



УРАЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ВТОРАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ

Разрушение горных пород и минералов

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Екатеринбург, 2025



Преимущества газовой цементации



Факторы, влияющие на результат цементации:

- температура;
- состав атмосферы;
- продолжительность насыщения.

- достаточно **простая конструкция** оборудования (зачастую используются обычные электрические печи, камерные или шахтные, в которых дополнительно устанавливается герметичная жаропрочная реторта);
- относительно **небольшие затраты** при использовании природного газа;
- возможность **осуществлять контроль над составом** науглероживающей атмосферы в режиме реального времени при помощи кислородного зонда, инфракрасных датчиков, или датчиков влажности;
- **стабильность результатов** при правильной настройке оборудования и периодическом контроле микроструктуры образцов-свидетелей.

Химический состав цементуемых сталей, масс. %, использованных для разработки математической модели процесса диффузии

Марка	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	Ti	S	P	Al
20X	0,21	0,75	0,64	0,24	0,16	0,017	0,002	0,022	0,012	0,034
18ХГТ	0,23	1,02	0,98	0,24	0,09	0,02	0,051	0,007	0,015	0,034
25ХГМ	0,24	0,96	0,90	0,27	0,23	0,19	0,002	0,006	0,016	0,044
20ХГНМ	0,22	0,61	0,92	0,27	0,52	0,18	0,003	0,022	0,010	0,019
20ХН3А	0,17	0,75	0,54	0,24	2,68	0,05	0,002	0,005	0,012	0,032
12ХН3А	0,13	0,60	0,37	0,20	2,75	0,05	0,001	0,008	0,015	0,012
20Х2Н4А	0,17	1,32	0,38	0,35	3,35	0,04	0,001	0,019	0,018	0,045
14ХН3МА	0,14	1,42	0,76	0,27	3,29	0,11	0,002	0,005	0,016	0,034
19ХГНМ	0,23	0,54	0,75	0,20	0,47	0,19	0,003	0,005	0,009	0,023

Температура цементации составляла 920 °С, продолжительность выдержки – 10 ч, заданное значение углеродного потенциала атмосферы варьировалось в диапазоне 0,60...0,95 %. Сразу после цементации образцы исследуемых сталей охлаждались в масле И20.

Математическая модель

Разработанная математическая модель основана на численном решении дифференциального уравнения диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1)$$

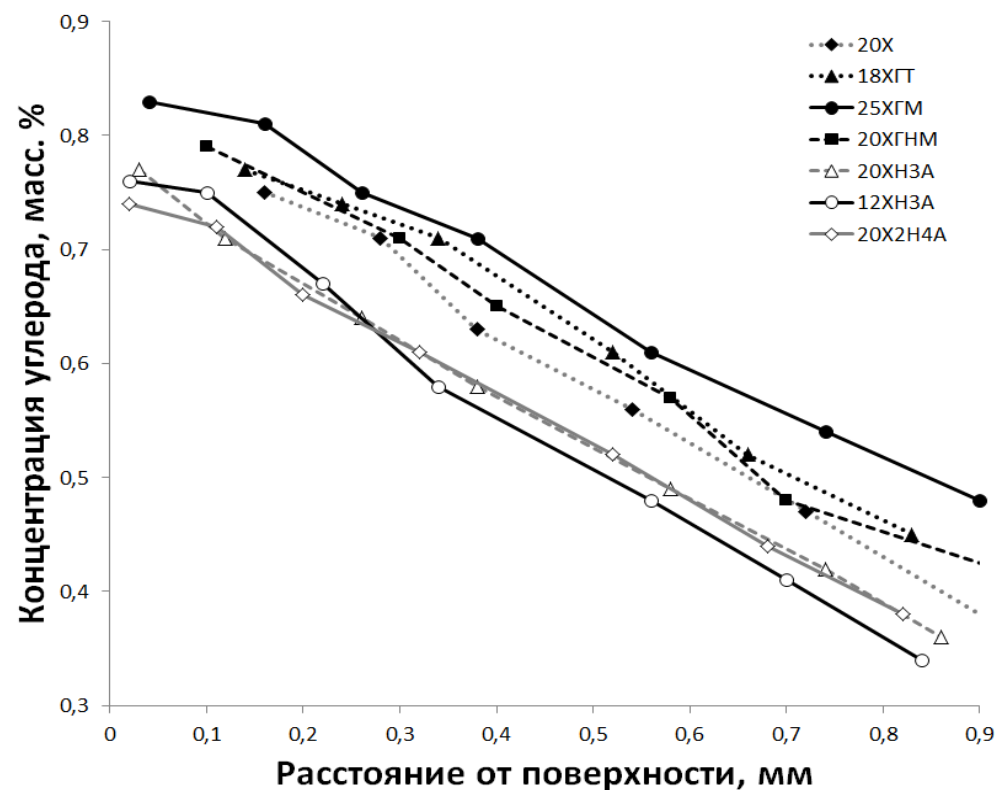
где c – концентрация углерода, мас. %; τ – время, с; x – расстояние от насыщаемой поверхности, м; D – коэффициент диффузии углерода в аустените, $\text{м}^2/\text{с}$.

