

ТЕХНОЛОГИЯ РЕДКИХ, РАССЕЯННЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ/TECHNOLOGY OF RARE, SCATTERED AND RADIOACTIVE ELEMENTS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА–ЛЕ ШАТЕЛЬЕ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГАФНИЯ

Научная статья

Негодин Д.А.^{1,*}, Штуца М.Г.², Карташов В.В.³

¹ORCID : 0009-0009-1293-8200;

¹АО «ТВЭЛ», Москва г., Российская Федерация

²АО «ЧМЗ», Глазов, Российская Федерация

³ Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российской Федерации

* Корреспондирующий автор (negodin.glazov[at]mail.ru)

Аннотация

Металлический гафний широко применяется в различных областях промышленности, основными являются атомная и электронная. В России единственным предприятием, специализирующимся на производстве металлического гафния, является АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов), в котором после распада СССР разработана и внедрена промышленная технология получения металлического гафния методом электролитического восстановления и производства изделий на его основе.

При проведении релогических исследований электролитического металлического гафния установлено, что при испытаниях образцов, выполненных в интервале температур от 800 до 1100 °C и скоростей деформации от 0,01 до 20 s^{-1} , на диаграммах зависимости механического напряжения от степени деформации проявляются многочисленные локальные пики значений механического напряжения при перемещении нагружающего штока с постоянной скоростью. Диаграммы зависимости механического напряжения от степени деформации при различных температурах испытаний имеют нетипичное взаимное расположение.

Наличие локальных пиков на диаграммах нагрузления и инверсия зависимости напряжения от скорости деформации указывает на проявление эффекта Портевена–Ле Шателье, который для металлического гафния установлен впервые.

Ключевые слова: металлический гафний, электролитический гафний, эффект Портевена–Ле Шателье, реологические исследования.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PORTEVIN–LE CHATELIER EFFECT FOR METALLIC HAPNIVUM

Research article

Negodin D.A.^{1,*}, Shtutsa M.G.², Kartashov V.V.³

¹ORCID : 0009-0009-1293-8200;

¹TVEL JSC, Moscow, Russian Federation

²CHMZ JSC, Glazov, Russian Federation

³Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (negodin.glazov[at]mail.ru)

Abstract

Metallic haphnium is widely used in various industries, primarily nuclear and electronics. In Russia, the only enterprise specialising in the production of metallic haphnium is "Chepetsk Mechanical Plant" JSC (Glazov), which, after the collapse of the USSR, developed and implemented industrial technology for obtaining metallic haphnium by electrolytic reduction and manufacturing products based on it.

During rheological studies of electrolytic metallic haphnium, it was found that when testing samples at temperatures ranging from 800 to 1100 °C and deformation rates from 0,01 to 20 s^{-1} , the diagrams showing the dependence of mechanical stress on the degree of deformation show numerous local peaks in mechanical stress values when the loading rod is moved at a constant speed. The diagrams showing the dependence of mechanical stress on the degree of deformation at different test temperatures have an atypical mutual arrangement.

The presence of local peaks on the loading diagrams and the inversion of the dependence of stress on strain rate indicate the manifestation of the Portevin–Le Chatelier effect, which has been established for metallic haphnium for the first time.

Keywords: metallic haphnium, electrolytic haphnium, Portevin–Le Chatelier effect, rheological studies.

Введение

Гафний широко применяется в различных областях промышленности. В металлургии его используют в качестве легирующего элемента для повышения коррозионной и термической стойкости сплавов на основе циркония, титана, ниобия, tantalа, вольфрама, молибдена [1], [2], [3], [4]. Из диоксида гафния изготавливают покрытия для металлических зеркал, применяемых в широком диапазоне электромагнитного спектра [2], [3], [5], [6]. Микроэлектронная промышленность использует диоксид гафния в качестве подзатворного диэлектрика в кремниевых транзисторах [7], [8].

Основными и наиболее ответственными областями применения металлического гафния являются атомная и электронная промышленности.

В реакторостроении гафний является эффективным и долговечным поглотителем нейтронов, при реакции его расщепления также образуются изотопы гафния Hf^{174} , Hf^{176} – Hf^{180} с периодами полураспада до 115 суток. Малый период полураспада существенно упрощает утилизацию отработанных поглощающих элементов [9], [10]. Уникальный комплекс физико-химических свойств металлического гафния позволяет использовать его в активной зоне ядерного реактора без дополнительной защитной оболочки [3], [10], [11], [12]. Низкая энергия выхода электронов из металлического гафния и высокая температура плавления обеспечивают ему широкое применение в электронной промышленности в качестве катодов радиоламп и электронных пушек, электродов для сварки, электродов плазмотронов [13], [14], [15].

В СССР слитки гафния выплавляли в ГНПП «Цирконий» (г. Днепродзержинск, Украина), а опытные партии изделий изготавливали в АО «ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград) и АО «ВНИИНМ» (г. Москва). После распада Советского Союза изделия производили из импортируемого металлического гафния, получаемого методами йодидного рафинирования или кальциетермического восстановления с последующим вакуумно-дуговым и/или электронно-лучевым переплавами [9], [16], [17].

В начале 2000-х годов в АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов) разработана и внедрена в производство экстракционная схема получения соединений гафния, в том числе из отходов производства ядерночистого циркония, с последующим его электролитическим восстановлением, вакуумно-дуговым и/или электронно-лучевым переплавами и получением слитков массой до 1100 кг [11], [12], [18].

Создание новой технологии получения металлического гафния методом электролитического восстановления (далее — электролитический гафний) потребовало масштабных исследований физико-механических и коррозионных свойств материала для обоснования возможности его применения в особо ответственных областях промышленности.

При проведении реологических исследований образцов электролитического гафния авторами настоящей работы впервые установлено наличие эффекта Портевена–Ле Шателье. В ранее проведенных исследованиях металлического гафния, полученного методами йодидного рафинирования и кальциетермического восстановления, эффект Портевена–Ле Шателье не фиксировался [3], [19], [20], [21].

Методы и принципы исследования

Эффект Портевена–Ле Шателье это явление прерывистой пластичности, проявляющейся в виде скачков механического напряжения или деформации при монотонном нагружении материалов. Впервые описанный в 1923 году он характерен для многих металлов и сплавов, особенно с ГЦК и ОЦК решетками. В более поздних исследованиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье связаны с наличием инверсии зависимости напряжения от скорости деформации и N-образной зависимости механического напряжения от скорости деформации. Совместное рассмотрение этих явлений позволяет связать микроструктурные превращения с макроскопическими реологическими аномалиями. Немонотонный характер зависимости механического напряжения от скорости деформации в некотором интервале скоростей не может быть объяснён существующими теориями [22], [23], [24], [25].

