



ООО «ПТЗП»



ОПН 1127921

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИИ
ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАНЕСЕНИЯ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С
ВНЕШНИМ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ И
СВЯЗУЮЩИМ СЛОЕМ НА ОСНОВЕ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА ДЛЯ
ДЕТАЛЕЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ИЗ
НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Филяков А.Д.

тел.: +7 (903)-994-71-20

e-mail: filyakov.1999@mail.ru





ВЫЗОВЫ И ПОТРЕБНОСТИ

Научные вызовы



- Фазовая и микроструктурная нестабильность керамического слоя при температуре выше 1300 °C
- Воздействие агрессивной среды: CMAS, горячая коррозия
- Контроль роста и морфологии TGO ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)

Технические вызовы



- Контроль качества и повторяемость процесса нанесения покрытий
- Сложность внедрения и масштабирования новых технологий нанесения покрытий

Экономические вызовы



- Санкционное давление и ограничение доступа зарубежным технологическим решениям
- Высокая капиталоемкость оборудования и стоимость его обслуживания
- Малые размеры внутреннего рынка.



Предлагаемое решение



Нанесение многослойного термобарьерного покрытия при помощи метода электровзрывного напыления

Ожидаемая себестоимость нанесения покрытий:

$\sim 0,0318 - 0,0843 \text{ \$/см}^2$

Себестоимость нанесения покрытий другими методами:

EB-PVD $\sim 0,0646 - 0,5985 \text{ \$/см}^2$

APS $\sim 0,0377 - 0,0720 \text{ \$/см}^2$

HVOF $\sim 0,0215 - 0,0653 \text{ \$/см}^2$



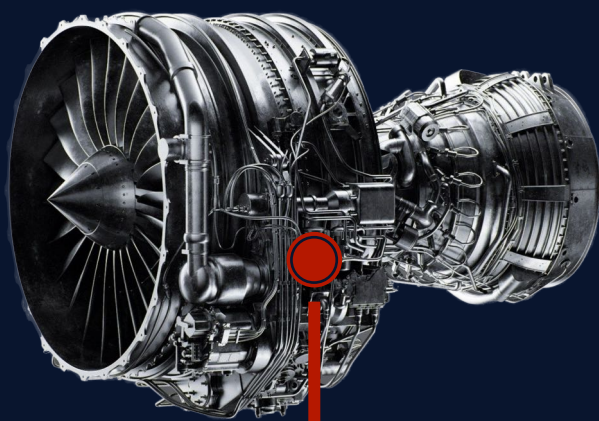
Преимущества предлагаемого решения

- При теплопроводности предлагаемого покрытия от 1,62 до 0,72 Вт/К*м ожидается увеличение межсервисных интервалов от 4,5 до 36,5 %
- Отсутствие необходимости создания глубокого вакуума или использования инертных газов
- Снижение капитальных затрат по сравнению с EB-PVD технологией в 2–3 раза за счет упрощённого оборудования и меньших требований к вспомогательным системам



РЫНОЧНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Отношение стоимости
нанесения покрытий к
стоимости авиадвигателя



0,5 – 3 %
20 – 280
тыс. \$

Целевые рынки

ГТУ



Авиадвигатели



ТОиР



Потенциальные потребители

- Ростех (ПАО ОДК);
- S7 Technics;
- Аэрофлот техникс;
- ООО «РГТ»



Бизнес-модель

Ценностное предложение



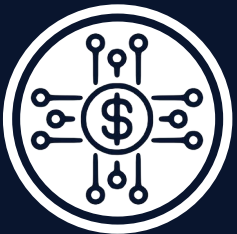
Разработка и внедрение технологии электровзрывного нанесения теплозащитных покрытий на жаропрочные никелевые сплавы

Каналы сбыта



Прямые B2B продажи

Источники доходов



Лицензирование технологий, получение роялти, проведение НИОКР



Ключевые игроки на рынке

Промышленные компании



ООО «ТСЗП», RTX Corp, OC Oerlikon , General Electric Co, Praxair Surface Technologies, AECC Shenyang Liming Aero Engine Co Ltd

Исследовательские институты



ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Tianjin University, University of Shanghai for Science and Technology, Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Lanzhou University of Technology, Fujian University of Technology



