

МАР



**ЛИТМАШ. РОССИЯ 2021.**

**8-10 июня 2021 г.**

**ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ  
КАЧЕСТВА ЖИДКОГО ЧУГУНА**

---

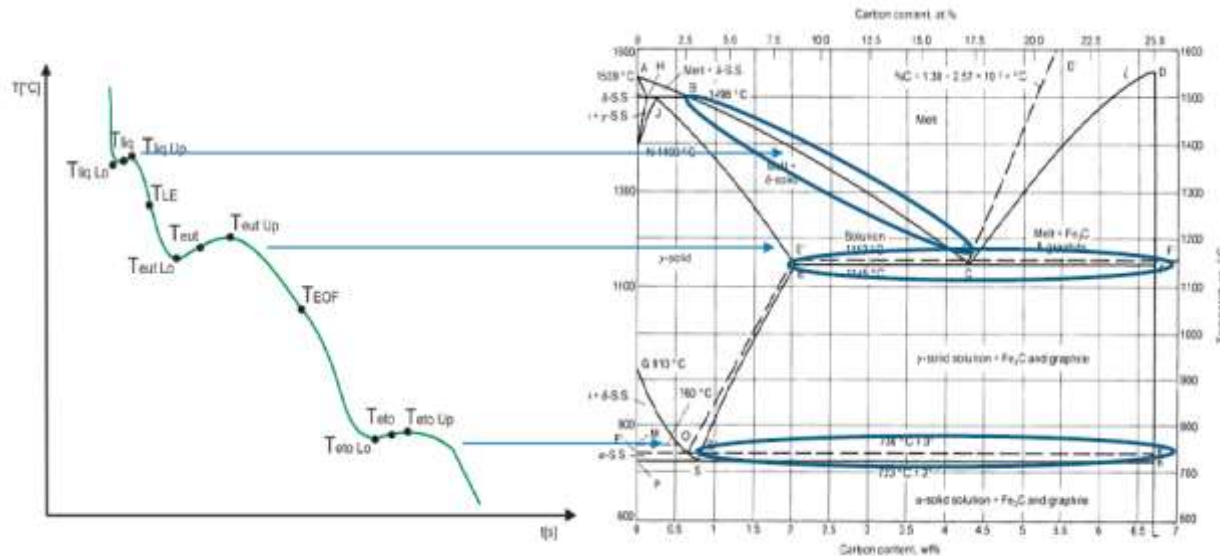
Докладчик:

**АРТЕМ КАЛЯСКИН**

Главный инженер металлург «Центра исследований и разработок «НПП»

## ВВЕДЕНИЕ

Термический анализ основан на явлении **теплового эффекта**.  
**Фазовые превращения** в сплавах сопровождаются **тепловым эффектом**.  
На кривых охлаждения сплавов при температурах фазовых превращений наблюдаются **точки перегиба** или **температурные остановки**.  
Термический анализ позволяет определить критические точки.





## ЦЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Управление металлургическими процессами в литейном производстве сводится к решению 3-х задач:

1. Задача первая – избежать образования дефектов в отливках.
2. Задача вторая – достичь высокого выхода годного литья.
3. Задача третья – снижение производственных затрат.

### КАК МОЖНО ЭТОГО ДОСТИЧЬ?

- Идентификация ключевых параметров технологического процесса
- Определение процедуры управления ключевыми параметрами





# КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

## Химический состав жидкого металла:

- основные элементы (C, Si, Mn, S, P)
- легирующие элементы (Cu, Sn, Cr, Ni, Mo)
- примеси (Ti, V, Mo, Pb, Sb и др.)

