

**Марина Анатольевна Рябикина^{1*}, Виктория Григорьевна Гаврилова¹,
Андрей Григорьевич Присяжный¹**

¹ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь, РФ

**maryna.ryabikina@mail.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТАЦИИ ШЕСТЕРЕН

Основное внимание в настоящей работе уделено расчету коэффициента диффузии и распределения углерода в шестернях из стали 25ХГТ в различных условиях цементации. Моделированием цементации при $t=950$ °С и $\tau=12$ часов установлено, что на поверхности диффузионного слоя расчетная концентрация углерода равна 1,2 % и достигает исходной на глубине $X_{II}=2,0$ мм. Расчеты подтверждены исследованиями микроструктуры и измерениями микротвердости диффузионного слоя стали 25ХГТ после газовой цементации, закалки ТВЧ и низкого отпуска в условиях машиностроительного предприятия. Определена эффективная толщина слоя $X_{Э}=1,8$ мм, которая соответствует твердости 550 HV (50 HRC).

Ключевые слова: цементация, диффузионный слой, эффективная толщина, твердость

Marina A. Ryabikina, Viktoriya G. Gavrilova, Andrei G. Prisyazhnyi

MODELING OF THE PROCESS OF GEAR CEMENTATION

The main attention in this work is paid to the calculation of the diffusion coefficient and distribution of carbon in gears made of 25KhGT steel under various carburizing conditions. Modeling of carburizing at $t=950$ °C and $\tau=12$ hours has established that the calculated carbon concentration on the surface of the diffusion layer is equal to 1,2% and reaches the initial value at TCD = 2,1 mm (total case depth). The calculations are confirmed by microstructure studies and microhardness measurements of the diffusion layer of 25KhGT steel after gas carburizing, high-frequency hardening and low tempering under the conditions of a machine-building enterprise. The effective case depth ECD=1,8 mm has been determined, which corresponds to a hardness of 550 HV (50 HRC).

Keywords: carburizing, diffusion layer, effective case depth, hardness

В машиностроении цементация часто используется для упрочнения поверхности стальных деталей (например, шестерен, валов), изготовленных из низкоуглеродистой стали, чтобы обеспечить высокие твердость, прочность, износостойкость при сохранении вязкой сердцевины. Последняя обеспечивается низким содержанием углерода (0,2%) в стали. Напротив, в поверхностном слое содержание углерода должно быть ~0,7-0,8%. Поэтому в

процессе цементации поверхность детали насыщается углеродом. После цементации следует закалка на мартенсит с последующим низкотемпературным отпуском. Мартенситная структура поверхностного слоя зубчатого колеса повышает твердость, сопротивление истиранию.

Статья посвящена моделированию процесса диффузии углерода, трансформации структуры и свойств по глубине диффузионного слоя при цементации шестерен.

Изложение основного материала. В настоящей работе образцы из стали 25ХГТ вначале были подвергнуты газовой цементации при 950 °С в течение 12 часов, а затем закалке ТВЧ при 800 и 900 °С в течение 20 минут, низкому отпуску при 200 °С, 1 час с последующим охлаждением на воздухе. Далее были проведены расчеты процесса насыщения поверхности стали углеродом в различных температурных и временных условиях.

Микроструктурный анализ выполнен на микроскопе «ММТ-14Ц», увеличение $\times 100$ – $\times 600$ крат, измерения микротвердости – на приборе NOVOTEST ТЗ-МКВ1.

В результате закалки ТВЧ при температурах 800–900 °С в поверхностном слое сформировалась микроструктура из смеси мартенсита, карбидов и остаточного аустенита ($M+K+A_{ост}$), структура сердцевины – малоуглеродистый мартенсит. Толщина науглероженного слоя стали 25ХГТ составляла ~ 2 мм.

Второй закон Фика связывает пространственное и временное изменения концентрации (уравнение диффузии):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Для решения уравнения (1) можно использовать уравнение (2), которое включает интеграл ошибок Гаусса [1]:

$$\frac{(C(x,t)-C_0)}{C_s-C_0} = 1 - erf \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad (2)$$

где $C(x,t)$ – концентрация углерода на заданном расстоянии; C_0 – исходная концентрация углерода в стали (масс. %); C_s – концентрация углерода на поверхности науглероживающей атмосфера – деталь (масс. %); D – коэффициент диффузии ($m^2 \cdot c^{-1}$); t – продолжительность науглероживания (с).

Цементация обычно производится при температуре от 820 до 960 °С. После закалки поверхность приобретает структуру мартенсита с высокой твердостью, износостойкостью, сопротивлением усталости.

Для $C_0=0,25$ %; $C_s=1,2$ %; $t=43200$ с (12 часов) распределение концентрации углерода и глубина слоя после цементации в 820–960 °С представлены на рис. 1 и 2.