Численное решение уравнения (1) производилось в одномерной постановке с граничными условиями 3 рода. Варьируемым параметром, значение которого определялось в ходе итерационных расчетов, являлась энергия активации диффузии атомов углерода, Q , оказывающая влияние на коэффициент диффузии, D , в соответствии с уравнением (2):

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}, \quad (2)$$

где D_0 – постоянный коэффициент, составляющий $0,11 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ для аустенита в стали; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31 \text{ Дж/моль} \times \text{К}$); T – температура в градусах Кельвина.

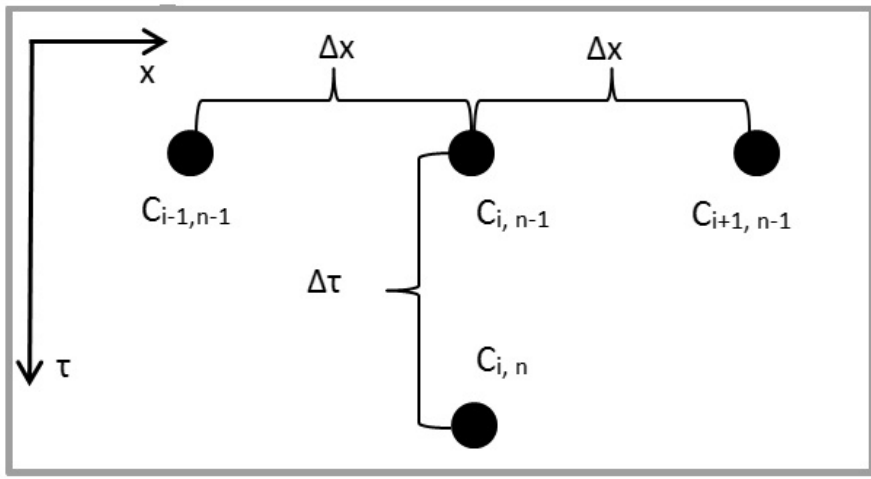
Результаты эксперимента и их обсуждение



- Экспериментальные профили концентрации углерода в диффузионном слое на поверхности образцов легированных сталей после цементации при заданном углеродном потенциале 0,85 %

Коэффициент легирования k:

$$\log(1/k) = 0,055 \times \text{Si} - 0,013 \times \text{Mn} - 0,040 \times \text{Cr} + 0,014 \times \text{Ni} - 0,013 \times \text{Mo} - 0,013 \times \text{Al} - 0,104 \times \text{V} - 0,009 \times \text{Cu} - 0,013 \times \text{W} + 0,009 \times \text{Co} \quad (3)$$



Расчетная схема для численного моделирования процесса диффузии методом конечных разностей

- Заменяя в уравнении (1) производные на конечные разности, получаем следующее выражение для нахождения концентрации углерода в каждой точке расчетной области в любой момент времени:

$$C_{i,n} = \frac{C_{i-1,n-1} + (m-2) \cdot C_{i,n-1} + C_{i+1,n-1}}{m}, \quad (4)$$

- где $C_{i,n}$ – содержание углерода в i -м расчетном слое в данный момент времени τ_n ; $C_{i,n-1}$ – содержание углерода в i -м расчетном слое в предыдущий момент времени τ_{n-1} ; $C_{i-1,n-1}$ и $C_{i+1,n-1}$ – содержание углерода в соседних расчетных слоях в предыдущий момент времени τ_{n-1} , m – размерность расчетного шаблона модели. Чем больше значение m , тем выше точность расчета и меньше шаг по времени $\Delta\tau$, который определяется из уравнения:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{m \cdot D}. \quad (5)$$

- В настоящей работе значение m было принято равным 6.

