

**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 – Металлургия 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 полностью соответствует приоритету «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции», а также стратегическим задачам развития атомной отрасли РК в части создания импортозамещающих технологий производства конструкционных материалов. 1) Диссертация выполнена в рамках проекта: Грантовое финансирование КН МНВО РК, проект № AP09259982 «Разработка и исследование технологии получения и улучшения оксидно-дисперсионной упрочненной стали для использования в ядерной энергетике». 2) Соответствие другим программам: Работа коррелирует с планами по развитию ядерно-топливного цикла в Республике Казахстан и повышению передела урановой и металлургической продукции.
2	Важность для науки	Работа вносит /не вносит существенный вклад в науку, а ее важность хорошо раскрыта /не раскрыта.	Работа вносит существенный вклад в науку, важность раскрыта. С позиций теории технологических процессов, докторантом решена задача создания комплексной технологии производства дисперсно-упрочненных сталей от выплавки до получения заготовок с контролируемой микроструктурой. Важность работы заключается в следующем: 1. Технология получения заготовки: экспериментально обоснованы параметры эндогенного введения оксидной фазы (Y_2O_3) на стадии плавки, что обеспечивает получение слитка, пригодного для дальнейшей обработки интенсивной деформацией.

			2. Деформационное структурообразование: Установлена взаимосвязь между исходным состоянием литого металла и режимами радиально-сдвиговой прокатки (РСП), необходимыми для формирования субмикронного зерна.
3	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1) высокий ; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет	Уровень самостоятельности высокий. Докторант лично выполнил весь цикл работ: разработка технологии плавки; провел серию экспериментальных плавков, отработал методику введения иттрия и оценил качество полученных слитков методами металлографии; выполнил компьютерное моделирование методом конечных элементов, обосновав выбор температурно-скоростных режимов; экспериментально верифицировал модели и интерпретировал результаты включая глубокий анализ микроструктурных изменений.
4	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) обоснована ; 2) частично обоснована; 3) не обоснована.	Актуальность обоснована. Проблема производства ODS-сталей заключается в сложности их деформации и высокой стоимости порошкового метода. Автор предлагает актуальную гибридную технологию с перспективами масштабирования: получение качественного слитка методом специальной плавки и его последующую проработку методом РСП. Это открывает путь к массовому производству заготовок для деталей реакторов на быстрых нейтронах.
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) отражает ; 2) частично отражает; 3) не отражает.	Содержание полностью отражает тему. Работа охватывает все звенья технологической цепи: «плавка → слиток → деформация → структура». Автор уделяет равное внимание как получению исходного металла с заданным фазовым составом (плавка), так и его трансформации в качественное изделие (прокатка), что соответствует заявленной теме.
		4.3 Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) соответствуют ; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.	Цель и задачи соответствуют теме. Задачи выстроены логично: от поиска способа введения упрочняющих частиц в расплав до оптимизации режимов деформации, обеспечивающих их равномерное распределение и измельчение зерна матрицы.
		4.4 Все разделы и положения диссертации	Все разделы диссертации логически взаимосвязаны.

		<p>логически взаимосвязаны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) полностью взаимосвязаны 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует. 	<p>Работа построена по классическому принципу «от теории к практике»: 1) Анализ проблемы → 2) Получение материала → 3) Изучение свойств материала и моделирование технологии → 4) Экспериментальная реализация технологии и верификация по структуре и свойствам. Выводы каждой главы служат фундаментом для последующей.</p>
		<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 выполнено системное сопоставление предлагаемых технологических решений с известными мировыми аналогами:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Проведена оценка эффективности существующих методов производства дисперсно-упрочненных материалов (включая порошковую металлургию и аддитивные технологии). Выявлены их ключевые недостатки — высокая стоимость, сложность масштабирования и ограничения по сортаменту продукции, что послужило аргументом для разработки альтернативного металлургического подхода. 2. В части обработки давлением автор критически рассмотрел возможности традиционных методов деформации (ковка, прокатка) и методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Выбор радиально-сдвиговой прокатки аргументирован ее преимуществами в получении длинномерных изделий (например, заготовки для трубок твэлов) и общей технологичности процесса по сравнению с аналогами.
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 являются новыми.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Разработаны основы технологии плавки ODS-стали, обеспечивающей формирование трудносмачиваемых тугоплавких твердых эндогенных оксидов в расплаве. 2. Впервые определены реологические характеристики полученного литого материала, необходимые для выполнения компьютерного моделирования процесса прокатки. 3. Выявлен механизм формирования ультрамелкозернистой структуры (400–800 нм) при РСП слитков с одного нагрева, обусловленный вихревым характером течения металла.

