

УДК 532.593+539.04

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПЫЛЕВЫХ СТРУЙ С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

А. Н. Власов¹, А. В. Журавлёв¹, В. А. Пашенцев¹, В. Н. Смирнов¹,
Е. Б. Смирнов^{1,4}, М. Ю. Столбиков¹, В. Е. Черемазов¹, К. А. Тен²,
Э. Р. Прууэл^{2,3}, А. О. Кашкаров^{2,3}, И. А. Рубцов², С. И. Кременко^{2,3}

¹РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, michael.yu.snz@mail.ru

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

³Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

⁴Южно-Уральский государственный университет, 454080 Челябинск

Представлены сравнительные результаты опытов по исследованию динамики развития пылевых струй, обусловленных наличием конструктивных элементов и канавок на поверхности нагружаемых образцов, с использованием метода импульсной рентгенографии и регистрации синхротронным излучением. Информация об изменении плотности пыления методом синхротронной диагностики достигалась за счет многокадровой съемки. В случае однокадровой регистрации методом импульсной рентгенографии для исследования динамики пыления использовалась скользящая детонационная волна вместо прямой волны.

Ключевые слова: пылевые струи, импульсная рентгенография, синхротронное излучение.

DOI 10.15372/FGV20190406

ВВЕДЕНИЕ

При выходе ударной волны на свободную поверхность металла происходит выброс микроструй и частиц с характерной плотностью $0.1 \div 100 \text{ мг/см}^3$. Данный эффект называется ударно-волновым пылением. Результаты исследований пыления с поверхности ударно-нагруженных металлов широко представлены в литературе. Выявлены факторы, влияющие на массу пылевых струй, в их числе: коррозионные дефекты, неоднородность материала, начальная шероховатость внутренней и наружной поверхностей, обусловленная технологией обработки, агрегатное состояние материала под действием динамической нагрузки и последующей разгрузки. Фундаментальный и практический интерес представляет исследование струй, возникновение которых обусловлено наличием конструктивных элементов (отверстий, стыков, трубок, каверн) на нагружаемой и свободной поверхностях ударно-нагруженных образцов. При этом важным является вопрос пыления металлов начиная со стадии разгона образца продуктами взрыва и

далее по мере его движения; имеется в виду определение зависимости $m(t)$ — массы пыления с единицы площади поверхности от времени процесса пыления, г/см^2 .

Представлены результаты экспериментальных исследований пыления в воздушной среде (давление 1 атм) с поверхности плоских металлических образцов, подвергнутых ударно-волновому нагружению ($16 \div 30 \text{ ГПа}$) [1]. Процесс регистрировался с использованием синхротронного излучения (СИ) и метода импульсной рентгенографии (МИР). Информация о динамике пыления с помощью СИ достигалась за счет многокадровой регистрации. В случае однокадровой регистрации МИР для этой цели использовалась скользящая детонационная волна вместо прямой волны.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Эксперименты проводились в двух постановках: в первой — плоскость луча перпендикулярна плоскости образца и плоскости стыка (рис. 1, *a*), во второй — плоскость луча параллельна плоскости образца и перпендикулярна плоскости стыка (рис. 1, *б*).