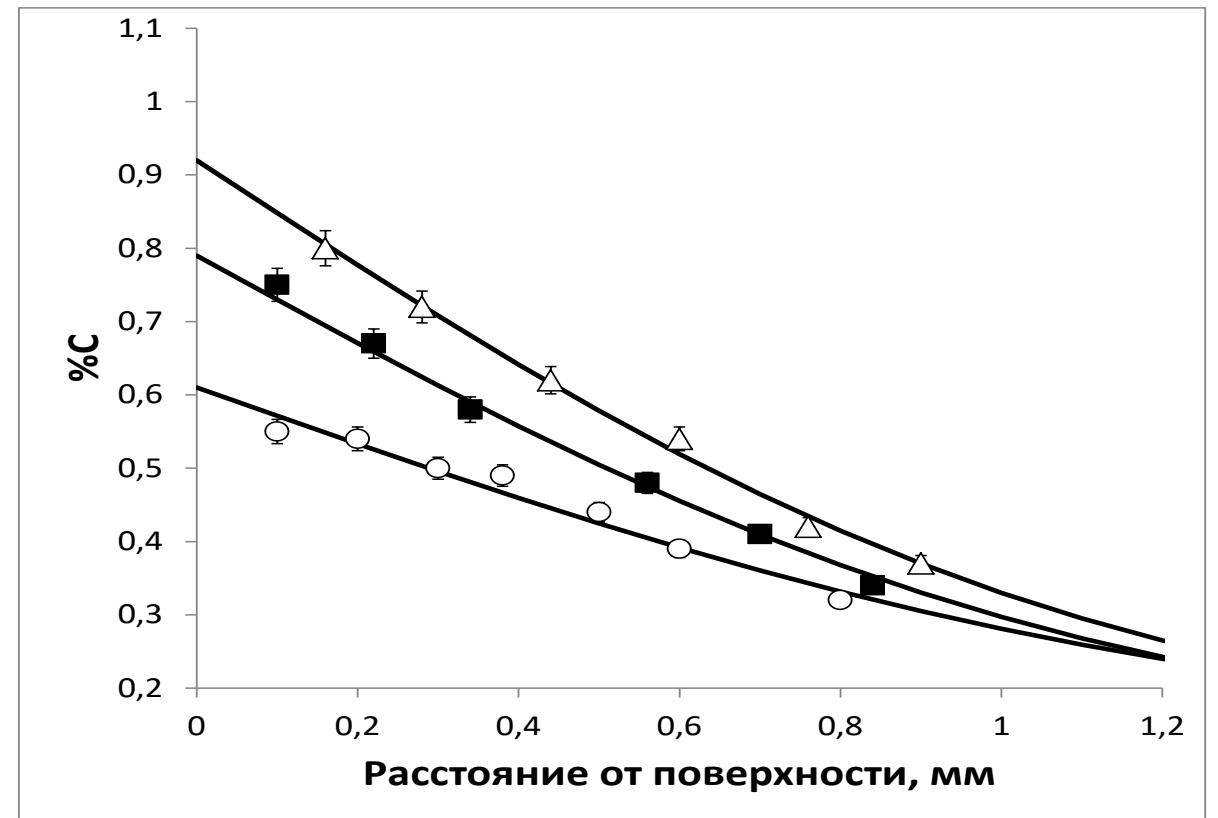
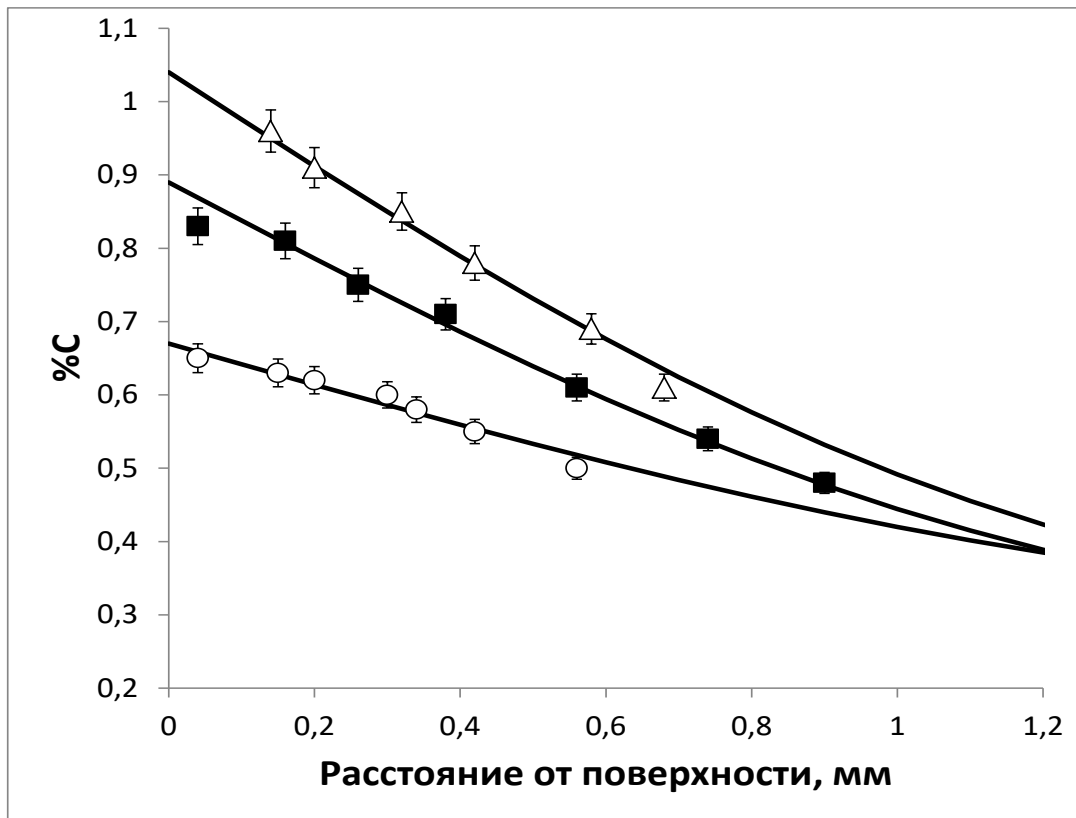
Для нахождения концентрации углерода на поверхности образца в каждый момент времени в настоящей работе применялись граничные условия 3 рода, согласно которым величина C_0 определяется следующим образом:

$$C_0 = \frac{C_1 D + \beta C_p \Delta x}{D + \beta \Delta x}, \quad (6)$$

где C_1 – концентрация углерода в первом расчетном слое толщиной Δx ; β – коэффициент массопереноса, принятый равным 0,0001 м/с; C_p – равновесная концентрация углерода на поверхности образца, определяемая как:

$$C_p = \phi \times k, \quad (7)$$

где ϕ – значение углеродного потенциала печной атмосферы для углеродистой стали; k – коэффициент легирования.



Экспериментальное (маркеры) и расчетное (линии) распределение концентрации углерода в диффузионном слое образцов из сталей: а) 25ХГМ; б) 12ХН3А (о – $C_A = 0,60\%$; ■ – $C_A = 0,80\%$; Δ – $C_A = 0,95\%$)

Уравнение, связывающее энергию активации и химический состав.

$$Q = 144490 - 6311 \times \text{Mn} - 1112 \times \text{Ni} - 13890 \times \text{Mo}, \quad (8)$$

В настоящей работе было использовано следующее уравнение для расчета температуры M_H :

$$M_H = 472 - 384 \times C - 26 \times Si - 14 \times Ni, \quad (9)$$

где C , Si , Ni – содержание легирующих элементов, масс. %. Количество мартенсита, образующегося в разных точках диффузионного слоя после закалки, можно определить по уравнению Коистинена-Марбургера:

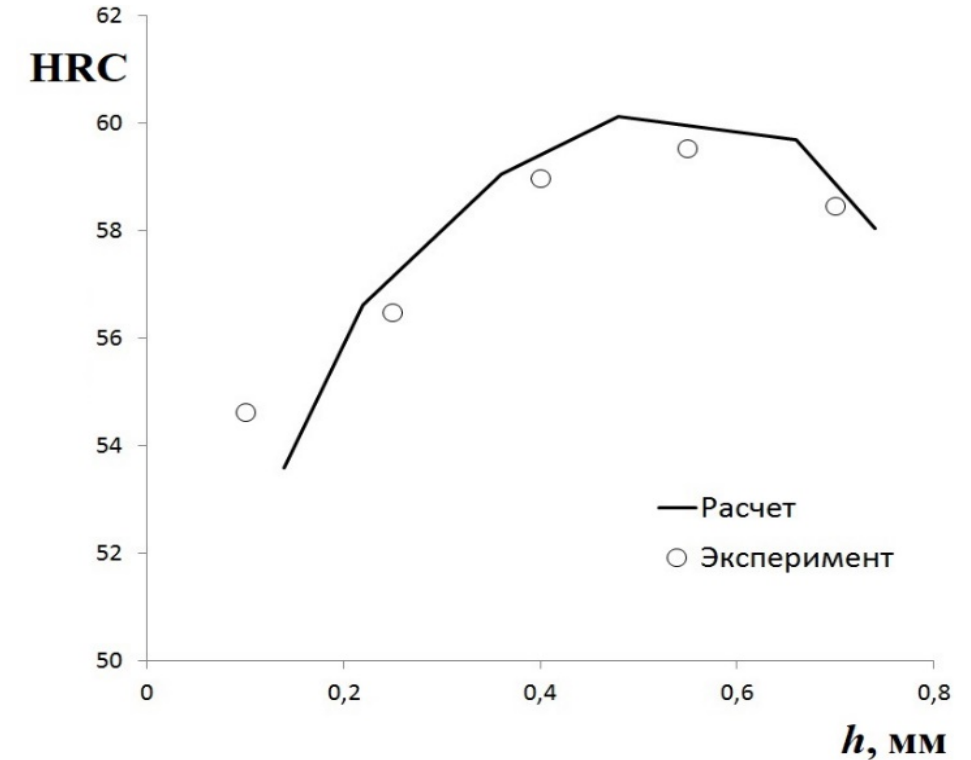
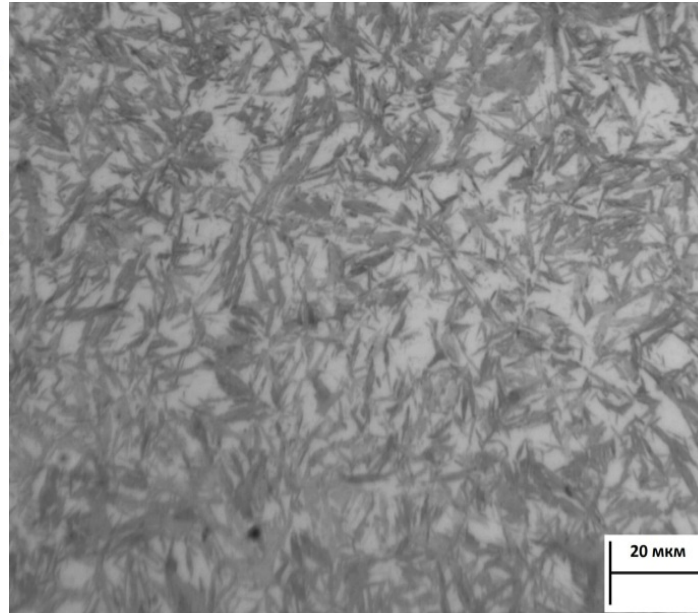
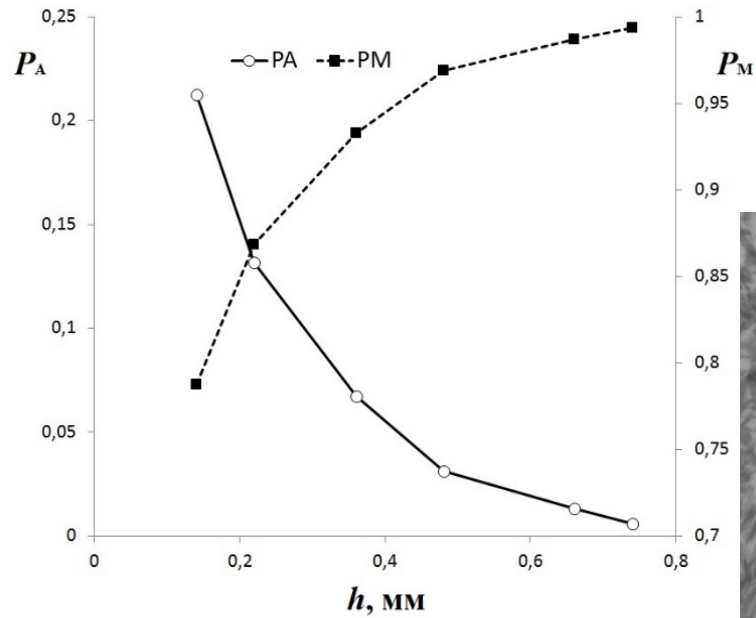
$$P_M = 1 - \exp[-\alpha \times (M_H - t)], \quad (10)$$

