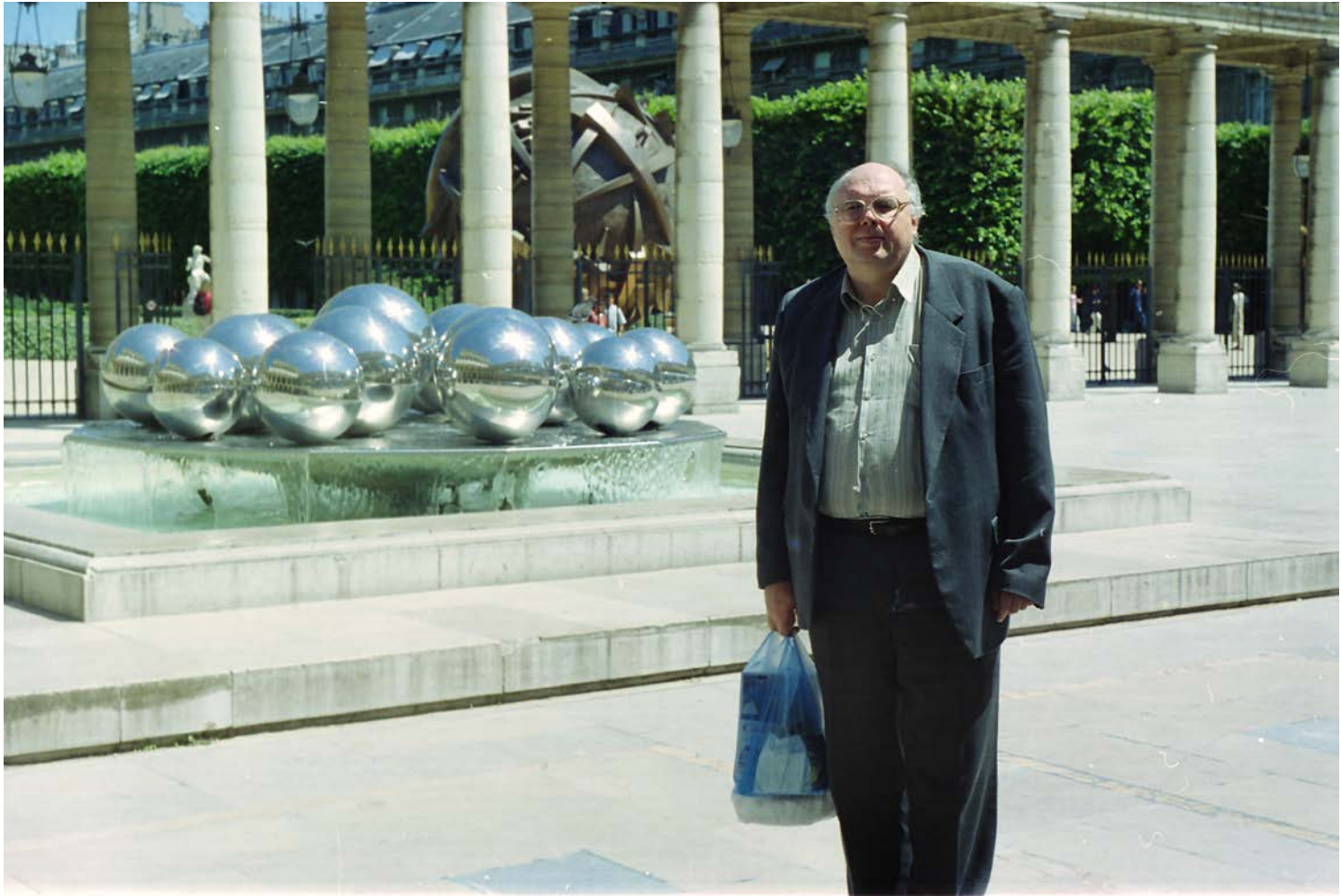


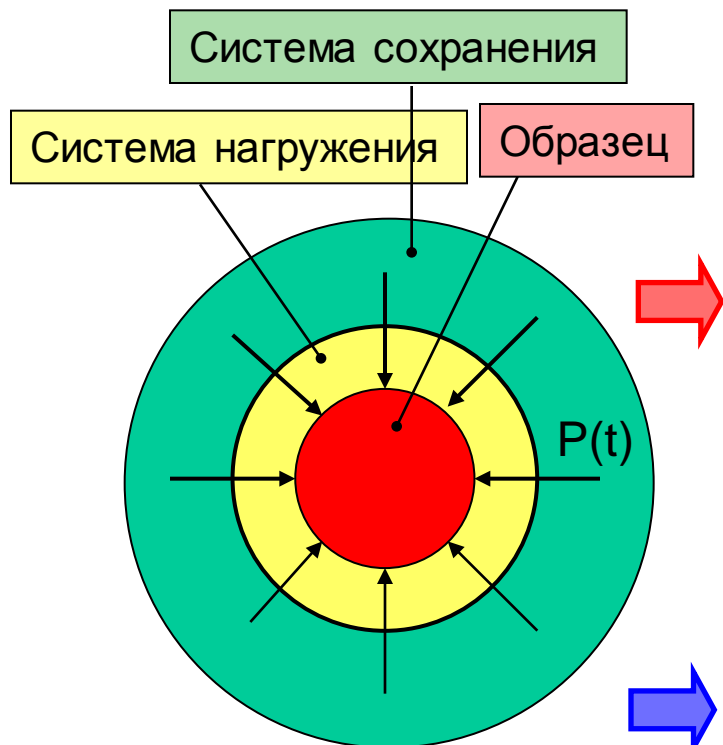
**Дополнительные экспериментальные
и расчетно-теоретические результаты
в подтверждение гипотезы Е.И.Забабахина
об ограниченности кумуляции энергии во
фронте сходящихся волн в средах с
фазовыми превращениями**

**Е.А.Козлов, А.В.Петровцев
РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И.Забабахина**

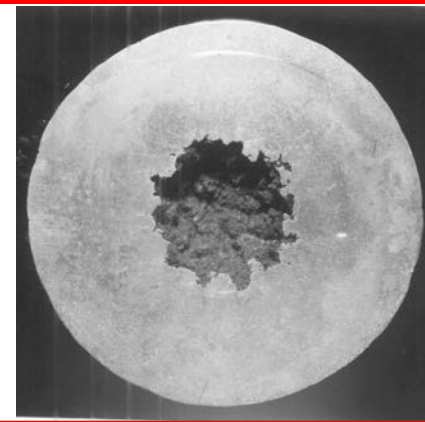
**XIII Забабахинские научные чтения,
20-24 марта 2017, Снежинск Челябинской обл.**



Сферические эксперименты сохранения



Материаловедческие исследования структуры и свойств материала обжатого образца



Калориметрические измерения приобретенной образцом энергии

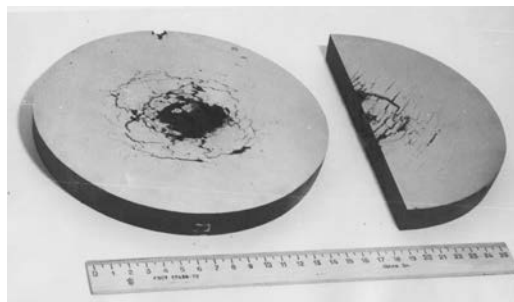
Материаловедческие исследования структуры и свойств сохраненных после взрывного нагружения образцов дополняются прецизионным математическим моделированием с учетом реальных свойств материалов