Для описания эффекта Портевена–Ле Шателье предложены различные теоретические модели, использующие континуальные (модели Коттрелла–Билби, Лабуша, Маккорника), многоуровневые и атомистические подходы [22], [23], [24], [26].

Основная гипотеза, предложенная Коттреллом и Билби, связывает эффект Портевена–Ле Шателье с периодическим захватом и освобождением дислокаций примесными атмосферами. При низких скоростях деформации атомы примесей успевают дифундировать к дислокациям, формируя облака, которые повышают напряжения течения. При достижении критической скорости дислокации «отрываются» от атмосфер, что приводит к разупрочнению и скачку деформации. Кроме того существует конкуренция термической активации и динамического закрепления дислокаций, что может приводить к инверсии зависимости напряжения от скорости деформации.

Наиболее распространенные способы промышленного получения металлического гафния, такие как йодидное рафинирование, кальциетермическое и электролитическое восстановление, позволяют получать металл с отличающимся содержанием в нем примесей, обусловленным особенностями способа производства. Различное содержание примесных элементов в металле влияет на его технологические и эксплуатационные характеристики.

Анализ содержания примесей в металлическом гафнии, полученном различными способами, выполнен авторами на основании как опубликованных данных [3], [27], [28], так и на основании исследований имеющихся образцов металла. Установлено, что наиболее значимые отличия наблюдаются в содержании кислорода и углерода, таблица 1, рисунки 1 и 2. В проведенных ранее исследованиях [9], [29], [30], [31] установлено, что на механические свойства и технологичность металлического гафния наибольшее влияние оказывают именно кислород, углерод и азот. Содержание азота практически не зависит от способа производства металлического гафния, и он исключен из рассмотрения в настоящей работе.

Дополнительно в таблице 1 представлены требования российских и международных стандартов к содержанию кислорода, углерода и азота в металлическом гафнии. По среднему содержанию примесей все рассмотренные способы получения металлического гафния обеспечивают соответствие стандартам.

Таблица 1 - Средние значения содержания примесей в образцах металлического гафния, полученного различными способами

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.1>

Способ получения металлического гафния	Углерод, % масс	Кислород, % масс	Азот, % масс
Йодидное рафинирование	0,0026	0,0087	0,0018
Кальциетермическое восстановление	0,0080	0,0129	0,0020
Электролитическое восстановления	0,0079	0,0295	0,0019
Требования стандартов ТУ ¹⁾ /ASTM ²⁾	0,010/0,015	0,050/0,040	0,005/0,010

Примечание: 1) ТУ 001.402-2008 «Гафний металлический в слитках»; 2) ASTM B 737-10 «Стандартная спецификация на горячекатаные и/или холоднотянутые прутки и проволоку из гафния», Grade 1 (ядерное применение); ASTMB776-12 (2024) «Стандартная спецификация для полос, листов и пластин из гафния и сплавов гафния», Grade 1 (ядерное применение)

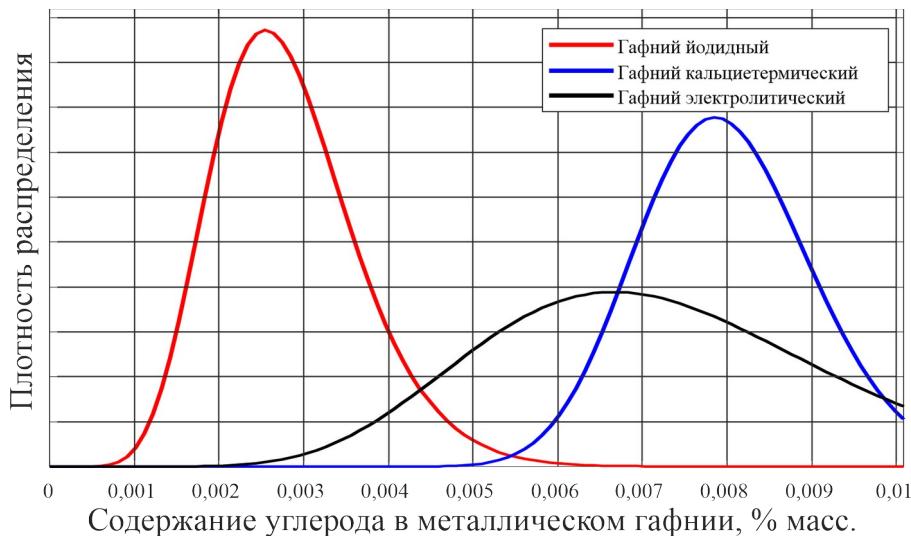


Рисунок 1 - Распределение содержания углерода в слитках металлического гафния, полученного различными промышленными способами

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.2>

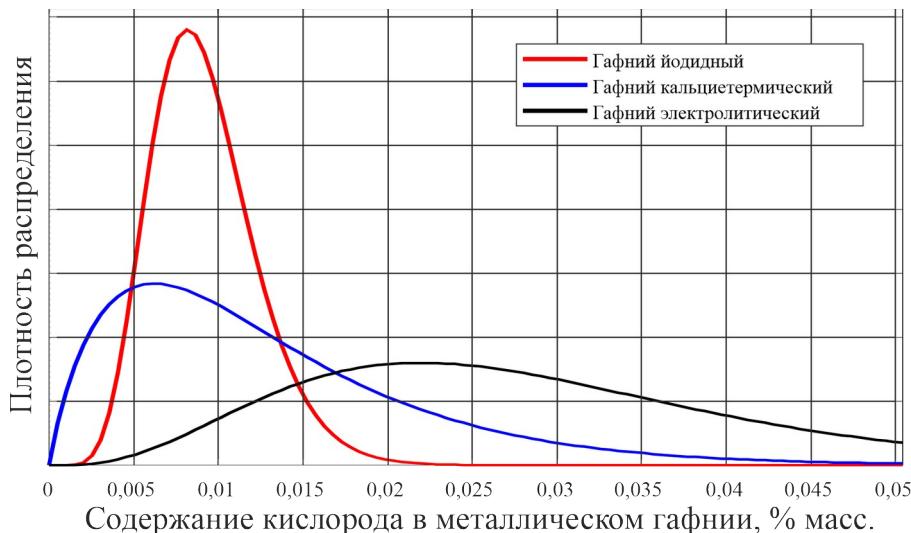


Рисунок 2 - Распределение содержания кислорода в слитках металлического гафния, полученного различными промышленными способами

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.3>

Для количественной оценки механических и технологических свойств электролитического гафния использованы диаграммы зависимости механического напряжения от степени деформации, полученные при испытаниях на сжатие. Испытания образцов выполнены при температурах от 20 до 1400 °C, скорости деформации от 0,01 до 20 с⁻¹ и максимальном значении истинной деформации до 0,4.

