

**Письменный отзыв официального рецензента
на диссертационную работу Попова Федора Евгеньевича
на тему «Разработка и исследование технологии получения дисперсно-армированной стали для использования в ядерной
энергетике»
на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D07202 – Metallургия черных и цветных металлов.**

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам: 1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы); 2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы); 3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).	Тематика диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, утвержденных Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан по направлению «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции». Диссертация выполнена в рамках проекта, финансируемого из государственного бюджета ИРН АР09259982 «Разработка и исследование технологии получения и улучшения оксидно-дисперсионной упрочненной стали для использования в ядерной энергетике» (договор № 179/36-21-23 от 15 апреля 2021 года).
2	Важность для науки	Работа вносит /не вносит существенный вклад в науку, а ее важность хорошо раскрыта /не раскрыта.	Диссертационная работа вносит значимый вклад в развитие материаловедения и технологий создания перспективных конструкционных материалов для ядерной энергетики. Автором научно обоснован и экспериментально реализован новый технологический подход к получению дисперсно-упрочненных оксидами (ODS) сталей с использованием вакуумной индукционной плавки, что является эффективной альтернативой сложным и дорогостоящим методам порошковой металлургии. Важность работы заключается в изучении эндогенного

			<p>формирования упрочняющих частиц оксида иттрия непосредственно в стальном расплаве.</p> <p>Впервые получена база данных реологических свойств нового материала в широком диапазоне температур и скоростей деформации. Установлены закономерности эволюции литой структуры нового материала при интенсивной пластической деформации методом радиально-сдвиговой прокатки, доказана возможность формирования ультрамелкозернистой структуры с высокими механическими характеристиками и устранения литейных дефектов.</p>
3	Принцип самостоятельности	<p>Уровень самостоятельности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) высокий; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет 	<p>Личный вклад автора заключается в непосредственном выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, представленных в диссертации. Докторантом самостоятельно проведены: серия экспериментальных плавов по отработке технологии эндогенного введения оксида иттрия методом вакуумной индукционной плавки; компьютерное моделирование процессов деформации в программном комплексе Deform-3D; экспериментальная прокатка слитков на стане радиально-сдвиговой прокатки и анализ эволюции микроструктуры с использованием методов электронной микроскопии (FIB/SEM, TEM, EBSD, EDS).</p> <p>Высокий уровень самостоятельности также подтверждается наличием 8 научных публикаций, в том числе 5 статей в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.</p>
4	Принцип внутреннего единства	<p>4.1 Обоснование актуальности диссертации:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) обоснована; 2) частично обоснована; 3) не обоснована. 	<p>Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы создания конструкционных материалов для ядерных реакторов нового поколения (Gen-IV) и малых модульных реакторов, способных работать в экстремальных условиях.</p> <p>Существующие стали имеют недостатки (радиационное набухание, наведенная радиоактивность), а существующие технологии получения более стойких ODS-сталей (порошковая металлургия) отличаются высокой стоимостью, сложностью технологического процесса и проблемами масштабирования.</p>

		Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки альтернативной, экономически эффективной технологии получения дисперсно-армированной стали методами плавки с последующей деформационной обработкой для обеспечения потребностей атомной энергетики.
	4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) отражает; 2) частично отражает; 3) не отражает.	Диссертация содержит результаты теоретического анализа, компьютерного моделирования и экспериментальных исследований по разработке технологии получения ODS-стали методом вакуумной индукционной плавки. Подробно описаны процессы эндогенного формирования оксидных включений, изучение реологических свойств полученного материала, компьютерное моделирование процессов обработки давлением и экспериментальная апробация метода радиально-сдвиговой прокатки для формирования ультрамелкозернистой структуры. Материал логично раскрывает тему «Разработка и исследование технологии получения дисперсно-армированной стали для использования в ядерной энергетике».
	4.3 Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) соответствуют; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.	Цель и задачи исследований соответствуют теме диссертации. Поставленные задачи (изучение методов введения оксида иттрия, исследование реологии, компьютерное моделирование, изучение влияния радиально-сдвиговой прокатки на структуру и свойства) являются обоснованными и направлены на последовательное достижение цели.
	4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) полностью взаимосвязаны 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует.	Структура диссертации выстроена последовательно и логично: от анализа современного состояния проблемы и теоретического обоснования к разработке технологии выплавки, изучению реологических свойств полученного материала и компьютерному моделированию процессов его обработки. Завершается работа экспериментальной реализацией выбранных режимов деформации и подтверждением достижения целевых характеристик материала. Каждый этап исследования закономерно вытекает из результатов предыдущего, обеспечивая внутреннее единство и целостность работы.

