

УДК 378(063)

ДОЭВТЕКТОИДНЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ КАК ОСНОВА ИИ-ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ершеев Нурлан Елубекович, студент, направление подготовки 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: erscheev1801@yandex.ru

Научный руководитель: **Крылова Светлана Евгеньевна**, доктор технических наук, доцент, профессор научно-образовательного центра новых материалов и перспективных технологий, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: krilova27@yandex.ru

Аннотация. Современные вызовы в области машиностроения и материаловедения требуют принципиально новых решений для прогнозирования характеристик конструкционных материалов. Данное исследование посвящено изучению возможностей компьютерного анализа микроструктур легированных сталей с применением передовых технологий искусственного интеллекта. В фокусе работы – доэвтектоидные стали марок 18ХГТ, 30ХМА и 40ХН, чьи свойства во многом определяются особенностями термической обработки. Для решения поставленных задач использованы современные алгоритмы глубокого обучения, в частности сверточные нейронные сети, способные с высокой точностью идентифицировать структурные составляющие металлов. Особое внимание уделено методам расширения и обработки исходных данных микроструктурных исследований. Разработанный подход позволяет автоматизировать процесс анализа фазового состава, значительно сокращая время исследований и минимизируя субъективный фактор. Предложенная методика открывает новые возможности для оптимизации технологических процессов обработки сталей и может быть интегрирована в системы контроля качества промышленных предприятий. В перспективе планируется расширение базы исследуемых материалов и совершенствование алгоритмов для более сложных случаев структурного анализа.

Ключевые слова: металловедение, конструкционная легированная сталь, термическая обработка, микроструктура, сверточные нейронные сети.

Для цитирования: Ершеев Н. Е. Доэвтектоидные легированные стали как основа ИИ-прогнозирования свойств конструкционных материалов // Шаг в науку. – 2025. – № 4. – С. 22–26.

HYPOEUTECTOID ALLOYED STEELS AS A BASIS FOR AI-PREDICTION OF PROPERTIES OF STRUCTURAL MATERIALS

Ersheev Nurlan Elubekovich, student, training program 22.03.01 Materials Science and Technology of Materials, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: erscheev1801@yandex.ru

Research advisor: **Krylova Svetlana Evgenyevna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Scientific and Educational Center for New Materials and Advanced Technologies, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: krilova27@yandex.ru

Abstract. Modern challenges in mechanical engineering and materials science demand innovative approaches for predicting the properties of structural materials. This study explores the potential of computer-assisted microstructure analysis in alloy steels using advanced artificial intelligence technologies. The research focuses on pre-eutectoid steel grades 18KhGT, 30KhMA, and 40KhN, whose properties are largely determined by heat treatment parameters. The investigation employs state-of-the-art deep learning algorithms, particularly convolutional neural networks capable of high-precision identification of metallic microstructural components. Special emphasis is placed on data augmentation and processing techniques for microstructural research. The developed approach enables automation of phase composition analysis, significantly reducing research time and minimizing subjective factors in evaluation. The



proposed methodology creates new opportunities for optimizing steel processing technologies and could be integrated into industrial quality control systems. Future research directions include expanding the database of analyzed materials and refining algorithms for more complex cases of structural analysis.

Key words: metal science, structural alloy steels, heat treatment, microstructure, convolutional neural networks.

Cite as: Ersheev, N. E. (2025) [Hypoeutectoid alloyed steels as a basis for AI-prediction of properties of structural materials]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 4, pp. 22–26.

Актуальностью управления структурообразованием конструкционных легированных сталей является приоритетная востребованность в различных отраслях промышленности, необходимость повышения качества и долговечности конструкций, которые подвергаются значительным механическим и термическим нагрузкам, в условиях постоянно растущих требований к надежности и безопасности материалов [2].

