


УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и инновационной работе. д-р техн. наук, профессор

 О.Н. Тулупов

› ноября 2020 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу БАТИНА СЕРГЕЯ ЕВГЕНЬЕВИЧА «Модель комплексного оценивания прочностных свойств металлических материалов на основе системного анализа зеренно-фазовой структуры», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические и информационные системы)

#### *1. Актуальность темы диссертации*

Диссертационная работа С.Е. Батина посвящена актуальной теме - разработке модели оценивания прочностных свойств металлов и сплавов путем анализа их зеренно-фазовой структуры. Во многих случаях это позволит обеспечить повышенные механические свойства, сэкономить количество металлических материалов, снизить их стоимость. Этого можно добиться, применяя наукоемкие подходы к проектированию микроструктуры таких материалов.

Для решения указанной задачи (применение наукоемких подходов) необходимо не только качественное, но и количественное описание связи микроструктуры и макросвойств материалов. Сложность количественного описания данной связи состоит в том, что они определяются видом дефектной микроструктуры в широком диапазоне масштабов: от размеров совокупности из нескольких тысяч зерен, имеющих размеры порядка десятков микрометров для мелкозернистых материалов, до характерных масштабов дислокационной структуры, имеющей порядок десятков нанометров. Существующая инструментальная база, применяемая для идентификации микроструктуры, как правило, не позволяет получить достаточно полные данные для структуры в столь широком диапазоне масштабов. Чаще всего проводится лишь исследование микроструктуры на уровне зерна. При этом наблюдается существенная неопределенность исходных данных в задаче системного анализа связи микроструктуры и макроскопических свойств различных материалов.

Ввиду упомянутой выше неопределенности данных при идентификации параметров микроструктуры, ключевой становится необходимость учета всей доступной информации о характеристиках материала на различных масштабных уровнях и проведение системного анализа этих данных. Хорошим источником данных могут служить фотографии микрошлифов, широко используемые при металловедческом анализе. Как правило, для качественного объяснения наблюдаемых макроскопических прочностных свойств такие фотографии подвергаются экспертному анализу, при котором делаются выводы о некоторых характерных размерах, например среднем размере зерен, долях фаз, а также морфологии зерен и включений, наличии текстуры материала. Таким образом, возникает возможность провести системный анализ связи характеристик микроструктуры металлического материала с измеряемыми в макроскопическом эксперименте его прочностными свойствами, что в настоящее время является актуальной задачей.

## ***2. Степень новизны результатов, научных положений, которые вынесены на защиту***

Вынесенные на защиту основные научные положения диссертационной работы обладают несомненной новизной.

Разработаны научные основы повышения эффективности процессов создания функциональных металлических материалов за счет применения моделей и алгоритмов, позволяющих проводить комплексное оценивание прочностных свойств металлического материала на основе системного анализа характеристик его микроструктуры.

Предложена оригинальная модель оценивания прочностных свойств материала, отличающаяся использованием нечетких отношений для установления причинно-следственных связей между параметрами микроструктуры и макросвойствами, что дает возможность более эффективно проектировать функциональные материалы.

Разработан алгоритм определения представительности цифровых данных о микроструктуре для оценки макроскопических свойств материала, отличающийся способом генерации модельной объемной структуры, заданием сечения сгенерированной зеренной структуры плоскостью и вычислением размеров представительного изображения на основе статистического критерия.

Разработана методика определения минимального числа экспериментов и значимых параметров при проведении оценки прочностных свойств металлических материалов в рамках новой модели комплексного оценивания, позволяющая получать оценки с допустимым значением погрешности на основе меньшего числа экспериментов.

Применен алгоритм исследования стохастической устойчивости к новой модели комплексного оценивания макросвойств рассматриваемого металлического материала по отношению к возмущению характеристик микроструктуры.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых моделей и алгоритмов, позволяющих проводить оценку физико-механических свойств материалов на основе минимальных данных о его зеренно-фазовой структуре и проводить анализ достоверности полученной оценки.

В целом, новизна вынесенных на защиту результатов, научных положений диссертации достаточно высокая.

### ***3. Обоснованность и достоверность основных результатов диссертации***

Достоверность результатов исследования определяется корректным использованием современных математических методов, широкой успешной практикой применения методов теории нечетких множеств в других предметных областях, верификацией полученных результатов в экспериментах на реальных данных.

### ***4. Научная и практическая значимость результатов и основных научных положений диссертации***

*Научная значимость* работы заключается в разработке новых моделей и алгоритмов, позволяющих проводить оценку физико-механических свойств материалов на основе минимальных данных о его зеренно-фазовой структуре и проводить анализ достоверности полученной оценки. Теоретическую и методологическую основу исследований составляют положения системного анализа, теории нечетких множеств, теории вероятностей и математической статистики, методы оптимизации и комплексного оценивания.