**Периодическая таблица Д. И. Менделеева**

Период	Ряд	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ										
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	1	(H)										He 4,0026
2	2	Li 6,941	Be 9,0122	B 10,811	C 12,01115	N 14,0067	O 15,9994	F 18,9984	Ne 20,179			Li 6,941
3	3	Na 22,98977	Mg 24,304	Al 26,981538	Si 28,0855	P 30,973762	S 32,06	Cl 35,453	Ar 39,948			Li 6,941
4	4	K 39,0983	Ca 40,078	Sc 44,955912	Ti 47,88	V 50,9415	Cr 51,9961	Mn 54,938044	Fe 55,845	Co 58,933195	Ni 58,6934	
5	5	Rb 85,4678	Sr 87,62	Y 88,905848	Zr 91,224	Nb 92,90638	Mo 95,94	Tc 98,90625	Ru 101,072	Rh 102,90550	Pd 106,42	
6	6	Cs 132,90545196	Ba 137,327	La* 138,90547	Ce 140,12	Pr 140,90765	Nd 144,242	Pm	Sm 150,36	Eu 151,964	Gd 157,25	
7	7	Rb 85,4678	Sr 87,62	Y 88,905848	Zr 91,224	Nb 92,90638	Mo 95,94	Tc 98,90625	Ru 101,072	Rh 102,90550	Pd 106,42	
8	8	Cs 132,90545196	Ba 137,327	La* 138,90547	Ce 140,12	Pr 140,90765	Nd 144,242	Pm	Sm 150,36	Eu 151,964	Gd 157,25	
9	9	Fr 223,0185	Ra 226,0254	Ac** 227,0337	Th 232,0375	Pa 231,036889	U 238,02891	Np 237,048173	Pu 244,064223	Am 243,061381	Cm 247,070353	
10	10	Fr 223,0185	Ra 226,0254	Ac** 227,0337	Th 232,0375	Pa 231,036889	U 238,02891	Np 237,048173	Pu 244,064223	Am 243,061381	Cm 247,070353	
7	11	Rg 272	Cn 285	Fl 289	Mc 288	Lv 293	Ts 294	Og 294				

88	Ce 140,12	59	Pr 140,90765	60	Nd 144,242	61	Pm 144,9127	62	Sm 150,36	63	Eu 151,964	64	Gd 157,25	65	Tb 158,92534	66	Dy 162,500108	67	Ho 164,930329	68	Er 167,259	69	Tm 168,934027	70	Yb 173,054688	71	Lu 174,967		
89	Th 232,0375	90	Pa 231,036889	91	U 238,02891	92	Np 237,048173	93	Pu 244,064223	94	Am 243,061381	95	Cm 247,070353	96	Bk 247,070353	97	Cf 251,0825	98	Es 252,083223	99	Fm 257,1037	100	Md 258,103888	101	No 259,10454	102	Lr 260,105208		





## КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

### Свойства отливки и формовочной смеси:

- толщина стенки отливки
- ЛПС отливки
- скорость охлаждения в процессе затвердевания
- влажность, газопроницаемость и др. свойства формовочной смеси





## НЕ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

### Физические свойства жидкого металла:

- тип кристаллизации (эвтектический, до или заэвтектический)
- количество и тип фаз, формируемых в процессе кристаллизации
- количество включений и скорость их роста
- скрытая теплота кристаллизации



**ГЛАВНАЯ ЦЕЛЬ**  
**ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА!**





## ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

### Термический анализ позволяет:

- определить  $C_{\text{ЭКВ}}$ , %
- процентное содержание углерода, кремния,  $\text{Fe}_3\text{C}$
- степень насыщения расплава чугуна (Sc)
- процентное содержание глобул графита (Nod [%])
- плотность частиц графита [ $1/\text{мм}^2$ ]
- процентное содержание перлита, склонность к усадке.





## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЧУГУНА

Характер распределения выделений аустенита и графита зависит от следующих факторов:

- химического состава металла
- шихтовых материалов (фракция шихты, степень ее окисленности, количества связанного углерода)
- температуры и продолжительности плавки исходных материалов
- времени выдержки расплава
- реакции между расплавом и футеровочными материалами
- содержания кислорода в расплаве
- состава модификатора, его расхода, способа модифицирования







## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЧУГУНА

### Понятие углеродного эквивалента

Обычно для чугуна:  $C_{eq} = \%C + (\%Si)/3$ , но имеются и др. химические элементы, оказывающие влияние, например:

$$C_{EQ} = C + 0,3(Si + P) + 0,4S - 0,03Mn + 0,11Cu + 0,05Ni - 0,075Cr - 0,15Ti - 0,10V + 0,22Al + 0,115Sb + 0,11Sn + 0,026Co - 0,015Mo.$$

**ВАЖНО!** При одном и том же химическом составе чугуна ( $C_{eq}$ ) его свойства могут быть разными. Два чугуна с одинаковым химическим составом имеют разное поведение кристаллизации