где P_M – доля мартенсита; M_H – температура начала мартенситного превращения, °C; t – температура окружающей среды ($t = 20$ °C); α – постоянный коэффициент.

Тогда долю непревращенного остаточного аустенита, P_A , можно определить следующим образом:

$$P_A = 1 - P_M. \quad (11)$$

Расчетно-экспериментальное исследование результата цементации стали 20Х2Н4А при углеродном потенциале 0,95 %:

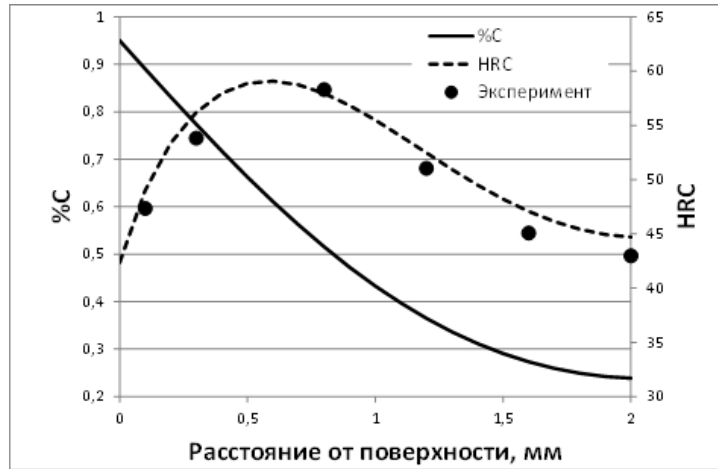


- а) расчетное изменение доли мартенсита, P_M , и остаточного аустенита, P_A , в диффузионном слое;
- б) микроструктура диффузионного слоя после цементации и закалки;
- в) расчетное и экспериментальное распределение твердости в диффузионном слое

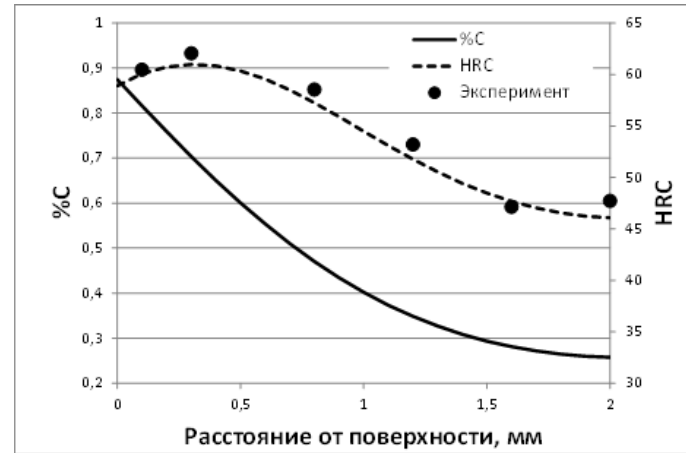
$$HRC = P_M \times HRC_M + P_A \times HRC_A, \quad (12)$$

