

**УДК 669.131.7**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ**

Нурлан Фейзуллаевич Нуралиев

*Студент I курса,*

*Кафедра «Литейные технологии»*

*Московский технический университет имени Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: В.В.Андреев,*

*кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела «Литейных процессов»*

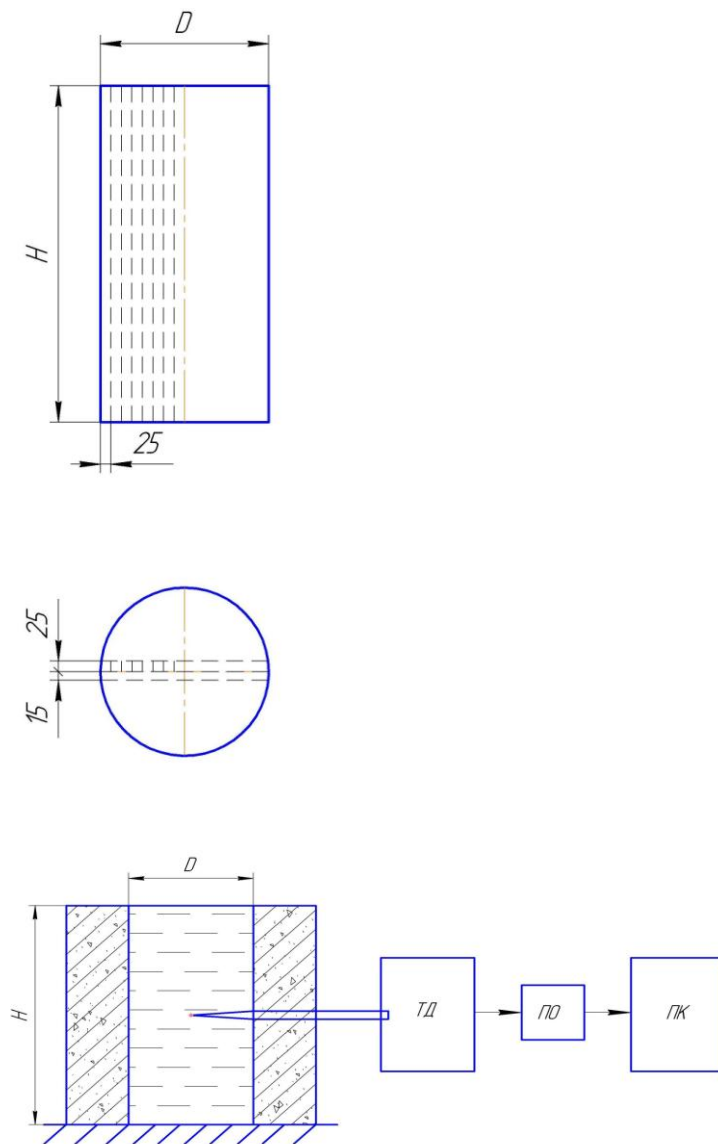
*Государственный научный центр НПО ЦНИИТМаш*

В настоящее время из чугуна с шаровидным графитом изготавливаются детали весом от нескольких граммов до десятков тонн. Однако, несмотря на большое количество работ по высокопрочному чугуну, исследований особенностей технологии производства и свойств чугуна с шаровидным графитом в толстостенных отливках с толщиной стенки свыше 100 мм еще недостаточно. В то же время известно, что с увеличением толщины стенки отливки увеличивается продолжительность ее затвердевания. Модифицированный сфероидизирующими присадками чугун в металлоемкой форме находится длительное время в жидком состоянии. При этом вследствие низких скоростей кристаллизации возможно понижение концентрации магния и других элементов - модификаторов в чугуне, развитие ликвационных процессов, рост эвтектических зерен, по границам которых выделяются карбидные включения, происходит формирование аномальных форм графита (пластинчатой, вермикулярной, звездообразной, междендритной и др.). Все это приводит, как следствие, к снижению уровня механических и эксплуатационных свойств чугуна в отливках. Целью настоящей работы является выявления особенностей процесса кристаллизации, формирование структуры и физико-механических свойств высокопрочного чугуна. Работа выполнена с привлечением современных способов и методов решения поставленных задач.

Выплавка чугуна проводилась в индукционных печах высокой и промышленной частоты ИСТ-О.160 емкостью 160 кг и ИЧТ-1 емкостью 1000 кг. Сфероидизирующее модифицирование чугуна проводили в открытых ковшах при температуре 1400-1450°C методом МДС-процесса. На дне ковша устанавливали перегородку из огнеупорного кирпича высотой 150...250 мм, в зависимости от емкости ковша. В одну половину закладывали модификатор, который присыпали чугунной стружкой, в другую направляли струю металла при сливе его из печи. В качестве модификатора использовали модификатор ФСМг-7 с содержанием Mg-6,5...7,5%, Ce-1,5%, Si-55,0% . в порошкообразном состоянии с фракцией частиц до 2,0 мм.

Из обработанного сфероидизирующими присадками чугуна заливались отливки цилиндрической формы диаметром 100 мм; 200 мм; 300 мм; 400 мм, 500мм и стандартные (ГОСТ 7293-85) пробы. В центральные части форм устанавливали термопары для снятия кривых охлаждения и определения продолжительности

затвердевания чугуна, с этой целью использовали прибор «Термодат» в сочетании с персональным компьютером и соответствующим программным обеспечением. (рис. 1.)



$D=100\div 500$  мм  
 $H=300\div 1000$  мм

Рис.1.Схема разрезки и измерения температуры отливок из высокопрочного чугуна.

Исследовали микроструктуры чугуна, определяли процентное соотношение структурных составляющих и коэффициент формы графита чугуна. В основу определения коэффициента формы графита был заложен двухмерный фактор формы./8/

$$\Phi_2 = 3,545 \sqrt{F} / P \quad (1)$$

где:  $F$  - площадь рассматриваемого включения графита;

P - периметр круга, равновеликого площади рассматриваемого включения графита.

Для исследования микроструктуры применяли также микроскоп МИМ-8.

Временное сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение определяли на образцах диаметром 10 мм по ГОСТ 27208-87.

Твердость чугуна по Бринеллю измеряли на специально подготовленных темплетях или шлифах на приборе с диаметром шарика 10 мм при нагрузке 3000 кг по ГОСТ 9012-59.

Ударную вязкость KCV определяли на образцах шириной 10 мм по ГОСТ 9454-78.

Модифицированный чугун имел следующий химический состав (%):

C - 3,2; Si - 2,4; Mn - 0,35; P - 0,05; S - 0,008; Mg - 0,055; Cr - 0,04; Cu - 0,14;

Al - 0,09; Ni, - 0,15.