Помимо химического состава форма и распределение фаз регулируются **физическим и термодинамическим процессом.**





## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЧУГУНА

Поведение чугуна в процессе кристаллизации управляется двумя основными температурами:

- Температурой ликвидус  $T_{liq}$
- Эвтектическая температура  $T_{em}$

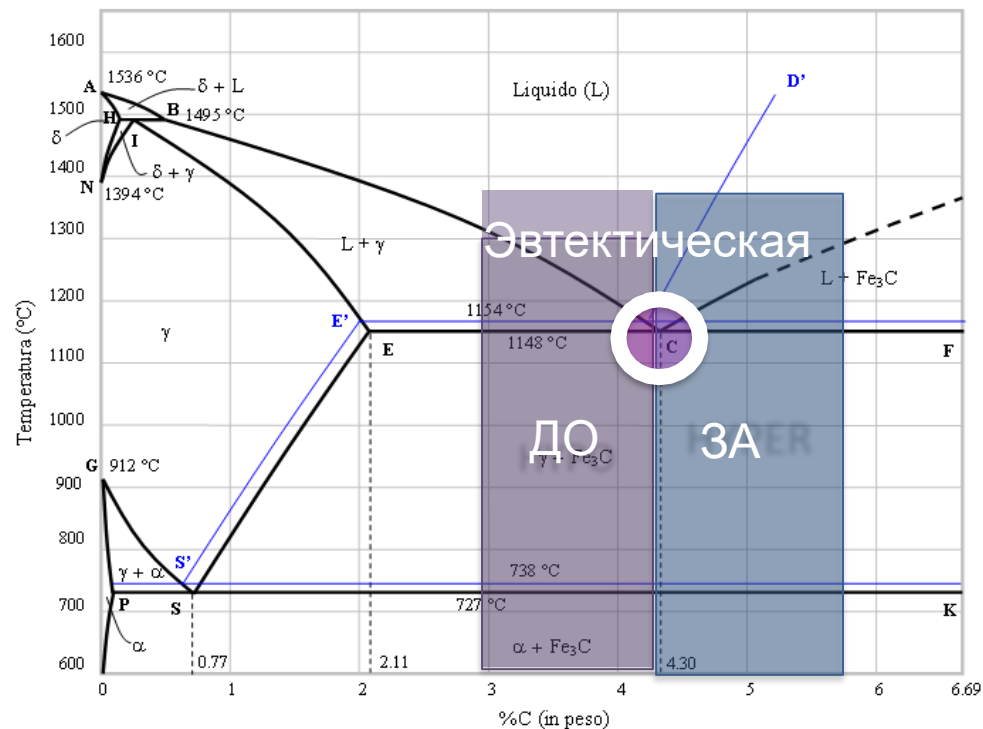


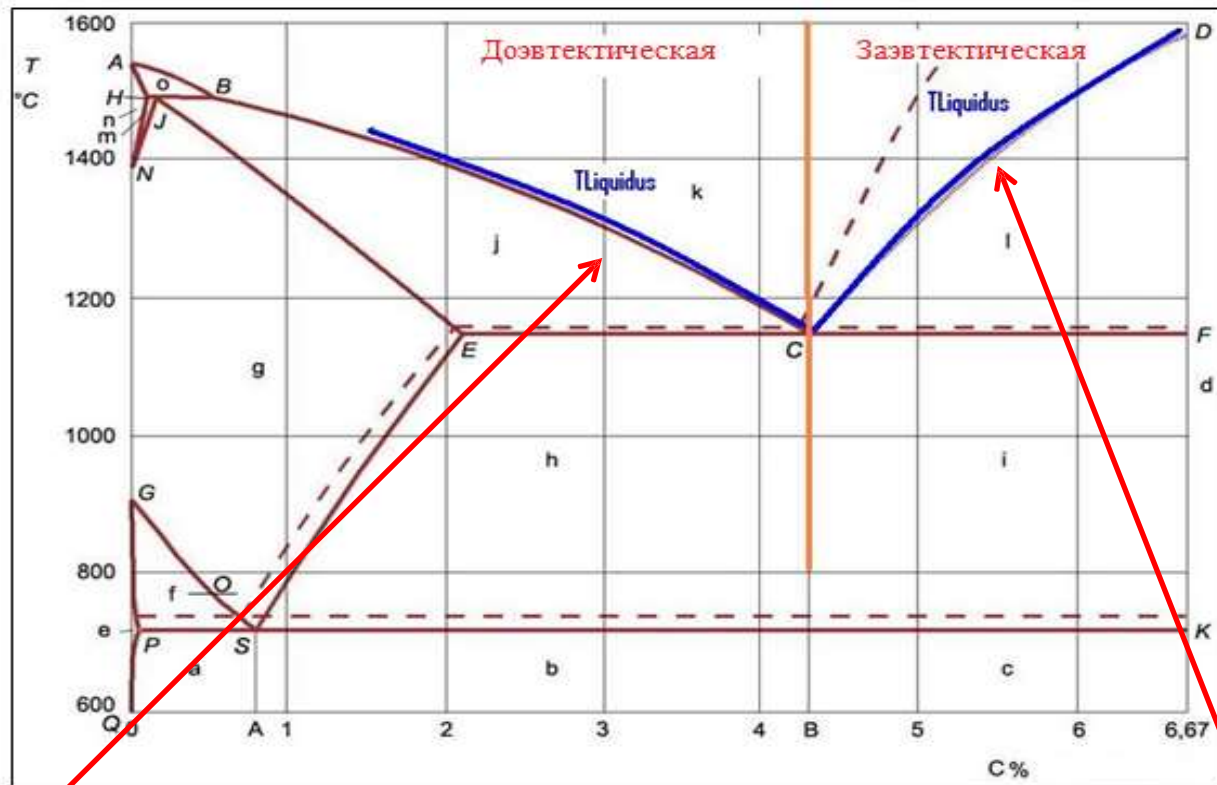
Использование этих температур в литейном производстве позволяет понимать динамику кристаллизации.



Взаимосвязи от  $T_{liq}$  и  $T_{min}$  можно различать виды кристаллизации:

- Доэвтектическая