Исследования выполнены с использованием испытательного комплекса Gleeble System 3800 (Dynamic System Inc., США) и закалочно-деформационного дилатометра DIL 805 A/D (TA Instruments, США).

Основные результаты

При проведении реологических испытаний образцов электролитического гафния получены диаграммы зависимости механического напряжения от истинной деформации. Диаграммы соответствуют двум типам.

Диаграммы испытания первого типа характеризуются гладкой кривой изменения зависимости механического напряжения от степени деформации, типичный вид диаграммы представлен на рисунке 3. Полученные при одной температуре испытаний диаграммы также соответствуют классическим представлениям теории деформации, а именно, при увлечении скорости деформирования механические напряжения увеличиваются при равной истинной деформации, рисунок 4.

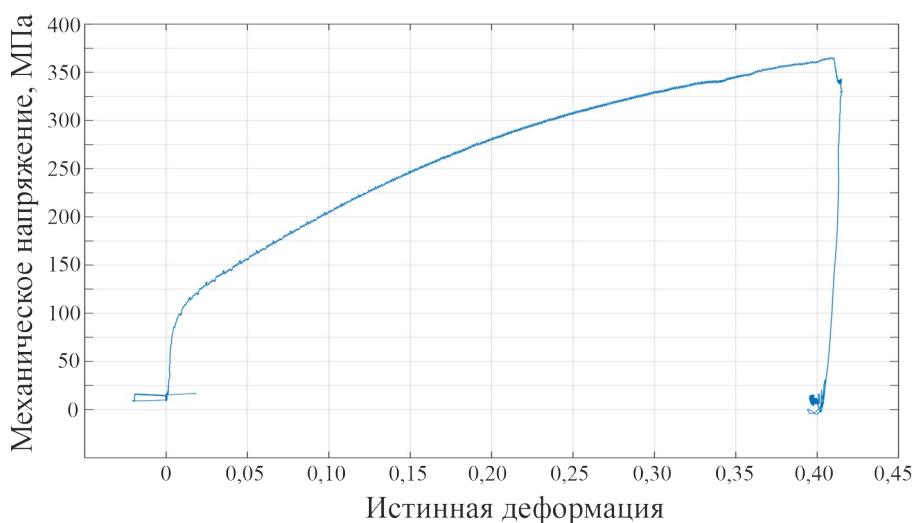


Рисунок 3 - Диаграмма первого типа зависимости механического напряжения от истинной деформации
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.4>

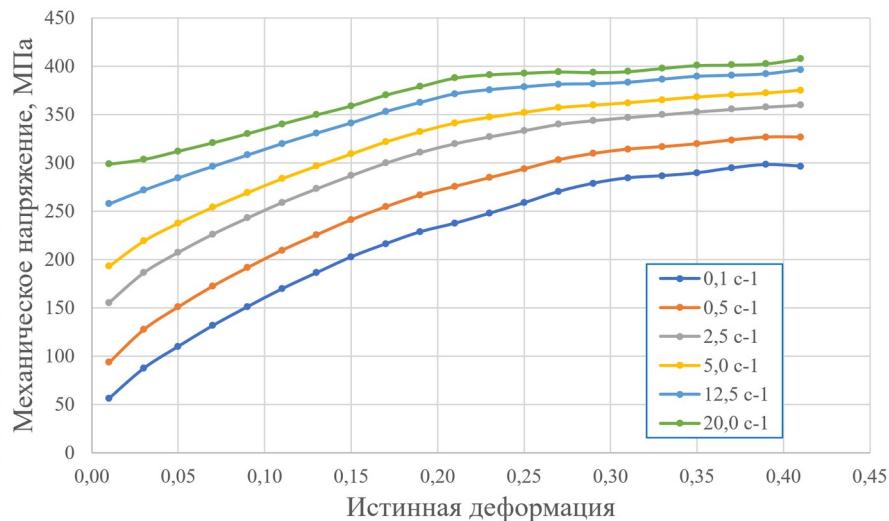


Рисунок 4 - Диаграммы первого типа зависимости механического напряжения от скорости деформации и истинной деформации, при температуре испытаний 700 °С, условно нормальные диаграммы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.5>

Диаграммы второго типа характеризуются наличием по диаграммам локальных пиков различной интенсивности, рисунки 5 и 6. При этом диаграммы второго типа, рисунок 7, отличаются от диаграмм первого типа, рисунок 4, наличием пересечений графиков, полученных при различной скорости деформирования.

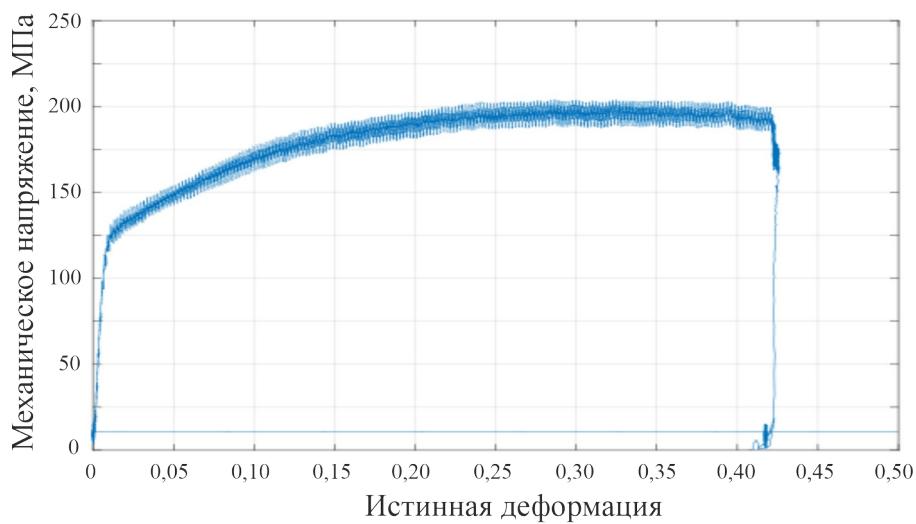


Рисунок 5 - Диаграмма второго типа зависимости механического напряжения от истинной деформации с множественными пиками, наблюдается интенсивное проявление эффекта Портевена–Ле Шателье