		<p>4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) критический анализ есть; 2) анализ частичный; 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов; 4) анализ отсутствует. 	<p>Автором проведен сравнительный анализ существующих методов производства ODS-сталей (порошковая металлургия, аддитивные технологии), выявлены их недостатки и обоснована необходимость применения металлургических методов плавки. В ходе экспериментальной части автором критически оценены и сравнены 5 различных способов введения оксида иттрия в расплав, что позволило аргументированно выбрать наиболее эффективный метод (окисление металлического иттрия при плавке без вакуума). Докторант не побоялся включить в защищаемые положения пункт о установленной в ходе экспериментов невозможности прямого введения дисперсных частиц оксида иттрия в расплав экзогенным путём.</p>
5	Принцип научной новизны	<p>5.1 Научные результаты и положения являются новыми?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%) 	<p>Научные результаты и выносимые на защиту положения являются полностью новыми, в частности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – экспериментально установлена низкая эффективность прямого введения экзогенных частиц оксида иттрия в расплав стали 12X13 вследствие высокого угла смачивания (более 120°) и значительной разности плотностей ; – разработана новая технология эндогенного формирования упрочняющих наночастиц Y₂O₃ непосредственно в процессе плавки за счет окисления металлического иттрия, определены оптимальные технологические параметры (температура 1550±10°С, время выдержки 1 мин, содержание Y – 2 %) ; – впервые получена база данных кривых течения новой стали с включениями оксида иттрия в диапазоне температур 600–1200 °С и скоростей деформации 0,5–15 с⁻¹, необходимая для компьютерного моделирования процессов обработки ; – установлена эффективность применения радиально-сдвиговой прокатки для эволюции литой структуры слитков ODS-стали, обеспечивающая формирование ультрамелкозернистой структуры (размер зерна 400–800 нм) и закрытие внутренних дефектов литья.
		<p>5.2 Выводы диссертации являются новыми?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) полностью новые; 	<p>Автором сделан вывод о невозможности получения качественной ODS-стали методом простого введения наночастиц при вакуумной</p>

		<p>2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>	<p>плавке. Сформулированы новые выводы о влиянии параметров радиально-сдвиговой прокатки на трансформацию дендритной структуры слитка и распределение оксидных включений. Доказано, что предложенная комбинированная технология (эндогенная плавка + РСП) позволяет достичь механических свойств, сопоставимых с материалами, полученными методами порошковой металлургии, но при значительном упрощении технологии.</p>
		<p>5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными: 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>	<p>Новизна заключается в разработке масштабируемой технологии получения заготовок ODS-стали методом плавки без вакуума с последующей интенсивной пластической деформацией. Техническая новизна подтверждена результатами экспериментальных плавок, металлографических исследований и механических испытаний. Результаты опубликованы в рейтинговых зарубежных журналах (Materials, Metals, Journal of Chemical Technology and Metallurgy) и доложены на международных конференциях.</p>
6	Обоснованность основных выводов	<p>Все основные выводы основаны/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (квалитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).</p>	<p>Все основные выводы, представленные в диссертационной работе, обоснованы и основаны на весомых доказательствах с научной точки зрения. В диссертации осуществляется системный подход к решению поставленных задач. Достоверность выводов обеспечивается использованием комплекса современных методов исследования, включая: – термодинамическое моделирование (HSC Chemistry); – компьютерное моделирование методом конечных элементов (Deform-3D); – физическое моделирование на пластометрическом комплексе Gleeble-3800; – современные инструментальные методы анализа микроструктуры и фазового состава (оптическая микроскопия, SEM, TEM, EDS, EBSD, рентгенофлуоресцентный анализ). Теоретические выводы, полученные в ходе моделирования, подтверждены результатами натуральных экспериментов по плавке и</p>

