

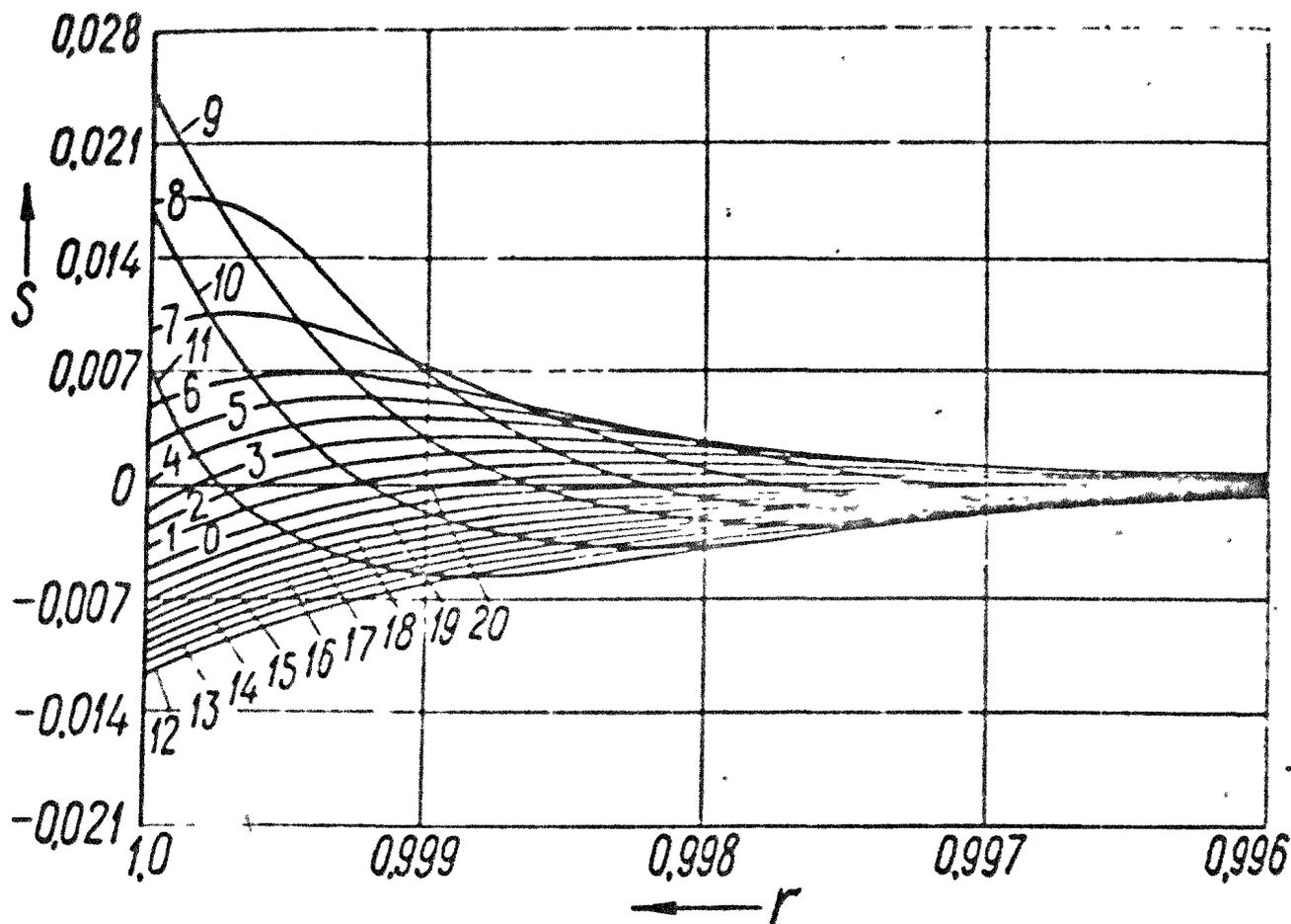


Инновационные технологии в тяжелонагруженных трибосопряжениях

**Президент РГУПС, академик РАН
КОЛЕСНИКОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ**



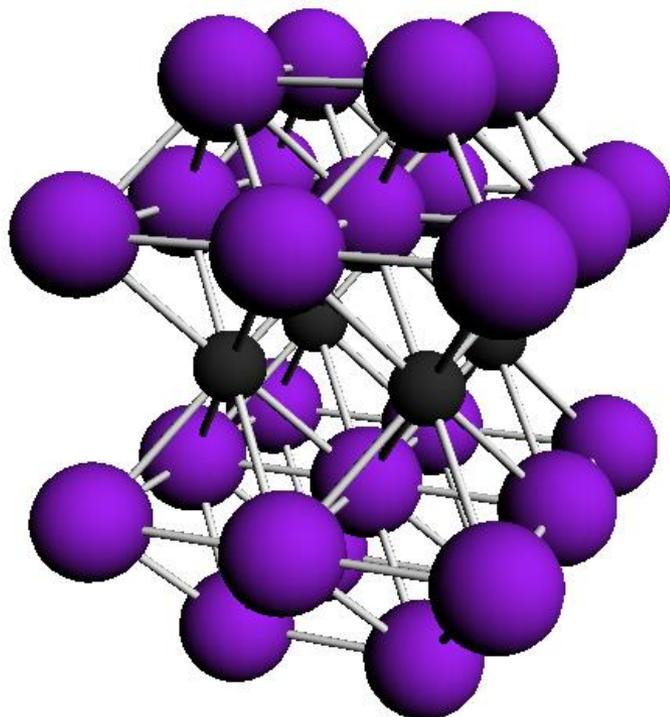
Изменения нестационарной составляющей $S(r, \theta)$ температурного поля



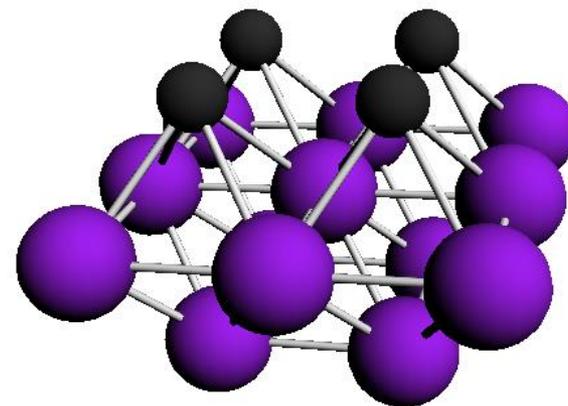
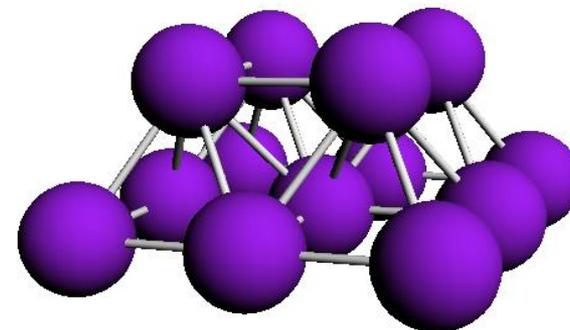
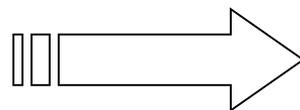
Применение разработанных композиционных материалов



Моделирование процессов упрочнения – разупрочнения на границе зерен



E1

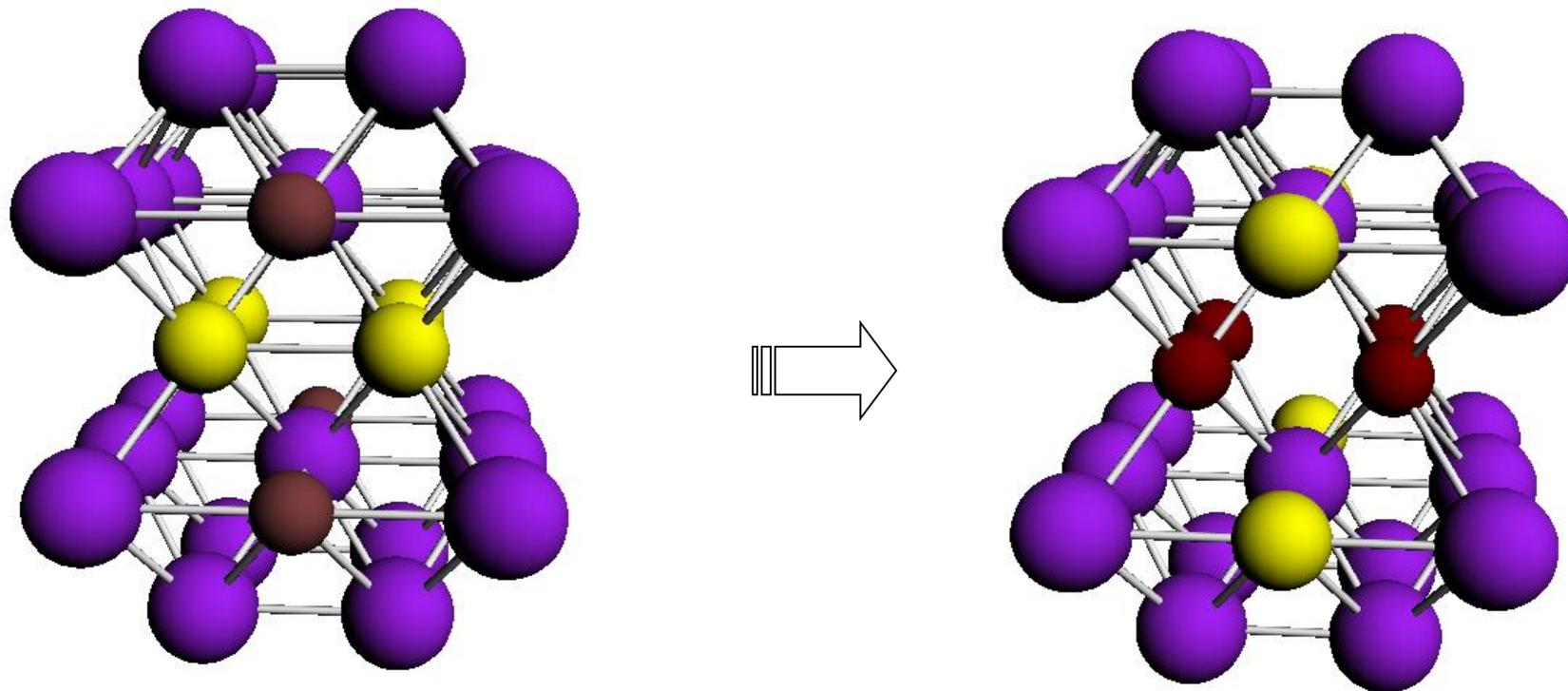


E2

УПРОЧНЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ: бор, углерод, азот, молибден : $E1 < E2$.