Продолжительность затвердевания чугуна в зависимости от толщины стенки представлена в табл. 1

Таблица 1 Продолжительность затвердевания чугуна в отливках различного диаметра

Диаметр отливки, мм	Продолжительность затвердевания, мин	Диаметр отливки, мм	Продолжительность затвердевания, мин
25	10	300	130
100	20	400	230
200	65	500	340

Для установления соответствия условий моделирования процесса кристаллизации крупных отливок процессам, протекающим при затвердевании реальных отливок, была выявлена расчетным путем функциональная зависимость между диаметром отливки и продолжительностью кристаллизации чугуна по известным методикам. Расчет продолжительности затвердевания чугуна производили по формулам:

$$t_{\text{затв.р}} = [ (L_E \cdot \rho_3 \cdot R_o) / (1,13 \cdot V_4 (T_E - T_{\phi})) + \sqrt{t_1} ] \quad (2)$$

$$t_1 = [ (C_1 \cdot \rho_1 \cdot R_o (T_H - T_L) / (1,128 \cdot V_4 (T_H - T_{\phi})) + \sqrt{t_{\text{зал}}}]^2 \quad (3)$$

$$t_{\text{зал}} [ (C_1 \cdot \rho_1 \cdot R_o (T_{\text{зал.}} - T_L) / (1,13 \cdot V_4 (T_{\text{зал.}} - T_{\phi})) ]^2 \quad \text{или} \quad (4)$$

$$t_{\text{зал}} = B \cdot S_o^n \cdot \sigma_o^m \quad (5)$$

где  $S_o$  - толщина стенки отливки, мм;

$\sigma_o$  - масса отливки, кг;

Коэффициенты:  $B = 2$ ;  $n = 0,25$ ;  $m = 0,5$ ;

$T_L$  - температура ликвидуса, °К;

$T_E$  - температура эвтектики, °К;

$R_o$  - приведенный размер отливки, м;

$T_{\phi}$  - начальная температура формы, °К;

$T_H = 1/2 (T_{\text{зал.}} + T_E)$  - начальная температура отливки, °К;

$V_4$  - коэффициент тепловой аккумуляции формы,  $\text{Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{С}^{1/2}$

$L_E$  - удельная теплота кристаллизации эвтектики,  $\text{Дж/кг}$ ;

$t_{\text{зал}}$  - продолжительность заполнения формы расплавом, с;

$t_1$  - время снятия перегрева, с;

$C_1, C_3$  удельная теплоемкость жидкого и твердого чугуна,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\rho_3, \rho_1$  плотность чугуна в жидком и твердом состояниях,  $\text{кг/м}^3$ .

Значения величин, используемых при расчете продолжительности затвердевания, приведены в табл. 2. В табл.3 приведена расчетная продолжительность затвердевания.

Таблица 2 Исходные данные для расчета продолжительности затвердевания

$T_L, ^\circ\text{K}$	$T_E, \text{K}$	$T_f, ^\circ\text{K}$	$B_4 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{C}^{1/2})$	$L_E \text{ Дж}/\text{кг}$	$C_1 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$	$C_3 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$	$\rho_1 \text{ кг}/\text{м}^3$	$\rho_3 \text{ кг}/\text{м}^3$
1473	1470	293	1377	215000	922	695	6950	7200

Таблица 3 Расчетная продолжительность затвердевания чугуна

Диаметр отливки, мм	Продолжительность затвердевания, мин	Диаметр отливки, мм	Продолжительность затвердевания, мин
25	7	300	115
100	16	400	200
200	55	500	310

На рис. 2 приведены зависимости экспериментальной и расчетной продолжительности кристаллизации чугуна от толщины стенки отливки. Как видно из приведенных графиков, при возрастании абсолютной разницы между экспериментальной и расчетной продолжительностью затвердевания с увеличением толщины стенки, относительная разность составляет в среднем 15%. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что при расчете продолжительности затвердевания моделируемых отливок, полученное значение необходимо увеличивать в среднем на 15%, а формула для расчета продолжительности затвердевания чугуна тогда примет вид:  $t_{\text{затв}} = K_3 \cdot t_{\text{затв. расч}}$ .

где  $K_3$  - поправочный коэффициент в соответствии с полученными данными, изменяется от 1,25 для толщины стенки 100 мм до 1,13 для толщины стенки 500 мм.

Очевидно, что продолжительность кристаллизации и последующего остывания определяется рядом переменных: конструкцией отливок, теплофизическими свойствами металла и формы, температурой заливки, технологией формы и т.д., вследствие чего значительно изменяется морфология включений графита и структура металлической основы высокопрочного чугуна. В соответствии с общей теорией графитизации увеличение толщины стенок отливок, а, следовательно, и продолжительности кристаллизации влечет за собой увеличение линейных размеров графита.

При металлографическом анализе образцов чугуна, вырезанных из толстых сечений, в плоскости шлифа обнаруживается практически весь спектр имеющихся форм и размеров графитовых включений, обычно присущих различным маркам чугуна. Оценивали форму каждого включения графита, определяли общий коэффициент формы графита для каждого исследуемого образца. На рис. 3-7 приведены микроструктуры чугуна в нетравленном состоянии, соответствующие различным толщинам стенок и коэффициентам формы графитовых включений.



Рис.2 Зависимость продолжительности кристаллизации чугуна от толщины стенки отливки.

Коэффициент формы графита при этом последовательно уменьшается от 0,82 в пробе с толщиной стенки 25 мм до 0,55 в центре отливки с толщиной стенки 500 мм. Зависимость коэффициента формы графита от толщины стенки отливки представлена на рис. 8. Как видно из данного рисунка, разница между коэффициентом формы в центральных и периферийных частях возрастает с увеличением толщины стенки отливки.

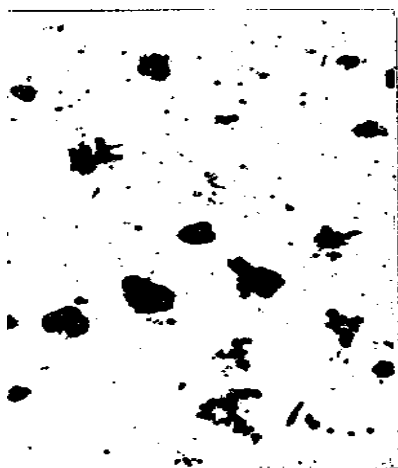
Так, если в сечении 100 мм она составляет 0,02, то с увеличением размеров сечения до 400 мм достигает 0,08.

Включения графита в стандартной пробе с толщиной стенки 25 мм, имеют, в основном, правильную шаровидную форму с размерами 15-25 микрон. Распределение графита при этом равномерное. С увеличением толщины стенки до 100 мм картина резко меняется. В результате уменьшения степени переохлаждения чугуна, увеличения продолжительности кристаллизации включения графита укрупняются до размеров 45-60 мк, приобретая при этом, в основном, неправильную шаровидную и компактную формы. Появляются отдельные включения вермикулярного графита. При дальнейшем увеличении продолжительности кристаллизации до 5 часов, что имеет место в сечении 500 мм, форма графита продолжает ухудшаться, размеры включений графита увеличиваются, а их количество уменьшается. Все это связано с дальнейшим снижением степени переохлаждения и уменьшением количества центров графитизации. Изучение зависимости количества включений графита от толщины стенки отливки, показывает, что в образце чугуна стандартной пробы количество включений графита составляет 85 шт/мм<sup>2</sup>, то в образце, вырезанном из центральной части сечения размером 500 мм, эта величина снижается до 7 шт/мм<sup>2</sup>. При этом в периферийных областях отливок количество включений графита примерно в 2 раза выше, чем в центральных. При дальнейшем увеличении продолжительности кристаллизации до 5 часов, что имеет место в сечении 500 мм, форма графита продолжает ухудшаться, размеры включений графита увеличиваются, а их количество

уменьшается. Все это связано с дальнейшим снижением степени переохлаждения и уменьшением количества центров графитизации.