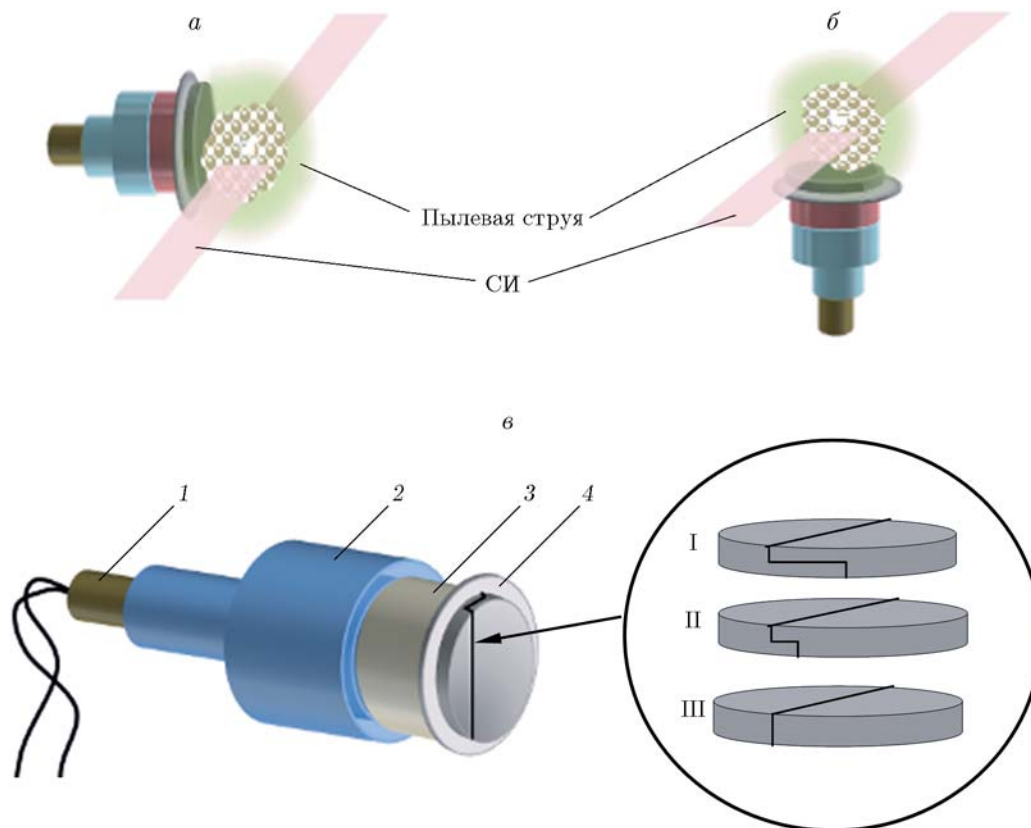


Рис. 1. Схемы постановки экспериментов и модели для опытов с СИ:

a — плоскость луча перпендикулярна плоскости образца и плоскости стыка; *б* — плоскость луча параллельна плоскости образца и перпендикулярна плоскости стыка; *в* — схема экспериментальной модели: 1 — электродетонатор, 2 — корпус сборки, 3 — взрывчатый состав, 4 — герметизирующая пластина из 12Х18Н10Т толщиной 0.5 мм, I и II — ступенчатый стык, ширина полки $\lambda = 10$ и 1 мм соответственно, III — прямой стык

1.1. Пыление из стыковых соединений

Эскизы плоской модели по регистрации пыления представлены на рис. 1, *a*. Образцы (I–III) представляли собой диски с общей шероховатостью поверхности $Rz = 10$ мкм, диаметром 30 мм и толщиной 2 мм, состояли из двух частей, при соединении которых образовывался стык. Зазор в стыке составлял ≤ 50 мкм. Для предотвращения прорыва продуктов взрыва в зону стыка между нагружающим устройством и образцом устанавливалась прокладка из стали 12Х18Н10Т толщиной 0.5 мм. Ширина ступенчатых стыков I и II равна 1 и 10 мм соответственно. В опытах исследовалось струеобразование из стыков.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2 [2]. Распределение плотности пыли ρ вычислялось из соотношения $\rho(t) = m_l(t)/L$, где $m_l(t)$ — лучевая масса струи, определяемая

в опыте, g/cm^2 , L — длина пылящего участка в направлении диагностирования, см. Длина L определялась по результатам экспериментов при регистрации струи по схеме постановки опыта, показанной на рис. 1, *б*. Ступенчатые стыки пылят одинаково в меди и олове — $\rho_{ср} \leq 60$ mg/cm^3 . Повышенное пыление производит прямой стык в олове — $\rho_{ср} \leq 80$ mg/cm^3 . При $t > 1$ мкс повсюду наблюдается монотонный спад плотности.

Другая часть опытов осуществлялась с ориентацией луча согласно рис. 1, *б* и рис. 3. Луч СИ проходил над поверхностью образца на расстоянии 10 мм. Результаты измерений приведены на рис. 4 и 5.