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.6>

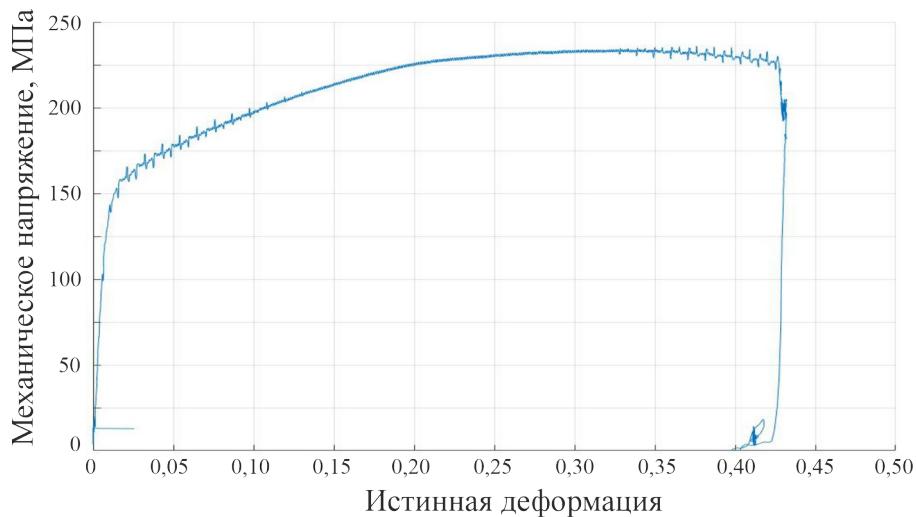


Рисунок 6 - Диаграмма второго типа зависимости механического напряжения от истинной деформации с единичными пиками, наблюдается проявление эффекта Портевена–Ле Шателье

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.7>

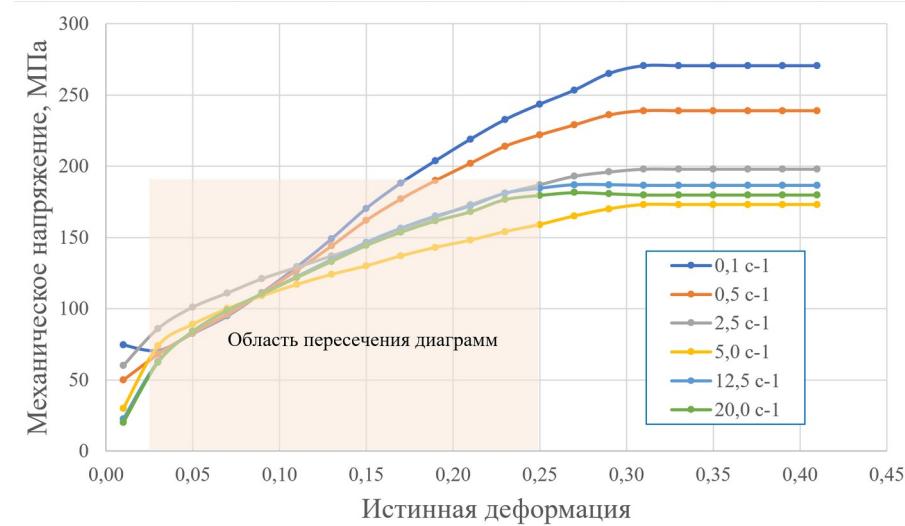


Рисунок 7 - Диаграммы второго типа зависимости механического напряжения от скорости деформации и истинной деформации, температура испытаний 1000 °C, условно аномальные диаграммы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.8>

Экспериментально установлено, что для электролитического гафния эффект Портевена–Ле Шателье, проявляемый в виде локальных пиков механического напряжения, в различной степени проявляется в интервале температур 800–900 °C и скорости деформации от 0,1 до 20 c⁻¹, рисунок 8.

В интервале температур испытаний от 800 до 1100 °C присутствует аномальное взаимное расположение диаграмм зависимости механического напряжения от скорости деформации — диаграммы, полученные при одной температуре испытаний, пересекаются в некоторой области истинной деформации.

Основываясь на исследованиях проявлений эффекта Портевена–Ле Шателье [22], [23], [24], [25] авторы сделали вывод о размерах области проявления эффекта, как области объединяющей в себя области локальных пиков и пересечения диаграмм: при температуре испытаний от 800 до 1100 °C и скорости деформации от 0,01 до 20 c⁻¹.

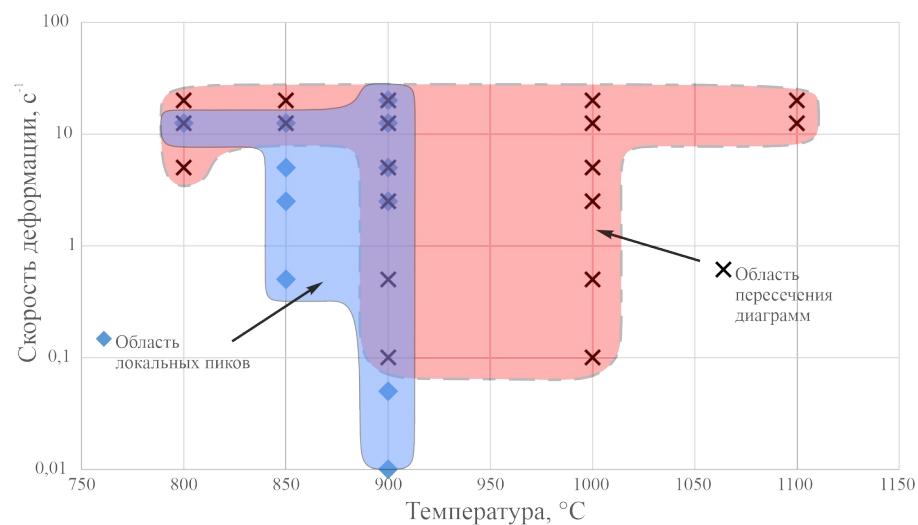


Рисунок 8 - Области проявления локальных пиков и пересечения диаграмм — область проявления эффекта Портевена–Ле Шателье

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.9>

Дополнительно при анализе диаграмм зависимости механического напряжения от истинной деформации при различных температурах отмечено, что области пересечения диаграмм связаны с температурой испытаний и истинной деформацией. Так, для испытаний, проведенных при температуре 1000 °C, рисунок 7, пересечение диаграмм происходит в области истинной деформации от ~ 2 до 25%. При других температурах испытаний аналогичные области пересечения диаграмм находятся в смещенных областях истинной деформации. На рисунке 9 представлено расположение области пересечения диаграмм в интервале температур от 800 до 1100 °C. Из которого видно, что с повышением температуры испытаний область проявления эффекта Портевена–Ле Шателье сдвигается в область меньшей истинной деформации испытываемых образцов.