В общем объеме машиностроительного производства наибольшую часть составляют конструкционные стали. Эти стали должны демонстрировать отличные прочностные и пластические характеристики. В данной работе рассматриваются стали дозвтектоидной группы, а именно: 18ХГТ, 30ХМА, 40ХН. Изделия, изготавливаемые из этих материалов, как правило, относятся к ответственным, так как в зависимости от легирующих элементов они обретают необходимые

физико-механические свойства: сталь марки 18ХГТ обладает вязкой сердцевиной и высокой поверхностной твердостью, что важно для валов; 30ХМА имеет свойство сохранять свои характеристики при температурах 450–500 °С, благодаря чему материалу нашли применение в деталях, работающих в диапазоне этих температур, например, паропроводы; сталь 40ХН из-за стойкости к вибрации и динамическим нагрузкам применяется для изготовления валов, шатунов, зубчатых колес¹ [4].

В состоянии поставки для всей группы дозвтектоидных конструкционных сталей характерна феррито-перлитная структура. Для стали 18ХГТ характерен пластинчатый перлит, указанный на рисунке 1а, а в структуре стали 40ХН присутствуют тугоплавкие карбидные включения $Cr_{23}C_6$, рассмотренные на рисунке 1в.

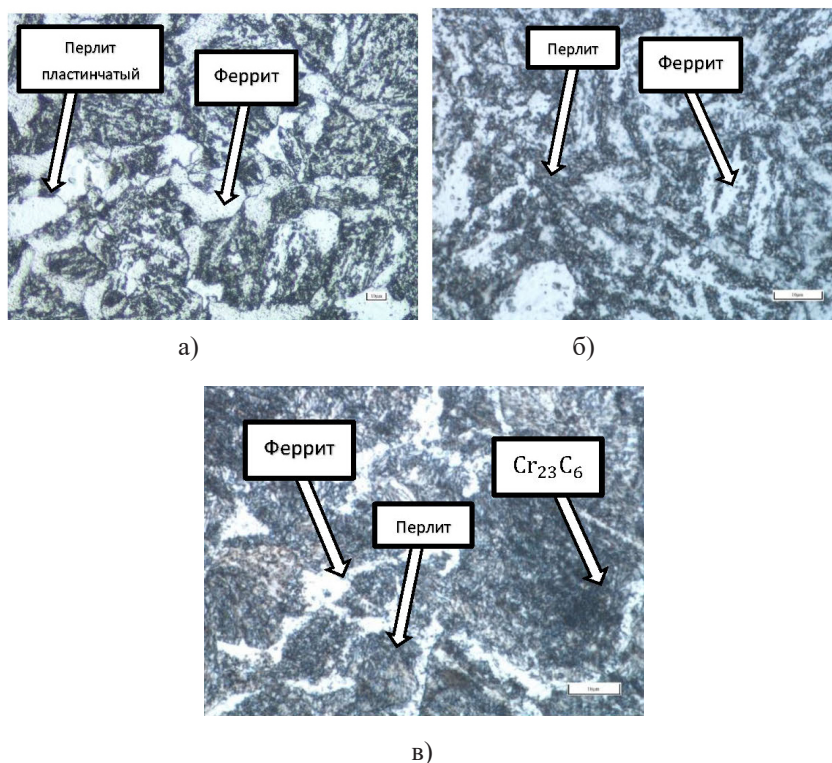


Рисунок 1. Структура выбранной группы сплавов в состоянии поставки, а – 18ХГТ, б – 30ХМА, в – 40ХН
Источник: разработано автором

¹ Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник. – М.: Машиностроение, 1980 – 493 с.

В настоящее время остро встал вопрос импортозамещения комплектующих и ремонта зарубежного оборудования, применяемого в различных сферах промышленности. В ходе решения этих задач обязательным этапом являются реверс-инжиниринговые исследования и металловедение, как основополагающая наука в машиностроении, принимает первостепенное участие в этом процессе [2]. Всеми известный анализ химического состава материала не дает полную картину для понимания эксплуатационных требований. Анализ структуры сталей и сплавов является неотъемлемой частью реверс-инжиниринговых работ и позволяет подобрать аналог материала с точки зрения комплекса «состав – структура – свойства» и разработать технологический процесс, обеспечивающий необходимые механические и физические свойства изделия.

