ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО РЕЦЕНЗЕНТА

на диссертацию Ревуцкого Александра Владимировича
на тему «Исследование по повышению качества технического бериллия и усовершенствование процессов порошковой металлургии», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07202 – «Металлургия»

№ 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).	Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, утвержденного Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан, направление «Передовое производство, цифровые и космические технологии», ориентированной на переход от экспорта минерально-сырьевых полуфабрикатов к выпуску наукоемкой отечественной металлургической продукции высоких переделов с высокой добавленной стоимостью.
2.	Важность для науки	Работа вносит/не вносит существенный вклад в науку, а ее важность хорошо раскрыта/не раскрыта.	Важность для металлургической науки заключается в открытии потенциала для развития бериллиевого производства Республики Казахстан.
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1) высокий; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет.	Докторант лично выполнил исследования образцов, провел математическую обработку многолетних массивов заводской статистики качества, построил регрессионные модели и экспериментально-аналитические зависимости прочностных свойств при ВГП и ГИП. Обосновал механизм возникновения упрочняющих фаз.

4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) обоснована; 2) частично обоснована; 3) не обоснована.	Тема актуальна ввиду необходимости снижения высокого уровня брака при производстве горячепрессованного бериллия ТГП-56 и научно-технологической потребности создания приборных сортов бериллия с повышенным прецизионным пределом упругости. Работа направлена на решение стратегической задачи металлургической отрасли Казахстана по переходу от экспорта сырьевых лигатур к высокотехнологичной продукции с высокой добавленной стоимостью.
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) отражает; 2) частично отражает; 3) не отражает.	Содержание диссертации полностью раскрывает заявленную тему «Исследование по повышению качества технического бериллия и усовершенствование процессов порошковой металлургии». В разделах работы комплексно исследованы процессы вакуумного горячего (ВГП) и горячего изостатического (ГИП) прессования, механизм формирования упрочняющей оксидной фазы на границах зерен бериллиевой матрицы и разработаны пути снижения брака промышленной продукции.
		4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) соответствуют; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.	Сформулированная цель — разработка научных принципов управления качеством спеченного бериллия и совершенствование технологий его горячего компактирования — прямо вытекает из названия диссертации. Четыре поставленные исследовательские задачи (повышение прочности при ВГП, изучение механизма формирования оксидной фазы, установление закономерностей ГИП и оценка экономической эффективности) полностью декомпозируют цель и охватывают все ключевые аспекты темы.
		4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) полностью взаимосвязаны; 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует.	В диссертации выдержана строгая логическая последовательность: от анализа причин брака и метрологической воспроизводимости аттестации порошков ПТБ-56 к фундаментальному изучению механизма девитрификации оксидной пленки под влиянием соотношения Si/Al (раздел 4), затем к переносу

			установленных закономерностей на процесс горячего изостатического прессования и завершающей оценке экономической эффективности. Положения, выносимые на защиту, последовательно раскрывают каждый этап исследования.
		4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями: 1) критический анализ есть; 2) анализ частичный; 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов; 4) анализ отсутствует.	Автор проводит детальный критический анализ существующих представлений о поведении оксидной фазы при компактировании бериллия. В противоположность общепринятой гипотезе простого механического растрескивания оксидной пленки из-за различия термических коэффициентов расширения автором предложена и научно аргументирована термодинамическая модель девитрификации аморфного BeO под действием примесной жидкой фазы $Si\text{–}Al$. Разработанные математические уравнения Холла-Петча и Орована детально сопоставлены с классическими дислокационными теориями упрочнения. *(Замечание: Обратная регрессионная зависимость для назначения температуры ВГП требует более строгого критического анализа на математическую устойчивость и чувствительность к малым вариациям прочности)*
5.	Принцип научной новизны	5.1 Научные результаты и положения являются новыми? 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Научные результаты и положения обладают выраженной научной новизной. Впервые предложена и обоснована физическая интерпретация формирования упрочняющей оксидной фазы на границах зерен бериллия через процесс девитрификации (расстеклования) аморфной пленки BeO под действием примесного расплава Si–Al. Установлена роль соотношения Si/A$ в переключении между гомогенным и гетерогенным механизмами кристаллизации, получены новые многофакторные математические зависимости механических свойств и прецизионного