- Эвтектическая
- Заэвтектическая



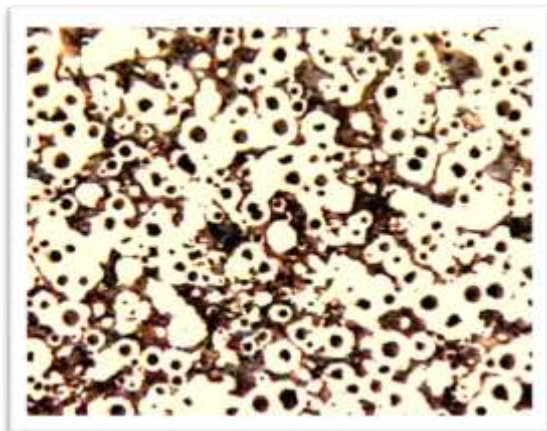


Доэвтектическая область  
Если  $T_{liq}$  увеличивается,  
%C снижается.

Заэвтектическая область  
Если  $T_{liq}$  увеличивается,  
%C увеличивается.



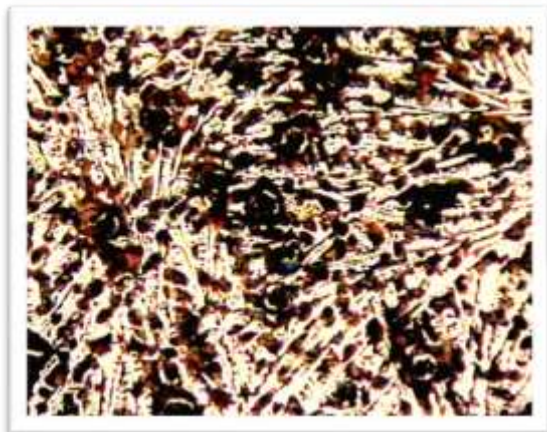
## ЭВТЕКТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА $T_{eMin}$



**$T_{eMin} > 1135^{\circ}\text{C}$**   
**Нормальная структура**

*Низкое значение  $T_{eMin}$  говорит о низкой степени зародышеобразования.*

*Это может привести к образованию отбела в тонких сечениях отливки, где имеется высокая скорость охлаждения.*