*Практическая значимость* заключается в применении разработанных моделей и алгоритмов при проектировании новых материалов, что упрощает процесс, позволяет уменьшить число натуральных экспериментов и снижает стоимость такого проектирования.

Модель оценивания комплексных свойств материалов реализована в виде программы для ЭВМ «Нечеткий определитель комплексных свойств материалов (НОКСМ)» (Свидетельство о государственной регистрации № 2018661275 от 04.09.2018, Бюл. № 9).

Предложенные модели и алгоритмы внедрены в производственную и исследовательскую практики предприятия ООО «Research and Development MGTU» (г. Магнитогорск), что подтверждается актом внедрения от 20.11.2019. Применение разработанных моделей и методик позволяет сократить затраты на 7 % за счет обоснованного уменьшения числа экспериментов.

Разработанные в диссертации модели и алгоритмы также используются в учебном процессе при реализации образовательных программ бакалавриата и магистратуры по направлению «Информационные системы и технологии» ПНИПУ (г. Пермь).

### ***5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации***

На основе проведенного системного анализа выбран набор характеристик микроструктуры, необходимый для комплексной оценки требуемых прочностных свойств функциональных металлических материалов (ФММ). Разработана модель комплексного оценивания свойств ФММ на основе системного анализа его микроструктуры, позволяющая на основе аппарата теории нечетких множеств выявлять системные связи между характеристиками микроструктуры и макросвойствами исследуемого материала.

Разработан алгоритм определения размеров представительного изображения микроструктуры материала. Показано, что для исследуемой группы сталей представительным можно считать размер фотографии микрошлифа, превосходящий средний радиус зерна в объемной структуре в 42 раза, где под средним радиусом зерна понимается радиус шара с объемом, равным среднему объему зерен в трехмерной структуре. Сделан вывод о представительности фотографий микроструктуры, полученных с увеличением 250 крат.

Предложены подходы по определению значимых характеристик микроструктуры и минимального количества экспериментов при изучении эксплуатационных свойств материала, что позволяет сократить количество натуральных экспериментов при проектировании новых ФММ. Показано, например, что при создании технологии производства арматурной стали с использованием термообработки для оценки набора прочностных свойств с заданной точностью достаточно измерять 6 существенных параметров микроструктуры и провести не менее 6 экспериментов для различных скоростей охлаждения стали.

Показано на примере арматурной стали, что модель комплексного оценивания является 0,95-устойчивой в стохастическом смысле при возмущениях входных параметров на уровне 0,05 для временного сопротивления и 0,90-устойчивой для микротвердости при том же наборе параметров и может быть использована в реальных условиях создания новых ФММ.

Разработанная модель комплексного оценивания свойств ФММ и предложенные алгоритмы легли в основу математического обеспечения программы для ЭВМ «НОКСМ», внедрение которой в производственную и исследовательскую практики ООО «Research and Development MGTU» позволило сократить затраты на разработку новых материалов на 7 % за счет обоснованного уменьшения числа экспериментов, примерно на 13%.

Полученные результаты и выводы, сделанные автором в диссертационном исследовании, разработанные модели и алгоритмы могут найти применение при проектировании новых материалов, что упрощает процесс, позволит уменьшить число натуральных экспериментов и снизить стоимость проектирования.

## ***6. Полнота опубликования основных положений и результатов диссертации***

*Апробация результатов диссертации.* Работа по теме диссертации выполнялась в рамках международного проекта (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58617X0055) по программе «Горизонт 2020» на 2016-2020 гг.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-методических семинарах кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ПНИПУ; XXIV и XXV Всероссийских школах-конференциях молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2015, 2016); XIV Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Управление большими системами» УБС-2017 (г. Пермь, 2017); Международной научно-технической молодежной конференции «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения» (г. Томск, 2018); VIII и IX Всероссийских научных конференциях с международным участием «Механика

композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (г. Москва, 2018, 2019); Международной научно-технической конференции «Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления» (г. Пермь, 2019).

*Публикации.* Основное содержание работы опубликовано в 17 печатных работах, из них четыре статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, в том числе три статьи индексированы в международных базах цитирования Scopus и WoS; получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и один патент на изобретение.

### ***7. Соответствие темы диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите***

Тема диссертационной работы С.И. Батина «Модель комплексного оценивания прочностных свойств металлических материалов на основе системного анализа зеренно-фазовой структуры» соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические и информационные системы), а именно областям исследования п. 5 (Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации), п. 11 (Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем), п. 12 (Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации).

### ***8. Соответствие научной квалификации соискателя научной степени, на которую он претендует***

Совокупность научных и прикладных результатов диссертационной работы свидетельствует о высокой научной квалификации автора, соответствующей ученой степени кандидата технических наук.