Обзор патентной активности. Теплозащитные покрытия

- Пат. KR 102697297 B1. 명칭 차열 코팅(TBC) 톱 코트용 고엔트로피 산화물 (Высокоэнтропийный оксид для верхнего слоя термобарьерного покрытия (TBC)). Oerlikon Metco (US) Inc. 2019.
- Пат. US 20190359528 A1. Thermal barrier coating repair compositions and methods of use thereof. General Electric Co. 2019.
- Пат. CN 105862038 B. 一种抗CMAS腐蚀耐超高温的长寿命热障涂层及其制备方法 (Долговечное теплоизолирующее покрытие, устойчивое к коррозии CMAS и сверхвысоким температурам, и способ его приготовления). Tianjin University. 2016.
- Пат. US 11739410 B2. Thermal barrier coatings. Penn State Research Foundation. 2017.
- Пат. CN 108060384 B. 一种双陶瓷层热障涂层体系及其复合制备 (Система двойного керамического теплоизолирующего покрытия и ее композитная подготовка). AECC Shenyang Liming Aero Engine Co Ltd. 2017.
- Пат. CN 109336647 B. 一种用于陶瓷基复合材料的热/环境障涂层及其制备方法 (Тепло- и экобарьерное покрытие для керамических матричных композитов и способ его приготовления). Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology. 2018.
- Пат. US 12344938 B2. Thermal barrier coating for gas turbine engine components. RTX Corp. 2012.



Обзор патентной активности. Высокоэнтروпийные сплавы

- Пат. CN 113881884 А. 一种长寿命抗氧化高熵粘结层材料及其制 (Долговечный, антиоксидантный, высокоэнтропийный адгезионный слой и его приготовление). Shanghai Institute of Ceramics of CAS East China University of Science and Technology Shanghai Jiao Tong University. 2021.
- Пат. CN 118406998 В. 一种稀土掺杂高熵合金涂层及其制备方法 (Покрытие из высокоэнтропийного сплава, легированного редкоземельными элементами, и способ его приготовления). Beijing Fengdarui Technology Co Ltd Xian Jiaotong University Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. 2024.
- Пат. CN 111809094 В. 一种耐高温氧化的高熵合金、热障涂层及热障涂层的制备方法 (Высокоэнтропийный сплав, устойчивый к высокотемпературному окислению, теплозащитное покрытие и способ получения теплозащитного покрытия). University of Shanghai for Science and Technology. 2020.
- Пат. CN 114032489 А. 一种AlCoCrFeNi高熵合金涂层 (Высокоэнтропийное сплавное покрытие AlCoCrFeNi). Lanzhou Institute of Chemical Physics LCP of CAS. 2021.
- Пат. CN 110158008 А. 一种高熵合金涂层及其制备方法 (Покрытие из высокоэнтропийного сплава и способ его получения). Fujian University of Technology. 2019.
- Пат. CN 114411081 А. 一种钇钪掺杂铝钴铬铁镍硅高熵热障粘结层 (Высокоэнтропийный термобарьерный связующий слой из алюминия, кобальта, хрома, железа, никеля и кремния, легированный иттрием-гафнием). AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials. 2021.



Обзор патентной активности. Технологии электровзрывного нанесения покрытий

- Пат. CN 115418597 А. 小管径管路内壁电爆喷涂装置及方法 (Устройство и способ электровзрывного напыления внутренних стенок трубопроводов малого диаметра). Lanzhou University of Technology. 2022.
- Пат. CN 115044855 А. 一种电爆喷涂装置 (Электровзрывное распылительное устройство). Lanzhou University of Technology. 2022.
- Пат. CN 104404439 В. 管及孔内壁连续送丝电爆炸喷涂装置 (Устройство электровзрывного напыления с непрерывной подачей проволоки на внутренние стенки труб и отверстий). Lanzhou University of Technology. 2014.
- Пат. CN 102251209 А. 一种粉末的电爆炸喷涂方法 (Метод электровзрывного напыления порошка). Ningbo University. 2011.
- Пат. CN 101550526 В. 用粉末材料直接进行电爆炸喷涂的方法 (Метод прямого электровзрывного напыления порошковых материалов). China Academy Of Machinery Science & Technology Zhejiang Branch Co Ltd. 2009.