а)



б)

Рис. 3 Структура графита чугуна

а) в отливке с толщиной стенки 25 мм ( $K_f - 0,82$ )

б) в отливке с толщиной стенки 100 мм ( $K_f - 0,73$ )

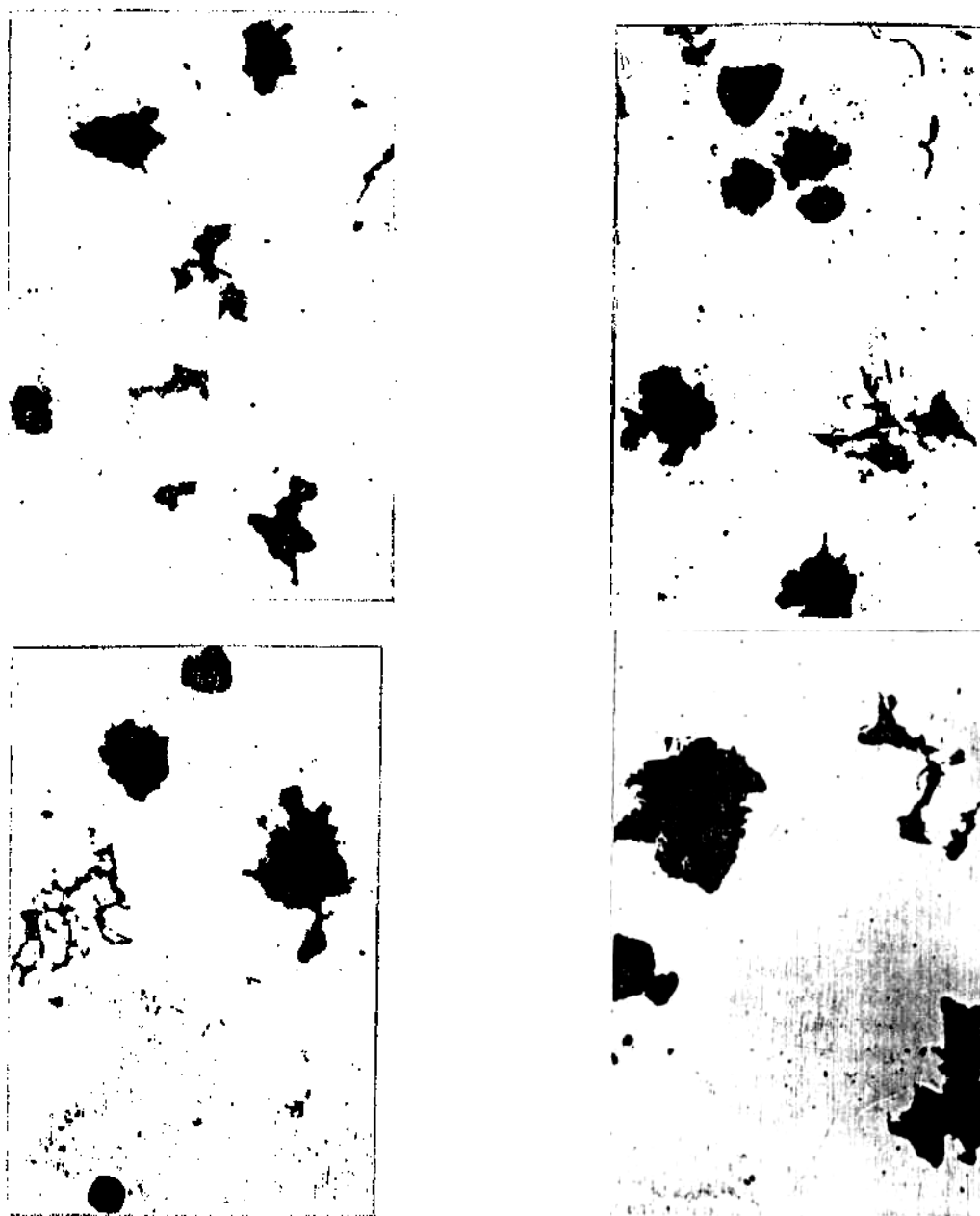


Рис. 4 Структура графита чугуна в отливке с толщиной стенки 200 мм (Кф - 0,67)