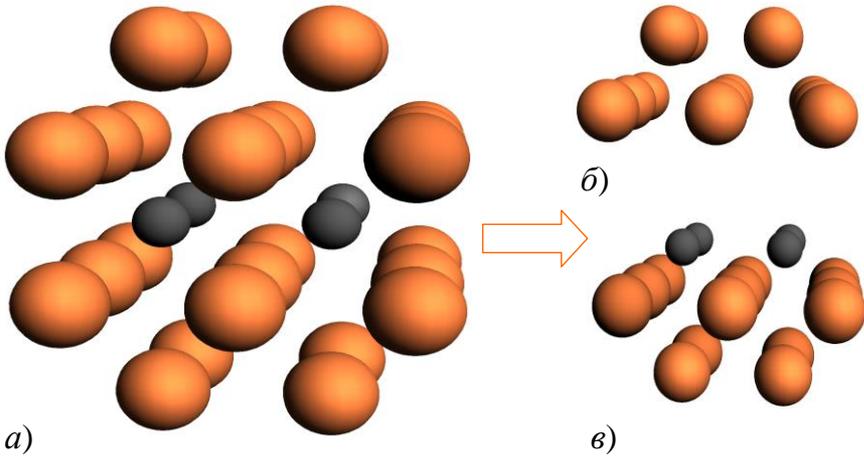
РАЗУПРОЧНЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ: литий, кремний, **фосфор, сера**, медь, никель: $E > E2$

Блокирование разупрочняющих элементов в объеме зерен

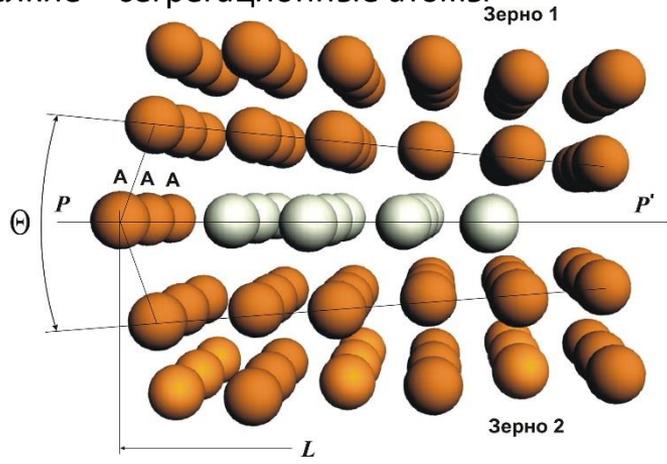
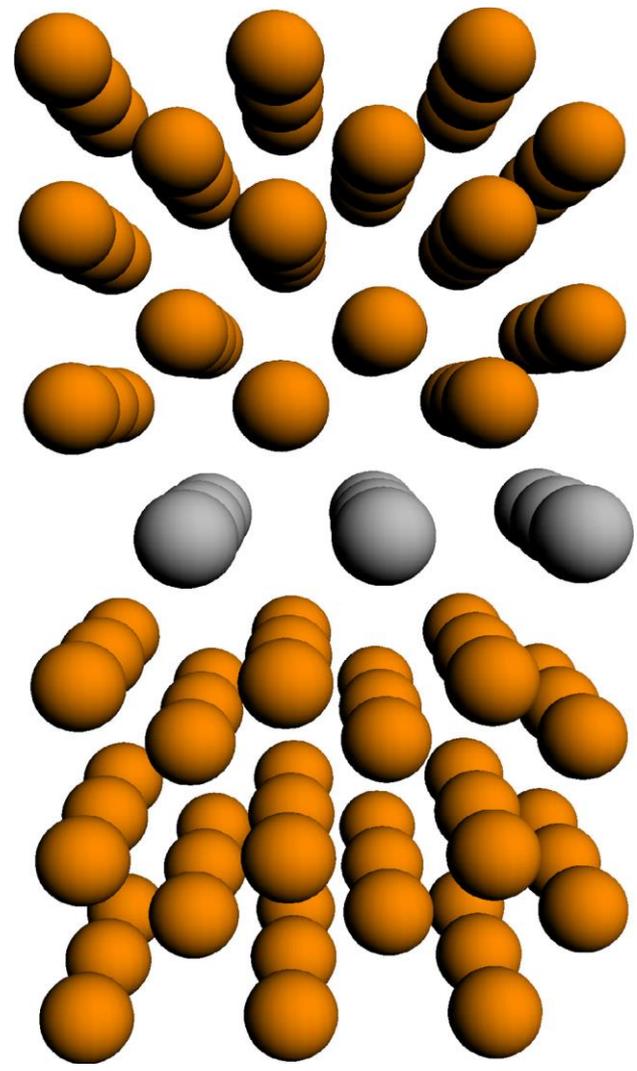


$E_1 > E_2$. Бор занимает место серы
на границе между зернами.

Исследование сегрегационных явлений



Распад сегрегационного кластера из 30 атомов (а) на кластер из чистого железа (б) и адсорбционный кластер. Крупные кружки соответствуют атомам Fe, мелкие – сегрегационные атомы



Моделирование границы зёрен с поверхностью (индекс Миллера 110) с помощью 5-слойной дупериодической пластины

Моделирование границы зёрен с помощью 11-слойной дупериодической пластины с поверхностью (индекс Миллера 100)

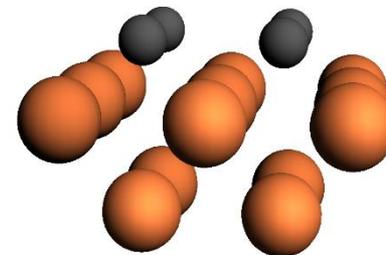
Энергия связи (в эВ) адсорбционных кластеров E_a в модели пластины с поверхностью зёрен (100)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	<i>H</i> -40,3										<i>He</i> ?
2	<i>Li</i> -39,1	<i>Be</i> -40,3	<i>B</i> -43,2	<i>C</i> -45,2	<i>N</i> -45,4	<i>O</i> -43,7	<i>F</i> -41,5				<i>Ne</i> ?
3	<i>Na</i> -38,0	<i>Mg</i> -38,2	<i>Al</i> -40,5	<i>Si</i> -41,7	<i>P</i> -42,1	<i>S</i> -41,4	<i>Cl</i> -38,8				<i>Ar</i> ?
4	<i>K</i> -36,3	<i>Ca</i> -37,8	<i>Sc</i> -41,0	<i>Ti</i> -43,0	<i>V</i> -44,0	<i>Cr</i> -44,4	<i>Mn</i> -44,5	<i>Fe</i> -44,1	<i>Co</i> -43,6	<i>Ni</i> -41,1	
	<i>Cu</i> -39,6	<i>Zn</i> -38,0	<i>Ga</i> -39,7	<i>Ge</i> -40,8	<i>As</i> -41,0	<i>Se</i> -40,4	<i>Br</i> -38,1				<i>Kr</i> ?
5	<i>Rb</i> -35,6	<i>Sr</i> -36,7	<i>Y</i> -40,3	<i>Zr</i> -42,7	<i>Nb</i> -44,7	<i>Mo</i> -45,1	<i>Tc</i> -46,3	<i>Ru</i> -43,8	<i>Rh</i> -42,6	<i>Pd</i> -39,3	
	<i>Ag</i> -38,9	<i>Cd</i> -37,5	<i>In</i> -39,2	<i>Sn</i> -40,0	<i>Sb</i> -39,7	<i>Te</i> -38,4	<i>I</i> -36,6				<i>Xe</i> ?