		<p>5.2 Выводы диссертации являются новыми? 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>	<p>Выводы обладают новизной. Новым является заключение о том, что сочетание плавки и РСП позволяет получить материал с уровнем свойств, сопоставимым с порошковыми аналогами, но при существенно меньших затратах. Доказана эффективность применения радиально-сдвиговой прокатки для первичной обработки слитков.</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>Обоснованность технических решений подтверждена экспериментальной верификацией технологии: - Получена опытная партия заготовок ODS-стали, прошедшая полный цикл обработки (плавка и прокатка на стане РСП-10/30). - испытания подтвердили достижение целевых показателей качества: сформирована равноосная ультрамелкозернистая структура (размер зерна 400–800 нм), обеспечено закрытие внутренних несплошностей и достигнут высокий уровень прочностных свойств. - Результаты прошли независимую экспертизу международного научного сообщества, что подтверждается публикациями в изданиях первого и второго квартала: Materials (Q1) и Metals (Q2).</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 обоснованы. Они базируются на расчетных данных, полученных с использованием известных термодинамических зависимостей, результатах компьютерного моделирования методом конечных элементов, а также экспериментальных данных, полученных в натуральных условиях прокатки и оцененных с применением стандартных методик исследования микроструктуры и механических свойств металлов и сплавов.</p>
7	Основные положения, выносимые на защиту	<p>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;</p>	<p>7.1.1 Положение 1, выносимое на защиту, доказано путём проведения серии экспериментальных плавок с различными методами введения оксида, химического и металлографического исследования выплавленных слитков. 7.1.2 Положение 2, выносимое на защиту, доказано результатами</p>

		<p>5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно.</p>	<p>экспериментальных плавок по разработанному режиму (температура $1550 \pm 10^\circ\text{C}$, 2% Y, выдержка 1 мин), анализом химического состава различными методами.</p> <p>7.1.3 Положение 3, выносимое на защиту, доказано методом натурального моделирования с использованием заготовок с искусственными дефектами, послойной резки, 3D-реконструкции эволюции формы дефекта и металлографического анализа зон сваривания.</p> <p>7.1.4 Положение 4, выносимое на защиту, доказано результатами EBSD-картирования, показавшими формирование зерен размером 400–800 нм, ТЕМ-анализом дислокационной структуры и механическими испытаниями, подтвердившими высокий уровень свойств. Подтверждение кристаллической структуры найденных оксидных включений упрочняющей фазы.</p>
		<p>7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно.</p>	<p>Тривиальность отсутствует для всех положений.</p>
		<p>7.3 Является ли новым? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно.</p>	<p>Все положения являются новыми</p>
		<p>7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; 3) широкий; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.</p>	<p>Уровень применимости для всех положений - широкий. Перспективы применения полученного материала и предложенных технологий не ограничиваются исключительно сферой ядерного машиностроения.</p>
		<p>7.5 Доказано ли в статье? 1) да; 2) нет;</p>	<p>7.5.1 Доказано и подтверждено в статье: Panichkin A., Popov F., et al. Research of injection methods for nanoparticles into nickel-free stainless steel during induction vacuum</p>