Команда



Филяков Артем Дмитриевич

Руководитель проекта

СибГИУ. Аспирант. Физика конденсированного состояния



Чумачков Илья Игоревич

Научный сотрудник, материаловед

СибГИУ. Аспирант. Сварка и родственные процессы



Технологическая зрелость решения



Подтверждение жизнеспособности предлагаемого решения. Тестовое нанесение покрытий. Определение ключевых параметров



Металлографические исследования покрытий



Исследование фазового состава



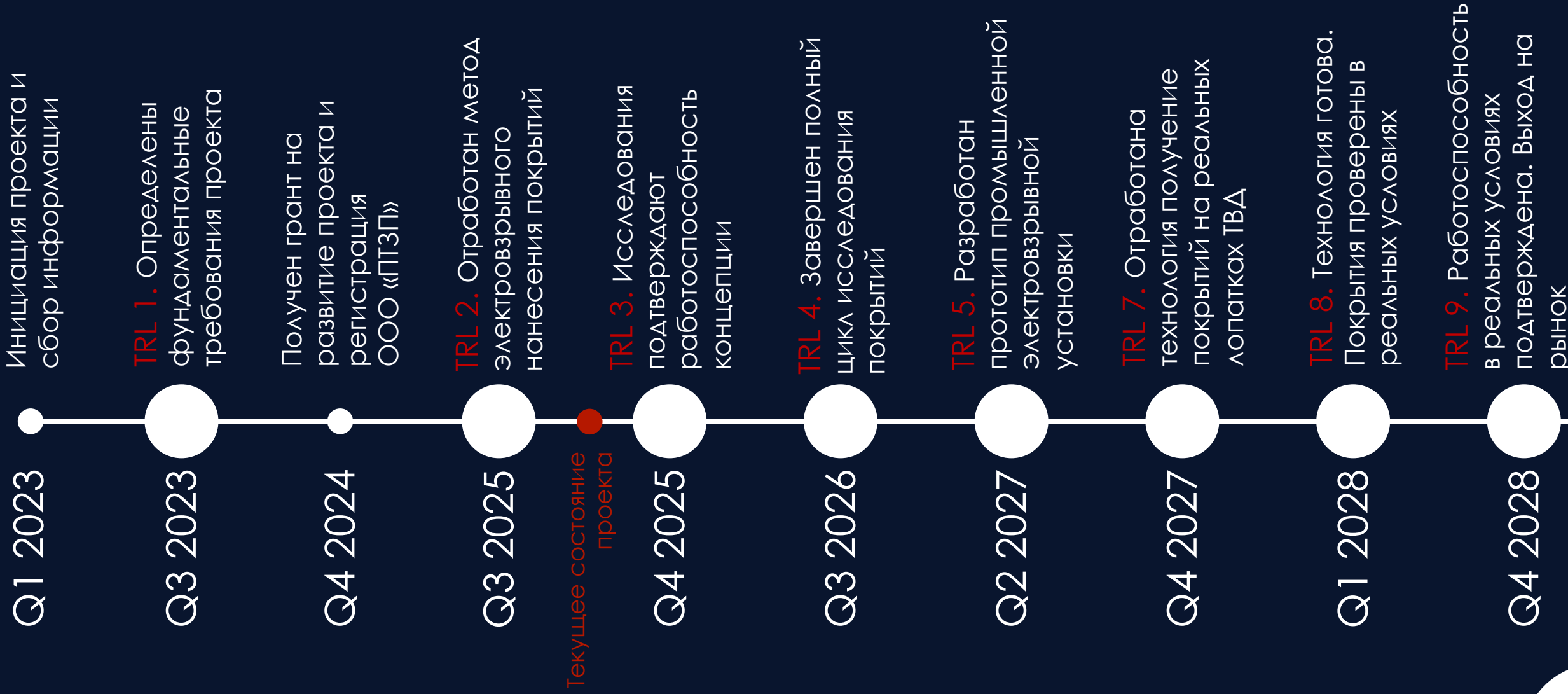
Кратковременные термоциклические испытания



Выход на TRL 3 в Q4 2025



Дорожная карта





Необходимое финансирование TRL 3 –5 (1 Этап)



! Возможен возврат
инвестиций до 12,5 млн ₽

Необходимые ресурсы TRL 3–9

Необходимые ресурсы для реализации проекта:

- Доступ к лабораторному оборудованию (SEM / EDS, XRD)
- Доступ к регламентам испытаний
- Рекомендации по процедурам лицензирования и сертификации технологий



