

# Структурные превращения стали 15Х5М при различных режимах термической обработки

Бакалавр: Р. В. Альмухаметов

Руководитель: канд. техн. наук, старший  
преподаватель кафедры МТМ О.А. Клецова

## Цель и задачи исследования

**Целью** работы является исследование закономерностей формирования структуры трубной стали 15Х5М и разработки на этой основе рекомендации по выбору режимов термообработки нефтяного сортамента.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Исследовать формирование структуры стали 15Х5М после различных режимов термообработки.
- 2) Исследовать влияние режимов термообработки на механические свойства стали.

# Материал и методики исследования

## Химический состав % сталь 15X5M

## Таблица 1

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Cu</b>
до 0,15	до 0,5	до 0,5	до 0,6	до 0,025	до 0,03	4,5-6	0,45-6	до 0,3	до 0,05	до 0,03	до 0,2

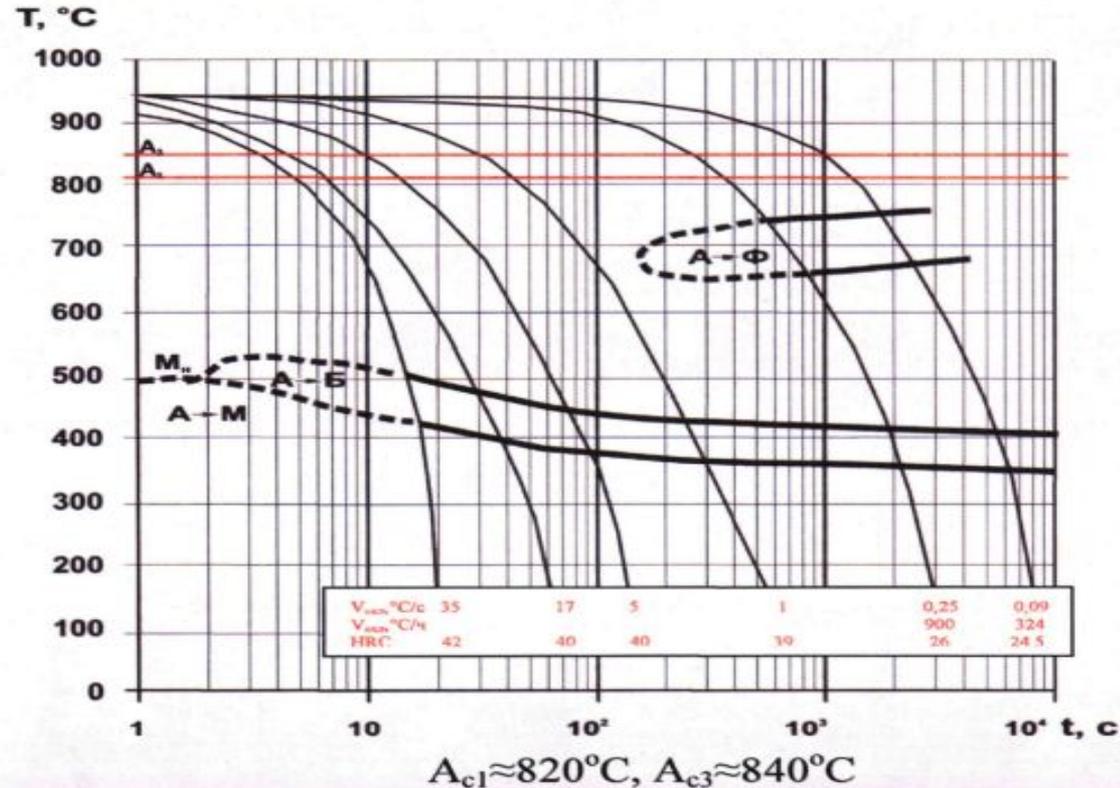
В работе применялись следующие методы исследования:

- 1) Металлографическое исследование образцов
- 2) ДюрOMETрические исследования образцов

# Изучение распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении

Рисунок 1

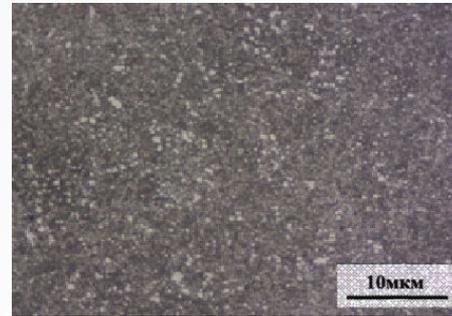
Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 15Х5М