Первые эксперименты и расчеты

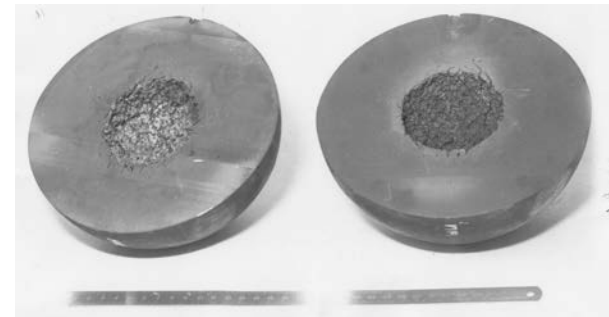
Ст3



30ХГСА HRc 35..40



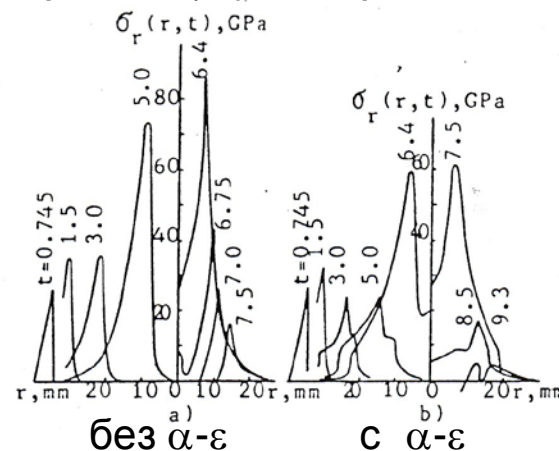
12Х18Н10Т



Сохраненные после обжатия шары $\varnothing 184$ мм. 18мм октоген содержащего ВВ

- Исследовалось влияние на кумуляцию свойств материала (Fe(Ст3), 30ХГСА, 12Х18Н10Т, Cu), размера шаров ($\varnothing 64 - \varnothing 184$ мм), условий нагружения
- Эксперимент¹: размеры полости в шарах из сталей с ФП близки при значительной разности прочностных свойств в начальном состоянии, и они существенно больше в шарах из материалов без ФП; увеличение мощности нагрузки приводит к увеличению расплава
- Расчет²: изменение структуры сходящейся ударной волны существенно уменьшает кумуляцию энергии на ее фронте при протекании ФП

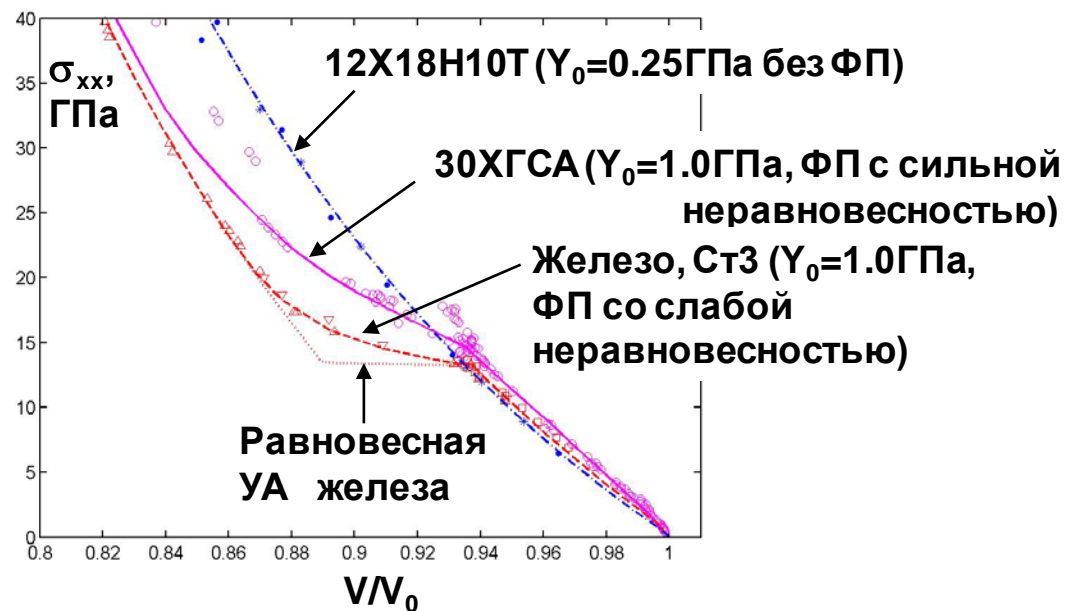
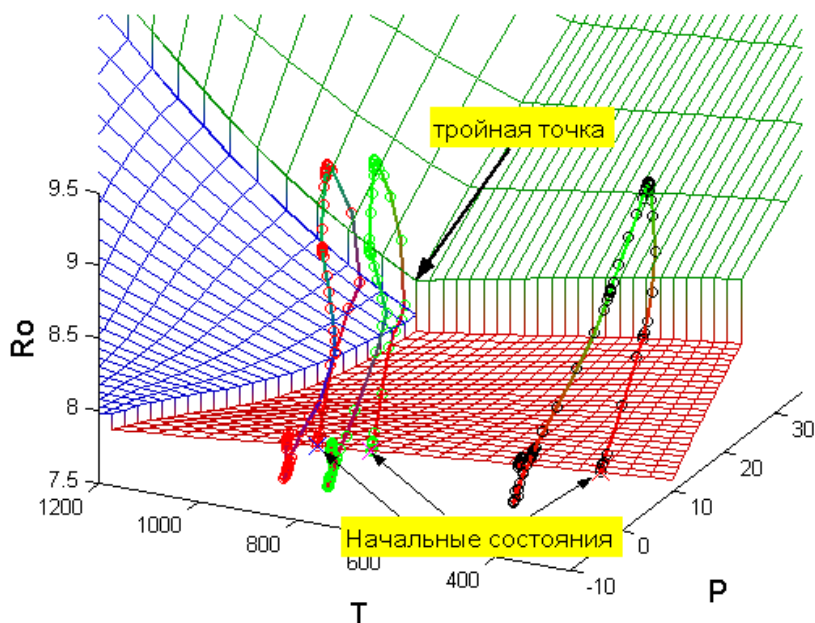
Профили $\sigma(r)$ в шаре Fe 32мм²



¹ E.A. Kozlov, Experimental verification of E.I.Zababakhin hypothesis concerning limitation of energy cumulation in spherically converging shock-wave front in medium with phase transitions, spalls and shears, physical and chemical transformations, in Shock Compression of Condensed Matter – 1991, S.C.Schmidt et.al. (eds.), Elsevier Publishers B.V., 1992, pp. 169-176.

² E.A.Kozlov, A.V.Zhukov, Phase transitions in spherical stress waves, in High Pressure Science and Technology – 1993, S.C.Schmidt, J.W.Shaner, G.A.Samara, M.Ross (eds.), AIP, New York, 1994, pp. 977-980.

Прецизионное описание свойств Fe и сталей



- Разработан учет полиморфных превращений на основе многофазных УРС^{1,2} и модели кинетики превращений³ для учета сильных изменений ударной сжимаемости, влияния их на предельные величины сдвиговых напряжений, характеристики разрушения и диссипацию энергии в материалах
- Построены модели прочностных свойств с учетом деформационного упрочнения, влияния скорости деформации, давления температуры, изменения фазового состояния и повреждений. Проведена калибровка моделей по результатам многочисленных экспериментов^{4,5}

¹ V.V.Dremov, A.V.Petrovtsev, et al., SCCM-2001, AIP CP#620, pp.87-90

² В.В. Дремов, Г.А.Задорожный, А.В.Петровцев, VII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, p.305-312

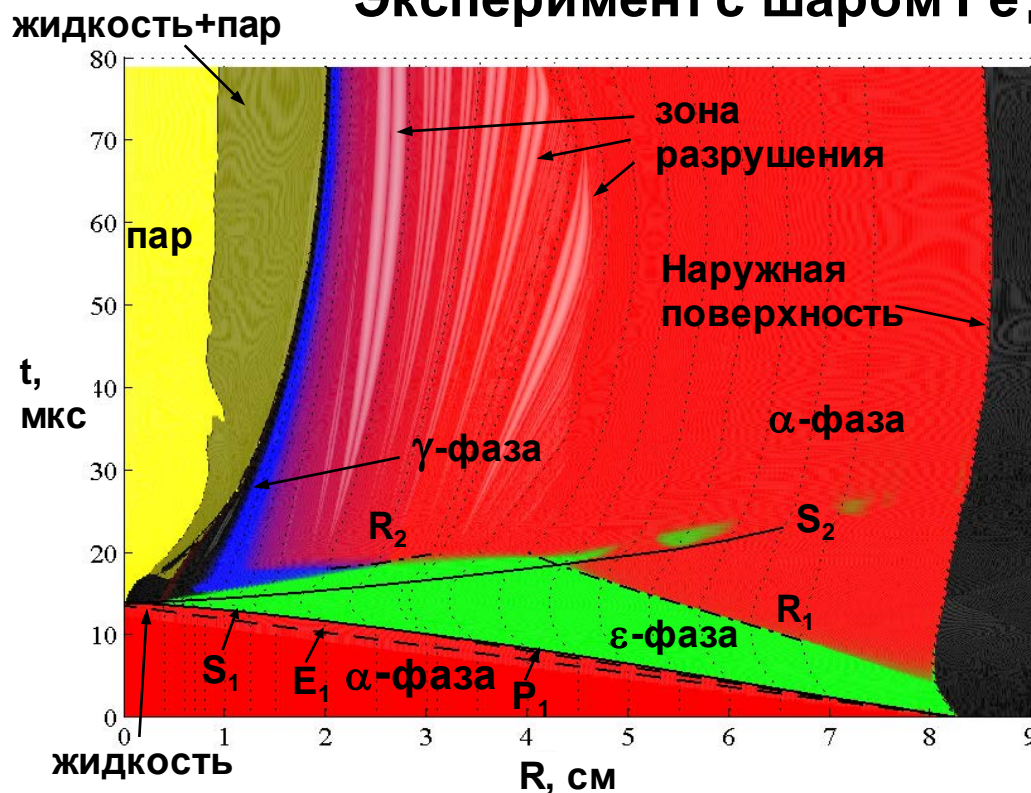
³ Г.А.Задорожный, Г.В.Коваленко, А.В.Петровцев, VII ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003, p.183