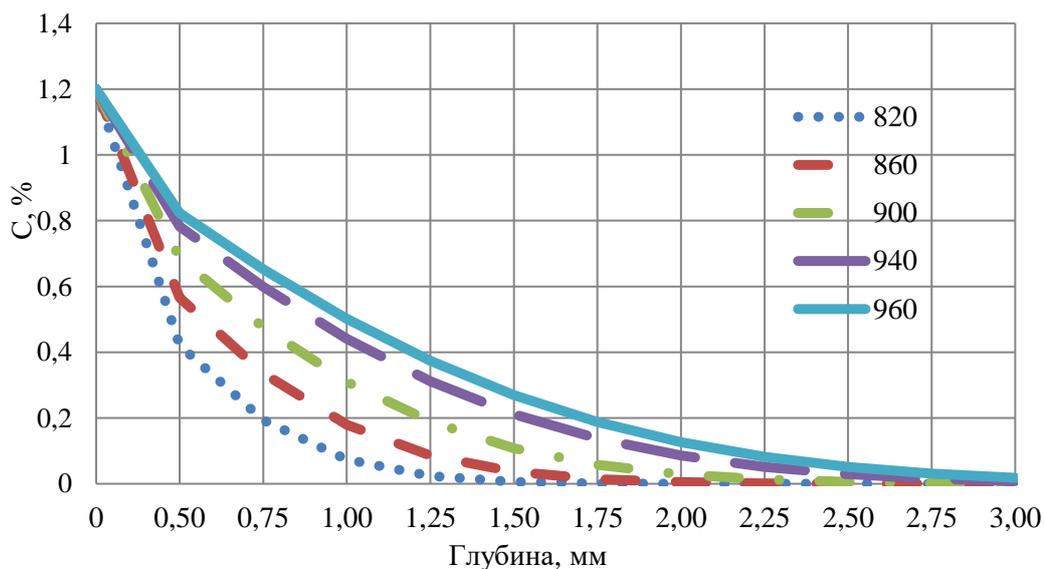


Рис. 1. Расчетное распределение углерода по глубине слоя в стали после цементации в интервале 820-960 °C

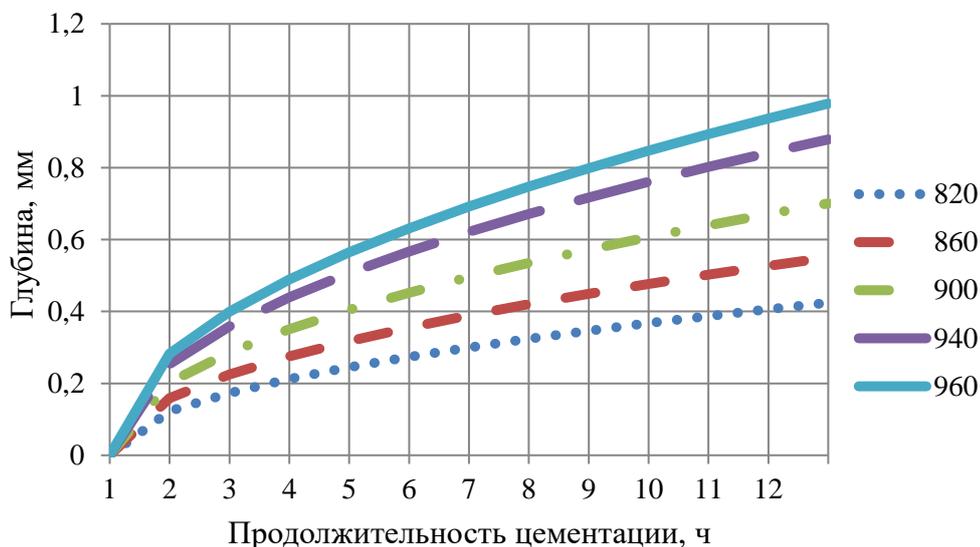


Рис. 2. Влияние продолжительности науглероживания температурах 820-960 °C на глубину слоя

Расчетная часть данной работы посвящена прогнозированию распределения углерода в зубчатых колесах из стали 25ХГТ после цементации при 950 °C в течение 12 часов, $D = 2,97 \cdot 10^{-11}$ (м²·с). Концентрация углерода плавно снижается от $C_s = 1,2$ % на поверхности до $C_0 = 0,25$ % на глубине ~2,0 мм, что соответствует полной толщине слоя X_{II} , рис. 3.

Экспериментальными исследованиями установлено (рис. 4), что после цементации и закалки ТВЧ на поверхности образцов твердость составляет ~850 HV (68 HRC), а затем плавно снижается до ~450 HV; полная толщина слоя X_{II} ~2,0 мм. Эффективной толщине слоя с твердостью 550 HV (50 HRC) соответствует расстояние X_E ~1,8 мм. Опытные точки аппроксимированы полиномом 4-й степени с высокой степенью достоверности.