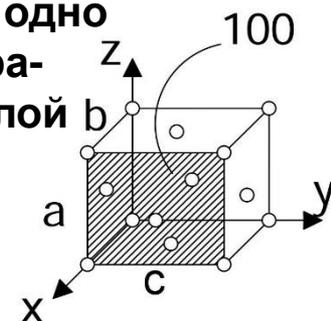
Энергия связи (в эВ) сегрегационных кластеров E_s в модели пластины с поверхностью зёрен (100)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	<i>H</i> -77,5										<i>He</i> ?
2	<i>Li</i> -76,5	<i>Be</i> -78,9	<i>B</i> -80,3	<i>C</i> -82,5	<i>N</i> -82,7	<i>O</i> -81,0	<i>F</i> -78,2				<i>Ne</i> ?
3	<i>Na</i> -75,1	<i>Mg</i> -76,0	<i>Al</i> -78,7	<i>Si</i> -80,3	<i>P</i> -80,0	<i>S</i> -78,2	<i>Cl</i> -75,7				<i>Ar</i> ?
4	<i>K</i> -73,8	<i>Ca</i> -75,8	<i>Sc</i> -79,4	<i>Ti</i> -81,9	<i>V</i> -83,2	<i>Cr</i> -83,2	<i>Mn</i> -83,0	<i>Fe</i> -82,4	<i>Co</i> -82,0	<i>Ni</i> -79,4	
	<i>Cu</i> -77,5	<i>Zn</i> -75,6	<i>Ga</i> -77,6	<i>Ge</i> -78,7	<i>As</i> -78,6	<i>Se</i> -77,0	<i>Br</i> -74,4				<i>Kr</i> ?
5	<i>Rb</i> -73,7	<i>Sr</i> -75,0	<i>Y</i> -78,5	<i>Zr</i> -81,6	<i>Nb</i> -83,4	<i>Mo</i> -83,7	<i>Tc</i> -84,8	<i>Ru</i> -82,2	<i>Rh</i> -81,0	<i>Pd</i> -77,3	
	<i>Ag</i> -76,5	<i>Cd</i> -75,1	<i>In</i> -76,9	<i>Sn</i> -77,3	<i>Sb</i> -76,8	<i>Te</i> -75,0	<i>I</i> -73,0				<i>Xe</i> ?

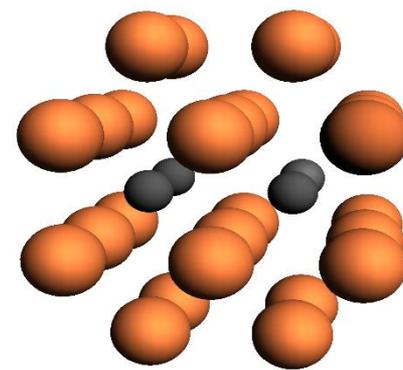
адсорбционный кластер



включает одно зерно и граничный слой



сегрегационный кластер включает два зерна и граничный слой

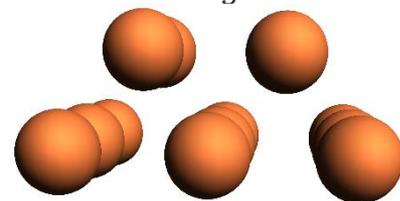


Энергия E_d (в эВ), необходимая для распада сегрегационных кластеров в модели пластины с поверхностью зёрен (100)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	<i>H</i> 0,6										<i>He</i> 0,0
2	<i>Li</i> 0,8	<i>Be</i> 2,0	<i>B</i> 2,3	<i>C</i> 2,2	<i>N</i> 1,5	<i>O</i> 0,7	<i>F</i> 0,1				<i>Ne</i> 0,0
3	<i>Na</i> 0,5	<i>Mg</i> 1,2	<i>Al</i> 1,8	<i>Si</i> 2,4	<i>P</i> 1,3	<i>S</i> 0,2	<i>Cl</i> 0,3				<i>Ar</i> 0,0
4	<i>K</i> 0,9	<i>Ca</i> 1,4	<i>Sc</i> 1,8	<i>Ti</i> 2,4	<i>V</i> 2,6	<i>Cr</i> 2,2	<i>Mn</i> 1,9	<i>Fe</i> 1,7	<i>Co</i> 1,8	<i>Ni</i> 1,7	<i>Kr</i> 0,0
	<i>Cu</i> 1,2	<i>Zn</i> 1,0	<i>Ga</i> 1,3	<i>Ge</i> 1,3	<i>As</i> 1,0	<i>Se</i> 0,0	<i>Br</i> 0,0				
5	<i>Rb</i> 1,5	<i>Sr</i> 1,7	<i>Y</i> 1,7	<i>Zr</i> 2,3	<i>Nb</i> 2,1	<i>Mo</i> 2,0	<i>Tc</i> 1,8	<i>Ru</i> 1,9	<i>Rh</i> 1,9	<i>Pd</i> 1,4	<i>Xe</i> 0,0
	<i>Ag</i> 1,0	<i>Cd</i> 1,1	<i>In</i> 1,1	<i>Sn</i> 0,8	<i>Sb</i> 0,6	<i>Te</i> 0,1	<i>I</i> 0,0				

$$E_d = |E_s - E_a - E_g|$$

где E_s - энергия связи сегрегационного кластера, включающая два зерна и граничный слой между ними; E_a - энергия связи адсорбционного кластера, включающего только одно зерно и граничный слой; E_g - энергия связи кластера, состоящего из одного зерна чистого металла ($E_g = -36,6$ эВ).

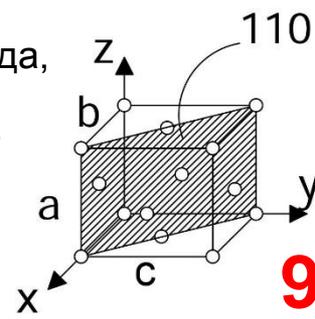


Энергия связи (в эВ) адсорбционных кластеров в модели пластины с поверхностью зёрен (110)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	<i>H</i> -34,6										<i>He</i> *
2	<i>Li</i> -31,4	<i>Be</i> -34,1	<i>B</i> -37,9	<i>C</i> -41,1	<i>N</i> -42,1	<i>O</i> -40,2	<i>F</i> -36,0				<i>Ne</i> *
3	<i>Na</i> -28,2	<i>Mg</i> -28,7	<i>Al</i> -33,6	<i>Si</i> -36,6	<i>P</i> -37,1	<i>S</i> -34,0	<i>Cl</i> -28,9				<i>Ar</i> *
4	<i>K</i> -23,6	<i>Ca</i> -25,0	<i>Sc</i> -32,9	<i>Ti</i> -38,7	<i>V</i> -42,0	<i>Cr</i> -43,2	<i>Mn</i> -43,4	<i>Fe</i> -42,9	<i>Co</i> -41,6	<i>Ni</i> -36,6	<i>Kr</i> *
	<i>Cu</i> -33,6	<i>Zn</i> -29,3	<i>Ga</i> -32,0	<i>Ge</i> -34,4	<i>As</i> -34,6	<i>Se</i> -31,8	<i>Br</i> -27,0				
5	<i>Rb</i> -20,2	<i>Sr</i> -21,1	<i>Y</i> -29,0	<i>Zr</i> -37,0	<i>Nb</i> -43,1	<i>Mo</i> -44,5	<i>Tc</i> -46,8	<i>Ru</i> -41,4	<i>Rh</i> -38,7	<i>Pd</i> -31,6	<i>Xe</i> *
	<i>Ag</i> -30,2	<i>Cd</i> -26,6	<i>In</i> -27,6	<i>Sn</i> -28,2	<i>Sb</i> -27,4	<i>Te</i> -24,3	<i>I</i> -18,9				

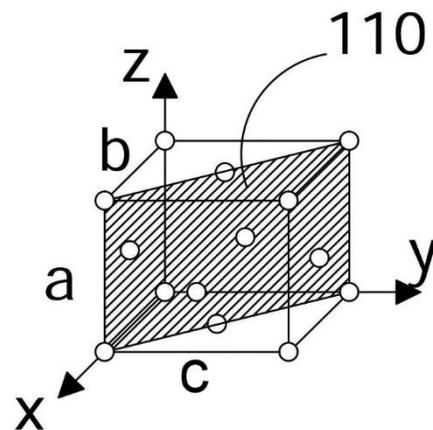
Видим:

- 1) атомы щелочных металлов (серы, фосфора) разупрочняют связь между зёрнами, т.к. энергия распада сегрегационного кластера для них меньше, чем у железа;
- 2) Атомы углерода, бора, марганца прочно сшивают зёрна железа.