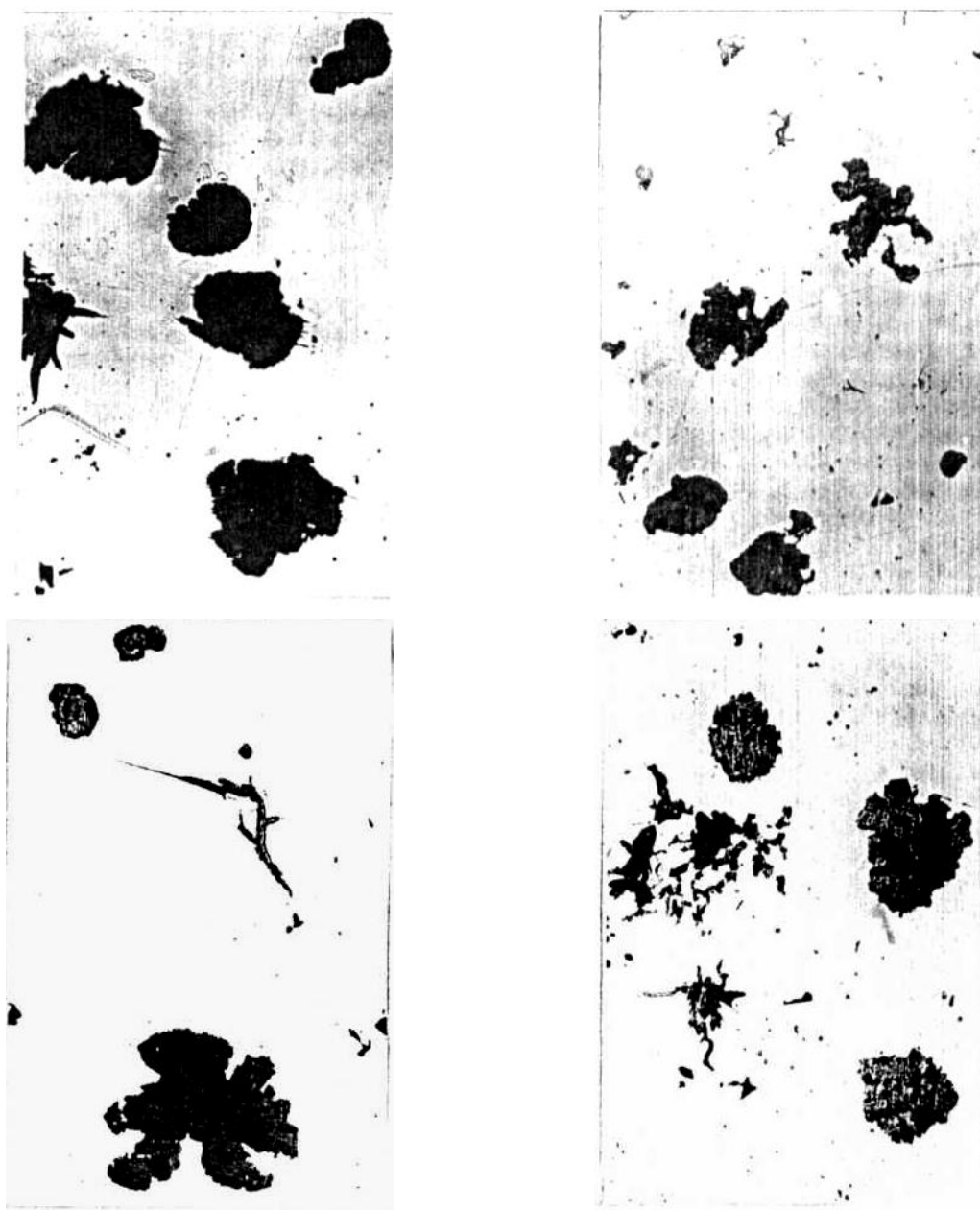


Рис. 5 Структура графита чугуна в отливке с толщиной стенки 300 мм (Кф - 0,62)

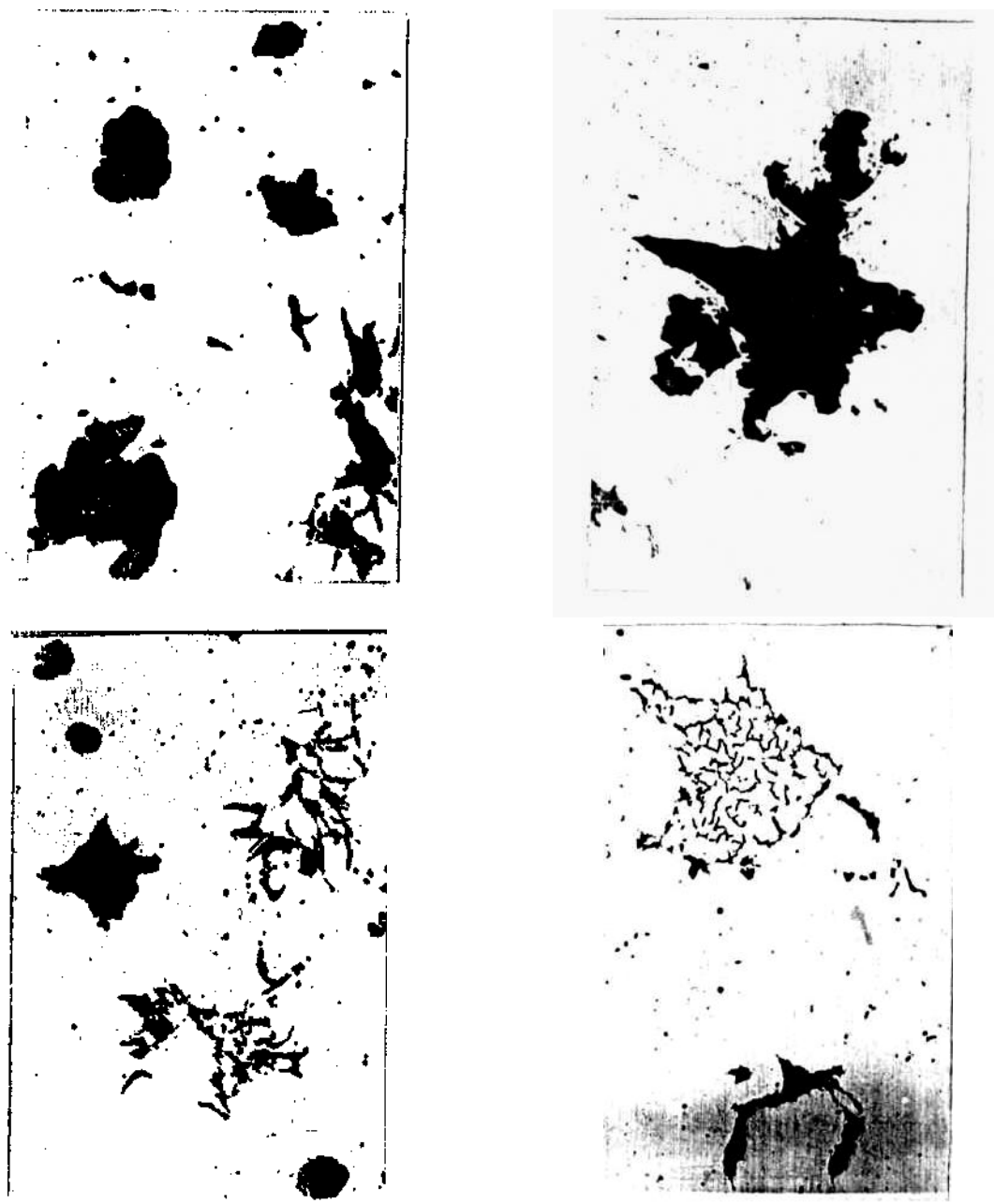


Рис. 6 Структура графита чугуна в отливке с толщиной стенки 400 мм (Кф - 0,58)