Из рис. 4 видно, что через ≈ 3 мкс после выхода ударной волны (УВ) на свободную поверхность образца передний фронт струй с лучевой массой $1 \div 3$ mg/cm^3 достигает плоскости регистрации СИ. Далее наблюдается слияние

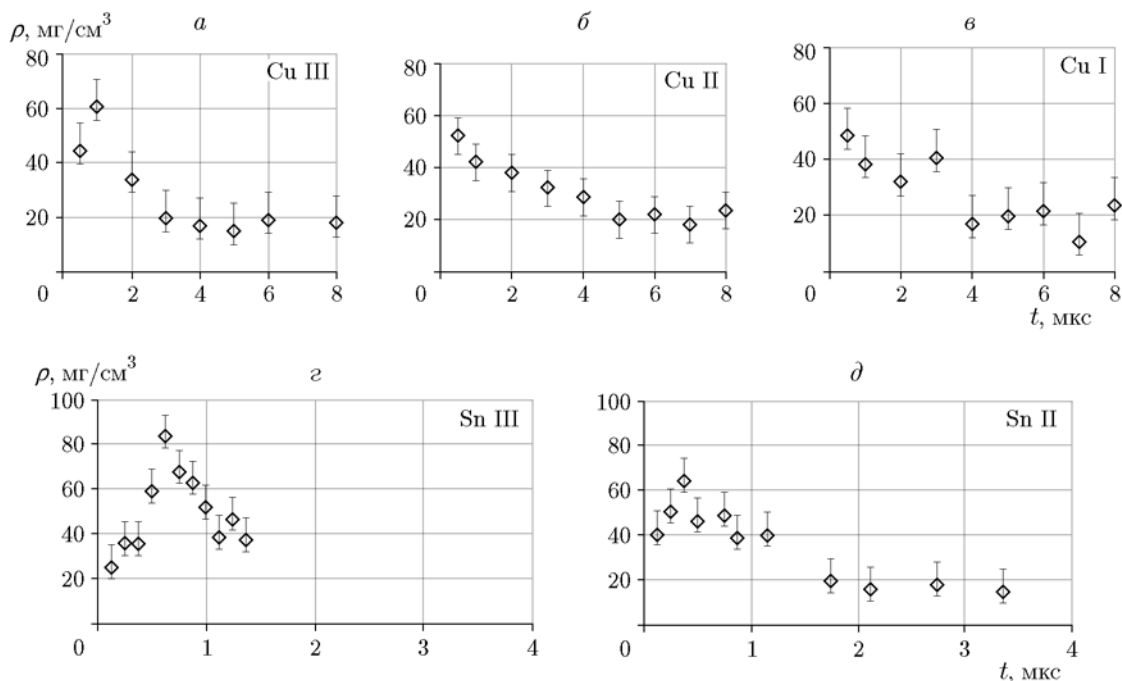


Рис. 2. Зависимость средней плотности струй от времени в области стыка (см. рис. 1, в). Образцы меди и олова:

ориентация СИ соответствует рис. 1, а; а-в — образцы меди со стыками типа I, II и III, г, д — образцы олова типа II и III

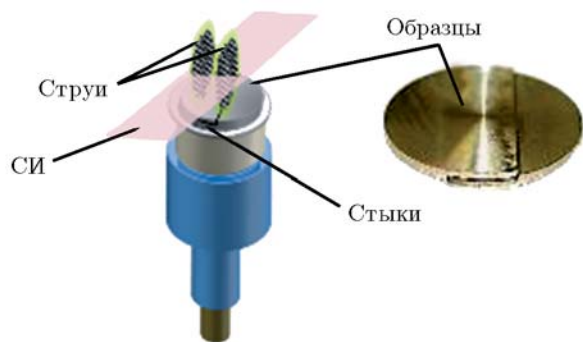


Рис. 3. Ориентация стыков образца относительно СИ (продолжение рис. 1, б)

струй из внутреннего и наружного стыков. На рис. 5 струи сливаются в общий поток через ≈ 5.5 мкс после выхода УВ.

Результаты экспериментов на рис. 4, 5 согласуются с данными на рис. 2. На начальной стадии при выходе УВ на свободную поверхность наблюдается кумуляция из стыка на внутренней (свободной) поверхности образца, затем формируется струя из стыка на наружной (нагруженной) поверхности образца. На завершающей стадии кумуляции из стыков про-

исходит слияние струй при расколе образца и раскрытие стыков.

1.2. Пыление проточки на наружной и внутренней поверхностях образца

Для исследования формирования струй с внутренней поверхности оболочки, обусловленных наличием дефектов на нагружаемой поверхности оболочки, использовался образец олова с проточкой треугольного профиля шириной 0.2 мм и глубиной 0.2 мм, как показано на рис. 6.