Энергия связи (в эВ) сегрегационных кластеров в модели пластины с поверхностью зёрен (110)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	<i>H</i> -63,2										<i>He</i> *
2	<i>Li</i> -60,7	<i>Be</i> -64,4	<i>B</i> -69,5	<i>C</i> -72,5	<i>N</i> -71,7	<i>O</i> -68,5	<i>F</i> -63,9				<i>Ne</i> *
3	<i>Na</i> -57,2	<i>Mg</i> -58,1	<i>Al</i> -63,5	<i>Si</i> -66,3	<i>P</i> -65,5	<i>S</i> -61,5	<i>Cl</i> -56,4				<i>Ar</i> *
4	<i>K</i> -52,9	<i>Ca</i> -55,1	<i>Sc</i> -63,3	<i>Ti</i> -69,5	<i>V</i> -73,1	<i>Cr</i> -74,1	<i>Mn</i> -73,8	<i>Fe</i> -72,8	<i>Co</i> -71,6	<i>Ni</i> -66,3	
	<i>Cu</i> -62,9	<i>Zn</i> -58,3	<i>Ga</i> -61,1	<i>Ge</i> -62,8	<i>As</i> -62,3	<i>Se</i> -59,4	<i>Br</i> -54,6				<i>Kr</i> *
5	<i>Rb</i> -49,2	<i>Sr</i> -50,9	<i>Y</i> -59,2	<i>Zr</i> -67,3	<i>Nb</i> -73,5	<i>Mo</i> -74,6	<i>Tc</i> -76,7	<i>Ru</i> -71,0	<i>Rh</i> -68,1	<i>Pd</i> -60,5	
	<i>Ag</i> -58,9	<i>Cd</i> -55,0	<i>In</i> -55,8	<i>Sn</i> -56,2	<i>Sb</i> -55,1	<i>Te</i> -52,0	<i>I</i> -46,6				<i>Xe</i> *

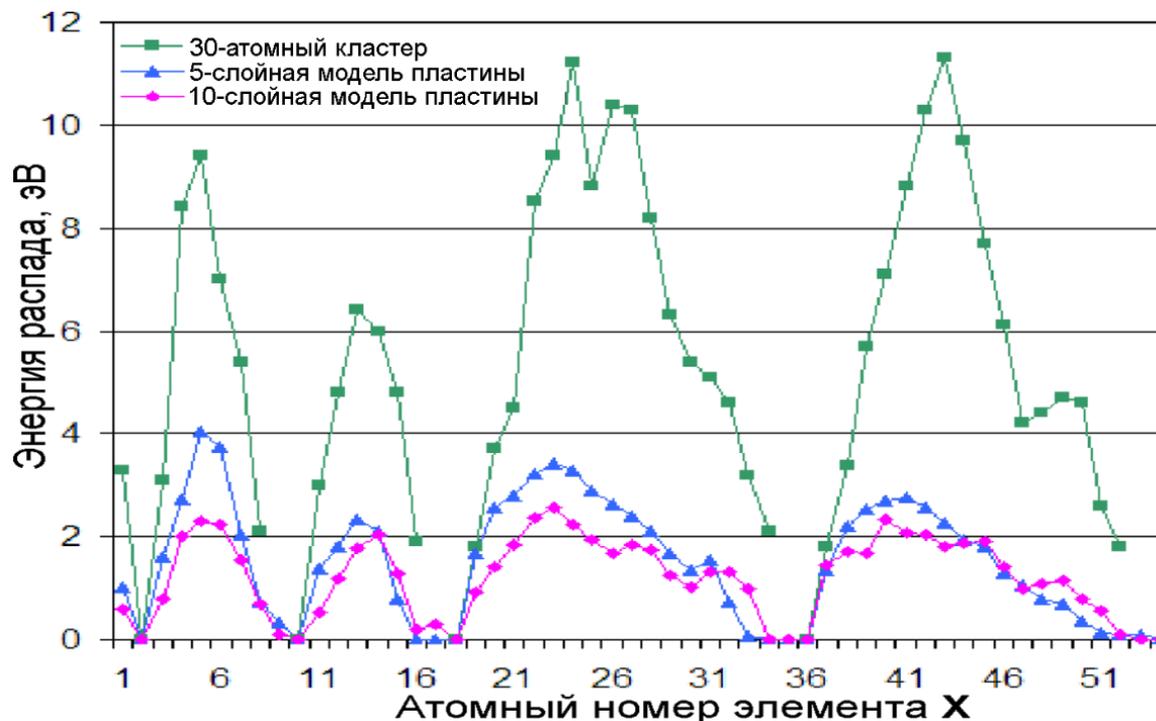


Энергия $E_d = |E_s - E_a - E_g|$ (в эВ), необходимая для распада сегрегационных кластеров в модели пластины с поверхностью зёрен (110)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	<i>H</i> 1,0										<i>He</i> 0,0
2	<i>Li</i> 1,6	<i>Be</i> 2,7	<i>B</i> 4,0	<i>C</i> 3,7	<i>N</i> 2,0	<i>O</i> 0,7	<i>F</i> 0,3				<i>Ne</i> 0,0
3	<i>Na</i> 1,4	<i>Mg</i> 1,8	<i>Al</i> 2,3	<i>Si</i> 2,1	<i>P</i> 0,8	<i>S</i> 0,0	<i>Cl</i> 0,0				<i>Ar</i> 0,0
4	<i>K</i> 1,7	<i>Ca</i> 2,6	<i>Sc</i> 2,8	<i>Ti</i> 3,2	<i>V</i> 3,4	<i>Cr</i> 3,3	<i>Mn</i> 2,9	<i>Fe</i> 2,6	<i>Co</i> 2,4	<i>Ni</i> 2,1	
	<i>Cu</i> 1,7	<i>Zn</i> 1,3	<i>Ga</i> 1,6	<i>Ge</i> 0,7	<i>As</i> 0,1	<i>Se</i> 0,0	<i>Br</i> 0,0				<i>Kr</i> 0,0
5	<i>Rb</i> 1,4	<i>Sr</i> 2,2	<i>Y</i> 2,5	<i>Zr</i> 2,7	<i>Nb</i> 2,8	<i>Mo</i> 2,6	<i>Tc</i> 2,3	<i>Ru</i> 2,0	<i>Rh</i> 1,8	<i>Pd</i> 1,3	
	<i>Ag</i> 1,1	<i>Cd</i> 0,8	<i>In</i> 0,7	<i>Sn</i> 0,4	<i>Sb</i> 0,1	<i>Te</i> 0,1	<i>I</i> 0,1				<i>Xe</i> 0,0

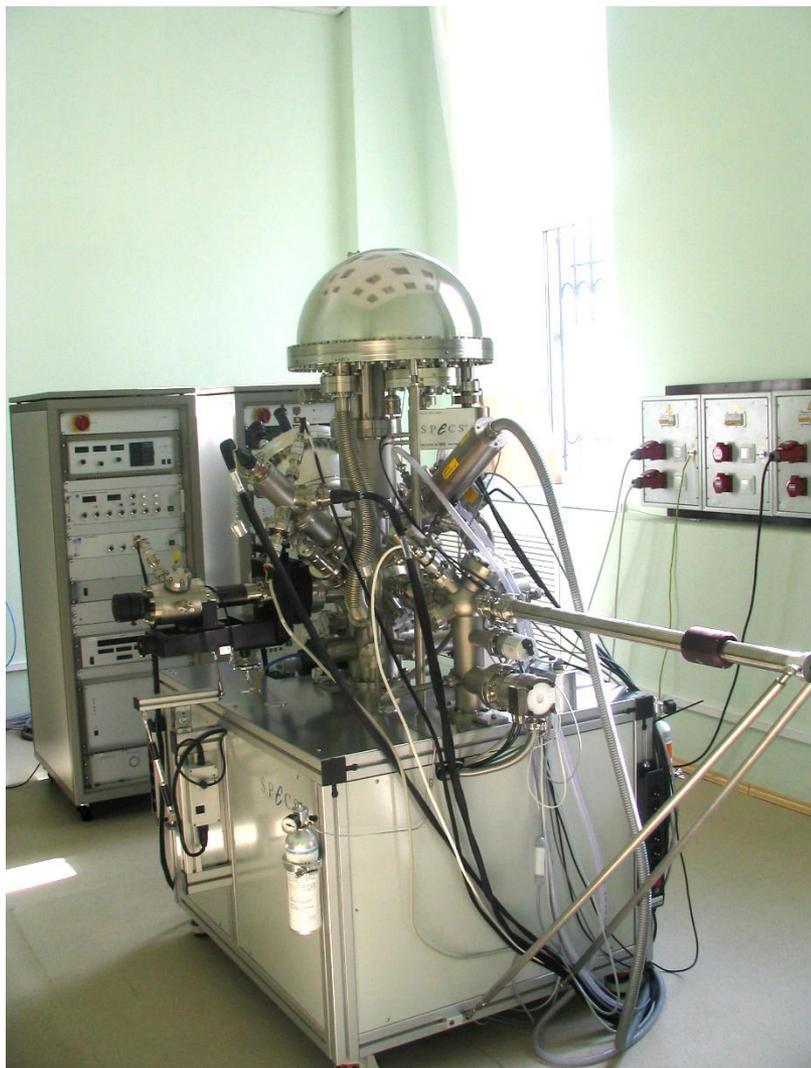
Здесь также видим:
 1) атомы щелочных металлов (серы, фосфора) разупрочняют связь между зёрнами, т.к. энергия распада сегрегационного кластера для них меньше, чем у железа;
 2) Атомы углерода, бора, марганца прочно сшивают зёрна железа.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ РАСПАДА СЕГРЕГАЦИОННЫХ КЛАСТЕРОВ В МОДЕЛИ ПЛАСТИНЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЁРЕН (110)



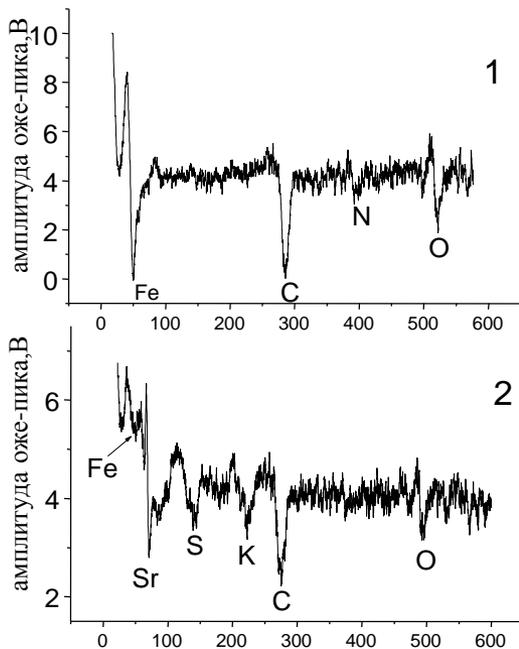
Видим периодическую зависимость величины энергии распада E_d от атомного номера элемента X для всех рассмотренных случаев. По сравнению со связью $Fe-Fe$ химическая связь элементов из начала любого из периодов с железом слабая, но с ростом номера элемента она вначале возрастает, а затем во второй половине – убывает.