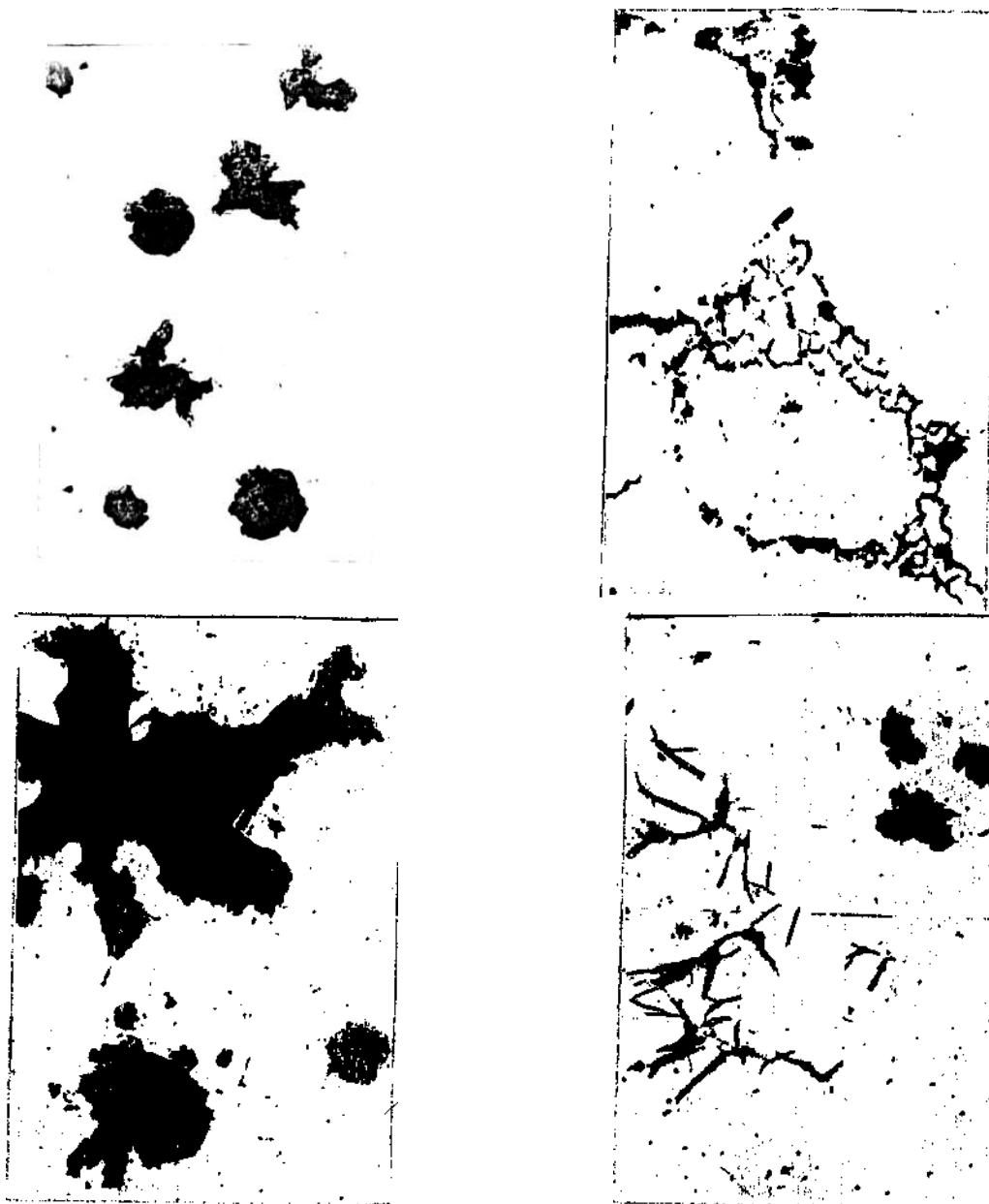


Рис. 7 Структура графита чугуна в отливке с толщиной стенки 500 мм (Кф - 0,54)

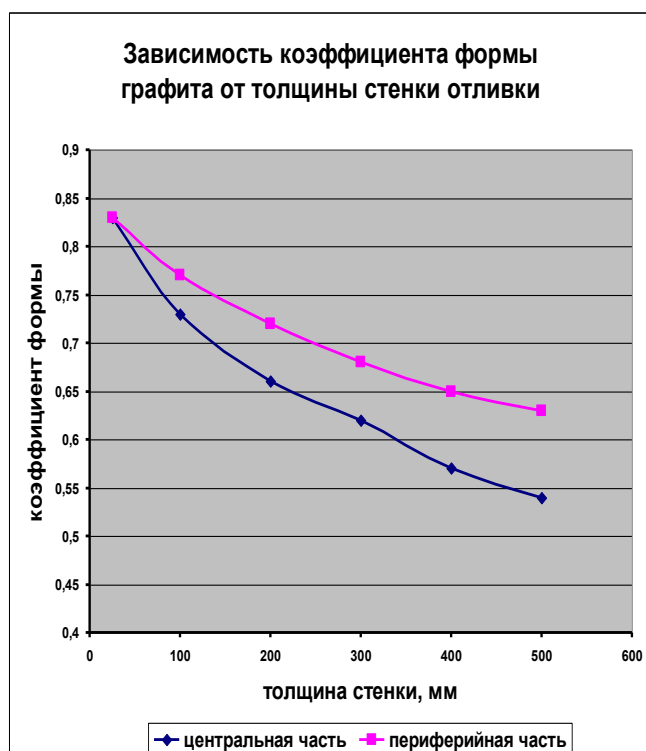


Рис. 8 Зависимость коэффициента формы графита от толщины стенки отливки.

Результаты исследований характера распределения включений графита по размерам приведены в табл. 4.

Таблица 4 Распределение включений графита по размерам в зависимости от толщины стенки отливки

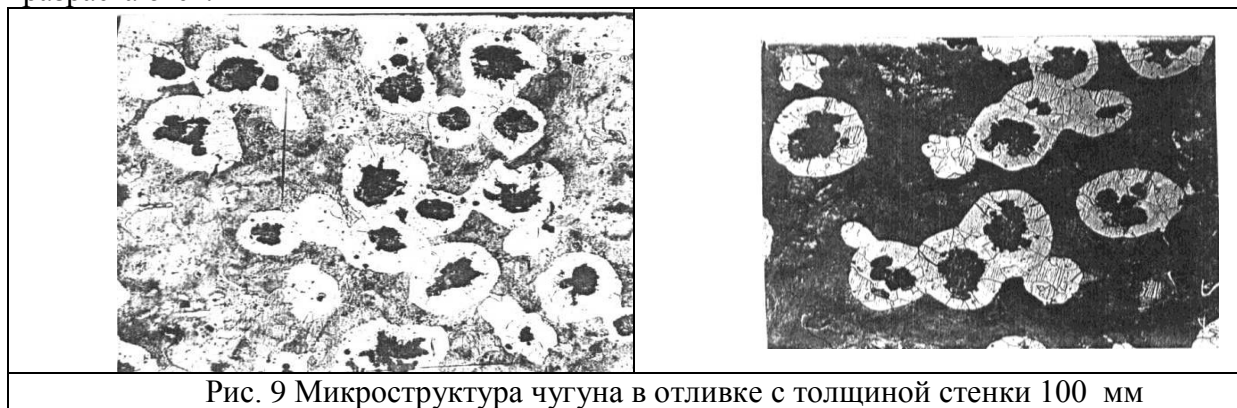
Площадь графитового включения, мк <sup>2</sup>	Количество графитных включений, шт./100 мм <sup>2</sup>								
	толщина стенки ,мм								
	5	2	1	2	3	4	5	6	5
150 – 300		4	3	2	1	1			6
301 – 600	000	93	92	89	21	5			
601 – 1200		3	4	3	2	1	1		1
1201 – 2400	000	94	85	47	87	10			
2401 – 4800		1	3	3	1	1			1
4801 – 9600	064	99	40	96	37	05			
9601 – 19200		3	3	2	1	1			1
> 19200	40	64	80	27	09	07			
		2	3	2	1	1			1
	0	40	50	29	01	12			1
		4	3	1	1	1			1
		-	25	76	23	12			23
		-	1	1	1	1			1
		99	22	35	24	30			
			4	4	1	1			2
					33	83			11

Механизм образования неправильных форм графита, на наш взгляд, протекает следующим образом.