**$T_{eMin} \leq 1135^{\circ}\text{C}$**   
**Образование  
первичных карбидов**

*Происходит замедление первичной стадии кристаллизации (первичный аустенит или графит) изменяются параметры кристаллизации.*



## ЭВТЕКТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА $T_{eMin}$



<  $1135^{\circ}\text{C}$ , степень зародышеобразования очень низкая,  
риск формирования первичных карбидов **очень высокий**



>  $1145^{\circ}\text{C}$ , степень зародышеобразования очень хорошая,  
риск формирования первичных карбидов **отсутствует**



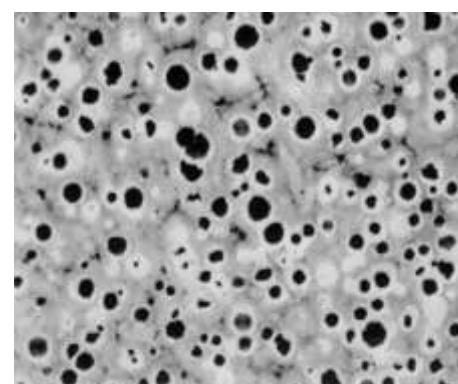
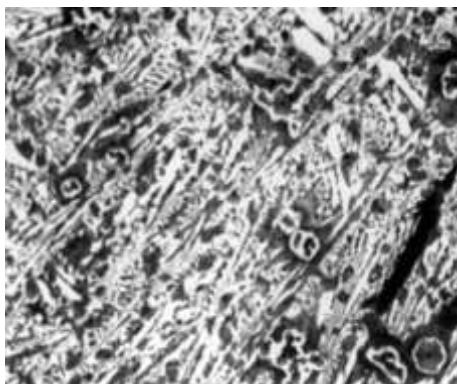
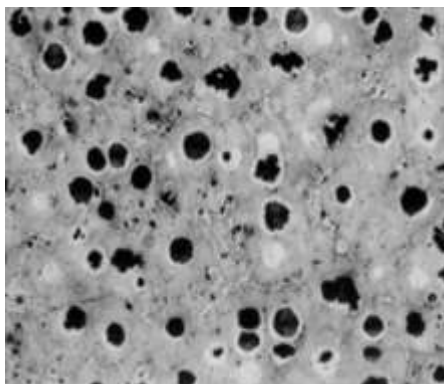
между  $1135^{\circ}\text{C}$  и  $1145^{\circ}\text{C}$  степень зародышеобразования **не оптимальная**, и риск формирования первичных карбидов будет зависит от толщины стенки отливки



## ФОРМИРОВАНИЕ ЗАРОДЫШЕЙ ГРАФИТА

Статус зародышеобразования может измениться при воздействии внешних факторов, таких как выдержка металла **в печи под действием температуры**, а также **в ковше перед заливкой**.

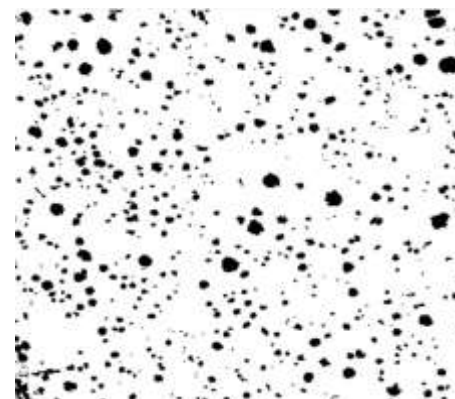
Динамика кристаллизации имеет большое влияние на статус образования зародышей графита.



## ЭФФЕКТ МОДИФИЦИРОВАНИЯ

Модифицирование металла - даёт толчок зарождению **центров кристаллизации** или увеличению количества уже образовавшихся.

Правильно выполненное модифицирование расплава позволяет снизить вероятность образования отбела, а также контролировать морфологию графита и его распределение.