⁴ Д.М.Шалковский, Е.А.Козлов, В.И.Таржанов, А. В. Петровцев и др. X ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010, с.233

⁵ Д.М.Шалковский, Е.А.Козлов, В.И.Таржанов, А. В. Петровцев и др. XII ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014, с.235

Общий характер процессов в образце

Эксперимент с шаром Fe диаметром 166 мм:



- Детонация слоя ВВ создает «треугольный» импульс нагрузки на наружной поверхности шара
- Создающаяся в результате сходящаяся волна имеет многоволновую структуру E_1 - P_1 - S_1 , зависящую от параметров нагрузки. Вещество переводится в высокоплотную ϵ фазу
- Глубоком радиусе – плавление во фронте основной пластической волны S_1
- При отражении от центра $S_1 \rightarrow S_2$ возникает волна разрежения.

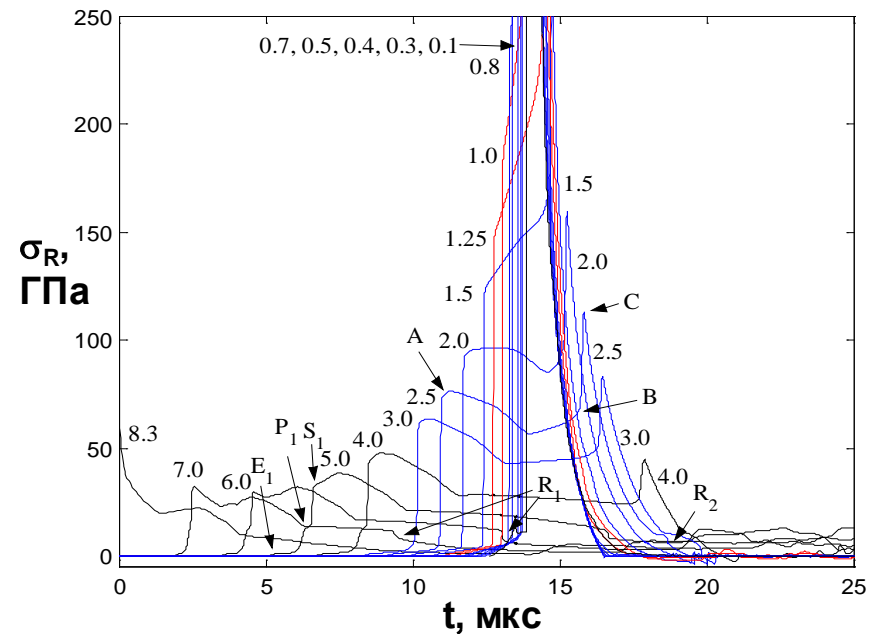
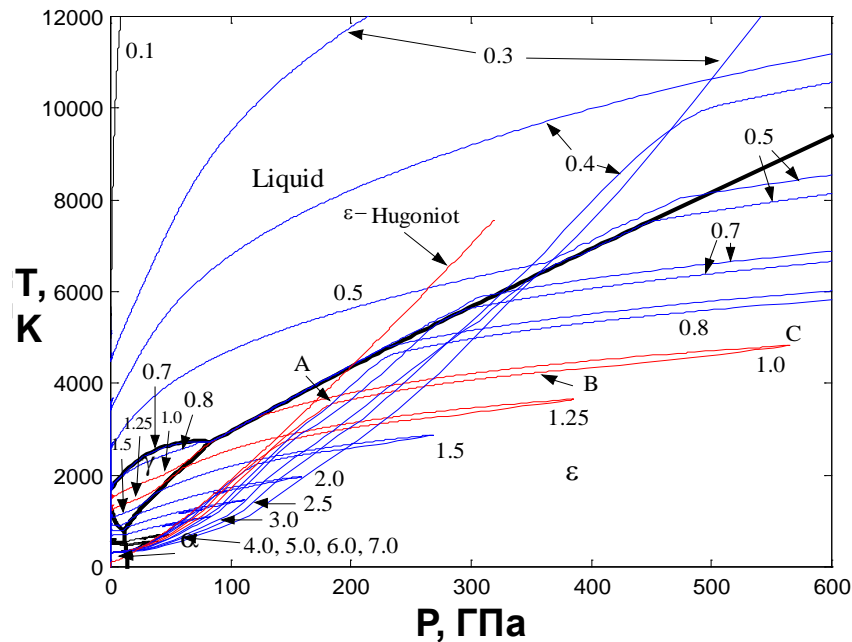
Происходит разгрузка вещества волнах разрежения, движущихся с наружной поверхности и из центра. Вещество переводится в состояние пара, смеси пара и жидкости, γ фазы и, в основной части образца, - α фазы

- Ударные волны разрежения R_1 и R_2 имеют место на участках разгрузки
- Осуществляются процессы образования повреждений при взаимодействии волн разрежения и залечивание повреждений на завершающей стадии остановки системы

¹ Г.В.Коваленко, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев. XIII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, с.129-136

² V.V.Dremov, G.V.Kovalenko, E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev, D.A.Varfolomeev et.al. SCCM-2007, AIP CP 955, 2008, pp.251-254

Многоволновой характер нагрузки

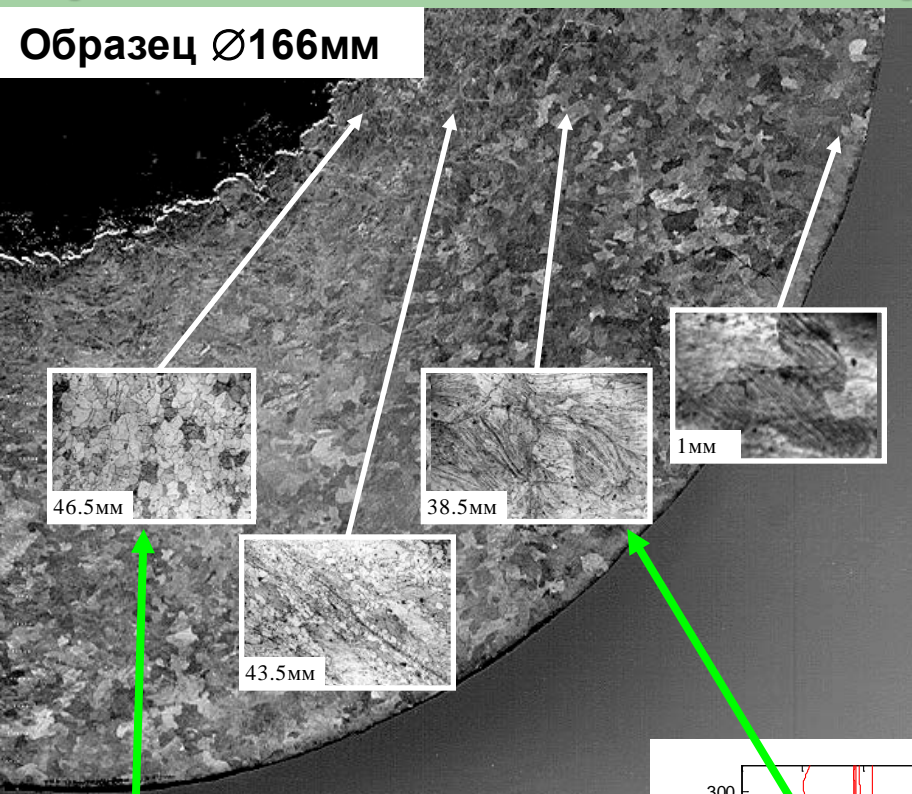


- Изменение в широких пределах состояния материала на P-T плоскости
- Многоволновой характер нагружения частиц материала, включая волны сжатия вследствие сферически сходящегося течения и отраженные от центра волны. ⇒ Квазиизэнтропическое сжатие, существенно более низкие температуры частиц ($\Delta T \approx 600\text{K}$ при $P^H \approx 200\text{GPa}$), чем на УА.
- Профиль нагрузки влияет на характеристики сжатия образцов
- Основная масса вещества плавится при разгрузке. Для железа начало плавления - $P^H \approx 180\text{GPa}$. Плавление на фронте - $P^H \approx 200\text{GPa}$