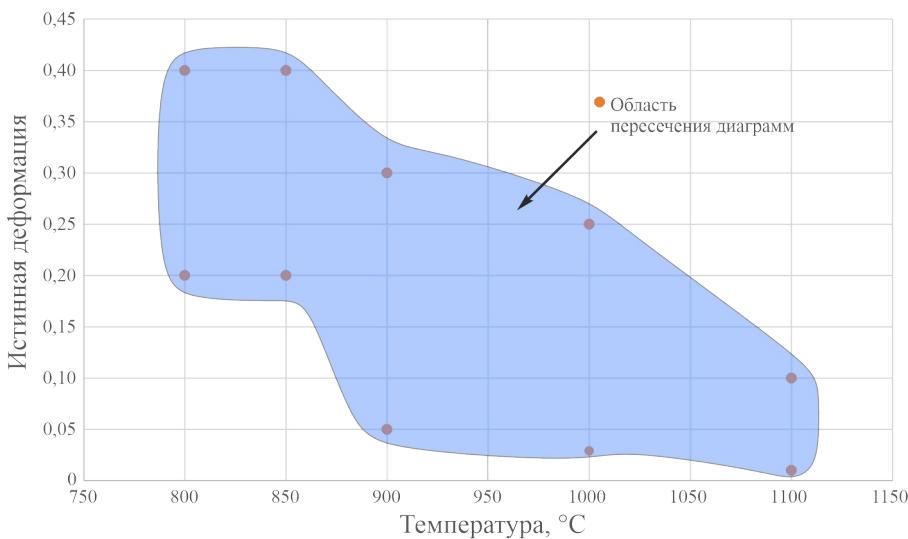


Рисунок 9 - Область проявления эффекта Портевена–Ле Шателье в координатах «температура–истинная деформация»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.10>

Для оценки влияния эффекта Портевена–Ле Шателье на структурное состояние электролитического гафния выполнены металлографические исследования образцов до и после проведения реологических испытаний.

Образцы электролитического гафния, испытанные при низкой температуре и малой скорости деформации, не достигшие области проявления эффекта Портевена–Ле Шателье, имеют условно крупнозернистую структуру, а образцы, испытанные вне области эффекта Портевена–Ле Шателье, при более высоких значениях температуры и скорости — условно мелкозернистую структуру, рисунок 10.

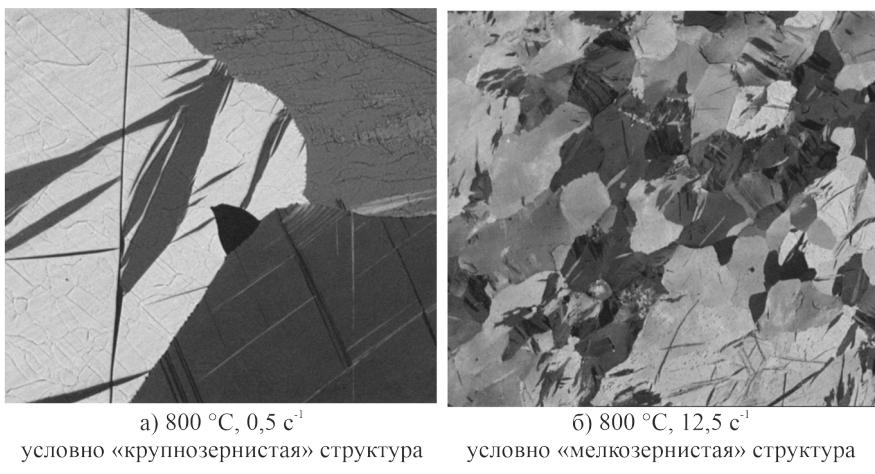


Рисунок 10 - Микроструктура образцов гафния после испытаний, поляризованный свет, долевое сечение
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.11>

Примечание: увеличение 450x

Образцы, испытанные в области проявления эффекта Портевена–Ле Шателье, рисунок 8, имеют нестабильную структуру: после проведения испытаний образцы могут иметь как крупнозернистую, так и мелкозернистую структуру, а также их сочетание. При этом даже проведение серии испытаний в одинаковых условиях не позволяет получить однотипного структурного состояния образцов, что указывает на нестабильность процессов деформации и формирования структуры.

Таким образом, авторами установлено, что технология производства металлического гафния методом электролитического восстановления позволяет получать гафний с химическим составом, отличным от химического состава гафния, полученного методами йодидного рафинирования и кальциетермического восстановления. Электролитический гафний отличается повышенным содержанием примесных элементов кислорода и углерода. Количество примесей в электролитическом гафнии достигло значения, при котором возникают процессы нестабильного закрепления и движения дислокаций, регистрируемых на макроуровне конкуренций термической активации и динамического закрепления дислокаций — эффект Портевена Ле Шателье.

Установление наличия эффекта Портевена–Ле Шателье позволяет управлять процессом изготовления изделий из электролитического гафния и сформировать рекомендации по их эксплуатации. Известно, что одним из проявлений эффекта Портевена–Ле Шателье является образование полос Людерса на поверхности изделий в процессе их пластической деформации, которые вызываются неустойчивостью состояния однородного малопластичного материала с хорошо выраженным пределом текучести [32], [33].

Таким образом, в процессе изготовления изделий из электролитического гафния для получения однородного по структуре материала необходимо избегать деформации металла в области, соответствующей эффекту Портевена–Ле Шателье.

Для исключения процессов искажения формы и повышения шероховатости поверхности изделий из электролитического гафния при их эксплуатации также необходимо избегать интервалов температур и скоростей деформаций, соответствующих области проявления эффекта Портевена–Ле Шателье.

Заключение

1. При проведении сравнительного анализа металлического гафния установлено, что электролитический гафний отличается от металлического гафния, полученного методами йодидного рафинирования и кальциетермического восстановления повышенным содержанием примесей кислорода и углерода.

2. Установлено, что при температуре от 800 до 1100 °C, скорости деформации от 0,01 до 20 с^{-1} и истинной деформации до 0,4 в электролитическом гафнии наблюдается эффект Портевена–Ле Шателье.

3. Проявление эффекта Портевена–Ле Шателье для металлического гафния, получаемого различными методами, установлено впервые.

