

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЛИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ КРУПНЫХ СЕЧЕНИЙ

Саибов Маруф Фархадович

PhD студент

Научный руководитель: Эгамбердиев Илхом Пулатович

д.т.н., профессор

Навоийский государственный горно-технологический университет

Аннотация: Рассмотрена математическая модель перлитного превращения, основанная на уравнениях Авраами–Ерофеева. Модель учитывает скорость охлаждения, размер зерна аустенита и концентрацию легирующих элементов. Проведён расчёт времени начала и конца перлитного превращения для валов диаметром 200–500 мм при различных средах охлаждения. Показано, что замедленное охлаждение способствует укрупнению межпластинчатого расстояния и снижению прочностных характеристик. Результаты используются для оценки опасности формирования грубого перлита при нарушении технологического процесса.

Ключевые слова: перлитное превращение, кинетика, охлаждение, крупногабаритные детали, математическая модель.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PERLITE TRANSFORMATION DURING COOLING OF LARGE SECTIONS

Saibov Maruf Farhadovich

PhD student

Scientific supervisor: Egamberdiev Ilkhom Pulatovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Navoi State Mining and Technology University

Abstract: The mathematical model of perlite transformation based on the Avrami-Yerofeev equations is considered. The model takes into account the cooling rate, austenite particle size, and the concentration of alloying elements. Calculations of the start and end times of pearlite transformation were performed for shafts with a diameter of 200-500 mm in various cooling environments. It has been shown that delayed cooling contributes to the increase in the distance between the plates and a decrease in strength characteristics. The results are used to assess the risk of coarse perlite formation when the technological process is disrupted.

Keywords: perlite transformation, kinetics, cooling, large-sized parts, mathematical model.

1. Введение

Перлитное превращение является ключевым диффузионным механизмом, определяющим структуру и свойства сталей при охлаждении. В массивных деталях, таких как крупногабаритные валы, скорость охлаждения существенно различается между поверхностью и центральной частью. Это приводит к изменению размера колоний перлита, межпластинчатого расстояния и, как следствие, механических свойств [1-3]. Управление условиями формирования перлитной структуры является важной задачей для обеспечения надёжности изделий. Особую сложность представляет прогноз кинетики перлитного превращения при больших поперечных размерах, где температурный градиент по сечению влияет на локальные скорости диффузии углерода. Для решения данной задачи применяются математические модели, позволяющие описывать зависимость объёма превращения от времени и температуры. Одним из таких универсальных подходов являются уравнения Авраами–Ерофеева, применяемые для анализа фазовой эволюции [4-7].

2. Методика моделирования

Кинетика перлитного превращения описывается обобщённым уравнением типа Авраами, которое связывает долю превращённой структуры с временем и параметрами нуклеации. Для моделирования учитывалась

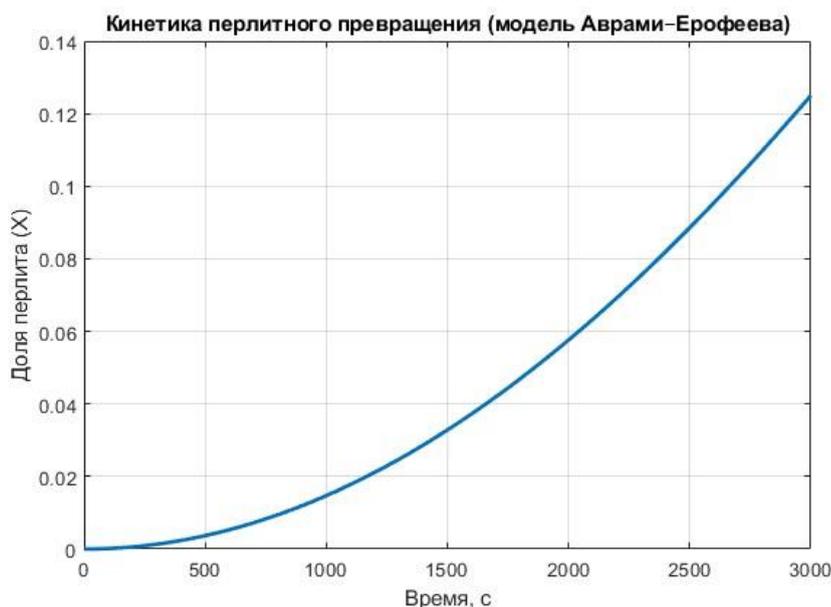
зависимость скорости распада переохлаждённого аустенита от температуры, размера зерна и концентрации легирующих элементов. Параметры модели определялись на основе данных программного комплекса OpenCalphad.