Система анализа поверхности фирмы SPECS

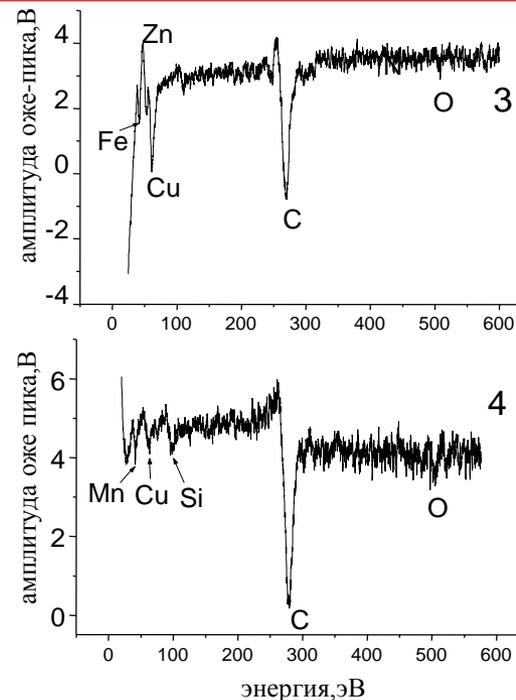


- РФЭС
- РФЭС с монохроматизацией
- Оже-спектроскопия
- Низковольтная растровая электронная микроскопия
- УФЭС
- Спектроскопия рассеянных медленных ионов

Оже – электронные спектры, полученные вблизи рабочей поверхности колеса



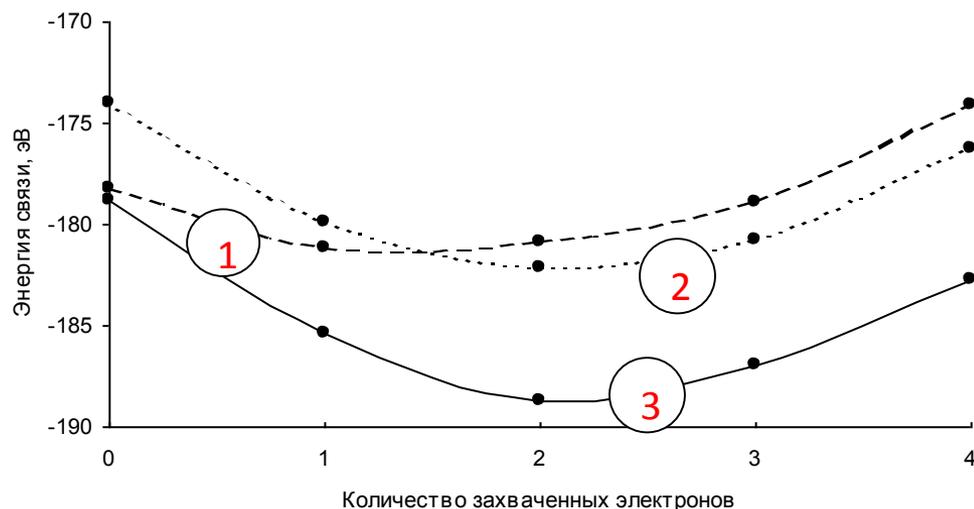
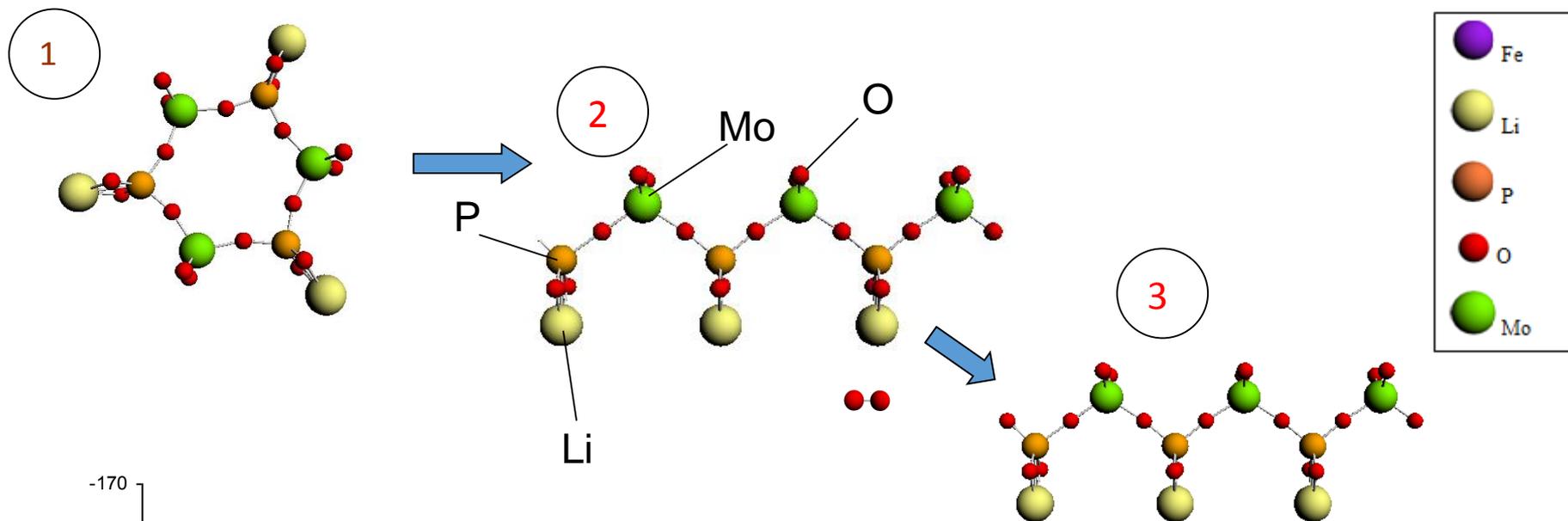
- 1. – на глубине 8мм;
- 2. – с поверхности отщепившегося фрагмента колеса;



- 3. – с поверхности поперечного скола отщепившегося фрагмента колеса;
- 4. – с поверхности поперечного скола пластины массопереноса.

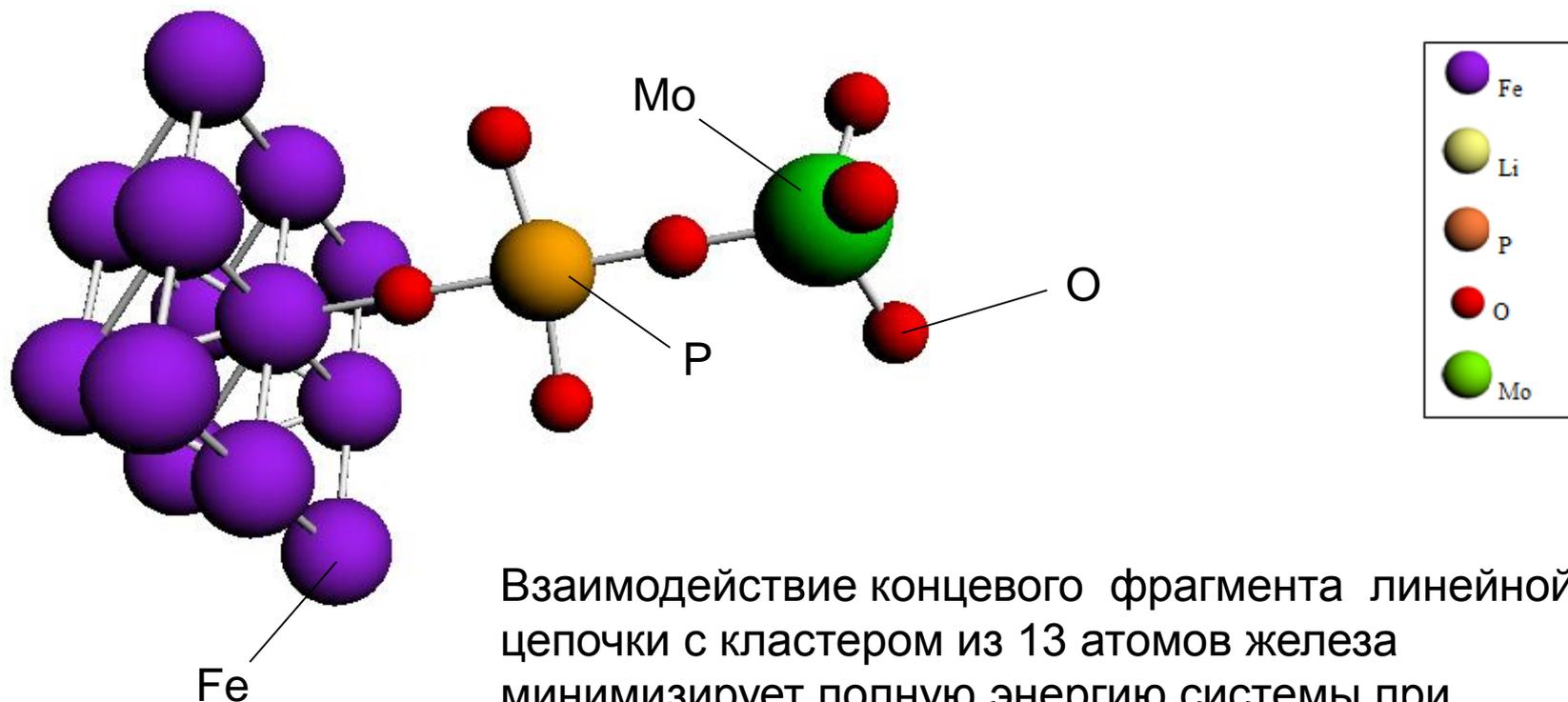
Элементы, принадлежащие материалу колеса								
Fe	C	Cu	Mn	Ni	P	S	Si	Cr
95.62	2.62	0.069	0.83	0.15	0.064	0.026	0.58	0.032

Зависимость энергии связи от электрического заряда молекулы



Перетекание электронов на циклическую молекулу $\text{Li}_3\text{P}_3\text{Mo}_3\text{O}_{18}$ (1) в кислородной среде превращает ее в радикал $(\text{Li}_3\text{P}_3\text{Mo}_3\text{O}_{18})^-$ (2) и, далее, в устойчивую линейную цепочку $\text{Li}_3\text{P}_3\text{Mo}_3\text{O}_{19}$ (3).