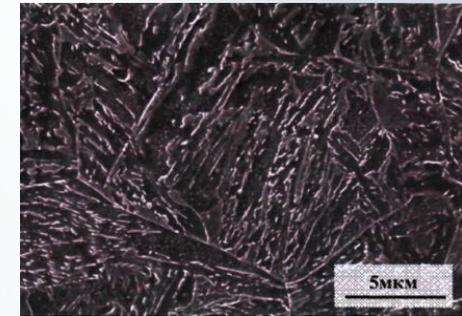
$v_{охл} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$     $v_{охл} = 17 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$     $v_{охл} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$     $v_{охл} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$     $v_{охл} = 900 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{ч}$     $v_{охл} = 324 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{ч}$

**Таблица 1**

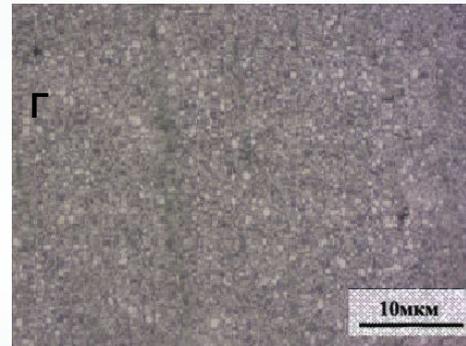
№ образца	Термическая обработка	Режим охлаждения
1	Закалка 900-920 °С (1 час)	Вода
2	Нормализация 900-920 °С (1 час)	Воздух
3	Нормализация 900-920 °С (1 час) +отпуск 690 °С (1 час)	Воздух
4	Нормализация 900-920 °С (1 час) +отпуск 710 °С (1 час)	Воздух
5	Нормализация 900-920 °С(1 час) +отпуск 730 °С(1 час)	Воздух
6	Нормализация 900-920 °С (1 час) +отпуск 770 °С (1 час)	Воздух
7	Нормализация 900-920 °С (1 час) +отпуск 790 °С (1 час)	Воздух
8	Нормализация 900-920 °С (1 час) +отпуск 790°С (1час)+отпуск 670 °С (1час)	Воздух