## МОДИФИЦИРОВАНИЕ СЕРОГО ЧУГУНА



*а) Расход  
Модификатора 0,15%*

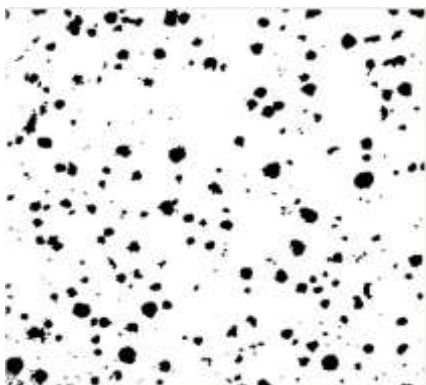


*б) Расход  
Модификатора 0,25%*

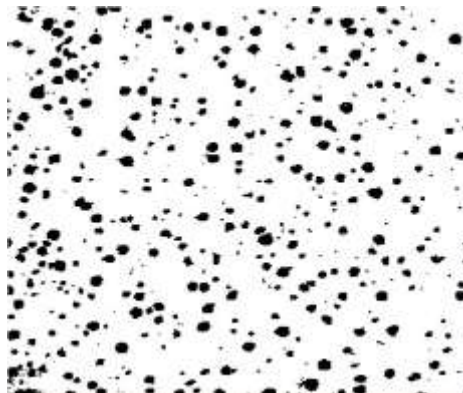


*в) Расход  
Модификатора 0,40%*

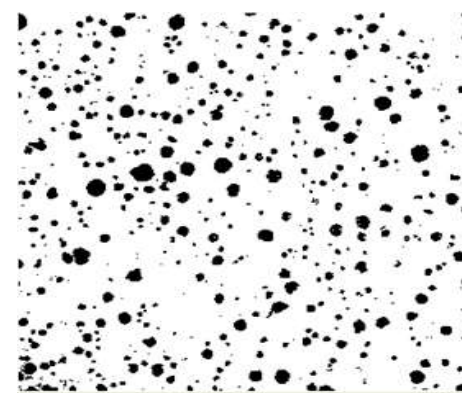
## ГРАФИТИЗИРУЮЩЕЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА



а) Расход  
Модификатора 0,15%



б) Расход  
Модификатора 0,25%



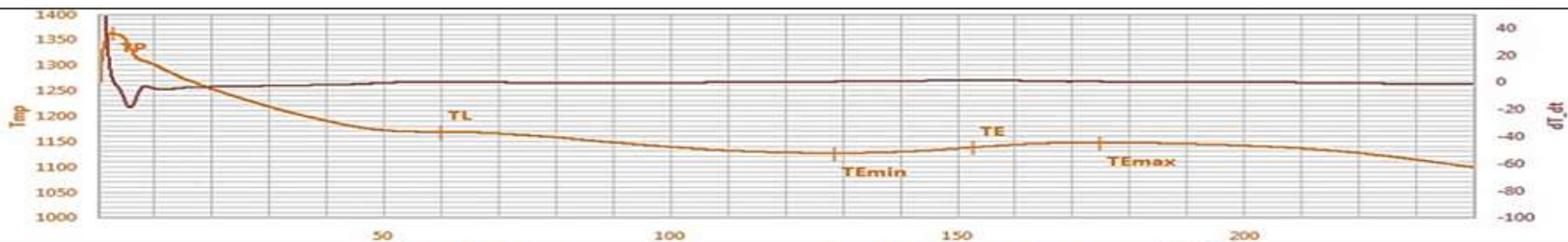
в) Расход  
Модификатора 0,4%

## Исследуемые модификаторы для производства отливок из чугуна с вермикулярным графитом

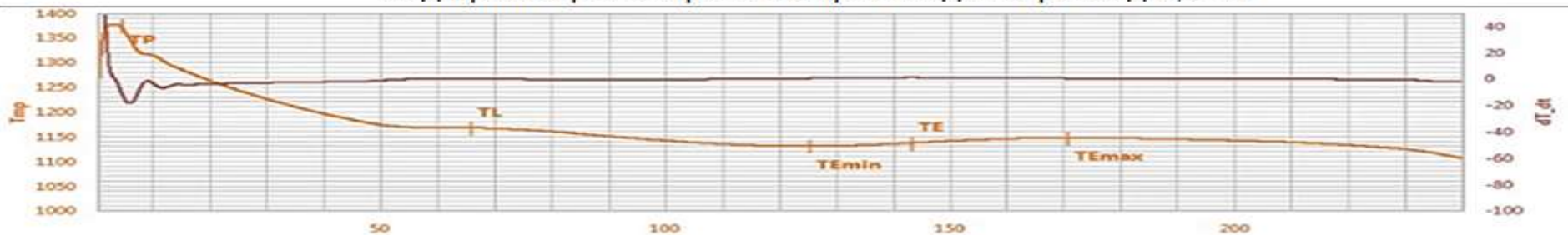
Модификатор	Фракция, мм	Химический состав, % <sub>масс</sub>					
		Si	Ca	Ba	PЗМ	Al	Fe
№1 иностранный	4-32	44-48	1,8-2,3	–	5,5-6,5	0,4-1	ост.
№2 отечественный	1-15	44-48	1,8-2,3	–	5,5-6,5	≤ 1	ост.