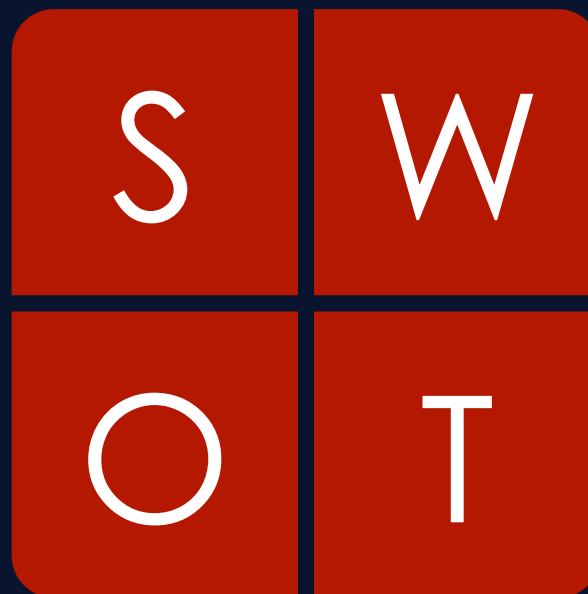
! Возможен возврат инвестиций
суммарно до 20 млн ₽



SWOT анализ

- Низкая стоимость оборудования по сравнению EB-PVD методом
- Высокая скорость напыления
- Высокая адгезионная прочность покрытий

- Снижения зависимости от импортных технологий EB-PVD и APS
- Возможность частичного возврата инвестиций
- Снижение себестоимости нанесения покрытий



- Низкий уровень TRL
 - Возможность получения колонной структуры (столбчатой структуры) изучена слабо
 - Высокие затраты на НИОКР
- Потенциальные проблемы сертификации
 - Долгие сроки разработки и внедрения
 - Срыв сроков поставок оборудования и материалов



ООО «ПТЗП»



ОПН 1127921

Спасибо за внимание!

Филяков А.Д.

