

УДК 621.791.011

## Прогнозирование структуры и свойств металла околошовной зоны высокопрочных трубных сталей с использованием машинного обучения

Хисматуллин Муратджан Рустемович<sup>(\*)</sup>

muratrust@mail.ru

SPIN-код: 7502-4735

Ефименко Любовь Айзиковна

lefimen@yandex.ru

SPIN-код: 6657-4608

РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

**Аннотация.** Представлены результаты разработки модели формирования структуры и свойств металла околошовного участка зоны термического влияния высокопрочных трубных сталей с использованием методов машинного обучения. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, показана структура и методология разработки модели. Продемонстрированы результаты сравнительного анализа эффективности методов машинного обучения для решения следующих задач: прогнозирование кинетики роста зерна аустенита, его распада, качественное и количественное прогнозирование структурно-фазового состава, твердости и ударной вязкости металла. Представлены возможности анализа влияния химического состава высокопрочных трубных сталей на прогнозируемые параметры и выбор оптимальных параметров термического цикла сварки с использованием разработанной модели.

**Ключевые слова:** свариваемость, машинное обучение, высокопрочные трубные стали, прогнозирование структуры, околошовный участок, искусственный интеллект

**Введение.** Технологический процесс изготовления труб для магистральных трубопроводов классов прочности К60–К70 подразумевает использование многоцикловой термомеханической обработки для формирования благоприятной мелкозернистой структуры основного металла, обеспечивающей повышенный уровень не только прочностных характеристик, но и показателей трещиностойкости. Однако влияние сварочного нагрева, вызывающего сопутствующие полиморфные превращения, в первую очередь в металле околошовного участка (ОШУ) зоны термического влияния (ЗТВ), нивелирует результаты предыдущей обработки. В результате металл ОШУ ЗТВ зачастую приобретает грубую микроструктуру, что приводит к значительному ухудшению механических свойств, в первую очередь ударной вязкости. В связи с этим, актуальной задачей является выявление и описание комплексных зависимостей между химическим составом высокопрочных трубных сталей, параметрами термического цикла сварки (ТЦС), микроструктурой и свойствами металла ОШУ ЗТВ.

**Методы и материалы; результаты.** Модель была обучена на основании результатов экспериментальных исследований высокопрочных трубных сталей: изучения кинетики роста зерна аустенита с использованием метода фиксации структур в воду [1], определения кинетики распада аустенита с исполь-

зованием дилатометрического метода [2], металлографического исследования структурно-фазового состава образцов после имитации ТЦС, определения твердости и ударной вязкости после имитации ТЦС. Схема блока структурообразования модели представлена на рисунке. Блок структурообразования на основании аналогичной схемы был ранее разработан с использованием ПО MATLAB и искусственных нейронных сетей (ИНС) [3]. В рамках данной работы блок был переработан с использованием языка программирования Python, в результате чего каждый из подблоков использует один из методов машинного обучения (показавший наибольшую эффективность для решения соответствующей задачи): ИНС, метод случайных лесов (Random Forest), метод k-ближайших соседей (kNN), метод опорных векторов (SVM). Для повышения точности прогнозирования была использована оптимизация гиперпараметров [4] каждого из методов машинного обучения.

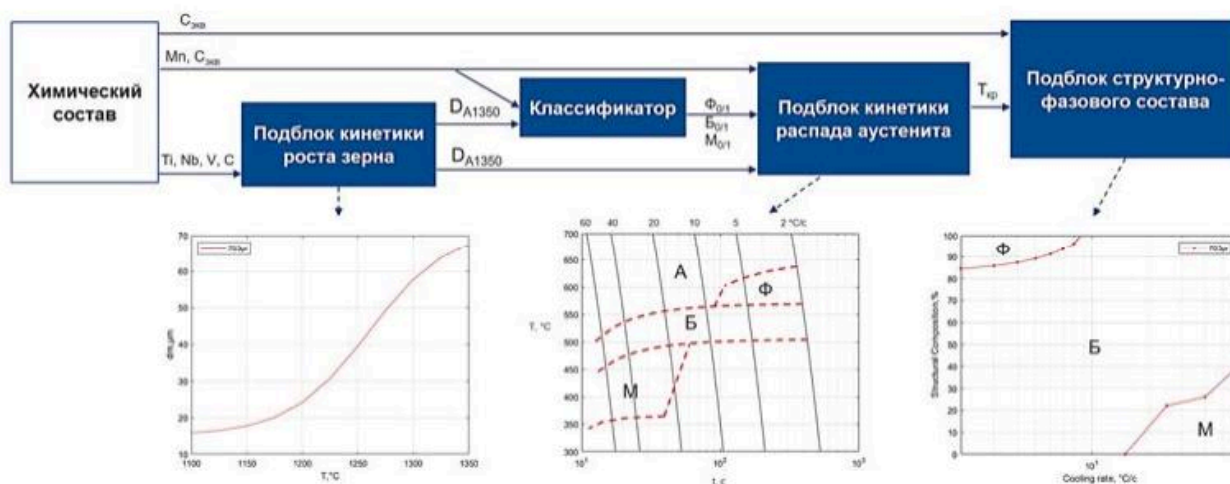


Схема блока структурообразования

Погрешность прогнозирования каждого из подблоков оценена экспериментально путем проверки на химическом составе стали, экспериментальные данные по которой не участвовали в обучении соответствующего подблока, и составила не более 10 %. Переход к языку программирования Python позволил повысить точность прогнозирования и подробно проанализировать влияние легирующих элементов как индивидуально с использованием вектора Шепли [5], так и совместно с использованием трехкомпонентных диаграмм.

**Заключение.** Разработанная модель позволяет выбрать оптимальные параметры ТЦС высокопрочных трубных сталей для обеспечения заданного уровня механических свойств (ударной вязкости и твердости), а также формирования благоприятного структурно-фазового состава, что является важной составляющей свариваемости. Использование моделей на основе машинного обучения позволило выявить комплексные нелинейные зависимости, лежащие в основе структурно-фазовых превращений металла ОШУ ЗТВ высокопрочных трубных сталей.

**Список источников**

- [1] Ефименко Л.А., Прыгаев А.К., Елагина О.Ю. *Металловедение и термическая обработка сварных соединений*. Москва, Логос, 2007, 456 с.
- [2] Шоршоров М.Х. *Металловедение сварки стали и сплавов титана*. Москва, Наука, 1965, 336 с.
- [3] Хисматуллин М.Р., Ефименко Л.А., Рамусь А.А. Разработка модели структурообразования металла зоны термического влияния высокопрочных трубных сталей. *Металлург*, 2025, № 3, с. 71–76. [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2025\\_3\\_71](https://doi.org/10.52351/00260827_2025_3_71)
- [4] *Гиперпараметрический поиск и оптимизация моделей*. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/754402/> (дата обращения 15.01.2026).
- [5] SHAP (SHapley Additive exPlanations) documentation. URL: <https://shap.readthedocs.io/en/latest/#> (дата обращения 15.01.2026).