Сегодняшние возможности систем искусственного интеллекта позволяют минимизировать затраты ручного труда при анализе микроструктуры сталей, автоматизировать процесс, снизить влияние человеческого фактора на анализ структуры посредством обучения нейронных сетей².

Задачи, которые решают нейронные сети в материаловедении, принято делить на 2 группы:

- анализ изображений микроструктур, например границ объектов, что позволяет распознавать границы зерен; выделение самих объектов дает представление о фазовом составе, а также определяет виды

излома. Таким образом решаются задачи классификации и сегментации;

- анализ баз данных (не изображений), позволяющих установить взаимосвязь между структурой, свойствами и составом, прогнозировать эти характеристики и тем самым решать задачи оптимизации³.

Для того, чтобы понимать различия между классификацией и сегментацией, необходимо ввести определения этих понятий. *Классификация изображений* – это задача в компьютерном зрении, которая заключается в анализе и классификации набора изображений по заранее определённым категориям, то есть классам. Для этого изображениям присваиваются метки, которые отражают, к каким классам относятся их содержимое. *Сегментация изображений* – это задача в области компьютерного зрения, заключающаяся в разделении изображения на несколько различных сегментов, каждый из которых соответствует определённому объекту – будь то человек, здание, дерево или любой другой объект [4].

Существуют различные виды сегментации, изображенные на рисунке 2. Для материаловедения наиболее близки задачи семантической сегментации, рассмотренные на рисунке 2б, когда идет разделение изображения на семантические классы, что упраздняет необходимость выделения отдельных объектов внутри одной группы, например, как это делает паноптическая сегментация, рассмотренная на рисунке 2г.

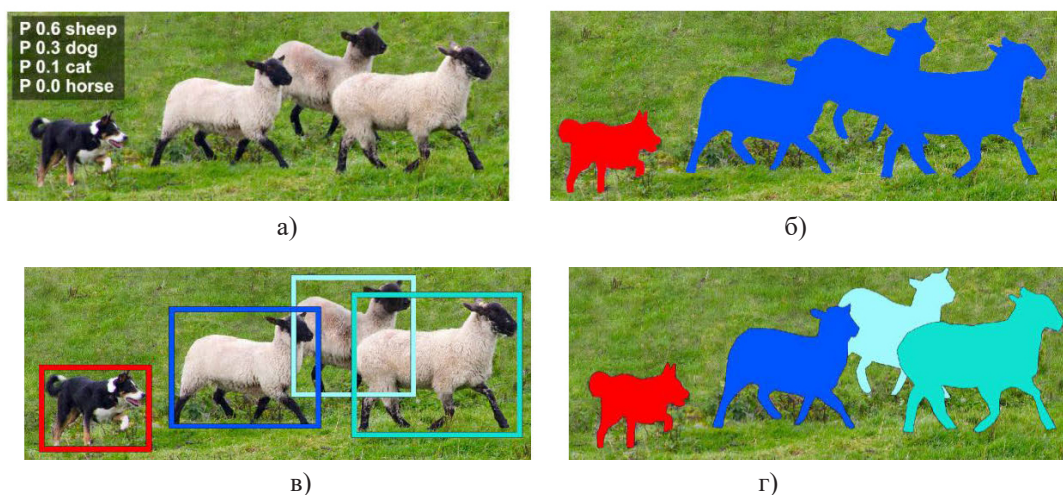


Рисунок 2. Пример работы различных видов сегментации, а – исходное изображение, б – семантическая сегментация, в – экземплярная сегментация, г – паноптическая сегментация

Источник: взято из книги Tedrake R. *Robotic Manipulation* – URL: https://manipulation.csail.mit.edu/data/coco_instance_segmentation.jpeg (дата обращения: 15.05.2025)

² Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении: учеб. пособие / А. Г. Тягунов [и др.] – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021 – 68 с.