4. При проведении технологических операций и эксплуатации изделий из электролитического гафния необходимо учитывать проявления эффекта Портевена–Ле Шателье.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань Российская Федерация

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.12>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.26.12>

Список литературы / References

1. Зеликман А.Н. Металлургия редких металлов : учебник для вузов / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршуенов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Металлургия, 1991. — 432 с.
2. Каганович С.Я. Цирконий и гафний (Технико-экономическое обобщение и анализ минерально-сырьевых ресурсов, производства и применения) / С.Я. Каганович. — Москва : Издательство Академии наук СССР, 1962. — 183 с.
3. Шиков А.К. Создание отечественного производства гафния. Исследование свойств, структурных и текстурных изменений при плавке, деформации и термической обработке гафния / А.К. Шиков, О.В. Бочаров, В.М. Аржакова [и др.] // Национальная металлургия. — 2002. — № 6. — С. 77–84.
4. Никерова Л.Ф. Тугоплавкие металлы, их сплавы и соединения : справочник / Л.Ф. Никерова, З.А. Таужнянская, Л.Н. Дорохина [и др.]. — Москва : ФГУП «ЦНИИЭИцветмет», 2001. — Т. 3. — 483 с.
5. Мировой рынок циркония и гафния // Бюллетень иностранной коммерческой информации (БИКИ). — 2004. — 23 марта. — № 32 (8678). — С. 12–15.
6. Справочник технолога-оптика : справочник / И.Я. Бубис, В.А. Вейденбах, И.И. Духопел [и др.]; под общ. ред. С.М. Кузнецова, М.А. Окатова. — Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. — 414 с.
7. Шахнович И. Intel открывает завод с 45-нм технологией: учение Мура живет и побеждает / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. — 2007. — № 7. — 121 с.
8. Афонский А.А. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов; под ред. проф. В.П. Дьяконова. — Москва : ДМК Пресс, 2011. — 688 с.
9. Металлургия гафния / под ред. Д.Е. Томаса, Е.Т. Хейса; пер. с англ. С.Л. Стефанюка, И.З. Бабиевской, В.В. Тарасова, [и др.]; под ред. Ф.М. Перельмана. — Москва : Металлургия, 1967. — 308 с.
10. Рисованый В.Д. Гафний в ядерной технике / В.Д. Рисованый, Е.П. Клочков, В.Е. Пономаренко. — Димитровград : НИИАР, 1993. — 143 с.
11. Негодин Д.А. Гафний производства ОАО «Чепецкий механический завод» — материал ядерной энергетики / Д.А. Негодин, М.Г. Штуца, Е.В. Ильенко [и др.] // Цветные металлы. — 2014. — № 1 (853). — С. 59–62.
12. Негодин Д.А. Промышленное производство металлического гафния и изделий на его основе / Д.А. Негодин, М.Г. Штуца, С.Г. Ахтонов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и явлений в твердых телах. — 2012. — № 2. — С. 97–101.
13. Мельникова И.П. Исследование физических причин, ограничивающих долговечность и эмиссионную способность катодных и катодно-сеточных узлов, и возможность улучшения этих параметров в электровакуумных приборах СВЧ : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.27.02 / И.П. Мельникова. — Саратов : Саратовский государственный технический университет, 1997. — 246 с.

14. Григорьев Ю.А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю.А. Григорьев, Б.С. Правдин, В.И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Электроника СВЧ. Сер. 1. — Москва : ЦНИИ «Электроника», 1987. — Вып. № 7 (1264). — 71 с.
15. Мельникова И.П. Технология двойного применения: повышение функциональных характеристик листовых материалов, применяемых в СВЧ-технике и имплантологии / И.П. Мельникова, А.В. Лясникова, В.Н. Лясников // Вестник СГТУ. — 2012. — № 2 (66). — Вып. 2. — С. 109–114.
16. Беляев А.И. Металлургия чистых металлов и элементарных полупроводников / А.И. Беляев, Е.А. Жемчужина, Л.А. Фирсанова. — Москва : Металлургия, 1969. — 504 с.
17. Батаев Я.С. Физико-химическое обоснование и разработка технологии магниетермического получения металлического гафния : дис. канд. техн. наук : 05.17.02 / Я.С. Батаев. — Екатеринбург, 2010. — 121 с.
18. Штуца М.Г. Опыт промышленной эксплуатации современного оборудования экстракционной схемы разделения циркония и гафния / М.Г. Штуца, И.Г. Копарулин, Е.Л. Бутя [и др.] // Химическая технология. — 2005. — № 5. — С. 26–29.
19. Шиков А.К. Применение гафния в управляющих элементах ядерных реакторов и энергетических установок / А.К. Шиков, О.В. Бочаров, В.М. Аржакова [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2003. — № 8. — С. 20–23.
20. Бочаров О.В. Структура и механические свойства холоднодеформированного и отожженного йодидного гафния / О.В. Бочаров, В.А. Зудилин, Н.Г. Решетников [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. — 1991. — Вып. 2 (42). — С. 27–30.
21. Бочаров О.В. Электронно-лучевая плавка и обработка давлением гафния / О.В. Бочаров, В.О. Зверев. — Москва : ВНИИНМ, 1982. — 25 с.
22. Трусов П.В. Методы и результаты исследования эффекта Портевена-Ле Шателье: физически-ориентированные континуальные и многоуровневые модели / П.В. Трусов, Р.М. Герасимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2023. — № 5. — С. 132–158. — DOI: 10.15593/perm.mech/2023.5.10.
23. Трусов П.В. Прерывистая текучесть: модели, основанные на физических теориях пластичности / П.В. Трусов, Е.А. Чечулина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2017. — № 1. — С. 134–163. — DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.09
24. Трусов П.В. Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели / П.В. Трусов, Е.А. Чечулина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2014. — № 3. — С. 186–232. — DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.10.
25. Келлер И.Э. Особенности развития локализации деформаций в металлах с существенной зависимостью от скорости деформации и их описание в рамках теории вязкопластичности : дис. д-ра физ.-мат. наук : 01.02.04 / И.Э. Келлер. — Пермь, 2014. — 330 с.
26. Еремин В.И. Эффект Портевена-Ле Шателье в сплаве Al-5Mg-2Li-0,1Zr / В.И. Еремин, Е.Ф. Еремина, А.А. Степанов // Вестник ХНАДУ. — 2007. — № 39. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekt-portevena-le-shatelie-v-splave-al-5mg-2li-0-1zr> (дата обращения: 18.05.2025).
27. Исследование рынка металлического гафния и соединений гафния. — Москва : ООО «Инфомайн», 2010. — 62 с.
28. Hafnium. Technical Data Sheet. ATI Wah Chang. — URL: http://www.wahchang.com/pages/products/data/pdf/DS_HafniumAlloyAdd.pdf (accessed: 05.11.2011).
29. Вьюгов П.Н. Получение высокочистого гафния и исследование некоторых его свойств / П.Н. Вьюгов, О.Е. Кожевников, Б.А. Мерисов [и др.] // Металлы. — 2011. — № 4. — С. 18–24.
30. Тихинский Г.Ф. Получение сверхчистых редких металлов / Г.Ф. Тихинский, Г.П. Ковтун, В.М. Ажажа. — Москва : Металлургия, 1986. — 160 с.
31. Шека И.А. Химия гафния / И.А. Шека, К.Ф. Карлышева. — Киев : Наукова думка, 1972. — 454 с.
32. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел : в 2 т. / А. Надаи; пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. — Москва : Издательство иностранной литературы, 1954. — Т. 1. — 648 с.
33. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел : в 2 т. / А. Надаи; пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. — Москва : Мир, 1969. — Т. 2. — 864 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zelikman A.N. Metallurgiya redkikh metallov [Metallurgy of rare metals] : textbook for universities / A.N. Zelikman, B.G. Korshuenov. — 2nd ed., revised and enlarged. — Moscow : Metallurgiya, 1991. — 432 p. [in Russian]
2. Kaganovich S.Ya. Tsirkonij i gafnij (Tekhniko-ekonomicheskoe obobshchenie i analiz mineral'no-syr'evykh resursov, proizvodstva i primeneniya) [Zirconium and hafnium (Technical and economic generalization and analysis of mineral resources, production and application)] / S.Ya. Kaganovich. — Moscow : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. — 183 p. [in Russian]
3. Shikov A.K. Sozdanie otechestvennogo proizvodstva gafniya. Issledovanie svojstv, strukturnykh i teksturnykh izmenenij pri plavke, deformacii i termicheskoy obrabotke gafniya [Creation of domestic production of hafnium. Investigation of properties, structural and textural changes during melting, deformation and heat treatment of hafnium] / A.K. Shikov, O.V. Bocharov, V.M. Arzhakova [et al.] // Nacional'naya metallurgiya [National Metallurgy]. — 2002. — № 6. — P. 77–84. [in Russian]