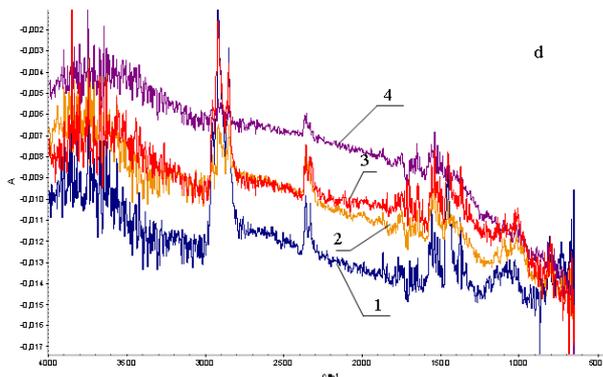
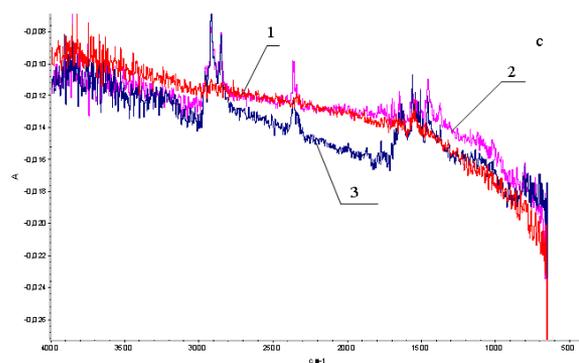
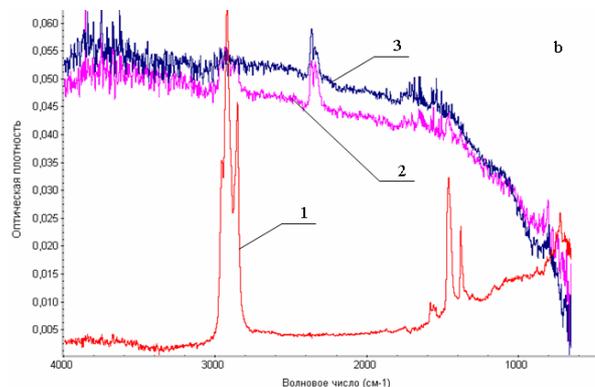
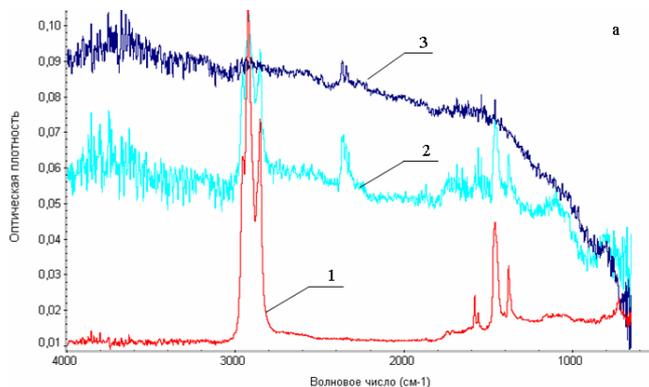
Адсорбция гетерополефосфатов щелочных металлов на поверхности железа



Взаимодействие концевго фрагмента линейной цепочки с кластером из 13 атомов железа минимизирует полную энергию системы при условии, что молекулярная ось нормальна к поверхности.

Расчеты выполнены с помощью программного ADF, основанного на теории функционала плотности

Исследования противоизносных присадок на основе неорганических полимерных фосфатов

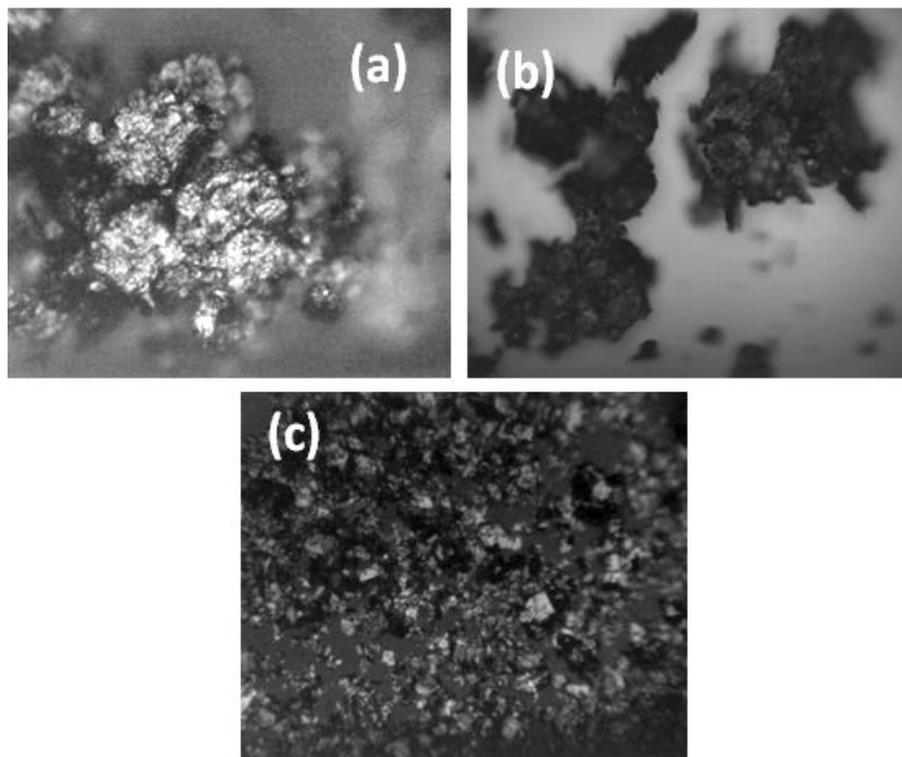


ИК спектр поверхности
металлического образца
после трибосопряжения
а) СК Пума МР
б) СК Пума МГ
при различных временах
трибоконтакта:
1– исходная СК;
2– 1 час; 3– 3 часа

СК Пума МГ с различными
присадками:
1– исходная Пума МГ;
2– Пума МГ+1% NaPMoO_6 ;
3– Пума МГ+1%
 $\text{NiP}_2\text{Mo}_2\text{O}_{12}$

СК Пума МГ+1%
 $\text{NiP}_2\text{Mo}_2\text{O}_{12}$ с различным
временем контакта:
1–1 час; 2– 6 часов;
3– 9 часов; 4 – 15 часов

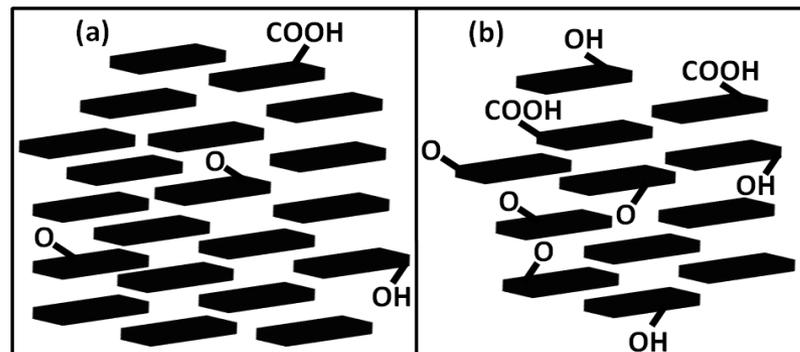
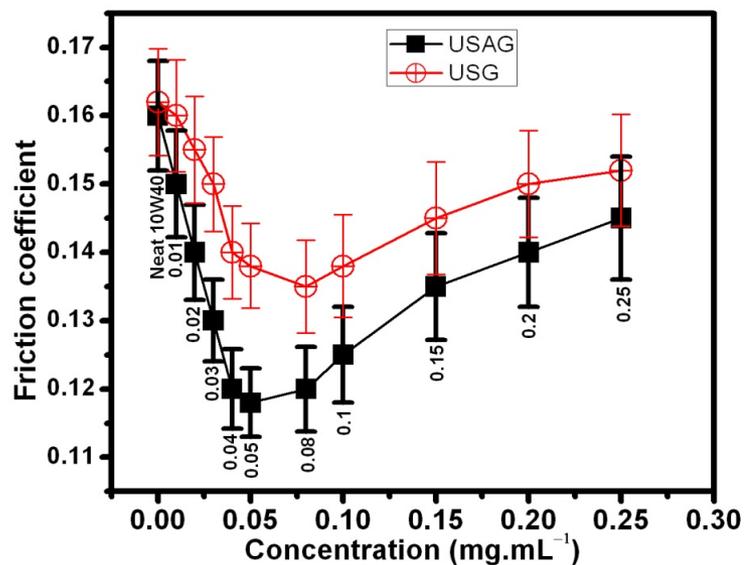
Оценка морфологии порошка графита