³ Там же.

Внедрение нейронных сетей в сферу металловедения традиционно включает последовательную реализацию шести ключевых этапов [6]:

1. Определение проблемы.
2. Составление набора данных.
3. Выбор модели.
4. Обучение модели.
5. Оценка модели.
6. Интеграция с существующим рабочим процессом.

На данный момент в работе реализованы первые 3 этапа.

Анализируя этапы внедрения нейронных сетей в материаловедение, стоит заострить внимание на 2 этапе «Составление набора данных». Данный этап является самым длительным и трудоемким в случае отсутствия готового набора данных (базы данных). В области металловедения для решения данной проблемы предоставляется определенный выбор: использовать изображения, имеющиеся в открытом доступе, например, есть проект Кембриджского университета, на сайте которого можно взять большое количество изображений микроструктур, но данные изображения сложно использовать для обучения нейросети, потому что в базе приведены разные металлы и сплавы и для одного и того же материала может быть несколько изображений [3]. Таким образом, оптимальным вари-

антом является наличие своего собственного набора данных для решения индивидуальной задачи, так как состав обучающей базы коренным образом влияет на качество распознавания объекта микроструктуры. Однако подготовка данных влечет за собой увеличение количества исходных изображений, что является трудоемким процессом, включающим подготовку самого шлифа, операции химического травления, работу на микроскопе, разметку фаз. Вспомогательным процессом увеличения выборки изображений структуры для пополнения базы данных является *аугментация* [5].

Аугментация изображений – это процесс создания новых обучающих примеров из существующих, для чего исходное изображение слегка изменяют. Аугментация позволяет расширить базу данных геометрическим преобразованием и преобразованием на уровне пикселей. Исходное изображение можно повернуть на произвольный или определенный угол, отразить относительно оси, сдвинуть одну часть относительно другой, масштабировать, вырезать определенные части. Преобразование на уровне пикселей – это зашумление, изменение яркости, контрастности, применение фильтров и т. д. Каждый из методов между собой можно совмещать и таким образом получать новые изображения для обучения [1]. Приведен пример аугментации изображения микроструктуры стали 30ХМА на рисунке 3.

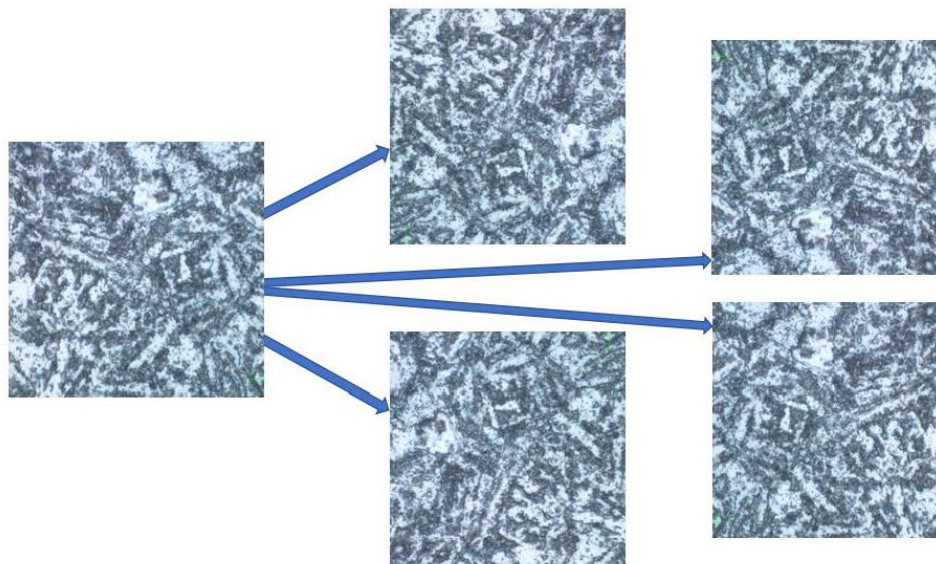


Рисунок 3. Пример аугментации изображения микроструктуры стали 30ХМА

Источник: разработано автором

В основе машинного зрения и анализа изображений всегда присутствует обучение с «учителем»,