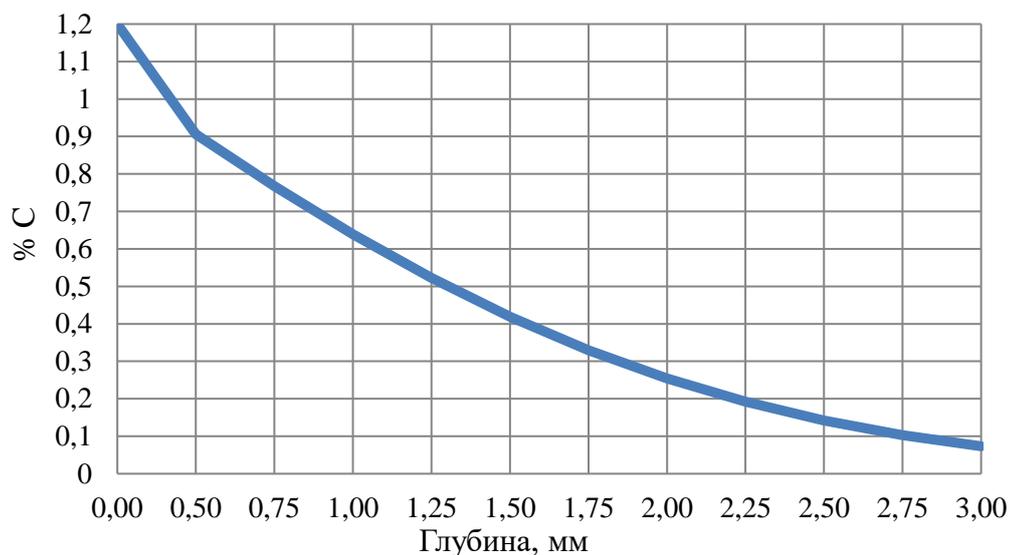


Рис. 3. Расчетное распределение углерода по глубине диффузионного слоя после цементации при 950 °С

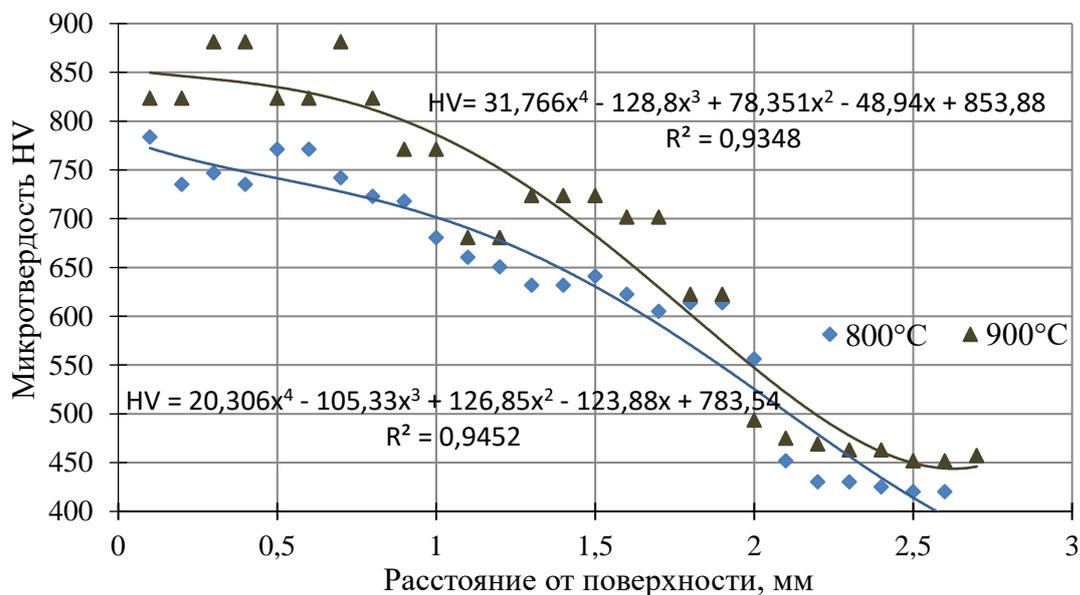


Рис. 4. Профиль микротвердости стали 25ХГТ после цементации и закалки ТВЧ

Увеличение $X_{\text{э}}$ повышает прочность, контактную выносливость шестерен и срок службы трансмиссионной системы в целом, напротив, слишком большая глубина науглероживания может привести к снижению прочности зацепления зубчатых передач вследствие разной $X_{\text{э}}$ наружной и внутренней шестерен, росту сложности технологического цикла [2,3].

Заключение. В работе показана взаимосвязь теоретических расчетов диффузии углерода с практической реализацией процесса цементации стали 25ХГТ с последующей закалкой и отпуском. Расчеты диффузии углерода на основе законов Фика, позволят более точно устанавливать режимы цементации шестерен, увеличивая их ресурс при повышенных нагрузках.

REFERENCES

1. Goldstein J. I. Diffusion Modeling of the Carburization Process / J.I. Goldstein, A. E. Moren // Met. Trans. A. 1978. V. 9A. № 11. P. 1515–1525.
2. Beskopylny A. Strength Characteristics Analysis of Structurally Inhomogeneous Steel Gears / A. Beskopylny [et al] // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. P. 894–903
3. Sandomirski S. Methodology for Determining the Effective Thickness of the Cemented Layer of Steel / S. Sandomirski, A. Val'ko, S. Rudenko // Devices and Methods of Measurements. 2023. V. 14, № 2. P. 145–151