Параметры расчетной модели для исследуемых долотных сталей

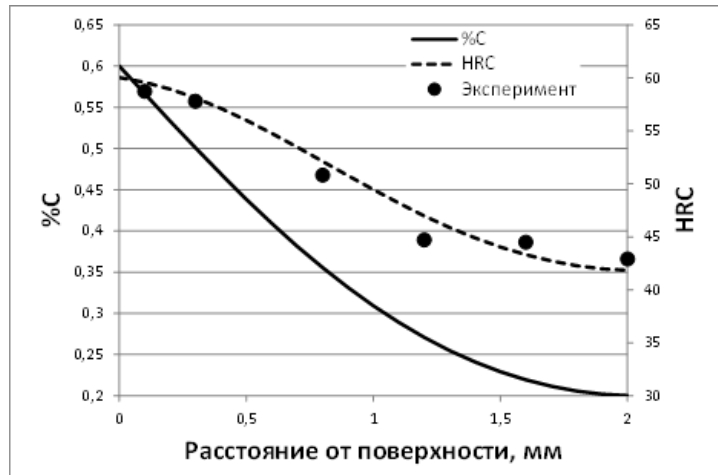
Марка стали	Коэффициент легирования, k	Энергия активации диффузии, Q, Дж/моль
14ХНЗМА	1,02	134457
19ХГНМ	1,04	136546