**Микроструктура металла труб из стали марки 15X5M**
**Рисунок 2**


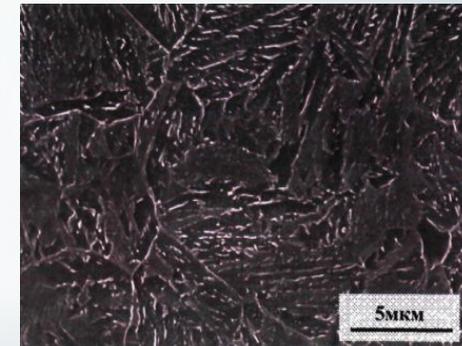
а



б



в



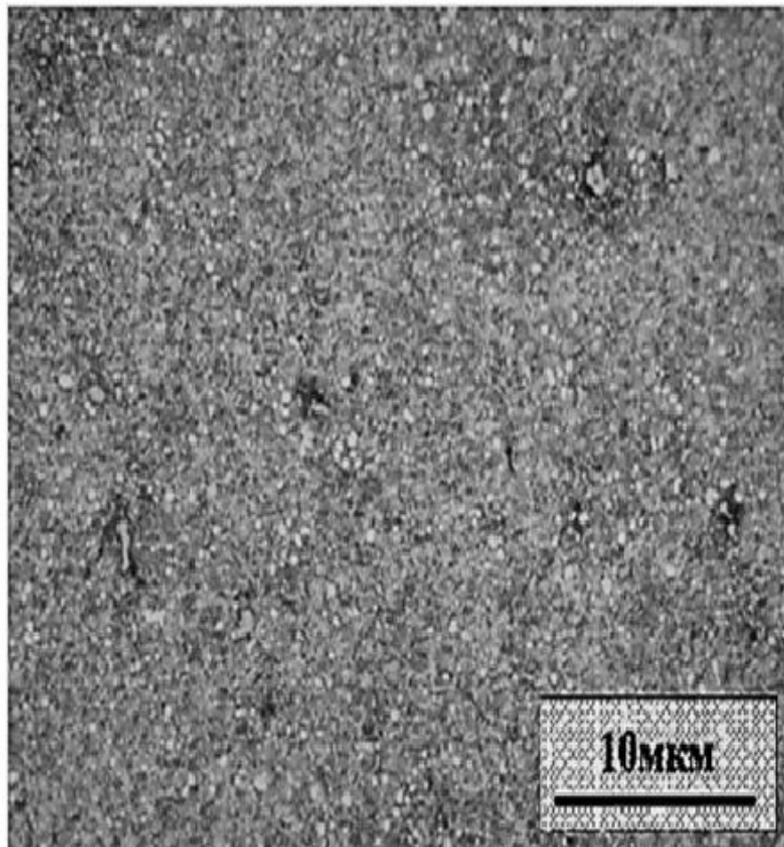
г

а), б)– после закалки 920 °С;

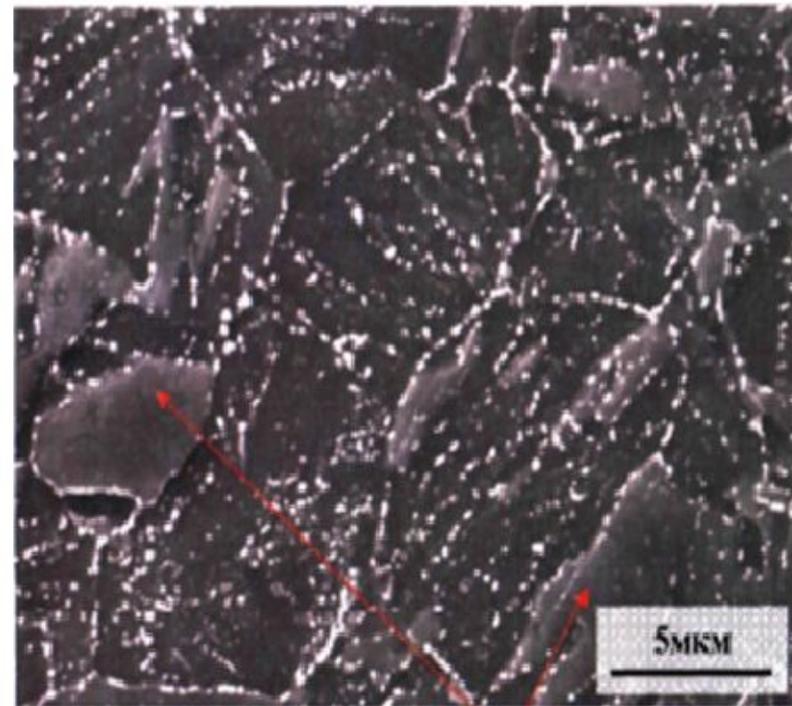
в), г) - после нормализации 920 °С;

# Структура стали 15X5М после нормализации 920 °С и отпуска 690 °С

Рисунок 3



а)