¹ Г.В.Коваленко, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев. XIII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, с.129-136

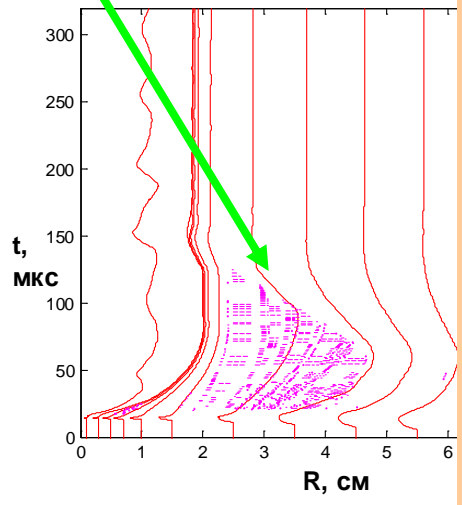
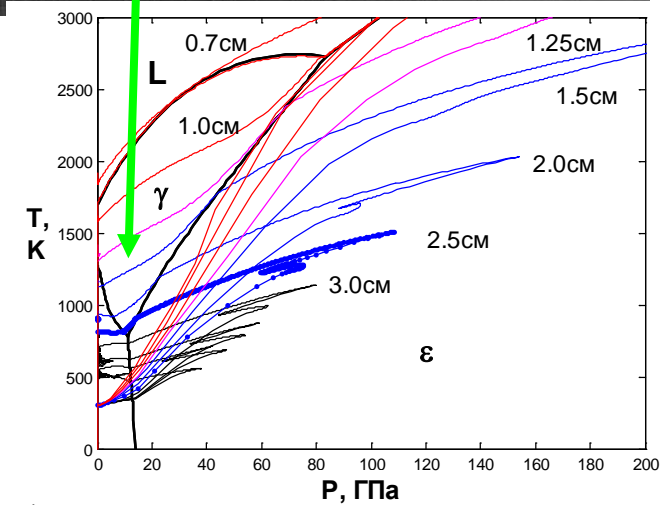
² V.V.Dremov, G.V.Kovalenko, E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev, D.A.Varfolomeev et.al. SCCM-2007, AIP CP 955, 2008, pp.251-254

Сравнение с данными материаловедческих исследований



Результаты структурных исследований показывают общую тенденцию изменений по направлению к центру образцов

- Структурные изменения соответствуют возрастанию деформации и температуры частиц железа
- Появляются зоны локальной деформации. Степень деформации в них возрастает при приближении к центру. Зоны содержат области рекристаллизованного зерна.
- На определенном радиусе материал полностью рекристаллизован
- Около центральной полости микроструктура соответствует кристаллизации из жидкой фазы



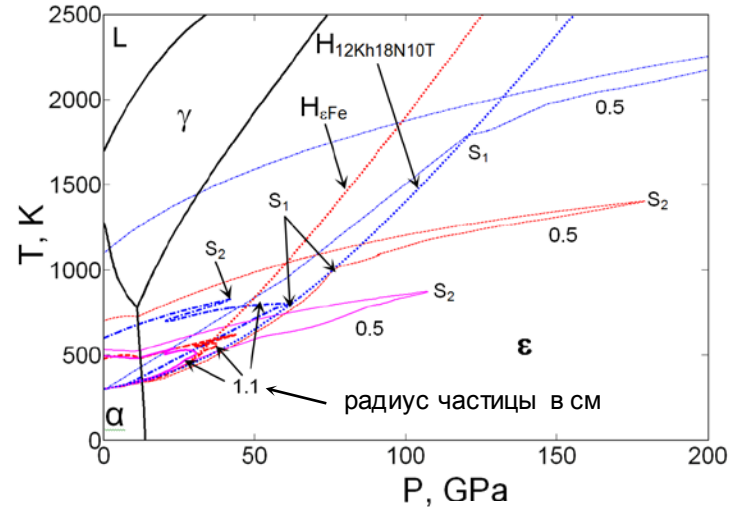
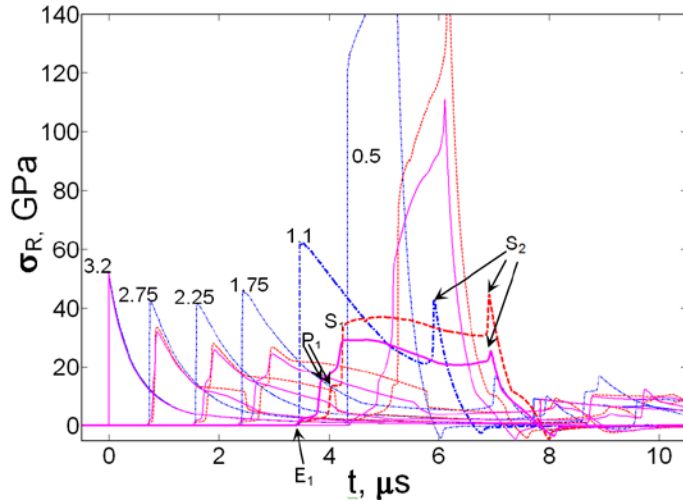
Расчетные данные - дают хорошую базу для интерпретации этой картины:

- Зоны локальной деформации соответствуют зонам залеченных повреждений
- Зоны рекристаллизованного зерна соответствуют областям, в которых железо превращалось в γ фазу и затем остывало

¹ A.V.Dobromyslov, N.I.Taluts, E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev et.al. SCCM-2007, AIP CP 955, 2008, pp.251-254

Влияние свойств материала на кумуляцию

Эксперименты с шарами Fe, 30ХГСА, 12Х18Н10Т диаметром 64 мм:



• В железе и сталях с полиморфными превращениями, особенно 30ХГСА:

• Ярко выражена многоволновая структура

• Сильное затухание в начале схождения стадии схождения

• Более слабая кумуляция

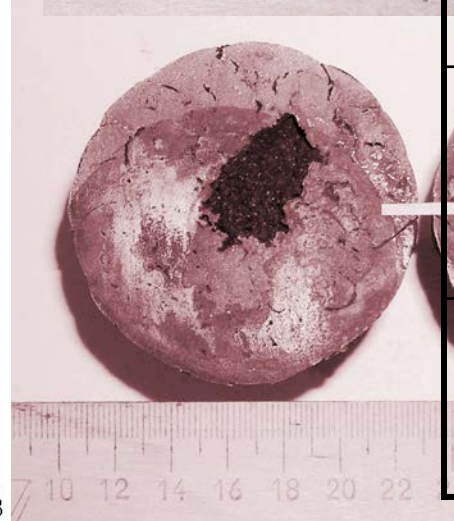
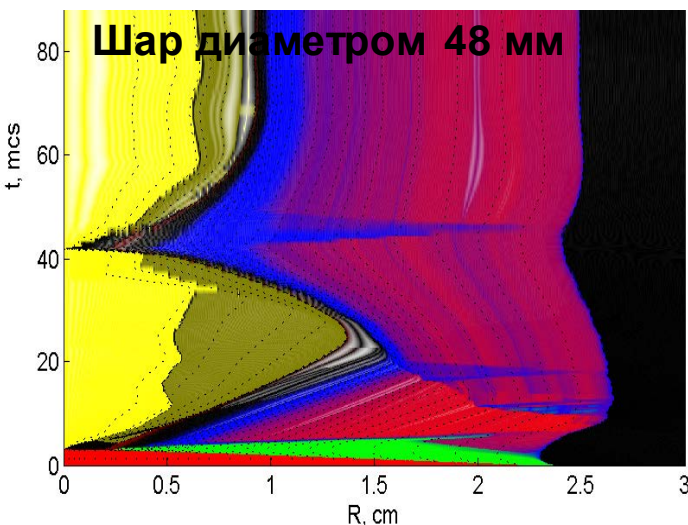
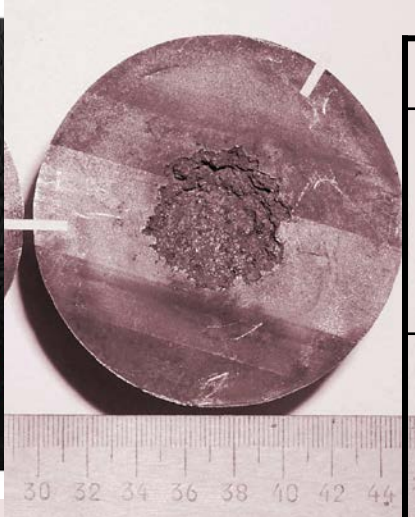
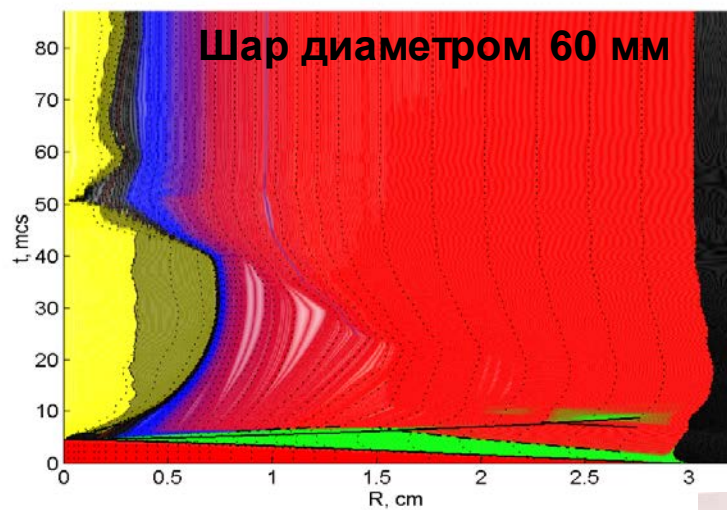
• Более низкие амплитуды нагрузки и температуры вещества в центральной области, меньше масса расплава