Микрофотографии:

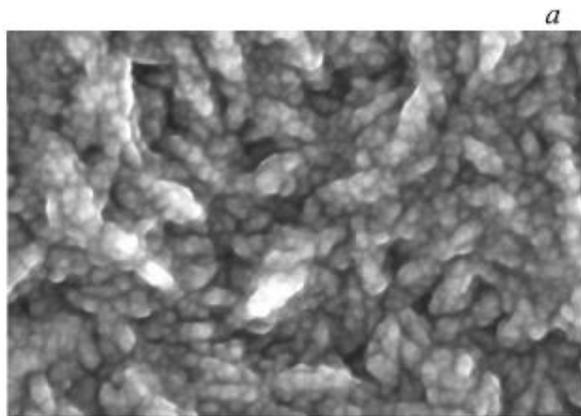
- порошка графита (а);
- после ультразвуковой обработки порошка графита (b);
- после облучения ультразвуком графитового порошка и состаренного в течение одного месяца в окружающей среде (с)

Концентрационная зависимость (0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.15, 0.2 and 0.25 mg.mL⁻¹) коэффициента трения образцов USG и USAG и стандартные ошибки.

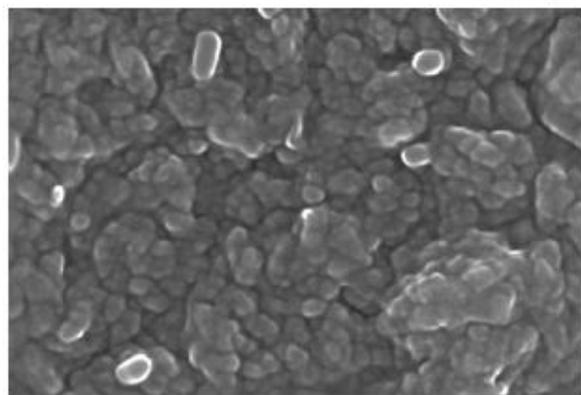


Изображение кислородсодержащих функциональных групп в образцах (a) USG и (b) USAG

Изображения участков нанокристаллических алмазных пленок с помощью растрового электронного микроскопа



20 nm

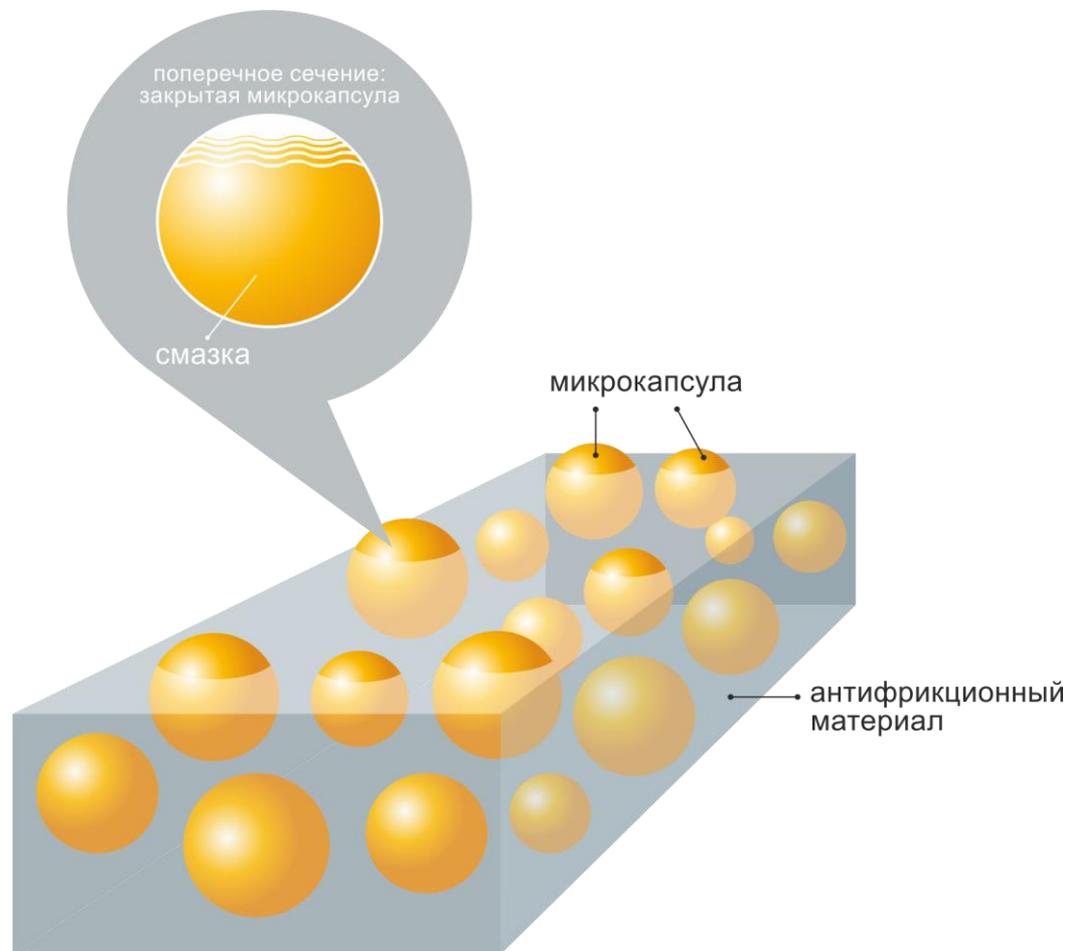


100 nm

а) пленка, созданная в среде Ar/CH_4 (размер микро кристаллитов 7-12 нм, твердость и модуль упругости 38,2 ГПа и 472 ГПа)

б) пленка, созданная в среде $\text{Ar}/2\% \text{H}_2/\text{CH}_4$ (размер микро кристаллитов 13-16 нм, твердость и модуль упругости 21,8 ГПа и 388 ГПа)

Технология создания полимерных композитов с включениями микрокапсул



Технология создания полимерных композитов с включениями микрокапсул





Участие ФГБОУ ВО РГУПС в программе реализации инновационного развития компании ООО «ЛокоТех»

Научно-испытательный центр
«Нанотехнологии и новые материалы»

В рамках реализации программы инновационного развития сервисной отрасли железнодорожного транспорта требуется решение важнейших задач по оптимизации ремонтных затрат за счет внедрения новых ресурсосберегающих технологий, и повышения энерго-эффективности производственных процессов. Одним из элементов инновационной инфраструктуры ФГБОУ ВО РГУПС получившее широкий научный опыт и наработку результатов в процессе выполнения задач договорной деятельности на железнодорожном транспорте является разработка оборудования и технологической оснастки при восстановлении и упрочнении, а также уменьшения коэффициента трения в трибосопряжении тяжело нагруженных узлов тягового подвижного состава. Конечным этапом таких работ является внедрение технологических циклов на производстве и тиражирование по программе импортзамещения. При этом постановка таких задач не ограничивается взаимодействием с внутрироссийскими компаниями как ОАО «РЖД», ООО «Локомотивные технологии» и ООО «СТМ-Сервис», а имеет опыт выхода и на страны ближнего зарубежья.

Разработка технологии восстановления наружного диаметра вкладышей моторно-осевых подшипников локомотивов до номинального размера



Головной исполнитель: Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

В РГУПС под руководством академика Колесникова В.И. разрабатываются новые методы восстановления деталей и узлов систем трибосопряжения, а также увеличение износостойкости и ресурса работы с применением модифицированных по составу материалов.

Базой для этих разработок являются исследования методов восстановления (таких как газотермическое, электроискровое легирование, плазменное), а также прочности связи покрытия, величин остаточных макронапряжений и металлографий покрытий. Установлены принципы совместимости химических элементов на границах зерен, которые позволили разработать материалы и технологию восстановления моторно-осевого подшипника (МОП) в целях снижения эксплуатационных затрат тягового подвижного состава при проведении технологического процесса ремонта.

В рамках работ по Плану НИОКР веден в эксплуатацию участок для восстановления МОП в СЛД «Тимашевск-Кавказский» филиала «Северо-Кавказский» ООО «Локотех=Сервис».