то есть нейросеть изначально не знает, как выглядит феррит, перлит или другие фазы стали, пока сам «учи-

тель» не укажет на них. Поэтому на вход нейронной сети с обучающим множеством подается правильный ответ распознавания, далее сеть корректирует свои настройки, исходя из разницы фактического ответа,

с тем, что дал «учитель» [4]. В связи с этим необходимо иметь предварительно размеченные изображения, показанные на рисунке 4.

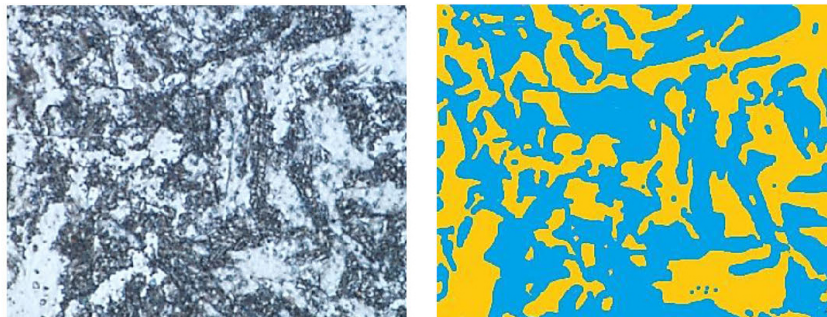


Рисунок 4. Размеченная структура, синий – перлит; желтый – феррит

Источник: разработано автором

Третьим этапом цепочки является «Выбор модели». Для решений задач обработки структуры подходит использование сверточных нейронных сетей, так как они имеют специальную архитектуру, которая нацелена на эффективное распознавание изображений. При обучении сеть самостоятельно формирует признаки, по которым она самостоятельно классифицирует изображение целиком или по отдельным областям. Видов сверточных сетей большое количе-

ство и с каждым днем создаются новые, более совершенные для каждой из областей [7].

Применение искусственного интеллекта в области металловедения и машиностроения только начинает свой путь и истинный потенциал внедрения нейросетей еще неизвестен. Искусственный интеллект поможет улучшить качество и скорость анализа микроструктуры, что, в свою очередь, увеличит производительность предприятий и качество выпускаемых изделий.

Литература

1. Афанасьев Д. Ю. Применение аугментации для улучшения качества классификации // StudNet. – 2022. – № 4. – С. 2397–2410.
2. Драпеза Е. В., Андреева Е. С. Анализ актуальных для российской Федерации направлений разработки импортозамещающих технологий // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – № 12–1(94). – С. 128–132. – <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2022-12-1-128-132>.
3. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
4. Соболева Н. Н. Применение нейронных сетей для анализа микроструктуры металла // Сборник статей XXII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых – Екатеринбург. – 2023. – С. 407–411.
5. Agrawal A., Choudhary A. Perspective. Materials Informatics and Big Data: Realization of the «Fourth Paradigm» of Science in Materials Science. APL Materials. – 2016. – Vol. 4, No 5. – P. 053208.
6. DeCost B. L. et al. UHCSDB: UltraHigh Carbon Steel Micrograph Database: Tools for Exploring Large Heterogeneous Microstructure Datasets. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2017. – Vol. 6. – P. 197–205.
7. Soboleva N., Mushnikov A. Improving the accuracy of semantic segmentation of carbides in the microstructure of composite coatings by the neural network. *Materials Today Communications*, Vol. 38. – <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108276>.

Статья поступила в редакцию: 15.05.2025; принята в печать: 13.10.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.