Материал		Железо	30ХГСА	12Х18Н10Т
Частица $R_0=0.5\text{см}$	σ_{S1} , ГПа	77	55	122
	T_{S1} , К	996	610	1787
	ΔT_{S1} , К	≈ 370	≈ 290	0
	σ_{S2} , ГПа	182	111	257
	T_{S2} , К	1404	874	2406
	T_0 , К	700	526	1098
Область плавления	R_{sol} , см	0.16	0.052	0.33
	R_{liq} , см	0.13	0.042	0.25

¹ Г.В.Коваленко, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев. VIII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, с.129-136

² E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev, Cumulation of a spherically converging shock wave in metals and its dependence on elastic-plastic properties, phase transitions, spall and shear fractures . J. of Phys.: Conf. Ser. 490 (2014) 012191

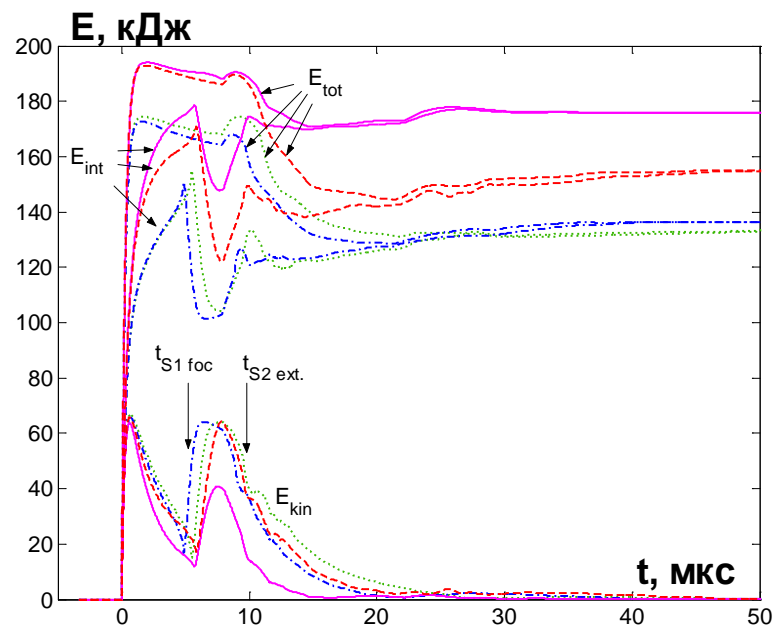
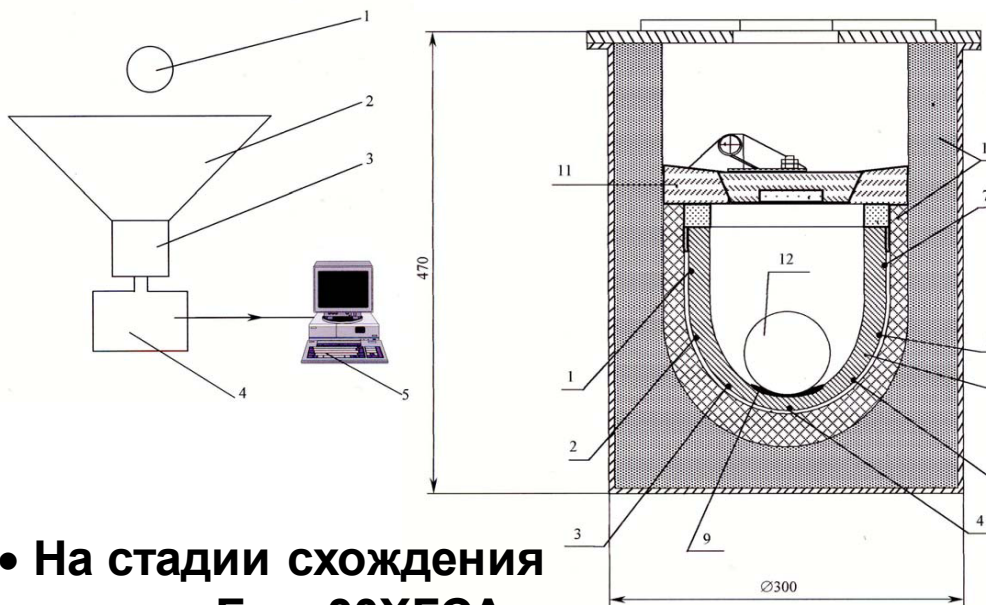
Влияние мощности нагрузки на кумуляцию



Образец		Ø60	Ø48
Остаточная деформация	Э:	1.016	1.024
	Р:	1.006	1.020
Область разрушения $R_{fr0} (\Delta R_{fr})$, см	Э:	1.2 (1.6)	Везде
	Р:	1.2-1.7	1.5
Граница зоны рекристалл. материала $R_{rc0} (\Delta R_{rc})$, см	Э:	1.1 (1.6) 0.7(1.85)	Везде
	Р:	1.1 0.7	Везде
Масса расплавленного железа, M_{liq} , г	Э:	1.73	32.9
	Р:	4.1(4.8)	13.7 (37.0)

- интенсивность деформации существенно выше с протеканием повторной фокусировки полости
- более интенсивные нагрев и фазовые превращения в высокотемпературную γ фазу и жидкость
- более интенсивное разрушение и неполное залечивание повреждений

Калориметрия приобретенной энергии^{1,2}



- На стадии схождения шары из Fe и 30ХГСА приобретают больше энергии
- В дальнейшем $E_{\text{внутр.}}$ в 30ХГСА растет, а $E_{\text{кин}}$ падает вследствие

Материал	Переданная E, кДж		$R_{\text{кон}}/R_{\text{нач}}$ ($R_{\text{пол}}$, мм)	
	Эксперим. ²	Расчет ^{4,5}	Эксперим. ³	Расчет ^{4,5}
12X18H10T	102 (1.000)	136 (1.000)	1.0144 (11.5)	1.021 (12.8)
Железо	115 (1.137)	155 (1.138)	1.0106 (11.0)	1.014 (11.2)
30ХГСА	129 (1.269)	176 (1.290)	1.0081 (9.3)	1.0069 (8.8)
Медь	100 (0.975)	134 (0.980)	1.0285 (14.4)	1.030 (14.4)

большой диссипации и малой обратной передаче энергии ПВ

- Расчетные и экспериментальные данные для всех материалов согласуются

¹ E.A. Kozlov et. al., SCCM – 1991, S.C.Schmidt et.al. (eds.), Elsevier Publishers B.V., 1992, pp. 859-862