Основное уравнение Аврами–Ерофеева

Доля превращённой структуры (перлит) выражается:

$$[X(t) = 1 - \exp(-kt^n)]$$

где: $(X(t))$ — доля перлитной структуры в момент времени (t) ; (k) — кинетическая константа превращения; (n) — показатель Аврами (обычно $(1.5 \leq n \leq 4)$).



Температурная зависимость константы

$$\left[k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \right]$$

где: (k_0) — предэкспоненциальный множитель; (Q) — энергия активации диффузии; (R) — газовая постоянная; (T) — температура (К).

Учет влияния скорости охлаждения

$$\left[\frac{dT}{dt} = f(r) \right]$$

где: (r) — радиус (координата по сечению вала), $(f(r))$ — функция теплоотвода (в центре скорость меньше). В реальных задачах поверхность остывает быстрее, центр медленнее:

$$\left[\frac{dT}{dt} = a - br \right]$$

Уравнение начала и окончания превращения

Начало превращения:

$$[X(t_s) = 0.01]$$

Окончание:

$$[X(t_f) = 0.99]$$

Отсюда:

$$\left[t_s = \left(\frac{-\ln(0.99)}{k} \right)^{1/n} \right]$$

$$\left[t_f = \left(\frac{-\ln(0.01)}{k} \right)^{1/n} \right]$$

Учет размера аустенитного зерна

$$[k = k_0 \cdot d^{-\alpha}]$$

где: (d) — средний диаметр зерна, $(\alpha \approx 1.5)$, то есть чем крупнее зерно, тем медленнее перлитное превращение.

Учет влияния легирующих элементов

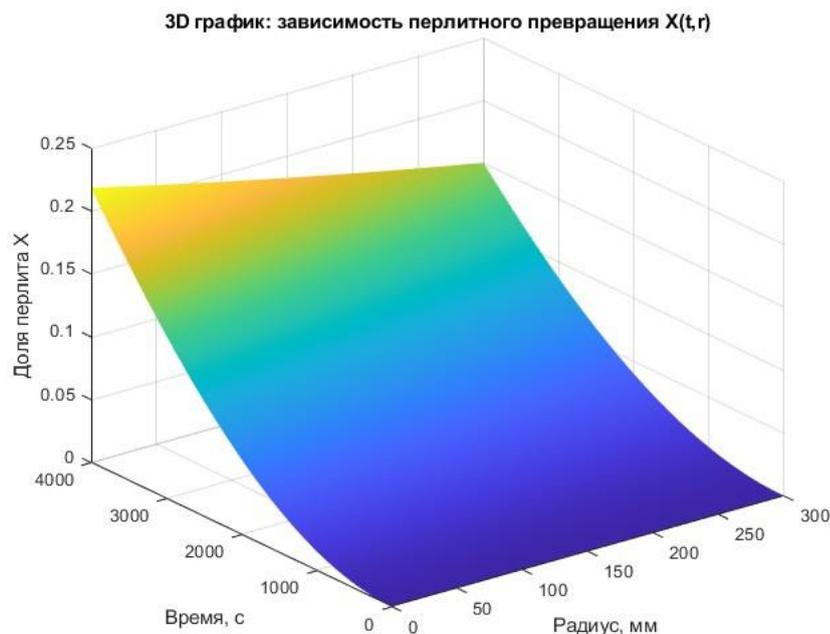
$$[Q = Q_0 + \beta \cdot C_{\text{leg}}]$$

где: (C_{leg}) — концентрация легирующего элемента, (β) — коэффициент влияния. Видно что легирование увеличивает энергию активации и замедляет процесс.