Рекристаллизованные  
зерна

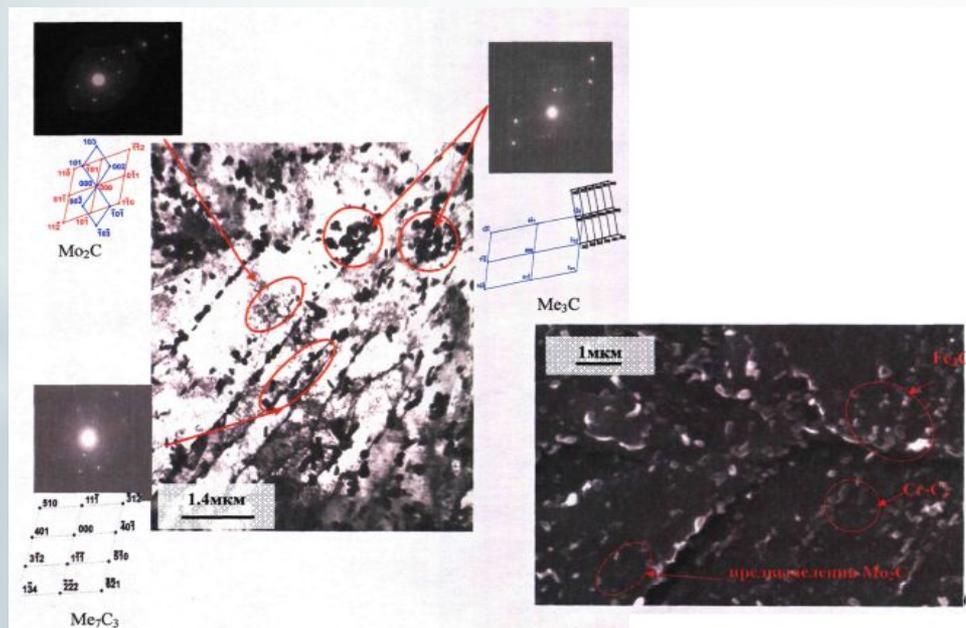
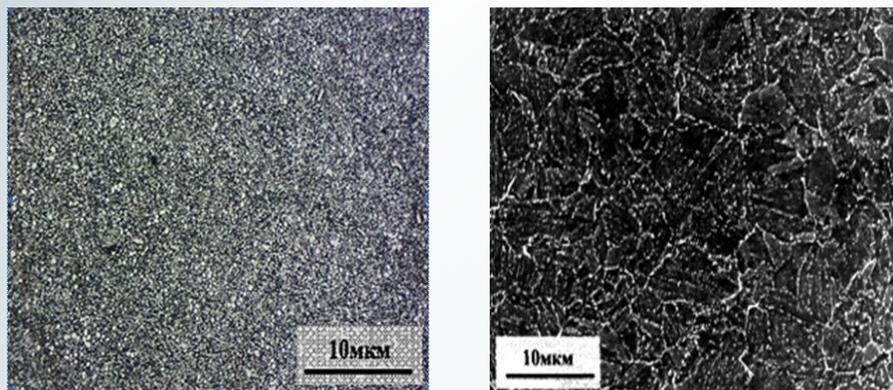
б)

Микроструктура металла труб из стали марки 15X5М после нормализации 920 °С и отпуска 690 °С:

- а) оптическая микроскопия;
- б) растровая электронная микроскопия

# Структура стали 15X5M после нормализации 920 °С и отпуска 710 °С

Рисунок 4



**ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СТАЛИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ** *Таблица 3 № 8*  
**Растворимость легирующих элементов в карбидных фазах стали 60Х2ГСФБ после различных режимов**  
**аустенитизации**

Режим ТО	Тип карбида	Содержание карбидных фаз, % вес.	Концентрация легирующих элементов в карбидах, % (по массе)					
			Mn	Fe	Cr	Mo	V	Nb
t = 1025 °C, τ = 15 мин, V <sub>нагр</sub> = 700 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	-	-	-	-	-	-	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	0,2	1	65	23	1	9	-
	MeC	0,5	-	6	10	1	67	16
t = 1025 °C, τ = 60 мин, V <sub>нагр</sub> = 700 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	-	-	-	-	-	-	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	0,4	-	21	9	4	68	60
	MeC	0,1	-	5	3	-	74	17
t = 1025 °C, τ = 15 мин, V <sub>нагр</sub> = 200 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	-	-	-	-	-	-	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	0,3	-	36	41	4	18	-
	MeC	0,1	-	7	18	2	60	13
t = 1025 °C, τ = 60 мин, V <sub>нагр</sub> = 200 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	-	-	-	-	-	-	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	0,45	-	-	12	16	72	-
	MeC	0,05	-	-	12	3	69	16
900 °C, τ = 15 мин, V <sub>нагр</sub> = 200 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	0,6	-	97	3	-	-	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1,8	1	79	17	0,5	2	-
	MeC	0,4	-	-	10	2	77	11
t = 900 °C, τ = 60 мин, V <sub>нагр</sub> = 200 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	0,2	-	97	3	-	-	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	0,8	2	70	23	1	4	-
	MeC	0,3	-	1	8	-	81	10
t = 900 °C, τ = 15 мин, V <sub>нагр</sub> = 700 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	1,5	-	75	23	-	2	1
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	2,25	4	77	16	0,5	2	-
	MeC	0,25	-	-	8	2	76	14
t = 900 °C, τ = 60 мин, V <sub>нагр</sub> = 700 °C/ч	Me <sub>3</sub> C	0,3	-	80	19	-	1	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	0,9	2	71	24	0,5	3	-
	MeC	0,5	-	1	9	2	76	12