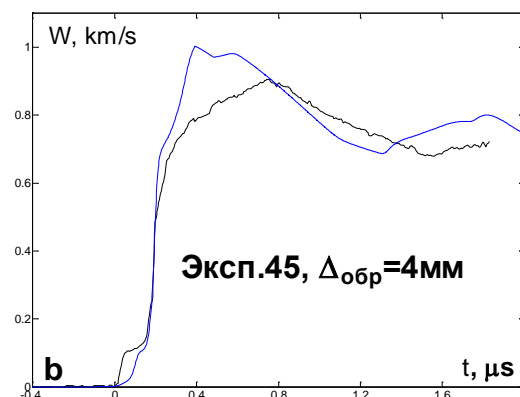
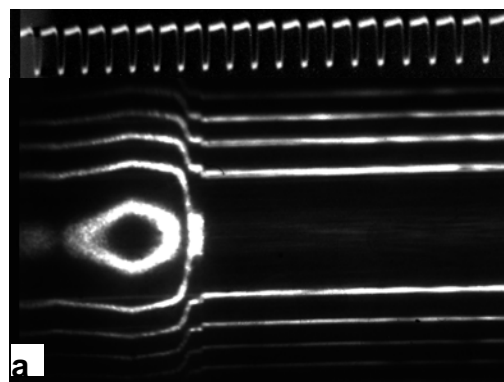
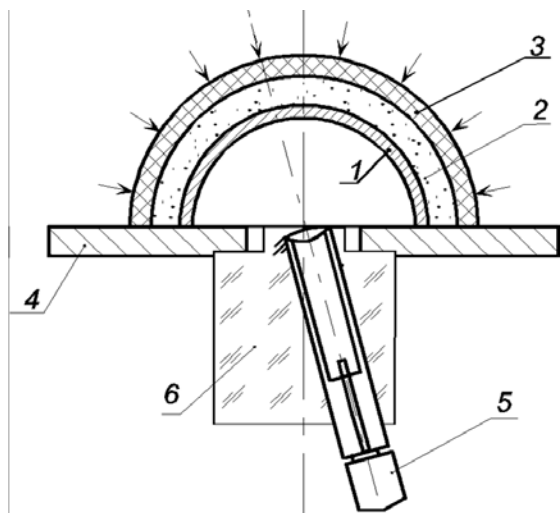
² В.Г.Вильданов, М.М.Горшков, Е.А.Козлов, Д.Т.Юсупов и др., VII ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, с. 185 (www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s5/5-35.pdf)

³ E.A. Kozlov, SCCM – 1991, S.C.Schmidt et.al. (eds.), Elsevier Publishers B.V., 1992, pp. 169-176

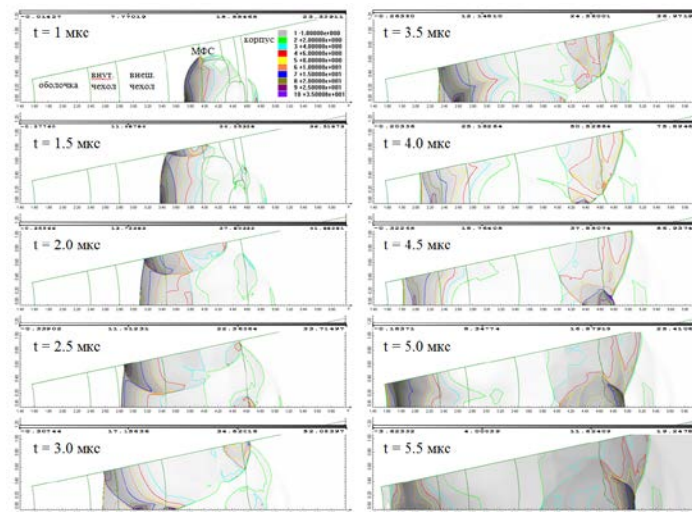
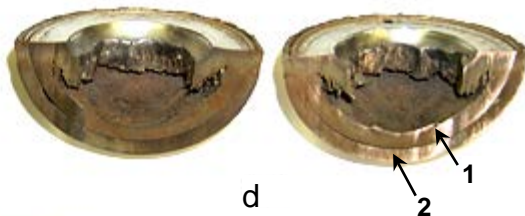
⁴ Г.В.Коваленко, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев. VIII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, с.129-136

⁵ E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev, J. of Phys.: Conf. Ser. 490 (2014) 012191

ЛИМ измерения параметров сходящихся волн



Эксп.42, $\Delta_{обр}=8\text{мм}$

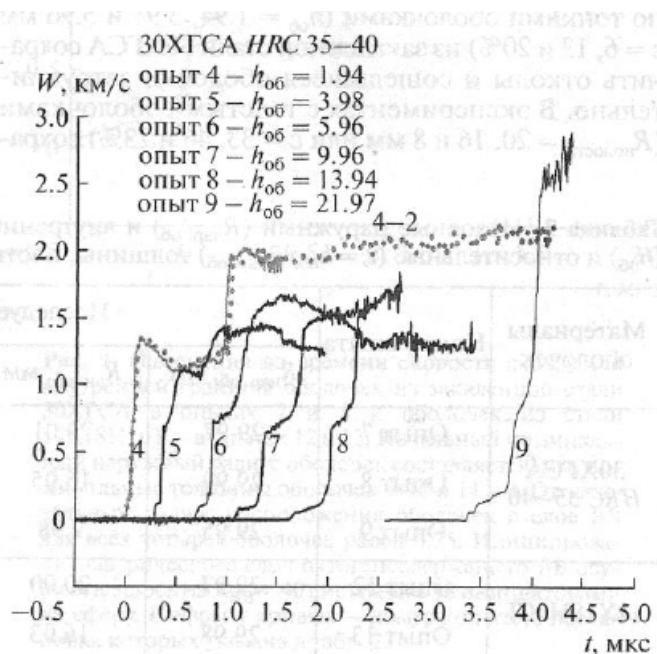


- Измерены¹ параметры волн E_1 , P_1 , S_1 многоволновой конфигурации в слоях различной толщины при изменении мощности квазисферической нагрузки, а также характеристики разрушения
- Данные использованы² для калибровки расчетных моделей описания нагрузки и проверки моделей свойств материала

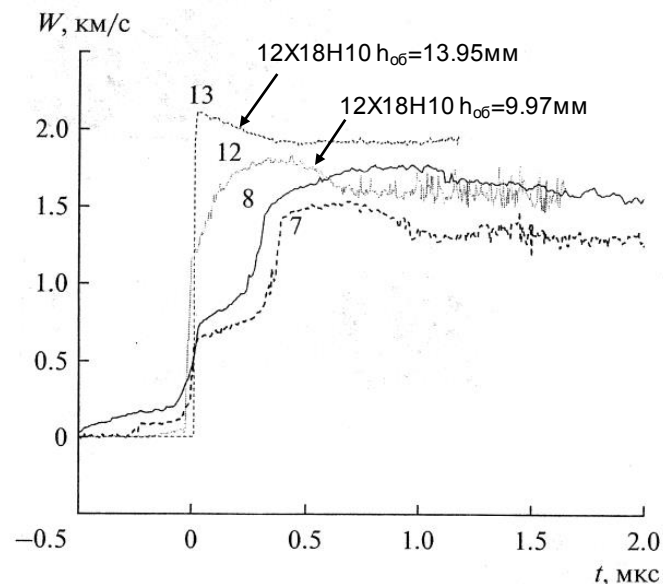
¹ Е.А.Козлов, С.А.Бричиков, Д.С. Боярников, Д.П.Кучко, А.А.Дегтярев. ФММ,112, №4, 2011, с.412-428

² Д.М.Шалковский, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев, Д.А.Варфоломеев, Н.С.Жиляева и др. Х ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010, с.233

ЛИМ измерения параметров сходящихся волн



Скорости ВГО стали 30ХГСА в зависимости от толщины оболочки ($R_{нар}=30\text{мм}$)