		3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	remelting // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2024. Vol. 59. No. 1. P. 173–182. 7.5.2 Доказано и подтверждено в статье: Panichkin A., Popov F., et al. Research of injection methods for nanoparticles into nickel-free stainless steel during induction vacuum remelting // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2024. Vol. 59. No. 1. P. 173–182. 7.5.3 Доказано и подтверждено в статьях: Arbuz A., Panichkin A., Popov F., et al. Modeling the evolution of casting defect closure in ingots through radial shear rolling processing // Metals. 2024. Vol. 14. No. 1. Article No. 53; Popov F., et al. Modelling the evolution of casting defect closure by radial shear rolling // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2024. Vol. 59. No. 1. P. 197–206. 7.5.4 Доказано и подтверждено в статье: Arbuz A., Kawalek A., ... Popov F., et al. Using the radial shear rolling method for fast and deep processing technology of a steel ingot cast structure // Materials. 2023. Vol. 16. No. 24. Article No. 7547.
8	Принцип достоверности (Достоверность источников и предоставляемой информации)	8.1 Выбор методологии – обоснован или методология достаточно подробно описана 1) да; 2) нет	В работе использован классический материаловедческий подход, включающий последовательное применение термодинамического анализа, физического и математического моделирования с последующей экспериментальной верификацией на натуральных образцах и глубоким исследованием структуры передовыми методами. Методика исследований подробно изложена в соответствующих разделах диссертации.
8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий: 1) да; 2) нет		Достоверность данных обеспечивается применением нового высокоточного аналитического оборудования и лицензионного программного обеспечения: – Компьютерное моделирование: Deform-3D v.11 (FEM-анализ), HSC Chemistry 9.0 (термодинамика); – Пластометрические исследования: комплекс Gleeble-3800; – Структурный анализ: Двухлучевой сканирующий микроскоп Helios NanoLab 650 (FIB/SEM), просвечивающий электронный	

			<p>микроскоп JEOL JEM-ARM200F, энергодисперсионный анализ (EDS/WDS);</p> <p>- Химический анализ: атомно-адсорбционная спектроскопия (ICP AES) на Thermo scientific ICAP 6300 DUO, рентгенофлуоресцентный анализ (XRF) на PANanalytical Axios Max, масс-спектрометрия (ICP MS) на Thermo scientific iCAP RQ ICP-MS</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):</p> <p>1) да;</p> <p>2) нет</p>	<p>1. Термодинамические расчеты образования оксида иттрия доказаны серией экспериментальных плавок, в ходе которых получен металл с заданным фазовым составом.</p> <p>2. Математические модели процессов деформации верифицированы натурными экспериментами на стане РСП-10/30. Показано, что полученный по разработанной технологии литой металл полностью меняет структуру и свойства входя в предсказанный корридор.</p>
		<p>8.4 Важные утверждения подтверждены/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу</p>	<p>Ключевые тезисы о механизмах эндогенного оксидообразования и закономерностях измельчения зерна при ИПД базируются на актуальных научных данных.</p>
		<p>8.5 Используемые источники литературы достаточны/не достаточны для литературного обзора</p>	<p>Библиография включает 202 источника, в том числе современные зарубежные публикации по металлургии ODS-сталей и процессам интенсивной пластической деформации.</p>
9	Принцип практической ценности	<p>9.1 Диссертация имеет теоретическое значение:</p> <p>1) да;</p> <p>2) нет</p>	<p>Да, результаты диссертационного исследования имеют теоретическое значение.</p>
		<p>9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике:</p> <p>1) да;</p> <p>2) нет</p>	<p>Да, работа обладает несомненной практической значимостью. Разработанная технология «плавка → радиально-сдвиговая прокатка» решает актуальную проблему производства заготовок для трубок ТВЭЛов для реакторов на быстрых нейтронах.</p> <p>1. Предложенная технология исключает дорогостоящие и технологически сложные стадии порошковой металлургии, что существенно снижает себестоимость продукции.</p>