## Характеристики аустенитного зерна стали 60Х2ГСФБ

Таблица 4

№	Режим термообработки			Средняя хорда, мкм	Балл зерна по ГОСТ 5639-82	Удельная поверхность зерен, $S, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	Коэффициент разнотерности, $V_h$
	$V_{\text{нагр}}, \text{°C/ч}$	$T_{\text{ауст}}, \text{°C}$	$\tau_{\text{ауст}}, \text{мин}$				
1	700	1025	15	7,9	10-11	0,25	0,48
2	200	1025	15	8,0	10-11	0,25	0,46
3	200	1025	60	10,2	9-10	0,19	0,40
4	200	900	15	7,2	11	0,28	0,46
5	200	900	60	7,7	10-11	0,26	0,47
6	700	900	15	6,6	11-12	0,30	0,58

## Расчетные характеристики

Средняя хорда

$$\bar{h} = \frac{L}{n}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина секущей,  
 $n$  – число пересеченных зерен

Дисперсия распределения хорд

$$S_h^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (h_i - \bar{h})^2, \quad (2)$$

где  $h_i$  – измеренная в  $i$  опыте хорда;  
 $\bar{h}$  – средняя хорда;  
 $n$  – число пересеченных зерен.

Вариация распределения хорд

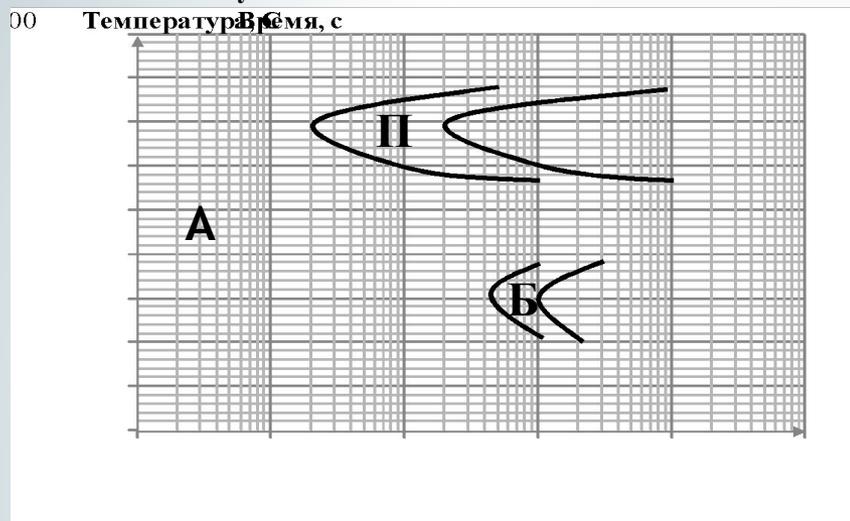
$$V_h = \frac{S_h}{\bar{h}}, \quad (3)$$