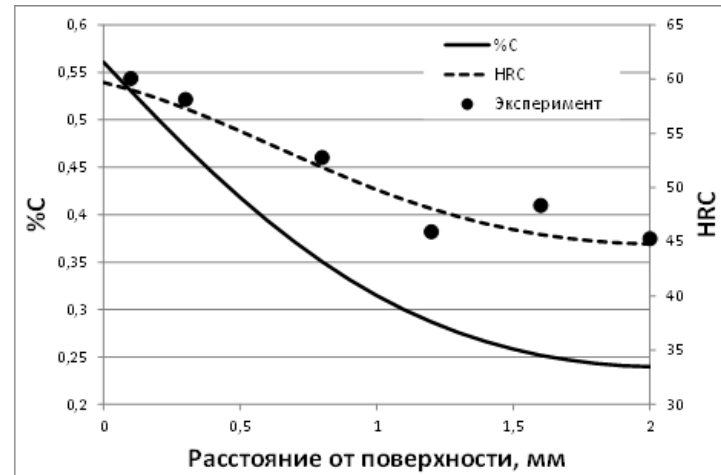
а



б



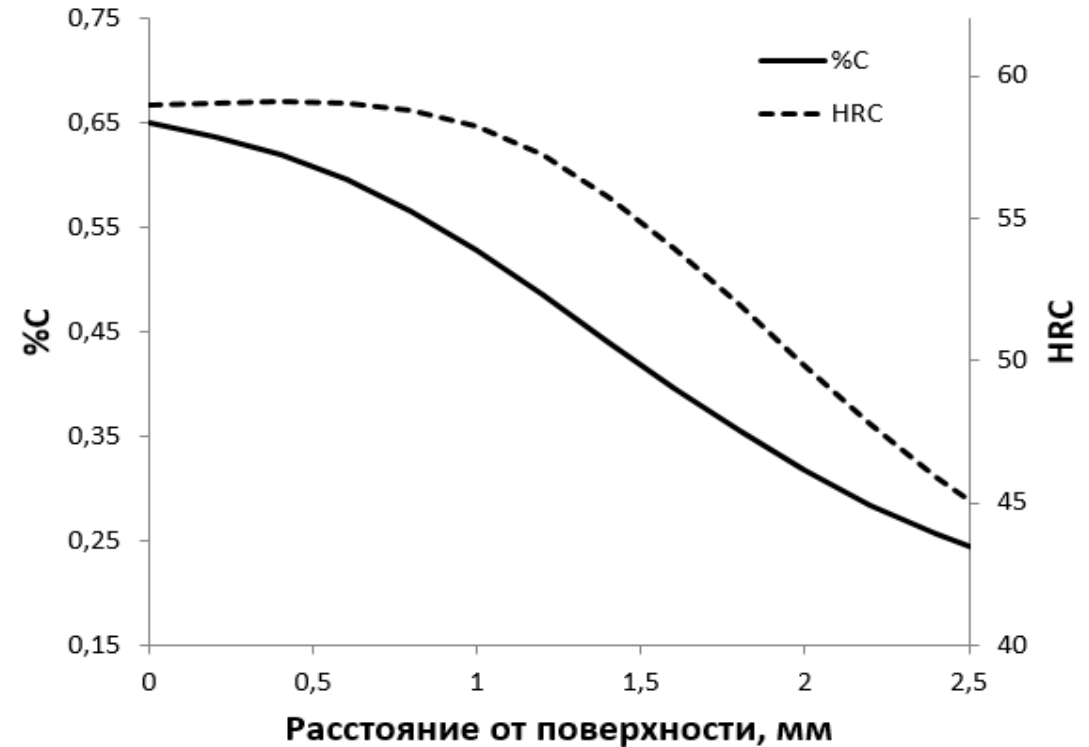
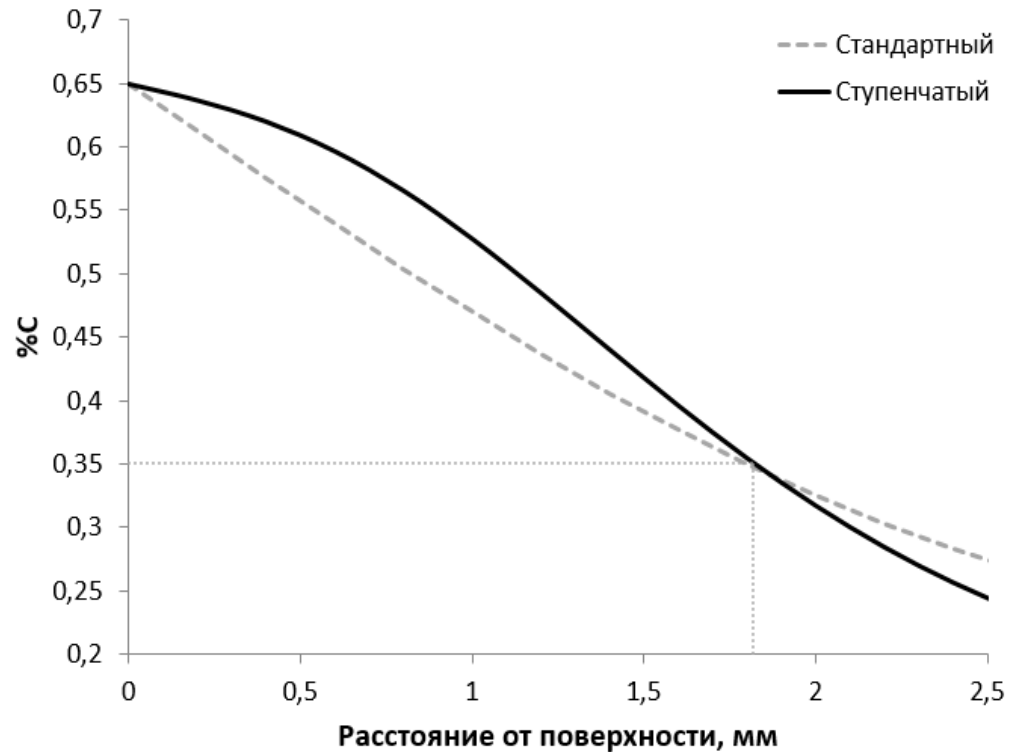
в