Обработано 2 ковша расплава чугуна модификаторами №1 и 2:

- Ковш 1 – №3 фр. 4-32 мм – 7 кг/1100 кг расплава чугуна (0,64%).
- Ковш 2 – №4 фр. 1-15 мм – 7 кг/1100 кг расплава чугуна (0,64%).



Модификатор иностранного производства расход 0,64%



Модификатор отечественного производства расход 0,64%

## Температурные параметры, определяемые с помощью ТА

Мод-р	TP	TL	TEmin	TE	TEmax	$\Delta T$	$\Delta TM$	CEL
1	1362,6	1167,5	1125,9	1136,9	1146,7	24,1	20,8	4,06
2	1374,8	1166,4	1130,2	1136,3	1146,8	19,8	16,6	4,07

# Результаты металлографического исследования

## Модификатор отечественный



1-й кулачок



8-й кулачок



сальник

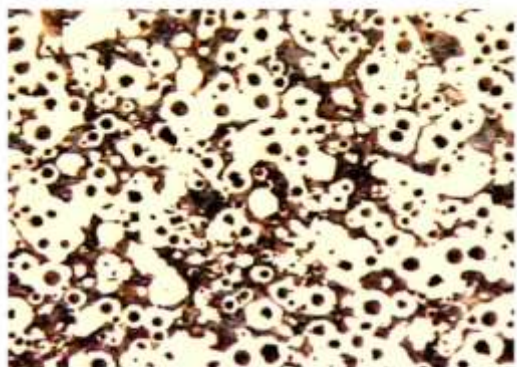
## Модификатор иностранный



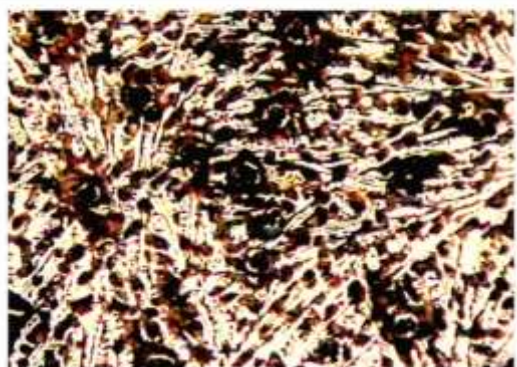
# Описание параметров термического анализа

**TeMin** является важным показателем степени зародышеобразования графита в чугуне

Чем выше TeMin, тем лучше степень зародышеобразования



**TeMin > 1135°C**  
Нормальная структура



**TeMin ≤ 1135°C**  
Образование первичных карбидов

# Описание параметров термического анализа

Рекалесценция - разницей между  $T_{eMax}$  и  $T_{eMin}$ ,

$$R_{ec} = T_{eMax} - T_{eMin} [^{\circ}C]$$

Связана с образованием скрытой теплоты и количеством сформированного графита (при хорошей степени зародышеобразования).

## При оптимальном $T_{eMin}$ :

- Оптимальное значение для СЧ [4 - 9] $^{\circ}C$
- Оптимальное значение для ВЧ [2-5] $^{\circ}C$

## ВЫВОДЫ:

1. Показатели  $TE_{min}$ ,  $TE$ ,  $\Delta TM$  свидетельствуют об интенсивном зародышеобразовании, что подтверждается результатами микроструктурного анализа.
2. По результатам испытаний отмечается, что отечественный модификатор для получения ЧВГ сопоставим по качеству обработки с модификатором импортного производства.



МРД



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

---

Челябинск  
[www.npp.ru](http://www.npp.ru)  
+7 (351) 210 37 37