4. Nikerova L.F. Tugoplavkie metally, ikh splavy i soedineniya [Refractory metals, their alloys and compounds] : handbook / L.F. Nikerova, Z.A. Tauzhnyanskaya, L.N. Dorokhina [et al.]. — Moscow : FSUE "TsNIIIEItsvetmet", 2001. — Vol. 3. — 483 p. [in Russian]
5. Mirovoj rynok tsirkoniya i gafniya [The world market of zirconium and hafnium] // Byulleten' inostrannoj kommercheskoj informacii (BIKI) [Bulletin of Foreign Commercial Information (BIKI)]. — 2004. — March 23. — № 32 (8678). — P. 12–15. [in Russian]
6. Spravochnik tekhnologa-optika [Handbook of optical technologist] : handbook / I.Ya. Bubis, V.A. Weidenbach, I.I. Dukhopel [et al.]; under the general editorship of S.M. Kuznetsov, M.A. Okatov. — Leningrad : Mashinostroenie, Leningrad branch, 1983. — 414 p. [in Russian]
7. Shakhnovich I. Intel otkryvaet zavod s 45-nm tekhnologij: uchenie Mura zhivet i pobezhdaet [Intel opens a factory with 45nm technology: Moore's doctrine lives and wins] / I. Shakhnovich // Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes [Electronics: Science, Technology, business]. — 2007. — № 7. — 121 p. [in Russian]
8. Afonsky A.A. Elektronnye izmereniya v nanotekhnologiyakh i mikroelektronike [Electronic measurements in nanotechnology and microelectronics] / A.A. Afonsky, V.P. Dyakonov; edited by prof. V.P. Dyakonov. — Moscow : DMK Press, 2011. — 688 p. [in Russian]
9. Metallurgiya gafniya [Metallurgy of hafnium] / edited by D.E. Thomas, E.T. Hayes; transl. from English by S.L. Stefanyuk, I.Z. Babievskaia, V.V. Tarasova [et al.]; edited by F.M. Perelman. — Moscow : Metallurgiya, 1967. — 308 p. [in Russian]
10. Risovany V.D. Gafnij v yadernoj tekhnike [Hafnium in nuclear technology] / V.D. Risovany, E.P. Klochkov, V.E. Ponomarenko. — Dimitrovgrad : NIIAR, 1993. — 143 p. [in Russian]
11. Negodin D.A. Gafnij proizvodstva OAO "Chepetskij mekhanicheskij zavod" — material yadernoj energetiki [Hafnium produced by JSC Chepetsky Mechanical Plant is a material of nuclear energy] / D.A. Negodin, M.G. Shtutsa, E.V. Ilyenko [et al.] // Cvetnye metally [Non-ferrous Metals]. — 2014. — № 1 (853). — P. 59–62. [in Russian]
12. Negodin D.A. Promyshlennoe proizvodstvo metallicheskogo gafniya i izdelij na ego osnove [Industrial production of metallic hafnium and products based on it] / D.A. Negodin, M.G. Shtutsa, S.G. Akhtonov [et al.] // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i yavlenij v tverdykh telakh [Issues of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Radiation Damage and Phenomena in Solids]. — 2012. — № 2. — P. 97–101. [in Russian]
13. Melnikova I.P. Issledovanie fizicheskikh prichin, ogranicivayushchikh dolgovechnost' i emissionnuyu sposobnost' katodnykh i katodno-setochnykh uzlov, i vozmozhnost' uluchsheniya etikh parametrov v elektrovakuumnykh priborakh SVCh [Investigation of the physical causes limiting the durability and emissivity of cathode and cathode-grid assemblies, and the possibility of improving these parameters in microwave vacuum devices] : dis. ... of PhD in Physics and Mathematics : 05.27.02 / I.P. Melnikova. — Saratov : Saratov State Technical University, 1997. — 246 p. [in Russian]
14. Grigoriev Yu.A. Elektronno-opticheskie sistemy s setochnym upravleniem [Electron-optical systems with grid control] / Yu.A. Grigoriev, B.S. Pravdin, V.I. Shesterkin // Obozory po elektronnoj tekhnike. Elektronika SVCh. Ser. 1 [Reviews on electronic technology. Microwave electronics. Ser. 1]. — Moscow : CNII "Elektronika", 1987. — Issue № 7 (1264). — 71 p. [in Russian]
15. Melnikova I.P. Tekhnologiya dvojnogo primeneniya: povyshenie funkcional'nykh kharakteristik listovykh materialov, primenyaemykh v SVCh-teknike i implantologii [Dual-use technology: increasing functional characteristics of sheet materials used in microwave technology and implantology] / I.P. Melnikova, A.V. Lyasnikova, V.N. Lyasnikov // Vestnik SGTU [Bulletin of SSTU]. — 2012. — № 2 (66). — Issue 2. — P. 109–114. [in Russian]
16. Belyaev A.I. Metallurgiya chistykh metallov i elementarnykh poluprovodnikov [Metallurgy of pure metals and elementary semiconductors] / A.I. Belyaev, E.A. Zhemchuzhina, L.A. Firsanova. — Moscow : Metallurgiya, 1969. — 504 p. [in Russian]
17. Bataev Ya.S. Fiziko-khimicheskoe obosnovanie i razrabotka tekhnologii magnietermicheskogo poluchenija metallicheskogo gafniya [Physico-chemical substantiation and development of technology for the magnetothermal production of metallic hafnium] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.17.02 / Ya.S. Bataev. — Ekaterinburg, 2010. — 121 p. [in Russian]
18. Shtutsa M.G. Opyt promyshlennoj ekspluatacji sovremennoj oborudovaniya ekstrakcionnoj skhemy razdelenija tsirkoniya i gafniya [The experience of industrial operation of modern equipment for the extraction scheme of separation of zirconium and hafnium] / M.G. Shtutsa, I.G. Koparulin, E.L. Butya [et al.] // Khimicheskaya tekhnologiya [Chemical Technology]. — 2005. — № 5. — P. 26–29. [in Russian]
19. Shikov A.K. Primenenie gafniya v upravlyayushchikh elementakh yadernykh reaktorov i energeticheskikh ustavovok [The use of hafnium in the control elements of nuclear reactors and power plants] / A.K. Shikov, O.V. Bocharov, V.M. Arzhakova [et al.] // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metallurgy and Thermal treatment of Metals]. — 2003. — № 8. — P. 20–23. [in Russian]
20. Bocharov O.V. Struktura i mekhanicheskie svojstva kholodnodeformirovannogo i otzhizhennogo jodidnogo gafniya [Structure and mechanical properties of cold-formed and annealed hafnium iodide] / O.V. Bocharov, V.A. Zudilin, N.G. Reshetnikov [et al.] // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novye materialy [Issues of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials]. — 1991. — Issue 2 (42). — P. 27–30. [in Russian]
21. Bocharov O.V. Elektronno-luchevaya plavka i obrabotka davleniem gafniya [Electron beam melting and pressure treatment of hafnium] / O.V. Bocharov, V.O. Zverev. — Moscow : VNIINM, 1982. — 25 p. [in Russian]
22. Trusov P.V. Metody i rezul'taty issledovaniya effekta Portevena-Le Chatel'e: fizicheski-orientirovannye kontinual'nye i mnogourovnye modeli [Methods and results of studying the Portevin-Le Chatelier effect: physically-oriented continuous and multilevel models] / P.V. Trusov, R.M. Gerasimov // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]. — 2023. — № 5. — P. 132–158. — DOI: 10.15593/perm.mech/2023.5.10. [in Russian]