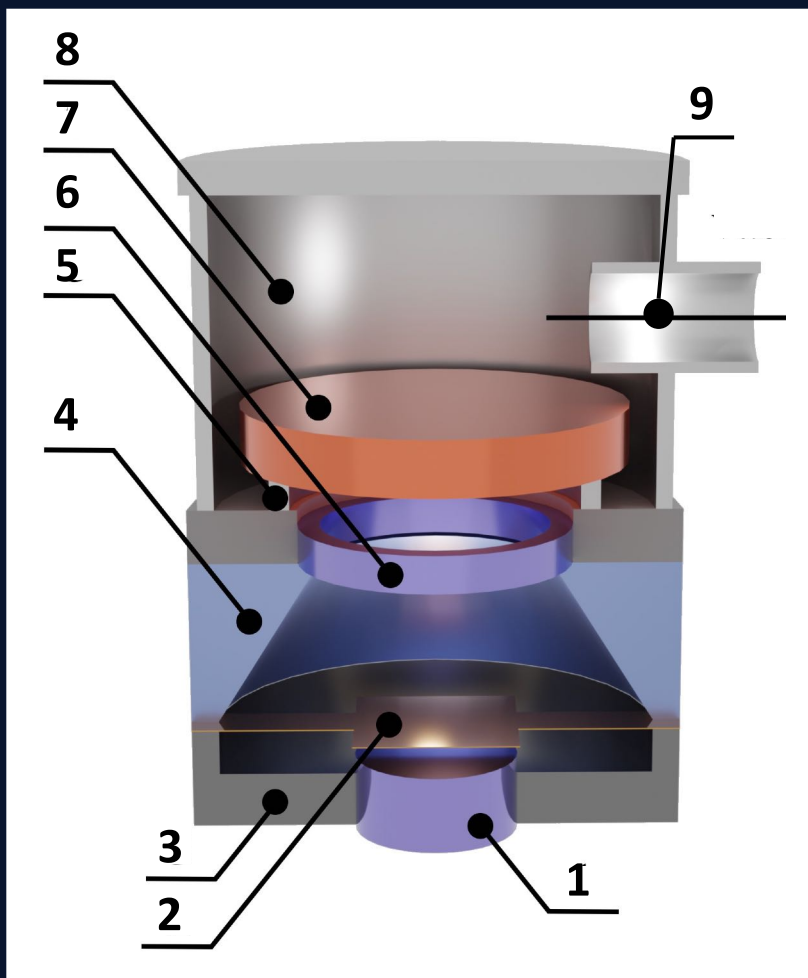
тел.: +7 (903)-994-71-20

e-mail: filyakov.1999@mail.ru





Приложение 1. Схема электровзрывной камеры

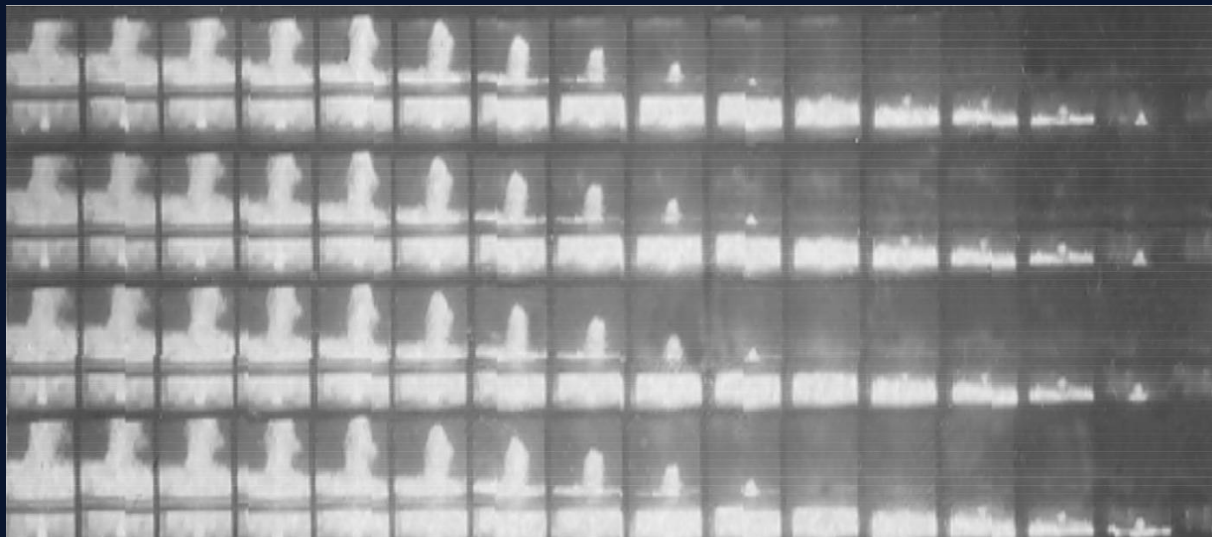


Схематическое изображение плазменного ускорителя установки :

- 1 – внутренний цилиндрический электрод;
- 2 – композитный электровзрываемый проводник;
- 3 – изолятор;
- 4 – разрядная камера (сопло);
- 5 – держатель образца;
- 6 – внешний кольцевой электрод;
- 7 – образец;
- 8 – вакуумная камера;
- 9 – Система откачки воздуха.



Приложение 2. Процесс электровзрывного напыления



Однокадровые изображения зоны распространения плазмы. Размер каждого кадра $60 \times 60 \text{ мм}^2$. Интервал между кадрами 1 мкс. Начало распространения плазмы соответствует правому верхнему кадру.

Sarychev, Vladimir, et al. "Modeling of the initial stages of the formation of heterogeneous plasma flows in the electric explosion of conductors." *Current Applied Physics* 18.10 (2018): 1101-1107.

