11,6 Mg,$$

$$HB = 114 + 80 Mn + 127 Cr + 195 S,$$

$$KC = 648 + 54 Si - 371 Mn - 1411,25 Cr + 657 Mg - 2238 S.$$

Как видно из уравнений, меньше всего от химического состава зависит твердость, затем прочность. И, наконец, резко возрастает эта зависимость у пластических характеристик. Становится понятным соответствующее распределение однородности указанных выше свойств.

Итак, самый стабильный показатель механических свойств — твердость зависит прежде всего от содержания карбидообразующих элементов марганца, хрома, а также серы. Первые два элемента оказывают существенное влияние на массовую долю и степень дисперсности эвтектидного цементита, что в свою очередь заметно изменяет твердость. Количество форм и размер графитных включений, которые в свою очередь определяются содержанием углерода, кремния, магния, не влияют на твердость (коэффициенты при них незначимы). Таким образом, эти элементы, в количествах присутствующих в чугунах, не оказывают существенного влияния на твердость.

Прочность чугуна оказывается более чувствительной к химическому составу. Значимость дополнительно приобретают коэффициенты при

углероде и магнии, т. е. степень графитизации и сфероидизации графитных включений в данном случае начинает оказывать влияние на прочность. Соответственно стабильность этого показателя снижается.

Наконец, пластические характеристики наиболее зависят от химического состава, особенно ударная вязкость, где коэффициенты регрессии более высокие. Соответственно продолжает снижаться и стабильность показателей этих механических свойств.

Из проведенного анализа вытекают пути повышения однородности механических свойств. Прежде всего следует отметить, что фосфор не оказал существенного влияния на механические свойства ВЧ, несмотря на то что он колеблется в широких пределах — от 0,022 до 0,091 (коэффициенты при нем незначимы). Дополнительные меры по его снижению не требуются. Это облегчает задачу, так как влиять на его содержание в ВЧ практически невозможно.

Наибольшее влияние на все без исключения механические свойства оказывают марганец и хром. Поэтому их концентрациям в металле необходимо уделять внимание в первую очередь. В шихту они попадают со стальным ломом, переплавными чугунами и возвратом. Поэтому нужно выбрать оптимальные марки чушковых чугунов и лома, иметь постоянных поставщиков и не менять их. Однако при наличии параллельных потоков изготовления отливок из СЧ и ВЧ, что имело место в нашем случае, решающее влияние на химический состав оказывает возврат, так как его потоки смешиваются. Отливки из серого чугуна СЧ24, а также специальные чугуны содержат повышенные концентрации марганца, хрома и существенно увеличивают колебания этих элементов. Возврат же ВЧ имеет высокое содержание кремния, который усваивается дополнительно при внутриформенном модифицировании. Вместе с тем в этом компоненте значительно меньше серы. Так, в процессе модифицирования в форме происходит одновременно и глубокая десульфурация расплава. Поэтому разделение потоков возврата приобретает решающую роль при параллельном изготовлении отливок из СЧ и ВЧ. Это позволит стабилизировать концентрации всех элементов, в том числе и магния, учитывая высокую степень рафинирования, возврата ВЧ.

Таким образом, статистическая обработка и регрессионный анализ позволили наметить пути повышения стабильности механических свойств ВЧ40, получаемого без термической обработки, внутриформенным модифицированием.