Рабочий процесс восстановления

МОП методом ЭДМ



Участок для
восстановления
МОП локомотива

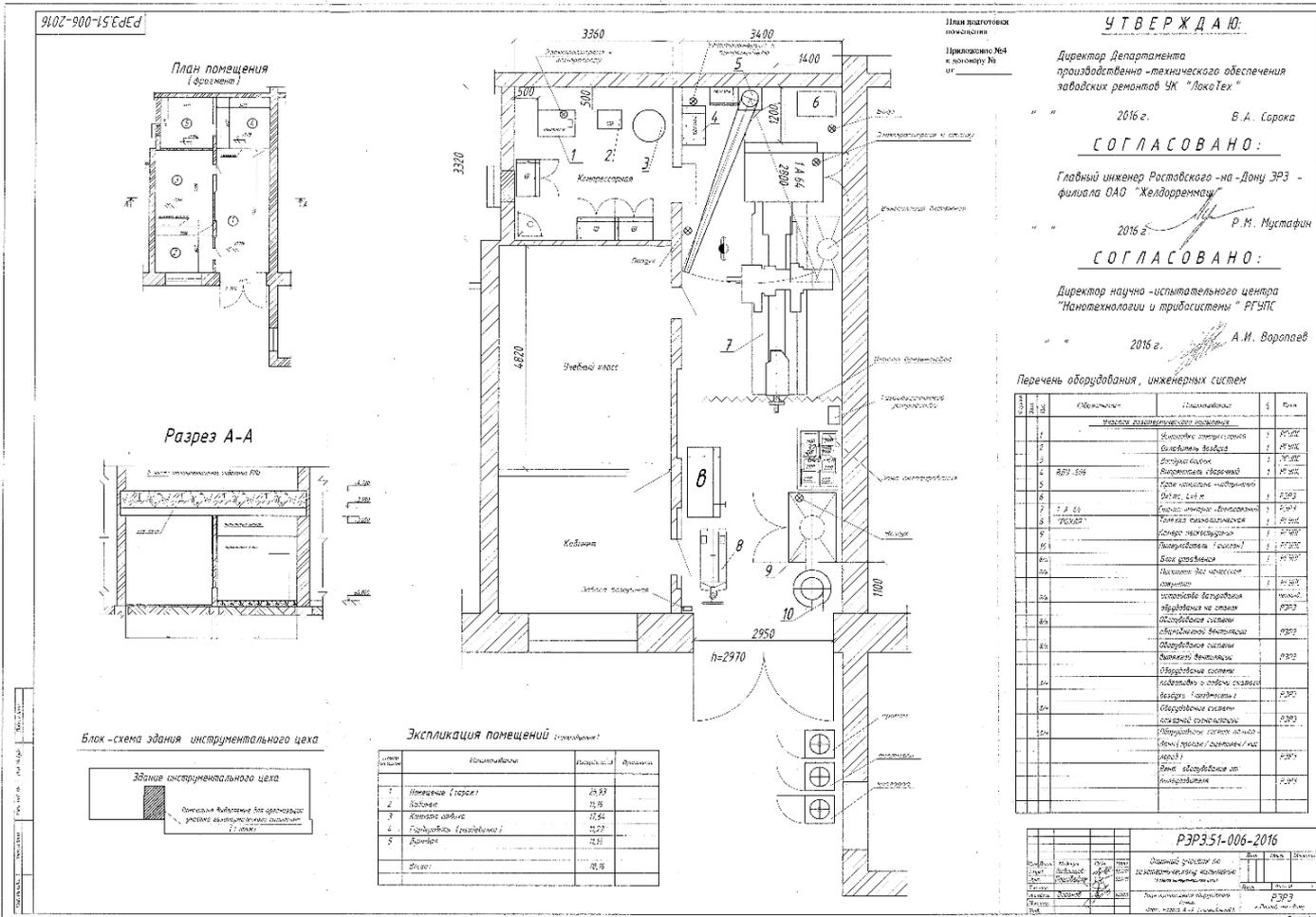


Благодаря участию в конкурсах компании ОАО «РЖД» и хозяйственных договорах научная группа академика Колесникова В.И. получила хороший научный задел, и в 2014 г. стали победителями Президентского гранта (РНФ) на 52 млн. рублей на 3 года (Проект №14-29-0016).



Введённый в эксплуатацию участок для восстановления МОР в сервисном локомотивном депо Тимашевск-Кавказский (СЛД-47)

Создан участок по программе разработки и внедрению новых технологий в процесс сервисного обслуживания ООО «Локомотивные технологии» на Ростовском ЭРЗ и обучению специалистов компании в целях технического сопровождения на производственных участках локомотивных депо подготовленного для тиражирования оборудования

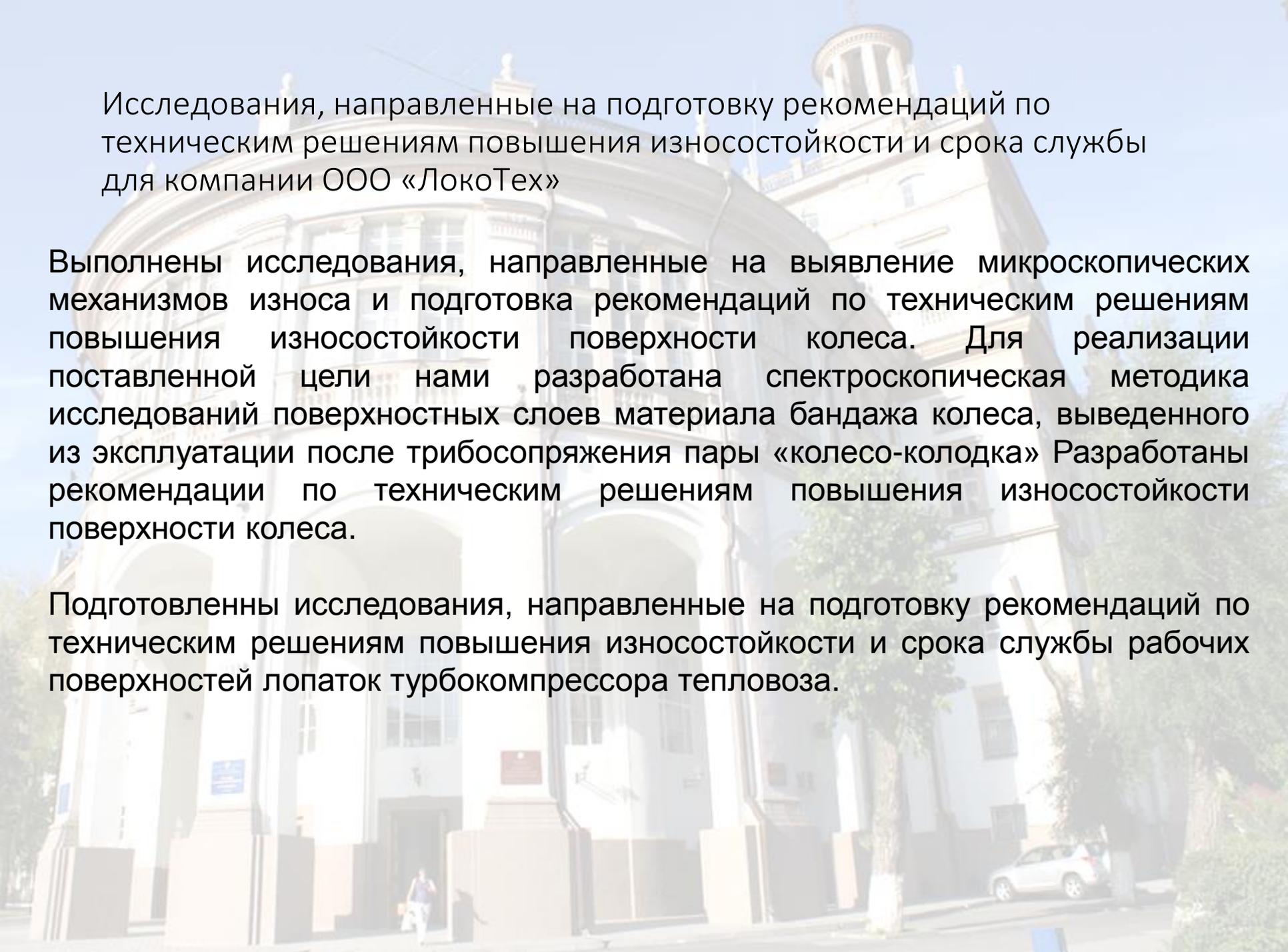


- Разработка оборудования для процессов упрочнения, легирования, нанесения термостойких покрытий и модификации поверхности при восстановлении деталей локомотивов

Разработка технологии, оборудования и технологической оснастки при восстановлении и упрочнении а также уменьшения коэффициента трения в трибосопряжении тяжело нагруженных узлов тягового подвижного состава, например восстановление и упрочнение таких элементов как:

- Лопатки турбокомпрессора;
- Боковая опора люлечного подвешивания;
- Балансир;
- Коленвалы и вкладыши тяговых дизельных установок;
- Сепараторы подшипников качения буксовых узлов;
- Посадочные места подшипников вала якоря тягового электродвигателя, оси колесной пары и тд.

Обработка деталей локомотивов антифрикционными самосмазывающимися композиционными материалами.



Исследования, направленные на подготовку рекомендаций по техническим решениям повышения износостойкости и срока службы для компании ООО «ЛокоТех»

Выполнены исследования, направленные на выявление микроскопических механизмов износа и подготовка рекомендаций по техническим решениям повышения износостойкости поверхности колеса. Для реализации поставленной цели нами разработана спектроскопическая методика исследований поверхностных слоев материала бандажа колеса, выведенного из эксплуатации после трибосопряжения пары «колесо-колодка» Разработаны рекомендации по техническим решениям повышения износостойкости поверхности колеса.

Подготовлены исследования, направленные на подготовку рекомендаций по техническим решениям повышения износостойкости и срока службы рабочих поверхностей лопаток турбокомпрессора тепловоза.



Спасибо за внимание!