23. Trusov P.V. Preryvistaya tekuchest': modeli, osnovанные на физических теориях пластичности [Serrated yielding: crystal viscoplastic models] / P.V. Trusov, E.A. Chechulina // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]. — 2017. — № 1. — P. 134–163. — DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.09 [in Russian]
24. Trusov P.V. Preryvistaya tekuchest': fizicheskie mekanizmy, eksperimental'nye dannye, makrofomenologicheskie modeli [Serrated yielding: physical mechanisms, experimental dates, macro-phenomenological models] / P.V. Trusov, E.A. Chechulina // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]. — 2014. — № 3. — P. 186–232. — DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.10. [in Russian]
25. Keller I.E. Osobennosti razvitiya lokalizacii deformacij v metallakh s sushchestvennoj zavisimost'yu ot skorosti deformacii i ikh opisanie v ramkakh teorii vyazkoplastichnosti [Features of the development of localization of deformations in metals with a significant dependence on the rate of deformation and their description within the framework of the theory of viscoplasticity] : dis. ... of Grand PhD in Physics and Mathematics : 01.02.04 / I.E. Keller. — Perm, 2014. — 330 p. [in Russian]
26. Eremin V.I. Effekt Portevena-Le Chatel'e v splave Al-5Mg-2Li-0,1Zr [The Portevin-Le Chatelier effect in the alloy Al-5Mg-2Li-0,1Zr] / V.I. Eremin, E.F. Eremina, A.A. Stepanov // Vestnik KHNADU [Bulletin of the KHNADU]. — 2007. — № 39. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekt-portevena-le-shateli-v-splave-al-5mg-2li-0-1zr> (accessed: 18.05.2025). [in Russian]
27. Issledovanie rynka metallicheskogo gafniya i soedinenij gafniya [Market research on metallic hafnium and hafnium compounds]. — Moscow : Infomain LLC, 2010. — 62 p. [in Russian]
28. Hafnium. Technical Data Sheet. ATI Wah Chang. — URL: http://www.wahchang.com/pages/products/data/pdf/DS_HafniumAlloyAdd.pdf (accessed: 05.11.2011).
29. Vyugov P.N. Poluchenie vysokochistogo gafniya i issledovanie nekotorykh ego svojstv [Obtaining high-purity hafnium and studying some of its properties] / P.N. Vyugov, O.E. Kozhevnikov, B.A. Merisov [et al.] // Metally [Metals]. — 2011. — № 4. — P. 18–24. [in Russian]
30. Tikhinsky G.F. Poluchenie sverkhchistykh redkikh metallov [Production of ultrapure rare metals] / G.F. Tikhinsky, G.P. Kovtun, V.M. Azhazha. — Moscow : Metalluriya, 1986. — 160 p. [in Russian]
31. Sheka I.A. Khimiya gafniya [Chemistry of hafnium] / I.A. Sheka, K.F. Karlysheva. — Kyiv : Naukova dumka, 1972. — 454 p. [in Russian]
32. Nadai A. Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel [Plasticity and destruction of solids] : in 2 vol. / A. Nadai; transl. from English, edited by G.S. Shapiro. — Moscow : Foreign Literature Publishing House, 1954. — Vol. 1. — 648 p. [in Russian]
33. Nadai A. Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel [Plasticity and destruction of solids] : in 2 vol. / A. Nadai; transl. from English, edited by G.S. Shapiro. — Moscow : Mir, 1969. — Vol. 2. — 864 p. [in Russian]