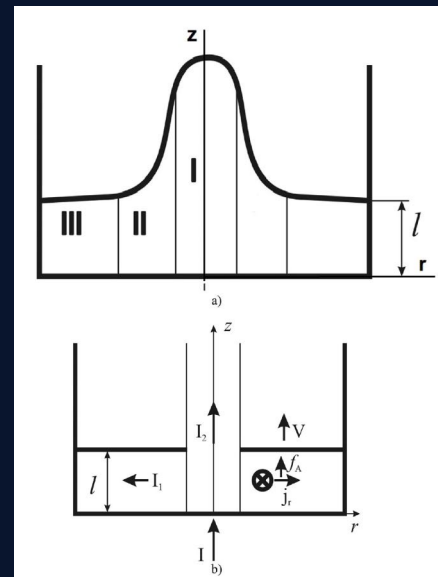
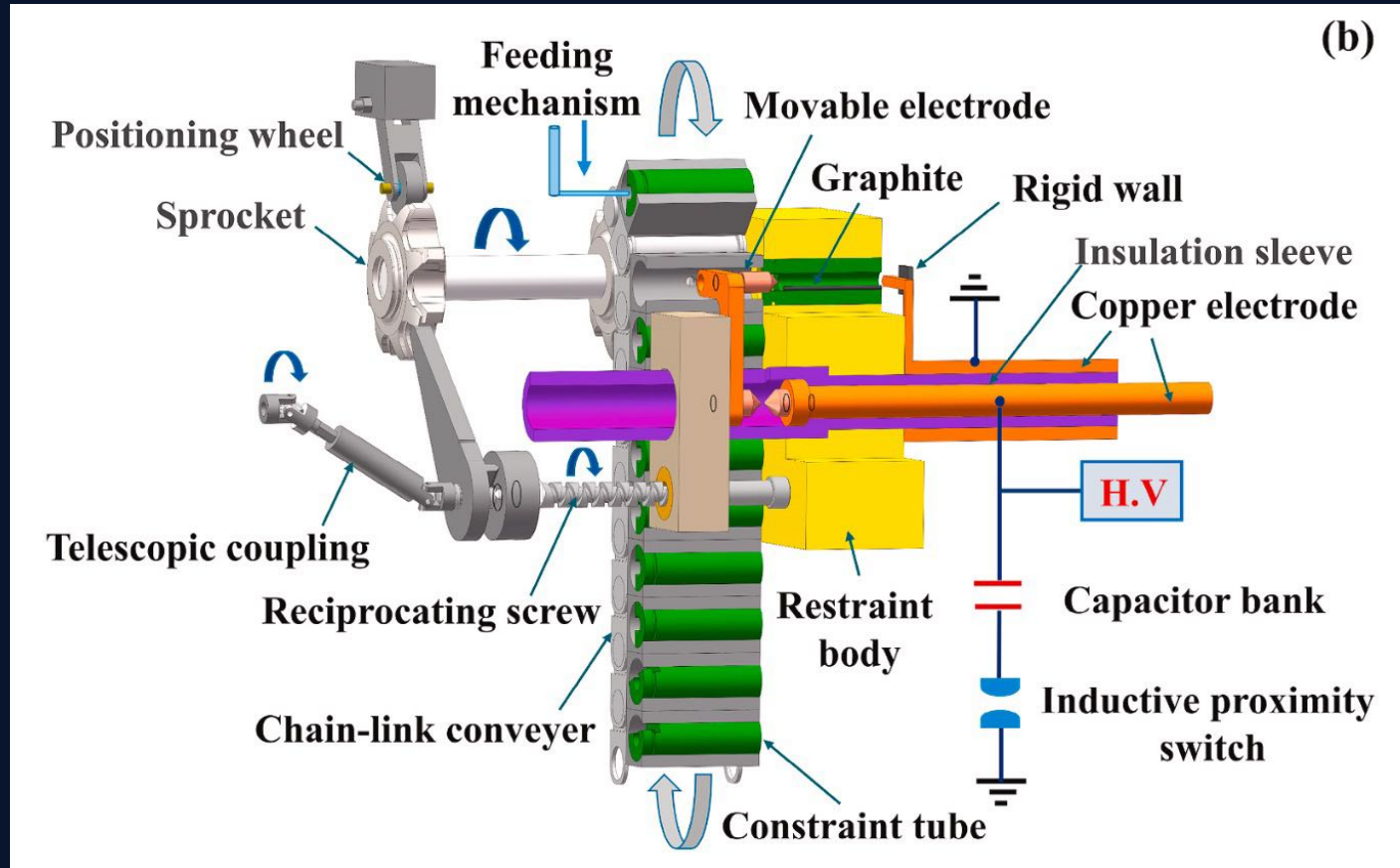


Схема распространения плазмы (I – плазменный фокус, II – зона поворота плазменного потока, III – зона параллельного течения) (а), Картина распределения электрического тока в плазме (б) (I_1 , I_2 – токи на диске и вдоль оси соответственно, I – сила тока через батарею, V – скорость вдоль оси z , f_A – плотность силы Ампера).



Приложение 3. Пример трубчатой конструкции электровзрывной камеры

*



* Wang, Xudong, et al. "Synthesis of graphene nanosheets by the electrical explosion of graphite powder confined in a tube." *Ceramics International* 47.15 (2021): 21934-21942.