			предела упругости от микроструктурных параметров и температуры консолидации.
		5.2 Выводы диссертации являются новыми? 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Выводы диссертации содержат оригинальные научные результаты: доказана роль соотношения Si/Al как управляющего фактора морфологии и дисперсности вторичных фаз на границах зерен; установлена возможность кратного повышения прецизионного предела упругости методом ГИП за счет наноструктурирования оксида; сформулированы новые аналитические критерии для гибкого технологического регламента консолидации порошков. *(Замечание: В выводах по разделу 4 и в заключении формулировку порогов Si/Al следовало зафиксировать как закономерность, установленную строго для исследованного промышленного диапазона сырья, избегая избыточного обобщения на все системы бериллия).*
		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%).	Предложенные автором решения являются новыми, практически значимыми и научно обоснованными. Разработан гибкий технологический регламент вакуумного горячего прессования с дифференцированным назначением температурного интервала спекания в зависимости от характеристик исходного порошка, позволивший снизить уровень брака с 20% до 1%. Для приборного сорта ТИП-56 научно обоснованы технологические параметры горячего изостатического прессования (температура, давление, гранулометрический состав порошка), обеспечивающие кратный рост прецизионного предела упругости на имеющемся оборудовании без капитальных затрат. *(Замечание: В экономической части работы расчеты по освоению приборного сорта бериллия ТИП-56 носят оценочно-сценарный характер и требуют подтверждения*

			прямыми договорами поставки и протоколами натурных испытаний у конечных приборостроительных потребителей)
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы основаны/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (куолитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).	Выводы диссертации опираются на репрезентативный массив промышленных данных, применение комплекса взаимодополняющих физико-химических методов и метрологически аттестованное испытательное оборудование. Теоретические выводы согласуются с фундаментальными моделями физического металловедения.
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. 7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно. 7.3 Является ли новым? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно.	**Положение 1**. Математическая модель управления качеством горячепрессованного бериллия сорта ТГП-56, которая может рассматриваться основой гибкого регламента промышленного процесса горячего вакуумного прессования после промышленных испытаний, набора статистических данных и корректировке уравнений 7.1.1 Положение доказано результатами статистической обработки представительных выборок, корреляционного анализа и многофакторного регрессионного моделирования сходимости расчетных и опытных данных (погрешность прогноза <5%). 7.2.1 Положение не является тривиальным: В отличие от традиционной разрозненной оценки отдельных параметров, модель впервые комплексно увязывает комплексный эффект примесей, гранулометрии и температуры спекания. 7.3.1 Положение является новым. Впервые математически формализован адаптивный регламент подбора температуры ВГП под фактический примесный состав поступающего сырья.

		7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; 3) широкий; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.	7.4.1 Уровень применения широкий. Методология применима для адаптивного управления процессами горячего вакуумного прессования широкого спектра марок бериллия. 7.5.1 Доказано в статьях: Revutskiy A.V., Syrnev B.V., Lopatin V.Yu. Development of a flexible technological regulation for quality control of hot-pressed beryllium // Наука и техника Казахстана. – 2026. – № 3; Ревуцкий А.В., Сырнев Б.В., Семилуцкая О.В. Исследование причин нестабильности промышленного процесса вакуумного горячего прессования порошков бериллия // Вестник КазНИТУ. – 2021. – № 5; Ревуцкий А.В., Сырнев Б.В., Семилуцкая О.В. Влияние технологического регламента процесса вакуумного горячего прессования на качество спеченного бериллия // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. – 2020. – № 1 (87). **Положение 2.** Новая интерпретация механизма формирования упрочняющей оксидной фазы на границах зерен спеченного бериллия, как процесс девитрификации аморфной оксидной пленки и определяющий морфологию, наноструктуру и упрочняющий эффект армирующей фазы. 7.1.2 Положение доказано комплексом методов микрофрактографических исследований и микрорентгеноспектрального анализа образцов промышленных заготовок. Экспериментально зафиксированы два разных морфологических типа фазы BeO в зависимости от баланса Si/Al. 7.2.2 Положение не является тривиальным. Принципиально опровергает и дополняет существовавшую ранее упрощенную модель механического растрескивания поверхностной пленки при прессовании. 7.3.2 Положение является новым. Впервые доказана определяющая роль отношения Si/Al в схемах механизмов
		7.5 Доказано ли в статье? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	

