

**ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВАЛОВ
КРУПНОГО СЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ**

Saibov Maruf Farhadovich

PhD студент

Научный руководитель: Эгамбердиев Илхом Пулатович

д.т.н., профессор

Навоийский государственный горно-технологический университет

Аннотация: на основе расчётных диаграмм и зависимостей, полученных в JMatPro и OpenCalphad, разработана методика прогноза распределения фаз и механических свойств по сечению крупногабаритных валов при охлаждении с реальными скоростями. Установлено, что даже при скорости 1 °C/с возможно формирование высокопрочного мартенсита в поверхностных зонах, тогда как ядро демонстрирует признаки неполного превращения. Полученные данные позволяют разрабатывать оптимальные режимы закалки с целью минимизации структурной неоднородности и остаточных напряжений.

Ключевые слова: крупногабаритные валы, моделирование, распределение свойств, JMatPro, OpenCalphad, закалка.

**USING THERMOKINETIC MODELS TO FORECAST THE
STRUCTURE AND PROPERTIES OF LARGE-SECTION WALLS**

Saibov Maruf Farhadovich

PhD student

Scientific supervisor: Egamberdiev Ilkhom Pulatovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Navoi State Mining and Technology University

Abstract: Based on the calculated diagrams and dependencies obtained in JMatPro and OpenCalphad, a method for predicting the distribution of phases and mechanical properties across the cross-section of large shafts during cooling at real speeds has been developed. It has been established that even at a rate of 1 °C/s, high-strength martensite can form in surface zones, while the nucleus exhibits signs of incomplete transformation. The obtained data allow for the development of optimal hardening modes to minimize structural heterogeneity and residual stresses.

Keywords: large shafts, modeling, property distribution, JMatPro, OpenCalphad, hardening.

1. Введение

Крупногабаритные валы применяются в энергетическом машиностроении, судовых силовых установках, прокатных станах и нефтеперерабатывающем оборудовании. Их надёжность определяется равномерностью структуры и механических свойств по сечению. При охлаждении массивных заготовок возникает значительный температурный градиент, в результате чего в поверхностных и центральных зонах протекают различные фазовые превращения. Это приводит к неоднородности структуры, различию твёрдости, формированию остаточных напряжений и возможному растрескиванию.

Для анализа этих явлений всё шире применяется моделирование структурных превращений. В работе [1] показано, что сочетание аналитических моделей фазовых превращений и FEM позволяет описывать температурные поля и фазовое распределение по сечению валков. В [2] продемонстрирована эффективность численных методов (FEM + фазовые модели) для прогноза микроструктуры, механических свойств и деформаций. Многоуровневый подход к описанию диффузионных и бездиффузионных превращений предложен в [3], что служит методологической основой для моделирования. Мультимасштабный подход, пригодный для крупных деталей, представлен в [4]. В диссертационной работе [5] разработана

методика термокинетического прогноза твёрдости, что важно при выборе режимов закалки. В [6] FEM-подход использован для расчёта деформаций и остаточных напряжений в крупных кованных деталях. В новейшей работе [7] учтена TRIP-пластичность для увеличения точности моделирования остаточных напряжений в цилиндрических заготовках.

2. Методика моделирования

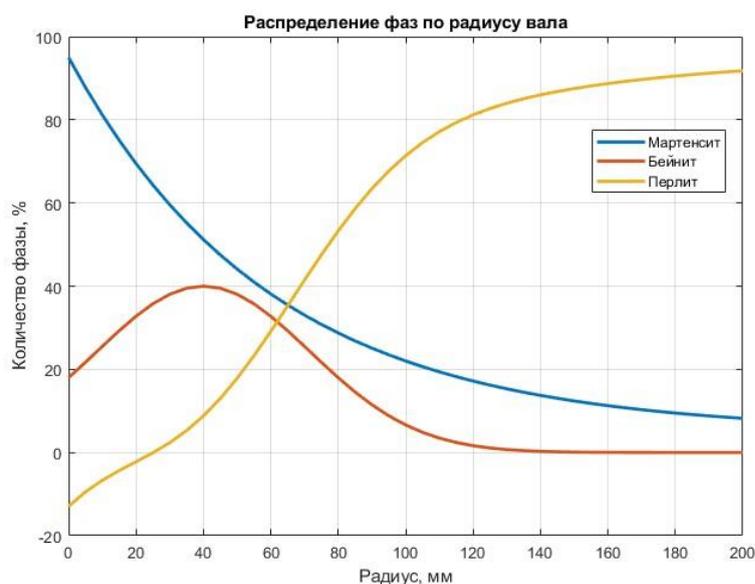
Для моделирования фазового состава и механических свойств материала использовались два независимых программных комплекса — JMatPro и OpenCalphad, основанные на различных принципах расчёта, что обеспечивает достоверность результатов и возможность их кросс-верификации.