Как известно фазой, способствующей формированию эвтектических колоний, обычно является графит. Он возникает в жидкости эвтектического состава первым и растет в виде кристаллов шаровидной формы. Прилегающая к графиту жидкость обедняется углеродом, и на отдельных участках вокруг графита зарождается аустенит. В условиях продолжительной кристаллизации, что имеет место в центре массивных отливок, этот процесс протекает крайне медленно и неравномерно. В местах соприкосновения графита с жидкостью, его рост будет происходить быстрее, чем в твердой. Сравнительно быстрый рост графита в жидкой фазе может замедляться по мере зарождения на этом участке аустенита. В результате включения графита, зародившиеся в начале кристаллизации, к моменту полного окружения их аустенитной оболочкой могут иметь самые разнообразие и непредсказуемые формы. Зародыши графита, возникающие в процессе кристаллизации позднее, быстро и равномерно обволакиваются аустенитной оболочкой, поэтому имеют более правильную форму, чем крупные, процесс образования которых происходит довольно длительное время.

Особенности формирования структуры чугуна в массивных сечениях отливок в значительной степени обусловлены длительным интервалом кристаллизации, а также уменьшением скорости охлаждения отливок.

Микроструктура исследованных чугунов с различной толщиной стенки приведена на рис. 9-12. Как известно, структурные изменения в твердом состоянии при охлаждении отливок начинаются с выделения вторичной высокоуглеродистой фазы из аустенита. Известно, что с понижением температуры растворимость углерода в железе уменьшается и, вследствие этого, аустенит при охлаждении чугуна все время находится в пересыщенном углеродом состоянии и в зависимости от скорости охлаждения, происходит либо выделение графита, либо цементита. Выделяющийся из аустенита углерод осаждается на имеющихся включениях графита, образовавшихся в процессе затвердевания чугуна. При этом, не меняя своей формы, эти включения заметно разрастаются.



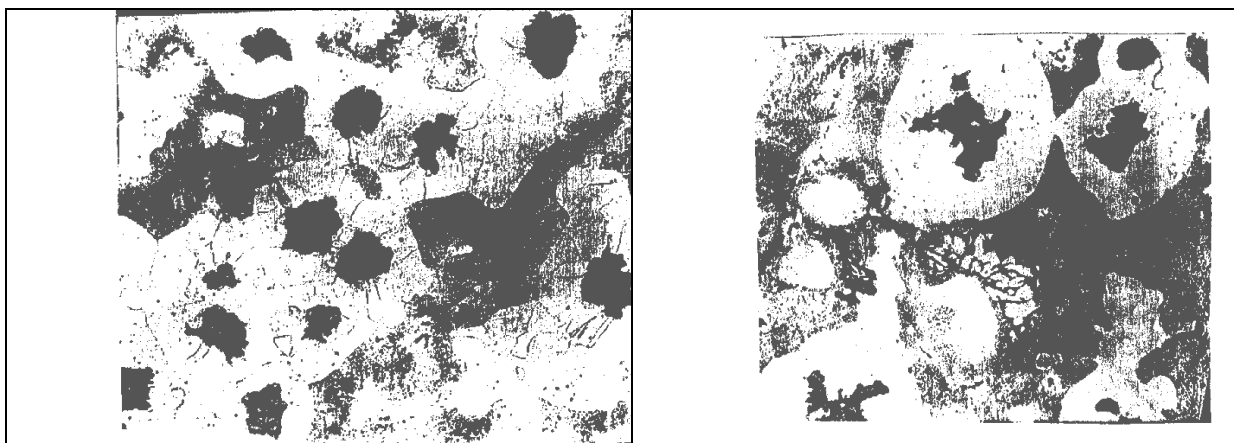


Рис. 10 Микроструктура чугуна в отливке с толщиной стенки 200 мм

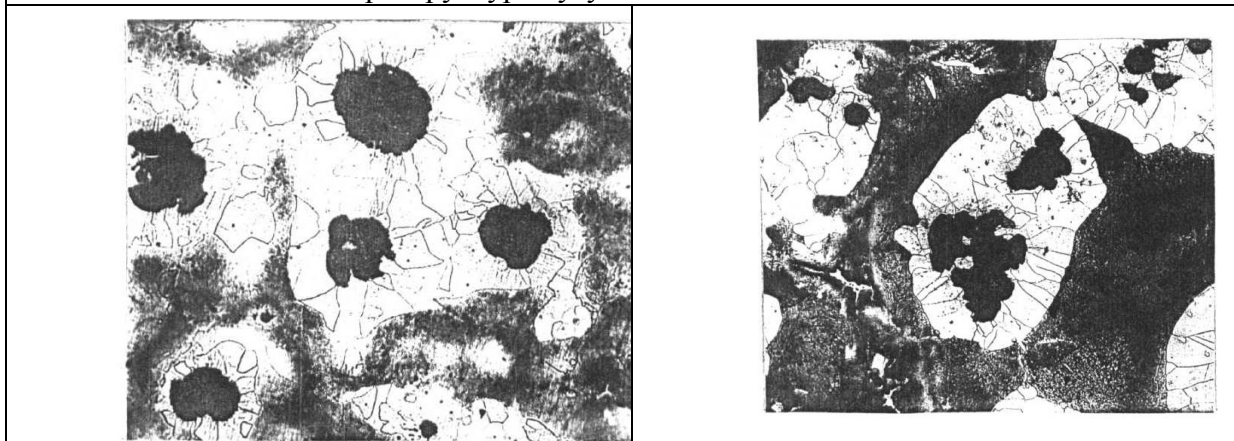


Рис. 11 Микроструктура чугуна в отливке с толщиной стенки 300 мм

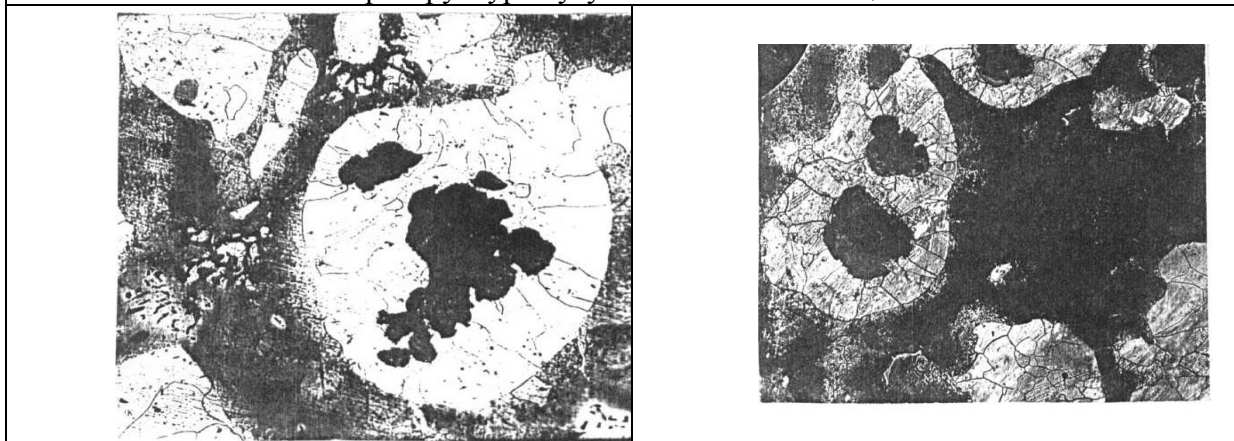


Рис. 12 Микроструктура чугуна в отливке с толщиной стенки 400 мм

Другим важнейшим фактором изменения структуры чугуна является эвтектоидный распад, который и определяет чаще всего окончательное строение металлической основы. В зависимости от состава и условий охлаждения аустенит распадается по-разному. В одних случаях происходит лишь реакция  $A \rightarrow \Phi + \Gamma$ , и тогда создается ферритная матрица. В других - преобладает реакция  $A \rightarrow \Phi + \Psi$ , и возникает перлитная матрица. Часто протекают обе реакции, и тогда образуется ферритно-перлитная основа.