Итоговая модель (комбинированная)

$$\left[X(t, T, r, d) = 1 - \exp\left(-k_0, d^{-\alpha} \exp\left(-\frac{Q_0 + \beta_{leg}}{RT(r)}\right) t^n\right)\right]$$

Это универсальное уравнение, которое учитывает: время (t), температуру (T), радиальную координату (r), размер зерна (d), легирование.



3. Результаты модели

Расчёты показали, что в деталях диаметром 200–500 мм начало перлитного превращения смещается при увеличении размера сечения. В поверхностной зоне превращение может начинаться при 600–650 °С, тогда как в центральной части — при температурах ниже 550 °С. Это объясняется снижением скорости охлаждения и замедлением диффузии углерода. Разница в температуре начала превращения может достигать 80–100 °С. Завершение перлитного превращения также зависит от теплопередачи. В

центральной зоне вала процесс длится существенно дольше, что способствует формированию более крупного межпластинчатого расстояния. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными и подтверждают применимость модели Авраами–Ерофеева для прогнозирования структуры в массивных деталях.

4. Обсуждение влияния скоростей охлаждения

Анализ показал, что именно скорость отвода тепла определяет морфологические параметры перлитной структуры. При замедленном охлаждении формируется крупнопластинчатый перлит, обладающий пониженной прочностью и ограниченной ударной вязкостью. Этот эффект наиболее ярко проявляется в центральной части больших валов, где теплоотвод ограничен.

При интенсивном охлаждении межпластинчатое расстояние уменьшается, а плотность перлитных колоний возрастает, что улучшает прочностные характеристики. Таким образом, расчет кинетики превращения позволяет заранее выявлять области риска формирования грубого перлита и корректировать технологические режимы.

5. Практическая значимость

Использование модели Авраами–Ерофеева для массивных деталей позволяет выполнять технологические расчёты без необходимости проведения большого количества экспериментальных исследований. Методика может быть дополнена анализом остаточных напряжений и интегрирована в комплексную систему моделирования структуры и механических свойств.

6. Заключение

Представлена математическая модель перлитного превращения, основанная на уравнениях Авраами–Ерофеева и учитывающая температуру, скорость охлаждения и размер сечения. Показано, что замедленное охлаждение способствует формированию грубой перлитной структуры и снижению прочности. Определены температурные интервалы начала и

окончания превращения для валов диаметром 200–500 мм. Разработанный подход может быть использован для прогнозирования структуры при термообработке массивных деталей. Результаты обладают практической значимостью для промышленных предприятий, позволяя оптимизировать технологии охлаждения и снизить риск дефектов.

Список использованной литературы

1. Liu H., Zhang Y., Wang B. Evolution mechanism of quenching stress field influenced by phase transformation in carburized steels // *Materials Chemistry and Physics*. — 2024.
2. Li Y., Xu J., Zeng Q. Influence of Initial Yield Strength Weighting on Residual Stress Distribution in Quenched Steel Parts // *Materials*. — 2024.
3. Effect of Residual Stress and Microstructure Evolution on Size Stability of M50 Bearing Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2025.
4. FEM simulation of stress changes and phase transformation during quenching of SDC99 steel // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2025.
5. Microstructural evolution and residual stresses due to quenching treatments of large forgings: numerical and experimental approach // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2025.
6. Process Optimization Simulation of Residual Stress in Martensitic Steel by Controlling Quenching and Tempering Parameters // *Crystals*. — 2025.
7. Филяков А.А., Птицын Н.С., Шестаков А.В. Методы моделирования фазовых превращений в бейнитных сталях // *Металлургические процессы и оборудование*. — 2023.