Сравнение скорости ВГО стали 12Х18Н10Т и 30ХГСА при толщинах оболочек 14 и 10 мм

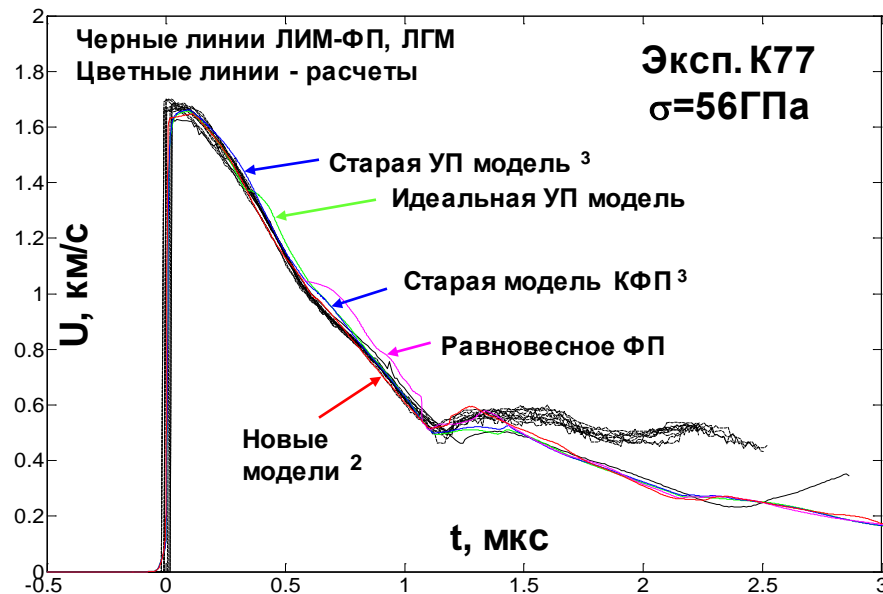
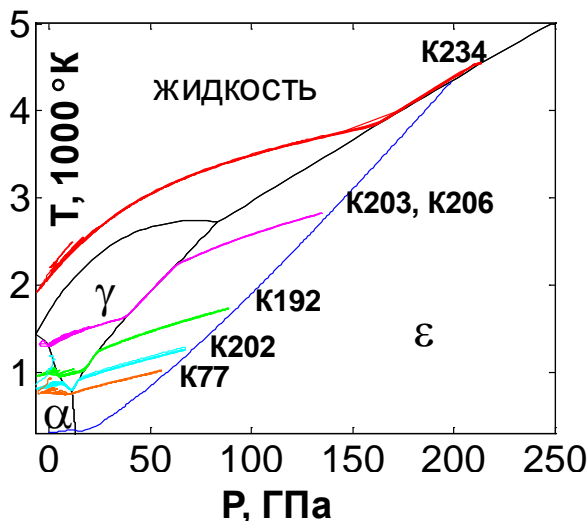
Экспериментальные результаты свидетельствуют о:

- многоволновом (E_1, P_1, S_1) характере деформации стали 30ХГСА с ФП,
- более сильной кумуляции на фронте основной волны S_1 в нержавеющей стали 12Х18Н10Т без ФП
- существенном повышении напряжений за фронтом сходящегося упругого предвестника E_1 на глубоких радиусах
- повышение напряжений на фронте фазового предвестника P_1 на глубоких радиусах схождения

ЛИМ измерения профилей волн для уточнения моделей



W(t) ЛИМ (Фабри-Перо, PDV)



- Проведены ЛИМ измерения профилей волн в стали 30ХГСА в «окнах» из LiF и сапфира для оценки характеристик фаз и фазовых превращений при нагружении и разгрузке в широком диапазоне условий УВ нагружения
- Результаты использованы для уточнения параметров УП моделей фаз и кинетики превращений
- Полученная информация свидетельствует о сильной неравновесности (метастабильности) фазовых превращений в данной стали

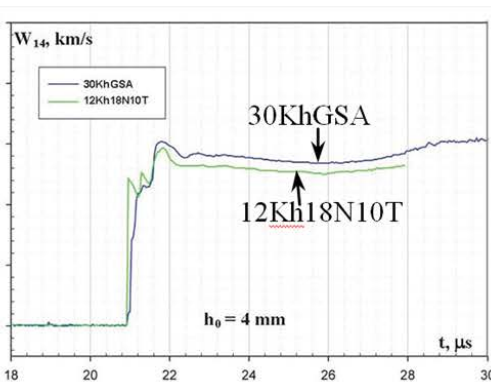
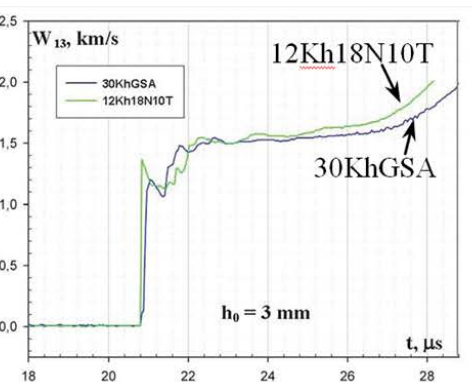
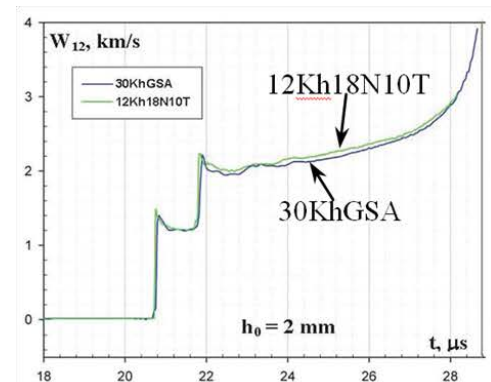
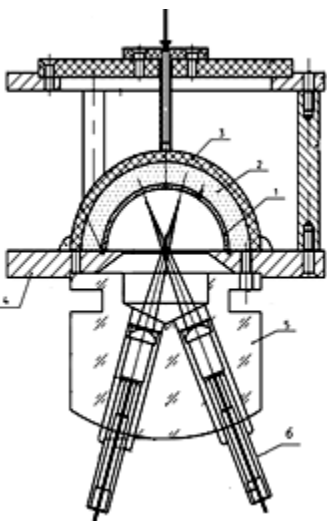
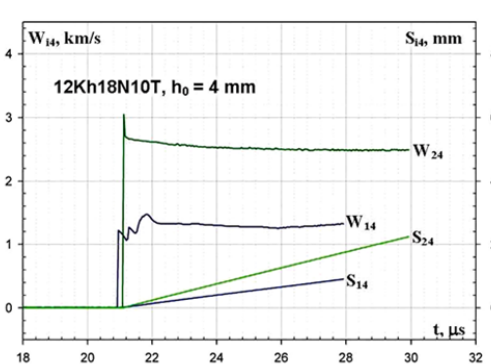
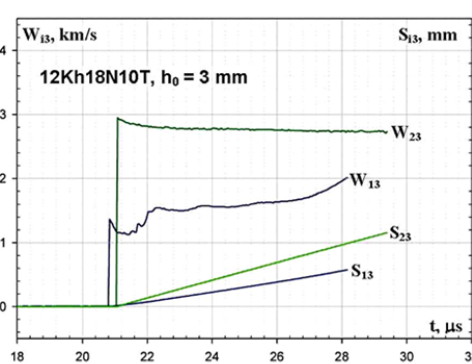
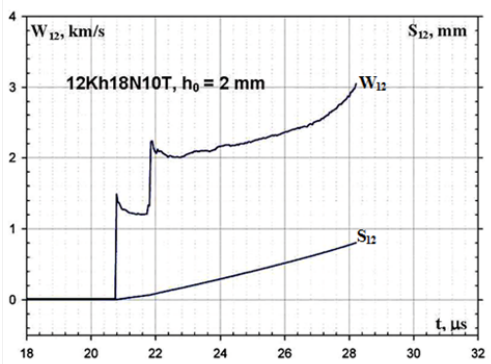
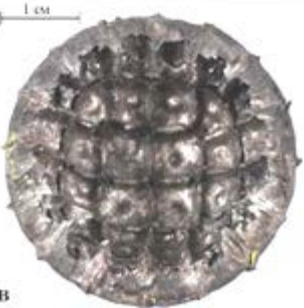
¹ А.С.Широбоков, Е.А. Козлов, А.В.Петровцев, Д.М.Шалковский и др. XVII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015, с.350-360

² Д.М.Шалковский, А.С.Широбоков, Е.А. Козлов, А.В.Петровцев, А.В.Павленко и др. II Российско-Китайский семинар, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2016

³ Д.М.Шалковский, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев, Д.А.Варфоломеев, Н.С.Жилияева и др. X ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010, с.233