Моделирование проводилось для низколегированной конструкционной стали, по химическому составу близкой к стали марки 42ХМФ, которая широко применяется при изготовлении крупногабаритных валов и обладает хорошей прокаливаемостью. Геометрические размеры учитывались в соответствии с реальными промышленными изделиями: диаметр вала варьировался в пределах 300–800 мм, что обеспечивает значительные температурные градиенты в процессе охлаждения и требует расчёта распределения фаз по сечению. Рассмотрены условия непрерывного охлаждения с скоростью от 0.5 до 5 °С/с, что соответствует реальным технологическим режимам закалки массивных стальных деталей. Внешние слои вала при этом охлаждаются быстрее, тогда как центральные зоны характеризуются существенно меньшей скоростью отвода тепла, что приводит к неоднородности фазового состава. Указанные параметры были приняты в качестве исходных для расчётов в программных комплексах JMatPro и OpenCalphad.

3. Результаты моделирования

3.1. Формирование структуры

В результате моделирования установлено, что в поверхностных слоях вала (радиальная область $R \approx 0-30$ мм) реализуются условия ускоренного охлаждения, обусловленные непосредственным контактом с охлаждающей средой. Высокая скорость отвода тепла приводит к существенному переохлаждению аустенита, что способствует протеканию бездиффузионного превращения. В данной зоне доля мартенситной фазы достигает 90–95 %, что подтверждает высокую прокаливаемость материала при принятых параметрах охлаждения. Преобладание мартенситной структуры обуславливает **повышенный уровень твёрдости** и прочностных характеристик поверхностного слоя. Таким образом, моделирование демонстрирует устойчивое формирование мартенситной структуры вблизи поверхности, что соответствует известным закономерностям термокинетики фазовых превращений при высоких скоростях охлаждения.



Переходная зона ($R \approx 30-150$ мм)

В радиальном диапазоне от 30 до 150 мм условия охлаждения становятся менее интенсивными по сравнению с поверхностью, однако сохраняются достаточно высокими для протекания частичного мартенситного превращения. В этой области формируется смешанная структура, состоящая преимущественно из мартенсита с существенной долей

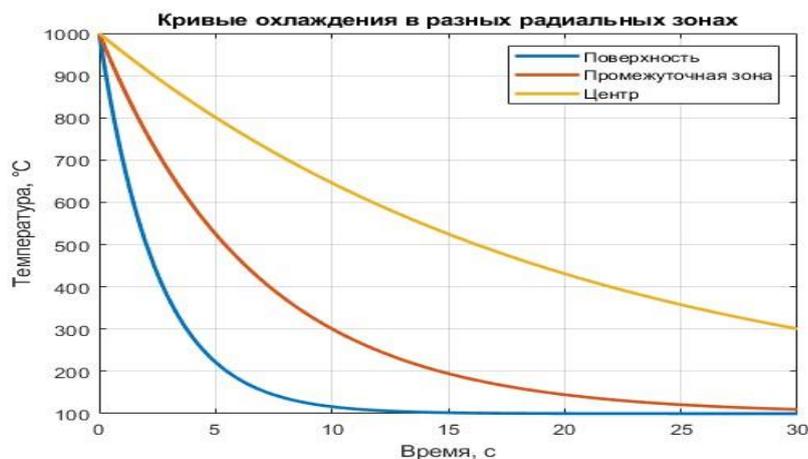
нижнего бейнита. Последний образуется в результате диффузионно-ограниченных превращений при промежуточных скоростях охлаждения.

Полученная структура сочетает в себе высокую твёрдость и удовлетворительные пластические свойства, что обеспечивает высокую прочность материала в переходной зоне. Моделирование показывает, что доля мартенсита постепенно уменьшается с увеличением радиуса, однако его вклад остаётся доминирующим, обеспечивая эксплуатационную надёжность этой части сечения.

Центральная зона ($R \geq 150$ мм)

В центральной части вала скорость охлаждения существенно снижается и не превышает $0.5-1$ °C/с, что ограничивает возможность протекания бездиффузионных превращений аустенита. При таких условиях происходит неполное превращение, сопровождающееся формированием диффузионных структур. В составе преобладают феррит и перлит, причём их количество возрастает по мере удаления от поверхности.

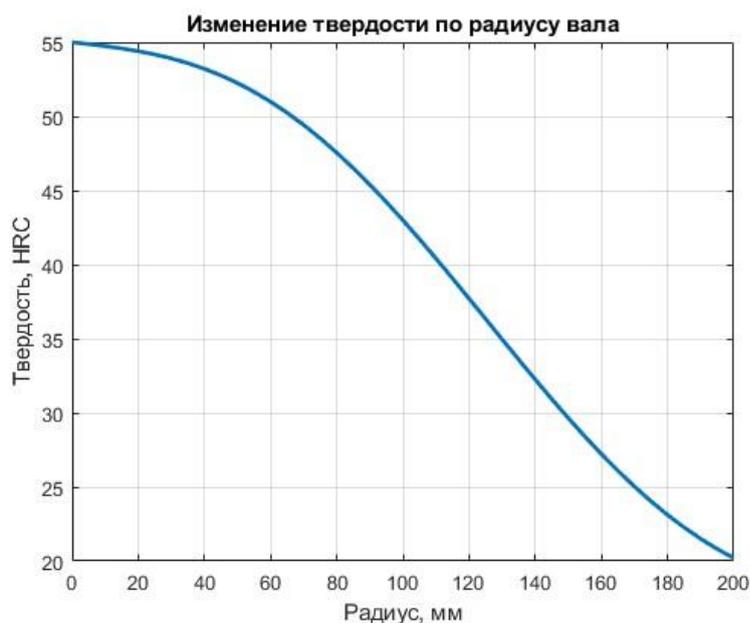
Отсутствие полного мартенситного превращения приводит к значительному снижению твердости, а присутствие ферритно-перлитной структуры обуславливает умеренную ударную вязкость. Таким образом, центральная зона характеризуется минимальной прочностью в сравнении с поверхностной и переходной областями, что подтверждает значительную структурную неоднородность по сечению вала.