Удельная поверхность зерен

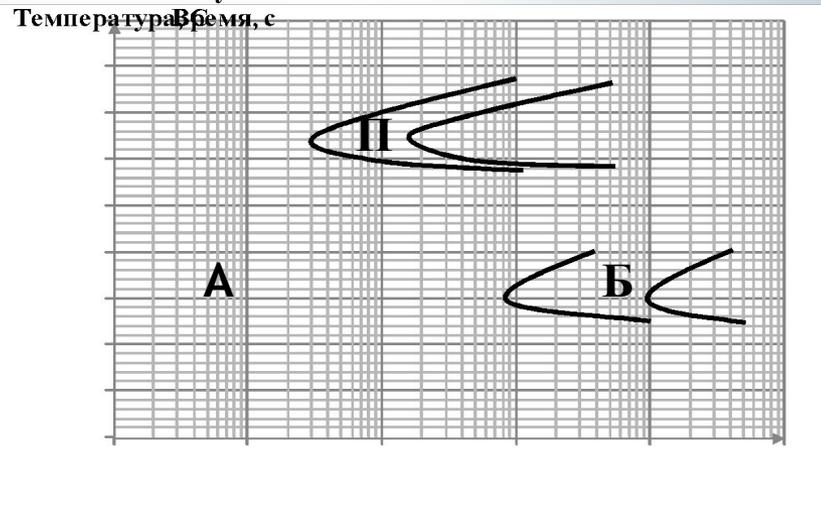
$$S = \frac{2}{\bar{h}}, \quad (4)$$

Изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 60Х2СГФБ

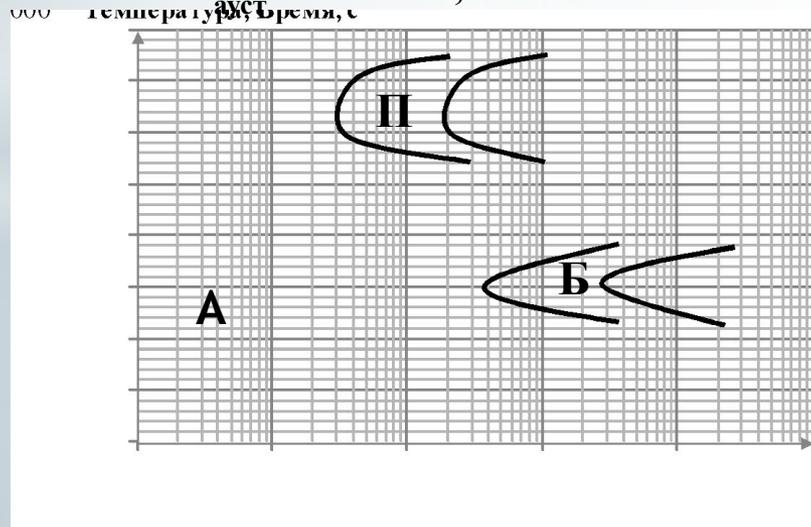
$T_{\text{ауст}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 15 \text{ мин}$



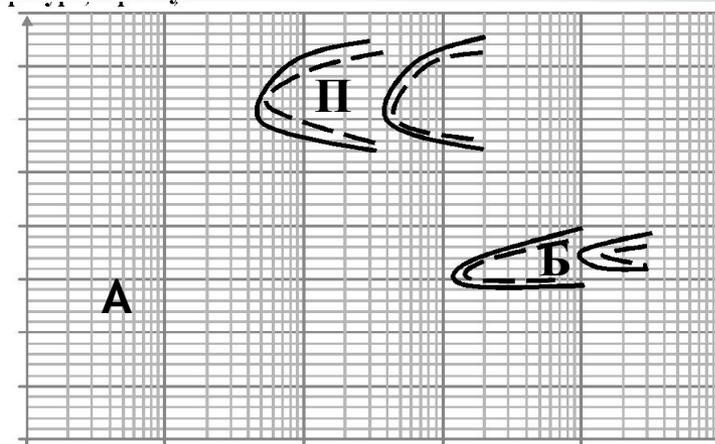
$T_{\text{ауст}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 60 \text{ мин}$



$T_{\text{ауст}} = 1025 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 15 \text{ мин}$



$T_{\text{ауст}} = 1025 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 60 \text{ мин}$   
 ---  $T_{\text{ауст}} = 1025 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 90 \text{ мин}$



Влияние температуры и продолжительности отпуска на твердость стали 60X2СГФБ после закалки от 900 °С

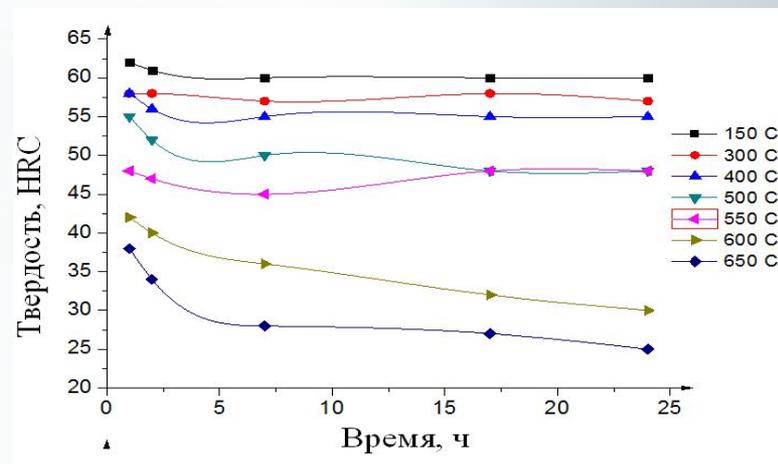


Рисунок 7

Влияние температуры и продолжительности отпуска на твердость стали 60X2СГФБ после закалки от 1025 °С