			расстеклования аморфной оксидной пленки (гомогенный и гетерогенный механизмы). 7.4.2 Уровень применения широкий. Закономерности девитрификации оксидных оболочек под воздействием легкоплавких контактных эвтектик применимы к порошковой металлургии реактивных и тугоплавких металлов (титан, алюминий, цирконий), а также для формулирования требований к сырью приборных и ядерных сортов бериллия. 7.5.2 Доказано в статьях: Revutskiy A.V., Syrnev B.V., Lopatin V.Yu., Semilutskaya O.V., Segeda T.A. Study of Reinforcing Phase Formation at the Grain Boundaries of Sintered Beryllium // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021. – Vol. 62, No. 1. – P. 125; Revutsky A.V., Syrnev B.V., Semilutskaya O.V. Study of beryllium hardening obtained by powder metallurgy // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2021. – № 2 (102). – С. 40–49; Ревуцкий А.В., Сырнев Б.В., Семилуцкая О.В. Исследование формирования армирующей фазы на границах зерен спеченного бериллия // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2020. – № 3. **Положение 3.** Экспериментально-аналитические зависимости механических свойств спеченного бериллия марки ТИП-56 (условный предел текучести, прецизионный предел упругости) от размера зерна микроструктуры, размера упрочняющих оксидных частиц и температуры консолидации порошков, предполагающие дальнейшую доработку по результатам промышленных испытаний. 7.1.3 Положение доказано и подтверждено систематическими экспериментами по ГИП четырех классов порошков (ПТБ-30, ПТБ-56, ПТБ-100, ПТБ-180) при температурах 800–1100 °С с прецизионными

			испытаниями на растяжение. Высокая линейность связи предела текучести с размерным фактором $\ln(2r/b)/(\lambda-2r)$ (R^2 = 0,997) доказывает реализацию механизма Орована. 7.2.3 Положение не является тривиальным: Впервые развивает классическую дислокационную модель Холла–Петча для бериллия путем раздельного математического учета дисперсности частиц оксида и термодинамических параметров консолидации. 7.3.3 Положение является новым. Впервые получены аналитические уравнения, позволяющие прогнозировать прецизионный предел упругости в зависимости от параметров структуры после ГИП. 7.4.3 Уровень применения широкий. Методика расчетного прогнозирования размерной стабильности и прецизионного предела упругости применима при проектировании прецизионных гироскопических узлов, аэрокосмических конструкций и других дисперсно-упрочненных порошковых материалов. 7.5.3 Доказано в статьях: Syrnev B., Revutskiy A., Semilutskaya O. Study on Hardening Potential of Isostatic Pressed Beryllium // Key Engineering Materials. – Vol. 842. – P. 199–204; Revutsky A.V., Syrnev B.V., Semilutskaya O.V. Study of beryllium hardening obtained by powder metallurgy // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2021. – № 2 (102). – С. 40–49.
8.	Принцип достоверности. Достоверность источников и предоставляемой информации	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана: 1) да; 2) нет.	Методология диссертационного исследования выбрана обоснованно и детально описана во 2-м разделе работы. Исследование базируется на сопряжении передовых аналитических методов материаловедения: микроструктурный анализ выполнен методами растровой электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии с микродифракцией на экстракционных репликах, элементный состав локализован с помощью энергодисперсионного микроанализа, гранулометрия

			охарактеризована лазерной седиментометрией, а удельная поверхность — адсорбционным методом БЭТ. Механические испытания реализованы на поверенной разрывной машине Instron 1195 по стандартизированным методикам. Статистическая обработка массивов заводских плавок проведена с применением аппарата многофакторного регрессионного анализа, что обеспечило высокую воспроизводимость и достоверность результатов.
		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.	Результаты работы получены с применением современного научно-исследовательского оборудования и цифровых технологий обработки экспериментальных данных. Изучение микроструктуры, морфологии и фазового состава выполнено с помощью высокоразрешающей растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Анализ гранулометрии реализован с программной обработкой светорассеяния на лазерном дифракционном анализаторе. Статистическая обработка заводских массивов данных, построение многофакторных уравнений регрессии, оценка их значимости и корреляционный анализ выполнены с использованием специализированных прикладных программных пакетов.
		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.	Теоретические модели и выявленные закономерности доказаны и подтверждены комплексным экспериментальным исследованием. Термодинамическая концепция девитрификации оксидной пленки BeO под влиянием отношения примесей Si/Al экспериментально подтверждена методами РЭМ, ПЭМ и микродифракции с фиксацией наночастиц BeO при гомогенном механизме кристаллизации и эвтектической коагуляции при гетерогенной кристаллизацией. Математическая регрессионная зависимость прочности от параметров порошка верифицирована на представительной промышленной выборке из 32 заготовок ВГП и подтверждена на практике снижением уровня брака с 20%