Симметрия и влияние ФП на динамику оболочек

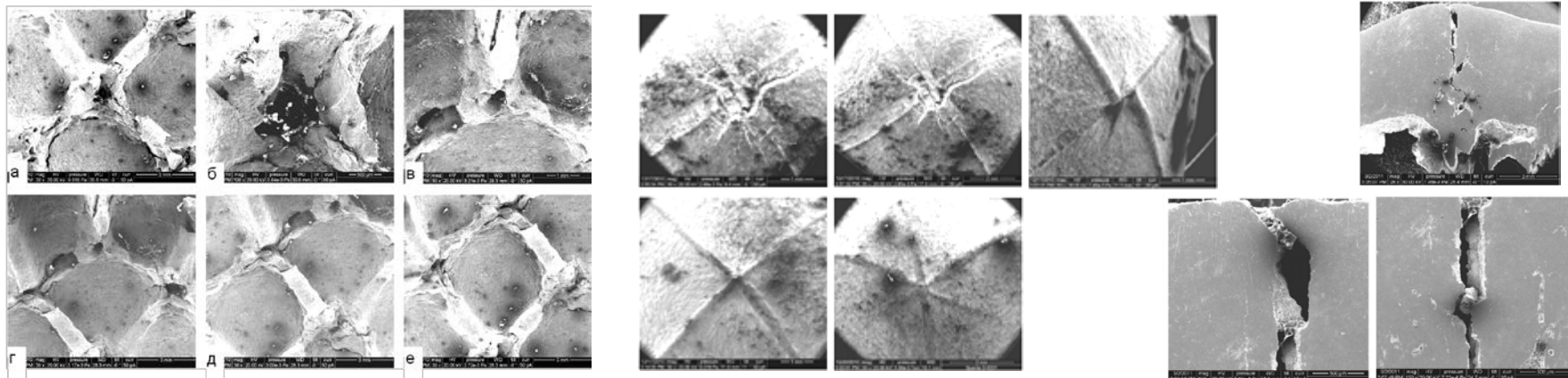
12X18H10T $\Delta_{об} = 2\text{ мм}$



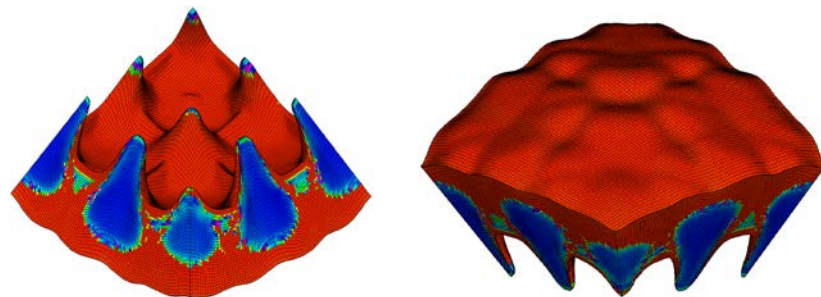
- Зарегистрирована разнодинамичность и симметрия оболочек при схождении до глубоких R; ФП ограничивает рост возмущений
- В тонких оболочках отличие материалов проявляется слабо, и они сходятся безотколно; при увеличении толщины в оболочках начинает проявляться отколное разрушение, при средней толщине разрушение залечивается при схождении, при большой – происходит отдельное схождение откола, на параметры которого влияет ФП, наблюдаются отличия скорости оболочек

¹ Д.П. Кучко, Е.А. Козлов, С.А. Бричиков и др. XII ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014, с.206
² Д.П. Кучко, Е.А. Козлов, С.А. Бричиков и др. XVII ХНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015, с.680-690

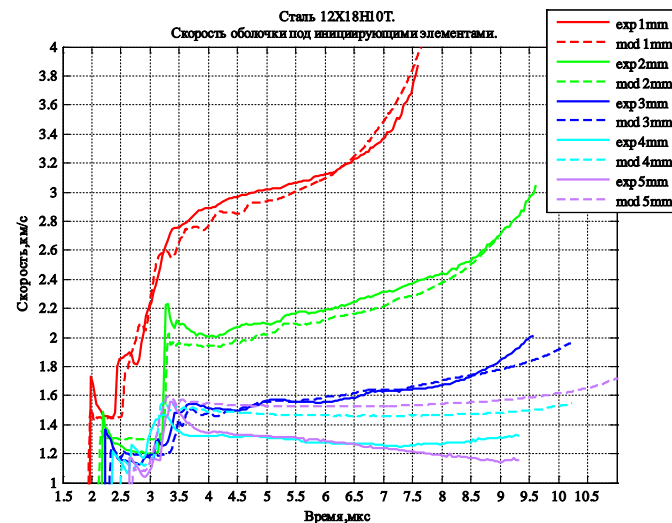
Материаловедческие исследования



Данные СЭМ [1] для внутренней (слева) и наружной (в центре) поверхностей оболочки из стали 12Х18Н10Т исходной толщиной 3мм после нагружения детонацией слоя октоген-содержащего ВВ толщиной 10мм. Справа – картины в сечении одного из возмущений с разным увеличением



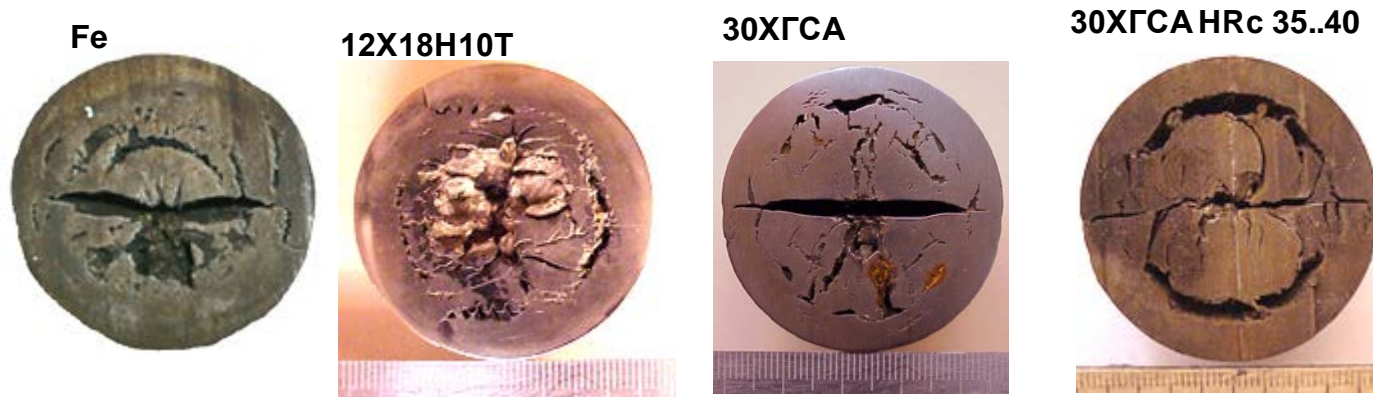
Данные 3D расчетов [2] экспериментов состояния оболочки при $t=7\mu\text{с}$. Справа – сравнение с результатами измерений ЛИМ [1]



¹ Е.А.Козлов, А.В.Добромыслов, Н.И.Талуц и др. XII ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014, с.206

² Результаты предоставлены авторами работ: А.Ю.Ададуновым, А.А.Брагиным, М.В.Гусевым, Д.В.Кочутиным, В.Н.Ногиным, М.Ю.Сахаровым и А.С.Шнитко, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2016

Материаловедческие исследования



Сохраненные оболочки исходной толщиной 10мм, обжаты в чехлах из стали
12X18H10T толщиной 4+7мм при нагружении детонацией слоя ПВВ 5мм без «шубы»

Еще одно подтверждение важности детального учета свойств материалов получено в экспериментах со схождением толстостенных оболочек [1]. Ранее в аналогичной постановке лазерно-интерферометрической методикой были зарегистрированы особенности профилей волн в оболочках. На приведенных на рисунках меридиональных сечениях сохраненных оболочек видно, что особенности профилей волн приводят к отличиям в структуре разрушений оболочек из разных материалов. В соответствии с [1]: три откольных слоя в Fe, два в 12X18H10T и 30ХГСА в состоянии поставки и один в закаленной стали 30ХГСА

¹ Е.А. Козлов, С.А. Бричиков, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов и др. Х ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010, с.188

² М.Ю.Сахаров, А.Ю.Ададунов, Д.М.Шалковский, доклад в секции 1 на данной конференции

³ Д.А.Краснослабодцев, Е.А.Козлов, М.Е.Васильев, В.П.Елсуков, П.Е.Кискин, В.Н.Ногин, доклад в секции 1 на данной конференции

Заключение

- Представлены результаты многолетних экспериментальных и расчетных исследований сферического схождения ударных волн в металлах. Показано, что проявление металлами сложной реологии, обусловленной наличием сдвиговой прочности, а также полиморфных превращений, существенно влияет на характеристики кумуляции напряжений на фронте сходящейся волны, на передаваемую энергию и ее диссипацию в среде.
- Для повышения точности расчетных моделей явления исследования были дополнены лазерно-интерферометрическими исследованиями профилей волн в материалах в плоской и сферической геометрии, а также измерением симметрии сходящихся волн и оболочек в реальных системах, материаловедческими исследованиями сохраненных образцов.
- В продолжение работ могут быть рассмотрены новые методические возможности:
 - метод импульсного рентгеноструктурного анализа для определения *in situ* кинетики полиморфных превращений
 - использование профилированного лазерного нагружения и тонкой спектральной диагностики для изучения УРС, величин сдвиговых напряжений и характеристик фазовых превращений и плавления при высоких давлениях
 - метод молекулярной динамики для уточнения механизмов высокоскоростной деформации и фазовых превращений
 - совмещение многоканальных ЛИМ-диагностик и методов МРТ РГ , а также многокадровой ПГ для изучения процессов в испытываемых системах