			прокатке, а также механическими испытаниями образцов, выполненными в соответствии с международными стандартами.
7	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности:	
7.1 Доказано ли положение? 1) доказано ; 2) скорее доказано; 3) скорее не доказано; 4) не доказано; 5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно.		7.1.1 Доказано результатами сравнительных экспериментальных плавок и термодинамического анализа. Установлено, что высокий краевой угол смачивания ($>120^\circ$) и разность плотностей препятствуют ассимиляции экзогенных частиц, приводя к их коагуляции и всплыванию в шлак, что подтверждено данными электронной микроскопии. 7.1.2 Эффективность технологии подтверждена получением качественных слитков с заданным составом. Результаты комплексного структурного анализа достоверно свидетельствуют о формировании в металлической матрице эндогенных включений, обладающих кристаллической структурой оксида иттрия. 7.1.3 Доказано методом физического моделирования на образцах с искусственными дефектами. Установлена кинематика смыкания стенок полости в поле сдвиговых деформаций, подтвержденная 3D-реконструкцией и металлографическим анализом зон сваривания. 7.1.4 Доказано данными прямых структурных исследований (EBSD, TEM), зафиксировавшими формирование субмикронной структуры (400–800 нм), и результатами механических испытаний, показавшими высокий уровень прочности.	
7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) нет ; 3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно.		Основные положения диссертации, выносимые на защиту, являются новыми, а потому не тривиальны.	
7.3 Является ли новым? 1) да ; 2) нет;	Все основные положения диссертации новые, что доказывается наличием у докторанта публикаций в журнале, входящем в базу данных Scopus.		

		3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно.	
		7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; 3) широкий ; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.	Положения 1 и 2: Результаты применимы в области специальной электрометаллургии для производства жаропрочных и радиационно-стойких сплавов конкретного назначения (ядерная энергетика, аэрокосмическая отрасль). Положения 3 и 4: Результаты имеют широкий уровень применения, так как установленные закономерности закрытия дефектов и формирования УМЗ-структуры при радиально-сдвиговой прокатке справедливы не только для ODS-сталей, но и для широкого класса труднодеформируемых и высоколегированных сплавов, используемых в машиностроении.
		7.5 Доказано ли в статье? 1) да ; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	Основные положения диссертации в полной мере отражены и доказаны в 8 печатных работах. Из них 5 статей опубликованы в международных рецензируемых журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, что подтверждает достоверность результатов на международном уровне: 1. Положения 1 и 2 доказаны в статье в Journal of Chemical Technology and Metallurgy (2024). 2. Положение 3 подробно изложено и доказано в статье журнала Metals (2024, Q2) и Journal of Chemical Technology and Metallurgy (2024, 34 перцентиль). 3. Положение 4 подтверждено публикациями в высокорейтинговом журнале Materials (2023, Q1) и журнале Metallurgist (2024, Q4).
8	Принцип достоверности (Достоверность источников и предоставляемой информации)	8.1 Выбор методологии – обоснован или методология достаточно подробно описана 1) да ; 2) нет	Выбор методологии обоснован, так как опирается на фундаментальные положения теории металлургических процессов и физики металлов. Методология подробно описана во введении и соответствующих главах диссертации .
		8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с	Результаты получены с использованием современных методов. В работе использовано компьютерное моделирование в программных комплексах HSC Chemistry 9.0 (термодинамика) и Deform-3D (обработка давлением). Экспериментальные данные

		<p>применением компьютерных технологий: 1) да; 2) нет</p>	<p>получены на высокоточном современном научном оборудовании, таком как: пластометр Gleeble-3800, микроскопы Helios NanoLab 650 (FIB) и JEOL JEM-ARM200F (TEM).</p>
		<p>8.3 Теоретические выводы, модели. Выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента): 1) да; 2) нет</p>	<p>Результаты термодинамического моделирования подтверждены серией экспериментальных плавок. Модели радиально-сдвиговой прокатки верифицированы натурными экспериментами на стане РСР-10/30, металлографическим анализом (EBSD) и механическими испытаниями, показавшими сходимость расчетных и фактических параметров структуры и свойств.</p>
		<p>8.4 Важные утверждения подтверждены/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу</p>	<p>Все важные утверждения подтверждены ссылками на актуальную научную литературу.</p>
		<p>8.5 Используемые источники литературы достаточны/не достаточны для литературного обзора</p>	<p>Библиография содержит 202 наименования, включая значительное количество зарубежных публикаций в рейтинговых журналах, что обеспечивает качественный обзор состояния проблемы.</p>
9	Принцип практической ценности	<p>9.1 Диссертация имеет теоретическое значение: 1) да; 2) нет</p>	<p>Да, результаты диссертационного исследования имеют высокое теоретическое значение. Автором разработаны теоретические основы эндогенного формирования нанодисперсных оксидов в стальном расплаве. Создана уникальная база данных реологических свойств нового материала, которая расширяет понимание поведения ODS-сталей при высокотемпературной деформации и позволяет прогнозировать эволюцию структуры при компьютерном моделировании.</p>
		<p>9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике: 1) да; 2) нет</p>	<p>Да, диссертация имеет практическое значение. Разработанная технология получения заготовок методом вакуумной плавки с последующей радиально-сдвиговой прокаткой является масштабируемой и экономически эффективной альтернативой порошковой металлургии. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии производства оболочек</p>

			тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для реакторов на быстрых нейтронах, обеспечивая повышение их радиационной стойкости и эксплуатационного ресурса. Решение проблемы масштабирования позволит изготавливать массивные детали (такие как корпуса и фланцы) для обычных ядерных реакторов на тепловых нейтронах.
		9.3 Предложения для практики являются новыми? 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)	Предложения для практики являются полностью новыми. Новизна заключается в предложенной технологической цепочке: «эндогенное окисление иттрия при плавке - радиально-сдвиговая прокатка». Доказано, что такой подход позволяет получать ультрамелкозернистую структуру (400–800 нм) в конструкционных сталях ядерного класса без применения дорогостоящих и технологически сложных порошковых методов, что является новым решением для атомной промышленности.
10	Качество написания и оформления	Качество академического письма: 1) высокое; 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Диссертационная работа написана на высоком научно-профессиональном уровне. Материал изложен грамотным академическим языком, с использованием корректной специальной терминологии. Структура работы логична и последовательна, соответствует нормам научного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов и заключения, изложенных на 149 страницах, содержит 85 рисунков, 202 библиографических источника и 4 приложения. Оформление текста, таблиц и графического материала выполнено качественно и соответствует предъявляемым требованиям.
11	Замечания к диссертации	<ol style="list-style-type: none"> 1. Плотность оксида иттрия ($5,01 \text{ г/см}^3$) значительно ниже плотности стального расплава ($7,9 \text{ г/см}^3$). Наблюдалась ли ликвация оксидных частиц по высоте слитка при кристаллизации, и какие меры (кроме индукционного перемешивания) предусмотрены для обеспечения равномерного распределения упрочняющей фазы по всему объему крупного слитка? 2. В работе проведено моделирование закрытия искусственных дефектов (сверленных отверстий). Насколько корректно переносить результаты закрытия макродефектов (отверстий диаметром 5 мм) на реальные литейные дефекты (микропоры, рыхлоты), которые могут иметь окисленную поверхность, препятствующую свариванию? <p>Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки диссертационной</p>	

		работы и научной ценности полученных результатов.
12	Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи)	<p>Научный уровень статей докторанта оценивается как высокий.</p> <p>По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 5 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.</p> <p>Следует особо отметить высокое качество публикаций:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Статья в журнале Materials (2023) имеет квартиль Q1 (Web of Science). 2. Статья в журнале Metals (2024) имеет квартиль Q2 (Web of Science). 3. Две статьи опубликованы в Journal of Chemical Technology and Metallurgy (34-й процентиль по Scopus). 4. Статья в журнале Metallurgist (2024) имеет квартиль Q4 (Web of Science). <p>Журналы полностью соответствуют профилю исследования (металлургия). Также результаты апробированы на международных конференциях (2 доклада) и опубликованы в издании, рекомендованном КОКСНВО МНВО РК (1 статья).</p> <p>Таким образом, докторант с запасом выполнил и перевыполнил минимальные нормативные требования к публикациям для защиты степени доктора философии (PhD).</p>
13	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	<p>Ходатайствовать перед Комитетом о присуждении докторанту Попову Федору Евгеньевичу степени доктора философии (PhD). Считаю, что диссертационная работа на тему «Разработка и исследование технологии получения дисперсно-армированной стали для использования в ядерной энергетике» является законченным научно-квалификационным трудом, выполненным на высоком уровне. Работа в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора философии (PhD), а ее автор Попов Федор Евгеньевич заслуживает присуждения искомой степени по образовательной программе 8D07202 – «Металлургия черных и цветных металлов».</p>

Официальный рецензент:

доктор PhD по специальности 6D070900 «Металлургия»,
ассоциированный профессор (доцент) кафедры «Металлургия и новые материалы»
НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
г. Караганда, Казахстан.



Султангазиев Р.Б