### ***9. Замечания по диссертации***

1. В научной новизне отсутствует количественная оценка представленных положений, что было бы более чем уместно.

2. На стр. 11 автореферата и на стр. 73-83 диссертации приведено описание алгоритма оценки размеров представительного изображения зеренной структуры материала, состоящего из трех основных пунктов. Необходимо дать пояснение этим пунктом, - в частности, объяснить почему принято допущение о том, что зерна в структуре материала имеют эллипсоидную форму, а не форму каких-либо других геометрических фигур?

3. В чем физический смысл статистического критерия  $V_{\alpha}(1)$  – выборочного среднеквадратического отклонения. Требуется пояснение к табл. 1 автореферата или табл. 3.2, приведенной в диссертации.

4. Необходимо пояснить данные, приведенные в табл. 2 автореферата. Почему выбраны именно указанные в таблице параметры? Каким образом связаны средний

размер зерна и скорость охлаждения металла – насколько логичны данные, приведенные в таблице?

### **10. Оценка оформления диссертации**

Рукопись диссертации и автореферат созданы с использованием современных возможностей компьютерной техники, качество их оформления соответствует требованиям ВАК РФ и заслуживает высокой оценки.

### **11. Заключение**

Проведенный анализ диссертации и автореферата С.И. Батина позволяет сделать следующее заключение.

1. Диссертационная работа посвящена актуальной работе, выполнена на высоком научном уровне, имеет большое научное и практическое значение. Количественное оценивание соответствия структуры и свойств металлоизделий обуславливает экономию металла в народном хозяйстве, снижает их стоимость.

2. Научные положения и выводы, изложенные в работе, аргументированы теоретически и подтверждены экспериментально. Основные положения, изложенные в диссертации, научные положения, технические решения и выводы оригинальны и являются результатом самостоятельной работы автора.

3. Диссертационная работа С.И. Батина «Модель комплексного оценивания прочностных свойств металлических материалов на основе системного анализа зеренно-фазовой структуры» по уровню научной и практической значимости отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (технические и информационные системы).

4. Диссертационная работа является законченной квалификационной научно-исследовательской работой, соответствует требованиям п. 9 «Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, так как содержит новые научно-обоснованные результаты, обеспечившие решение важной прикладной задачи комплексного оценивания прочностных свойств металлических материалов путем анализа зеренно-фазовой структуры.

Ученую степень кандидата технических наук С.И. Батину следует присудить:

- за анализ современных подходов к определению свойств функциональных металлических материалов (ФММ) на основе данных о его микроструктуре;

- за выявление основных зависимостей между характеристиками микроструктуры и значениями механических макроскопических свойств материалов;

- за выбор набор характеристик микроструктуры, необходимый для комплексной оценки требуемых прочностных свойств;

- за разработку модели комплексного оценивания свойств ФММ на основе системного анализа его микроструктуры, позволяющей на основе аппарата теории нечетких множеств выявлять системные связи между характеристиками микроструктуры и макросвойствами исследуемого материала;

- за разработку алгоритма определения размеров представительного изображения микроструктуры материала, выполнение оценки размеров представительного изображения для исследуемого класса ФММ;
- за разработку подходов к определению значимых характеристик микроструктуры и определению минимального количества экспериментов при определении эксплуатационных свойств материала, сокращающих количество натуральных экспериментов при проектировании новых ФММ;
- за проведение исследования стохастической устойчивости модели комплексного оценивания.

Полученные результаты отличаются от ранее известных тем, что получено количественное оценивание вместо качественного оценивания формирования свойств металлических материалов в зависимости от структурного состояния материала.

Диссертация и отзыв на нее обсуждены на заседании кафедры литейных процессов и материаловедения, протокол № ... от 18 ноября 2020 года.

#### Отзыв составлен:

Доктор технических наук (05.16.01 –  
Металловедение и термическая обработка  
металлов и сплавов), профессор кафедры  
литейных процессов и материаловедения  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
доцент,  
e-mail: [absychkov@mail.ru](mailto:absychkov@mail.ru);  
тел: 8-919-348-66-84

  
Сычков Александр Борисович

18.11.2020 г.

Доктор технических наук (05.16.01 –  
Металловедение и термическая обработка  
металлов и сплавов), профессор кафедры  
литейных процессов и материаловедения  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
доцент,  
e-mail: [korceva1948@mail.ru](mailto:korceva1948@mail.ru);  
тел: 8-909-095-18-61

  
Корцева Наталья Васильевна

18.11.2020 г.

455000, г. Магнитогорск, Челябинской обл., пр. Ленина, 38, каф. «Литейных процессов и материаловедения», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». e-mail: [mgtu@magtu.ru](mailto:mgtu@magtu.ru).



**Я ЗАВЕРЯЮ**  
за делопроизводства  
У им. Г.И. Носова  
  
Д.Г. Семенова