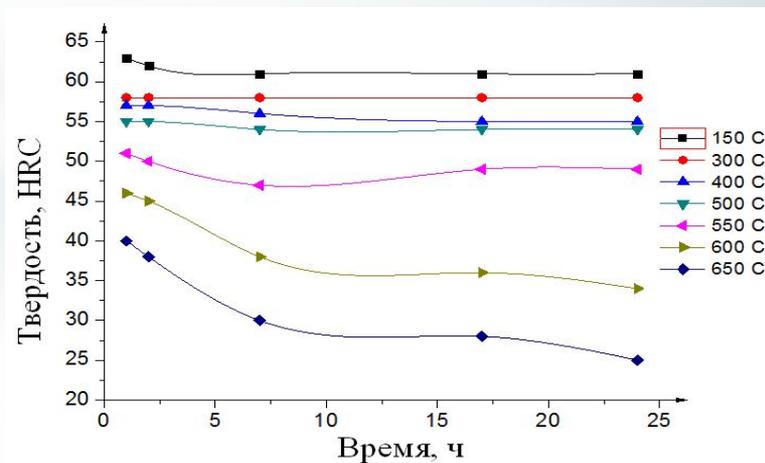


Таблица 5

Растворимость легирующих элементов в карбидных фазах стали 60X2ГСФБ после закалки и отпуска

Режим ТО	Тип карбида	Концентрация легирующих элементов в карбидах					
		Mn	Fe	Cr	Mo	V	Nb
Закалка 1025 °С, отпуск 500 °С, 6 ч	Me <sub>3</sub> C	5	84	10	-	1	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	-	20	7	1	15	58
	MeC	-	7	3	-	73	17
Закалка 1025 °С, отпуск 550 °С, 6 ч	Me <sub>3</sub> C	8	79	12	-	1	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	6	45	32	-	4	13
	MeC	-	4	4	1	75	16
Закалка 1025 °С, отпуск 600 °С, 6 ч	Me <sub>3</sub> C	9	69	21	-	1	-
	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	9	78	8	0,5	2	2
	Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	-
	MeC	-	3	4	-	79	14

# РЕКОМЕНДАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛИ № 12 60X2СГФ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ДТО

**Таблица 6**

**Сопоставительная оценка результатов проведенной работы с требованиями, предъявляющих к материалу валковых сталей, предназначенных для реализации технологии ДТО**

Требование	Результат согласно требованию	Полученный результат	Заключение
Высокой прокаливаемостью (повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита в перлитной области)	от 2000-3000 с	15-1200 с	не соответствует
Высокой закаливаемостью (твердость после закалки)	HRC 60-63	HRC 60-65	соответствует
Высокой устойчивостью разупрочнению при отпуске (твердость после среднего и высокого отпуска)	HRC 40-50	48-52	соответствует
Малой склонностью к росту зерна аустенита при нагреве	не ниже 6-8 балла	9-12	соответствует
Возможностью получения достаточно пластичной сердцевины (предел текучести), наряду с обеспечением повышенной прочности на поверхности (предел прочности)	предел текучести = 300-350 МПа, предел прочности = 800-900 МПа	Предел текучести = 380 МПа, Предел прочности 1200 МПа*	соответствует
Микролегирование	-	микролегирование ванадием и бором	соответствует

В работе изучены структура, и свойства перспективной стали 60X2СГФБ, состав которой выбран в качестве базового, с целью оценки применимости сталей такого типа для изготовления валков горячей прокатки, подвергаемых дифференцированной термической обработке.

Показано:

1. Сталь 60X2СГФБ имеет малую склонность к росту аустенитного зерна при нагреве под закалку: 9-12 балл после выдержек от 15 до 60 минут при температурах 900 и 1025 °С. Твердость закаленной стали обеспечивается на уровне HRC 60-65.

2. В карбидных осадках после закалки остаются нерастворенными карбиды типа  $MeC$ ,  $Me_7C_3$  и  $Me_3C$ . Частицы этих карбидов при дальнейшем охлаждении являются дополнительными центрами зарождения перлитных колоний, и следовательно, снижают устойчивость переохлажденного аустенита.

3. Переохлажденный аустенит стали 60X2СГФБ имеет малую устойчивость в перлитной области, что требует корректировки базового химического состава.

4. При отпуске в интервале температур 300-550 °С сохраняется высокая твердость в пределах HRC 48-52 при выдержках до 24 часов. Интенсивное разупрочнение происходит при 600-650 °С. Пик вторичной твердости приходится на температуру 500 °С, что связано с выделением дисперсных карбидов типа  $Me_3C$  и  $Me_{23}C_6$ .

**Спасибо за внимание!**