			до 1%. Модель формирования прецизионного предела упругости по механизму Орована подтверждена серией ГИП в интервале 800–1100 °C с достижением значений до 570 МПа.
		8.4 Важные утверждения подтверждены/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу.	Все ключевые теоретические посылки, аналитические выкладки и физические интерпретации диссертации подкреплены ссылками на авторитетные источники. Библиографический список работы включает фундаментальные труды отечественных и зарубежных специалистов в области физического металловедения бериллия и порошковой металлургии, а также современные публикации в рецензируемых международных журналах (индексируемых в Scopus и Web of Science), отражающие актуальное состояние исследований в области консолидации бериллиевых порошков.
		8.5 Использованные источники литературы достаточны/не достаточны для литературного обзора.	Объем и глубина проанализированного библиографического материала полностью достаточны для всестороннего раскрытия темы исследования. Список литературы сбалансирован: он охватывает как базовые монографии и отраслевые стандарты, так и современные зарубежные и отечественные статьи последних лет, индексируемые в ведущих наукометрических базах (Scopus, Web of Science).
9	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение: 1) да; 2) нет.	Теоретическое значение диссертационной работы заключается в существенном развитии научных представлений о физико-химических и дислокационных механизмах формирования структуры и механических свойств бериллия при горячем компактировании порошков.

		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике: 1) да; 2) нет.	Диссертационная работа имеет выраженную практическую направленность, а полученные результаты дают основу для дальнейшей работы уже по промышленному внедрению.
		9.3 Предложения для практики являются новыми: 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Внедрен адаптивный регламент ВГП, предложены трактовки механизмов гомогенной и гетерогенной девитрификации на основе отношения Si/Al, и созданы основы для получения приборного сорта бериллия на имеющемся оборудовании без капитальных затрат.
10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: 1) высокое; 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Текст диссертации изложен строгим научным языком с грамотным использованием специальной металловедческой терминологии. Материал структурирован логично: разделы последовательно раскрывают поставленные задачи, а графики, схемы и микрофотографии оформлены на высоком академическом уровне.
11.	Замечания к диссертации	Вопросы: 1. Каким образом можно обеспечить стабильное и контролируемое соотношение Si/Al в промышленных условиях при производстве бериллиевых порошков? 2. Какие экспериментальные результаты позволяют однозначно подтвердить, что повышение прочностных свойств связано именно с процессом девитрификации оксидной пленки, а не преимущественно с уменьшением размера зерна или изменением пористости материала? 3. Преимущества горячего изостатического прессования? Замечания: 1. В разделе 5 разработаны экспериментально-аналитические зависимости механических свойств бериллия от структурных характеристик и параметров горячего изостатического прессования. Вместе с тем для подтверждения универсальности предложенных моделей целесообразно расширить объем экспериментальных исследований и провести дополнительную оценку точности прогнозирования в условиях промышленного производства.	
12.	Научный уровень статей докторанта по теме	Научный уровень статей докторанта по теме исследования оценивается как высокий. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, соответствующих профилю специальности:	

	исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи докторанта по теме исследования)	– 2 статьи в международных рецензируемых изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science: • *Russian Journal of Non-Ferrous Metals* (2021, Vol. 62, No. 1) — переводная версия статьи из ведущего профильного журнала «Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия» (2020, № 3); • *Key Engineering Materials* (2020, Vol. 842) — по материалам международной конференции по новым материалам и химической промышленности NMCI (г. Сямынь, Китай); – 5 статей в научных изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК: «Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева» (две статьи), «Вестник КазНИТУ», «Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика» и «Наука и техника Казахстана»; Результаты прошли всестороннюю апробацию на международных конференциях (в г. Усть-Каменогорске, Москве и Сямыне). Полнота публикаций и уровень изданий полностью удовлетворяют установленным квалификационным требованиям для защиты диссертации на соискание степени доктора философии (PhD).
13.	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	Диссертационная работа Ревуцкого Александра Владимировича «Исследование по повышению качества технического бериллия и усовершенствование процессов порошковой металлургии» представляет собой самостоятельный, законченный научно-квалификационный труд, выполненный на высоком научном уровне. В исследовании успешно решена важная научно-техническая задача прогнозирования и управления эксплуатационными свойствами спеченного бериллия, имеющая существенное практическое значение для модернизации бериллиевого производства Республики Казахстан. Диссертация полностью удовлетворяет критериям и требованиям, предъявляемым к докторским работам на соискание степени доктора философии (PhD), а ее автор, Ревуцкий Александр Владимирович, заслуживает присуждения степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07202 – «Металлургия».

Официальный рецензент:
Доктор философии (PhD), профессор кафедры
«Металлургия и новые материалы»
НАО «Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова» _____ А.М. Достаева

ЗАВЕРЯЮ
Руководитель АУ