Из переохлажденного аустенита первым начинает выделяться графит, феррит при меньшем переохлаждении. Если феррит обволакивает включения графита, то при дальнейшем распаде аустенит непосредственно выделяет лишь феррит, а графит выделяется из феррита. В результате распад  $A \rightarrow \Phi + \Gamma$  завершается, и матрица полностью ферритизируется. При нормальном ходе эвтектоидного распада аустенит контактирует не только с ферритом, но и с графитом, и возможно выделение углерода из аустенита. В этом случае углерод перераспределяется в аустените. Ускоренное охлаждение чугуна "уменьшает долю аустенита, распадающегося по реакции  $A \rightarrow \Phi + \Gamma$ , и увеличивает объем аустенита, переходящего в перлит  $A \rightarrow \Phi + \Pi$ .

Результаты исследований металлической основы чугуна в отливках с различной толщиной стенки представлены в табл. 5

Таблица 5 Количество перлита в чугуне отливок с различной толщиной стенки

Толщина стенки, мм	Количество перлита		Толщина стенки, мм	Количество перлита	
	периферийная область	центральная область		периферийная область	центральная область
25	98	96	300	26	38
100	74	56	400	22	45
200	35	30	500	20	48

Как видно из приведенных в табл. 5 результатов исследования структуры металлической основы чугуна, количество перлита в периферийной области в отливке с толщиной стенки 100 мм больше, чем в центральной ее части, что естественно связано с более быстрым охлаждением наружных слоев. При этом в структуре быстро охлаждаемой части отливки присутствует структурно свободный цементит в количестве 2-4% . В сечении 200 мм количество перлита в наружных слоях чугуна не намного превышает его содержание в центральной части. При увеличении толщины стенки до 300 мм и более процент перлита в центральных областях отливок выше, и на довольно значительную величину, чем в наружных частях. Как показали проведенные исследования, выявленные закономерности структурообразования в массивных толстостенных отливках имеют сложный характер и свои специфические особенности, требующие проведения дальнейших исследований, как по изучению особенностей протекания процессов кристаллизации и структурообразования в этих условиях, так и по разработке эффективных методов воздействия на эти процессы с целью повышения физической и химической однородности структуры по сечению и горизонтам массивных толстостенных отливок.

Продолжительность кристаллизации чугуна, определяемая толщиной стенки отливки, оказывает существенное влияние на уровень физико-механических характеристик чугуна, что вызвано изменением формы графита и структуры металлической основы.

Взаимосвязь между показателями свойств чугуна и продолжительностью затвердевания или толщиной стенки отливки имеет сложный характер и требует конкретизации подхода или установлении закономерностей изменения свойств чугуна.

Были проведены исследования физико-механических свойств чугуна в отливках цилиндрического типа диаметром 100, 200, 300, 400 и 500 мм, продолжительность кристаллизации которых соответственно составляла 20, 65, 130, 230 и 340 мин. Параллельно для сравнения заливались стандартные пробы толщиной стенки 25 мм и продолжительностью затвердевания 10 мин. Чугун имел следующий химический состав (%): С – 3,2; Si – 2,4; Mn – 0,35; P – 0,05; S – 0,008; Mg – 0,055. Из различных зон отливок вырезались образцы для определения свойств чугуна. Результаты исследований приведены на рис. 6 и 7. Как видно из приведенных данных, предел прочности при растяжении уменьшается в чугуне 400 мм-й отливки по сравнению со стандартной пробой на 42% или на 240 МПа. В отливке с толщиной стенки 100 мм в периферийной части предел прочности практически такой же, как и в стандартной пробе, и лишь в центре его величина ниже на 5-9%. В центре отливки диаметром 200 мм предел прочности ниже, чем в стандартной пробе, уже на 24%, а в центре 300 мм отливки на 33%. При этом разница в значении этой механической характеристики в периферийной и центральной зонах отливок растет с увеличением толщины стенки от 9% в сечениях 100 мм до 12% в сечениях 400 мм. Наименее чувствительной характеристикой чугуна к изменению продолжительности кристаллизации является предел текучести.

Как видно, его уровень в самом массивном из исследованных сечений снижается по сравнению со стандартной пробой на 30 %, причем начиная с толщины стенки 200 мм предел текучести остается практически неизменным. Необходимо также отметить практически одинаковые значения предела текучести в наружных и центральных частях отливок. Относительное удлинение в стандартной пробе составляет всего 2,5%, что связано с перлитной основой чугуна и наличием структурно свободного цементита в его структуре. В отливке с толщиной стенки 100 мм относительное удлинение имеет небольшую разницу в значениях в центре и на периферийных участках.