			<p>2. Технологические режимы прокатки адаптированы к оборудованию существующих металлургических мини-заводов, что облегчает трансфер технологии в промышленность.</p> <p>3. Полученный пруток с ультрамелкозернистой структурой обладает комплексом свойств, удовлетворяющим требованиям к материалам активной зоны реакторов нового поколения согласно международным требованиям ASTM.</p>
		<p>9.3 Предложения для практики являются новыми?</p> <p>1) полностью новые;</p> <p>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</p> <p>3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>	<p>Предложения для практики являются полностью новыми.</p> <p>Научная новизна практических рекомендаций заключается в обосновании принципиально нового технологического маршрута, сочетающего методы металлургии и интенсивной пластической деформации. Предложены и экспериментально верифицированы режимы деформационной обработки литых слитков ODS-стали, обеспечивающие получение бездефектной макроструктуры и субмикронного зерна без применения промежуточных термообработок.</p>
10	Качество написания и оформления	<p>Качество академического письма:</p> <p>1) высокое;</p> <p>2) среднее;</p> <p>3) ниже среднего;</p> <p>4) низкое.</p>	<p>Диссертация изложена грамотным техническим и научным языком. Терминология в области металлургии и обработки металлов давлением используется корректно. Иллюстративный материал (карты EBSD, 3D-модели, электронная микроскопия) отличается высокой информативностью и наглядно подтверждает основные положения работы.</p>
11	Замечания к диссертации	<p>1. В работе установлено формирование градиентной структуры после радиально-сдвиговой прокатки, где ультрамелкозернистое состояние достигается преимущественно в периферийной зоне прутка. В диссертации недостаточно подробно рассмотрен вопрос о том, как менее проработанная структура в осевой зоне заготовки повлияет на эксплуатационные характеристики тонкостенных труб (оболочек ТВЭЛ) после операции прошивки и последующего волочения.</p> <p>2. В работе показано, что после РСП формируется ультрамелкозернистая (УМЗ) структура с размером зерна 400–800 нм. Однако известно, что УМЗ-материалы, полученные методами интенсивной пластической деформации, могут быть термически нестабильны и склонны к росту зерна при нагреве. Исследовалась ли термическая стабильность полученной структуры при длительных выдержках при рабочих температурах реактора (500–700 °С), и не произойдет ли рекристаллизация, сводящая на нет эффект упрочнения в процессе эксплуатации?</p>	

		<p>3. При радиально-сдвиговой прокатке реализуется сложная схема напряженно-деформированного состояния с кручением. Оценивалась ли анизотропия механических свойств полученных прутков в продольном и поперечном направлениях, и как она может повлиять на технологичность дальнейшего передела (например, изготовления труб)?</p> <p>4. Эксперименты проводились на слитках диаметром 30–32 мм. Промышленные слитки имеют диаметр 300-500 мм и выше. Сохранится ли эффект «проработки» центральной зоны и закрытия пор при увеличении диаметра заготовки в 10 раз, учитывая, что глубина проникновения сдвиговых деформаций при РСП ограничена?</p> <p>5. При моделировании радиально-сдвиговой прокатки (РСП) критически важным параметром является коэффициент трения, так как именно силы трения обеспечивают вращение заготовки и реализацию сдвига. Какое значение коэффициента трения (или закон трения) вы использовали в модели Deform-3D? Было ли это значение постоянным или зависело от температуры/скорости скольжения, и как оно верифицировалось?</p> <p>Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и научной ценности полученных результатов.</p>
12	<p>Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи)</p>	<p>Результаты диссертации полно отражены в 8 научных работах.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 5 статей опубликованы в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Особо стоит отметить публикации в журналах Materials (Q1) и Metals (Q2), что подтверждает высокий уровень исследований как в области материаловедения, так и в области технологий обработки. – 2 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК. – Результаты апробированы на международных конференциях. <p>Требования к публикациям выполнены в полном объеме.</p>
13	<p>Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)</p>	<p>Считаю, что настоящая диссертация в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора философии (PhD) Комитетом по контролю в сфере науки и высшего образования МНВО Республики Казахстан и ходатайствую перед Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК о присуждении докторанту Попову Федору Евгеньевичу степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07202 – «Металлургия черных и цветных металлов».</p>

Официальный рецензент:

кандидат технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением,
старший преподаватель кафедры Проектирования и эксплуатации металлургических
машин и оборудования
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.



Огнева Екатерина Михайловна



05 12 2021