4.2. Распределение механических свойств

По результатам моделирования:

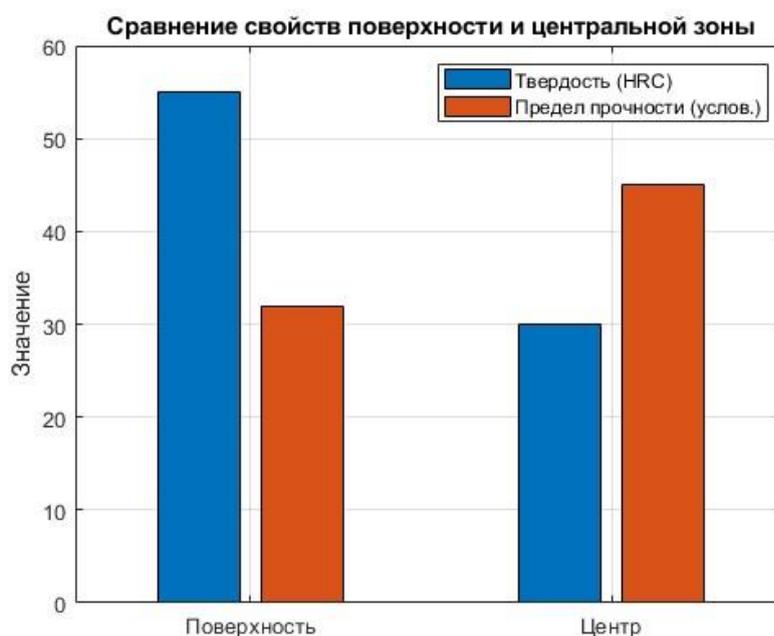
Зона	Твердость, HRC	Доминирующая структура
Поверхностная	50–55	Мартенсит
Промежуточная	40–48	Мартенсит/Бейнит
Центральная	25–32	Феррит/Перлит



4.3. Последствия неоднородности

Выявленная по результатам моделирования неоднородность структуры по радиусу вала приводит к ряду негативных эксплуатационных последствий. Различия в фазовом составе и уровне твердости между поверхностной, переходной и центральной зонами вызывают образование остаточных напряжений, возникающих вследствие неравномерного объёмного изменения металла при фазовых превращениях. С ростом градиента твёрдости указанное напряжённое состояние усиливается, повышая вероятность локальной концентрации напряжений. Наличие внутренних напряжений, в сочетании с уменьшенной пластичностью в периферийной зоне и сниженной прочностью в центральной части, создаёт риск растрескивания детали при эксплуатации, особенно при воздействии

переменных нагрузок или ударных воздействий.



5. Заключение

Разработанная методика позволяет прогнозировать распределение фаз и свойств по сечению крупногабаритных валов при непрерывном охлаждении. Использование двух независимых программных систем (JMatPro и OpenCalphad) обеспечивает высокую достоверность результатов. Это даёт возможность оптимизировать режимы закалки, повысить однородность структуры и улучшить эксплуатационные характеристики изделия.

Список использованной литературы:

1. P. V. Krot, S. V. Bobyr, N. V. Biba, M. O. Dedik, “*Modeling of Phase Transformations in the Rolls of the Special Alloy Steels During Quenching and Deep Cryogenic Treatment*”, 2016 (и последующие публикации автора)
2. C. Coroas et al., “Numerical Modeling for the Prediction of Microstructure, Mechanical Properties and Distortion in Steel Components”, 2023
3. И. Л. Исупова, П. В. Трусов, “Математическое моделирование фазовых превращений в сталях при термомеханической нагрузке”, 2013

4. Y. Bouissa, M. Jahazi и др., *“FEM modeling and experimental validation of quench-induced distortion and residual stress in large forged steel parts”*, 2020
5. Д. В. Константинов и др., *“Мультимасштабное моделирование структурно-фазовых превращений в стали при волочении”*, 2016
6. А. С. Созыкина, *“Моделирование превращений при аустенитизации и закалке и прогнозирование твёрдости высокохромистых сталей и чугунов...”* (диссертация, 2018) Y. Bouissa, M. Jahazi и др., *“FEM modeling and experimental validation of quench-induced distortion and residual stress in large forged steel parts”*, 2020
7. J. Li, Y. Xu, H. Wang и др., *“A Novel Model for Transformation-Induced Plasticity and Its Performance in Predicting Residual Stress in Quenched AISI 4140 Steel Cylinders”*, 2025