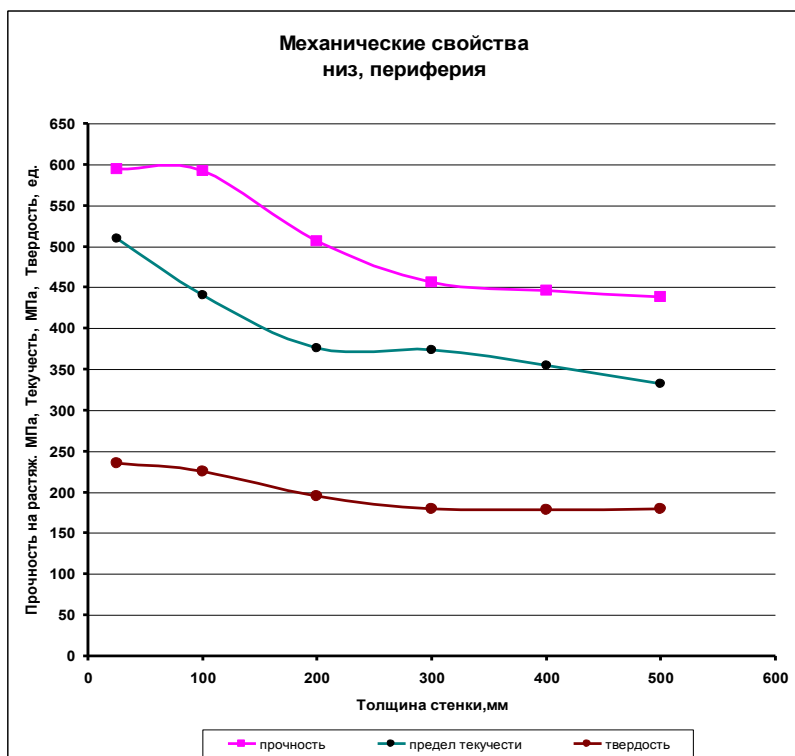


Рис.13 Физико-механические свойства высокопрочного чугуна в отливках

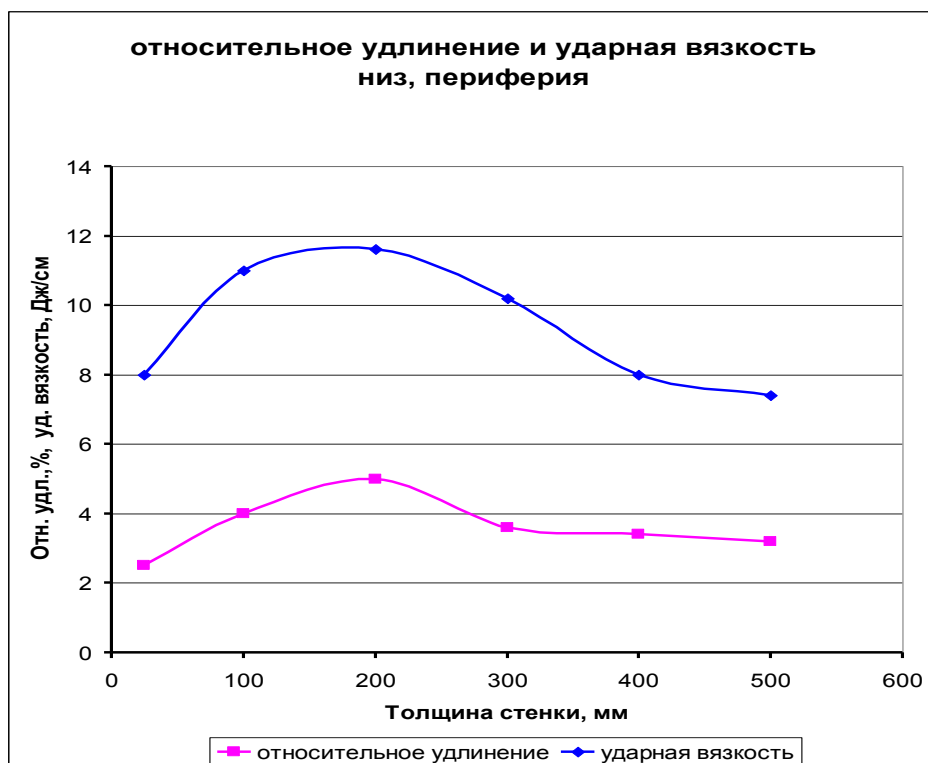


Рис.14 Физико-механические свойства высокопрочного чугуна в отливках цилиндрического типа диаметром 100, 200, 300, 400 и 500 мм.

В центре отливки диаметром 200 мм предел прочности ниже, чем в стандартной пробе, уже на 24%, а в центре 300 мм отливки на 33%. При этом разница в значении этой механической характеристики в периферийной и центральной зонах отливок растет с увеличением толщины стенки от 9% в сечениях 100 мм до 12% в сечениях 400 мм. Наименее чувствительной характеристикой чугуна к изменению продолжительности кристаллизации является предел текучести. Как видно из таблицы 6, его уровень в самом массивном из исследованных сечений снижается по сравнению со стандартной пробой на 30 %, причем начиная с толщины стенки 200 мм предел текучести остается практически неизменным. Необходимо также отметить практически одинаковые значения предела текучести в наружных и центральных частях отливок. Относительное удлинение в стандартной пробе составляет всего 2,5%, что связано с перлитной основой чугуна и наличием структурно свободного цементита в его структуре. В отливке с толщиной стенки 100 мм относительное удлинение имеет небольшую разницу в значениях в центре и на периферии и изменяется от 3,0 до 4,0 %. С увеличением толщины стенки разброс значений относительного удлинения растет, при этом в центральной зоне 400 мм отливки его величина в 8,5 раз меньше, чем в периферийной, что говорит о высокой чувствительности относительного удлинения к изменению скорости кристаллизации чугуна.

Твердость чугуна понижается от 235 ед. в стандартной пробе до 182 ед. в центре 200 мм отливки, что связано с уменьшением доли перлита в структуре чугуна. Однако в центральных участках более толстостенных отливок (300 мм и более) в связи с перлитизацией матрицы, вновь происходит некоторое увеличение твердости до 198 ед. Ударная вязкость чугуна имеет низкие значения, что связано в стандартной пробе с перлитной основой и наличием структурно не связанного цементита, а в более толстых

сечениях с укрупнением структуры, ликвационными процессами и ухудшением формы графита.

## ВЫВОДЫ

1. На основании полученных экспериментальных данных и известных расчетных методик были установлены зависимости продолжительности затвердевания чугуна от толщины стенки в сечениях до 500 мм и установлено соответствие между экспериментальными и расчетными значениями.

2. В результате проведенных исследований структуры строения графита предложен критерий оценки формы графитовых включений в массовых отливках и получены зависимости основных характеристик морфологии графита (формы, размеров, количества, распределения) от толщины стенки.

3. Предложены механизмы образования вырожденных (переходных) форм графитовых включений в чугуне массивных отливок.

4. Получены зависимости и выявлены особенности структуры металлической основы чугуна в массивных сечениях.

5. Установлено, что при толщине стенки свыше 200 мм происходит увеличение количества перлита в центре отливки.

6. Установлено влияние процесса длительной кристаллизации на физико-механические свойства высокопрочного чугуна при производстве из него крупных отливок ответственного назначения с толщиной стенки до 500 мм.

## Литература

1. *Баландин Г.Ф.* Основы теории формирования отливки. – М.: Машиностроение, 1976, -328с.

2. *Гиршович Н.Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.; Л.: Машиностроение, 1966. – 430с.

4. *Высокопрочные чугуны для отливок. /Под ред. Н.Н. Александрова.* – М.: Машиностроение, 1982, 222 с.

5. *Литовка В.И.* Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – Киев: Наук.думка, 1987. – 208с.

6. *Курганов В.А., Краузе Л.А., Лесовский В.В. и др.* Применение комплексных модификаторов для сфероидизирующей обработки больших масс чугуна. – Литейное производство, 1983, №10, с. 4-5.

7. *Захарченко Э.В., Левченко Ю.Н., Горенко В.Г., Вареник П.А.* Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. – Киев: Наук.думка, 1986, - 248 с.

8. *Булнина Ю.К., Пузырьков-Уваров О.В., Ермолин И.Г. и др.* Оценка формы графита в массивных отливках из высокопрочного чугуна.- Литейное производство, 1977, №5, - 25с.