г

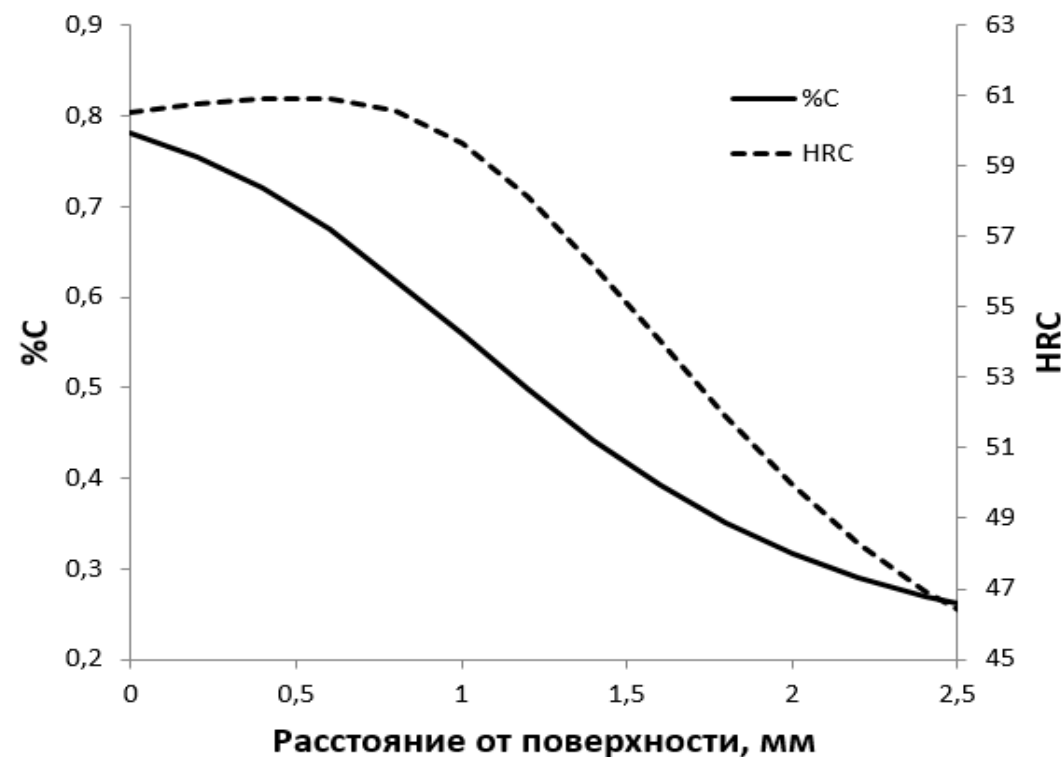
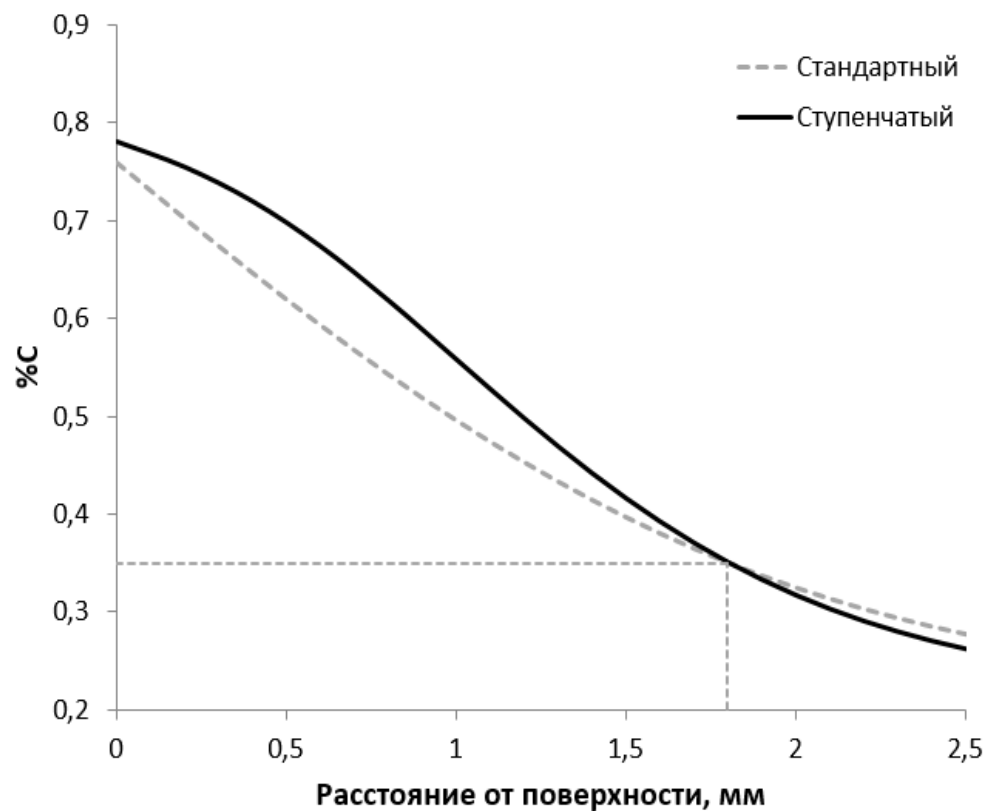
Расчетное распределение концентрации углерода и твердости в диффузионном слое на поверхности сталей 14ХНЗМА (а, в) и 19ХГНМА (б, г) после цементации при величине углеродного потенциала: а, б) 0,95%; в, г) 0,60%

Результаты численного моделирования цементации стали 14ХНЗМА



а) расчетные профили концентрации углерода в диффузионном слое при стандартном режиме цементации (0,65 %, 35 ч) и ступенчатом режиме цементации (0,95% - 16 ч, 0,65% - 4 ч); б) расчетные профили концентрации углерода и твердости в диффузионном слое после ступенчатого режима цементации

Результаты численного моделирования цементации стали 19ХГНМ



а) расчетные профили концентрации углерода в диффузионном слое при стандартном режиме цементации (0,80 %, 24 ч) и ступенчатом режиме цементации (1,15% - 13 ч, 0,80% - 3 ч); б) расчетные профили концентрации углерода и твердости в диффузионном слое после ступенчатого режима цементации

Выводы

- Предложена методика численного моделирования процесса цементации, позволяющая учитывать влияние химического состава стали на процесс насыщения углеродом поверхности деталей.
- Показано, что при одинаковых условиях цементации (температура, углеродный потенциал, продолжительность) на поверхности сталей разных систем легирования образуется диффузионный слой с разными характеристиками. Установлена зависимость между химическим составом стали и энергией активации диффузии углерода в аустените.
- Рассмотрен алгоритм расчета твердости в диффузионном слое после закалки, который учитывает наличие остаточного аустенита в микроструктуре.
- При помощи разработанных методик численного моделирования были установлены параметры ступенчатых режимов цементации долотных сталей 14ХНЗМА и 19ХГНМ, что позволило получить требуемую толщину (1,8 мм) и твердость диффузионного слоя (57...60 HRC) при сокращении продолжительности цементации на 30...40 % по сравнению со стандартно применяемыми режимами при постоянном углеродном потенциале.