Результаты эксперимента представлены на рис. 6 [2]. Видно, что дефекты типа проточки на наружной поверхности металла также являются источниками возмущений, формируемых на свободной поверхности ударно-нагруженного образца. Максимальная плотность струи 40 мг/см^3 . Скорость струи 2.5 км/с .

Максимальная плотность струи, обусловленной дефектом на наружной (нагружаемой) поверхности, достигается через ≈ 1 мкс после выхода УВ на свободную поверхность. Струя с проточки на внутренней поверхности (т. е. на свободной поверхности) достигает максимума

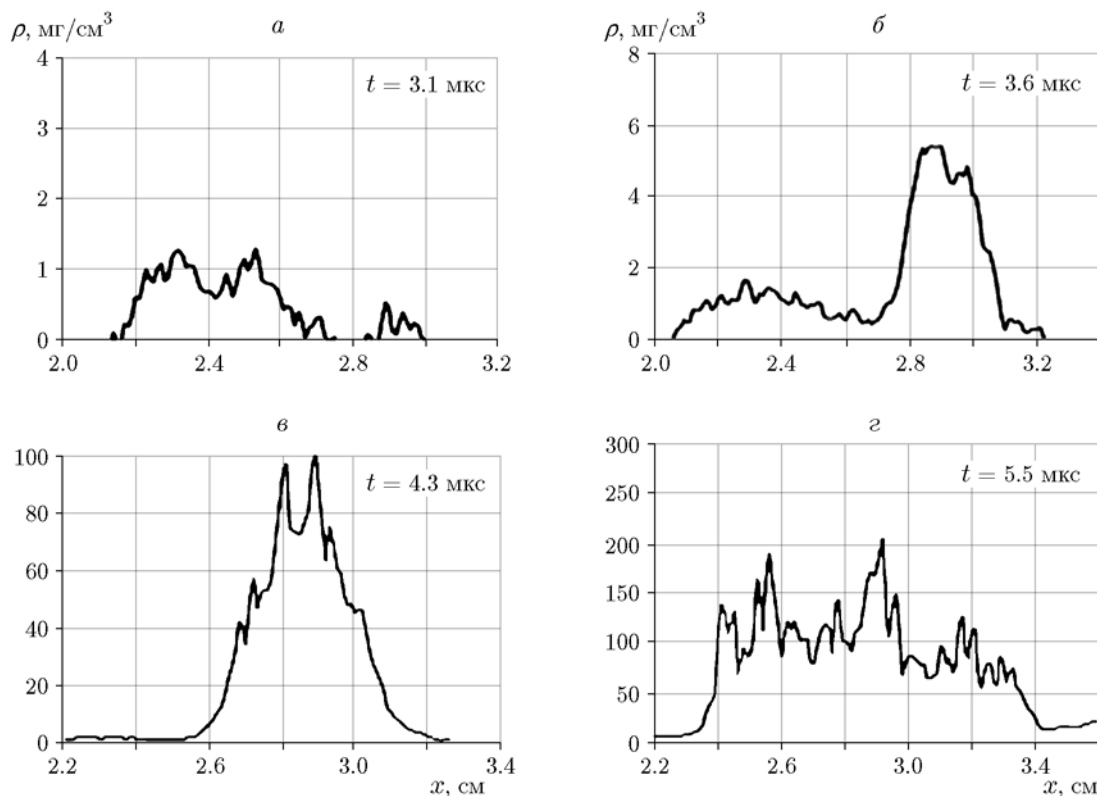


Рис. 4. Плотность струй из стыков типа II с $\lambda = 1$ мм. Образцы олова: ориентация СИ соответствует рис. 1, б и 3

плотности 75 мг/см^3 через ≈ 2 мкс после выхода УВ. Можно предположить, что при наличии проточек одновременно на наружной и внутренней поверхностях образца струеобразование будет носить двухэтапный волнообразный характер, что согласуется с результатами на рис. 2 для стыков типа I с шириной участка между проточками стыка $\lambda = 10$ мм.

1.3. Пыление из трубки

Схема постановки опыта по регистрации пыления из стальной трубки приведена на рис. 1, а, схема экспериментальной сборки — на рис. 7, а. Результаты измерения плотности струи $\rho(t)$ и движения струи вне трубки $x(t)$ представлены на рис. 7, б [2].

Плотность струи $< 200 \text{ мг/см}^3$, длина ≤ 15 мм. Струя выходит из трубки на 1.9 мкс раньше окончания детонации. Скорость струи на выходе из трубки 11.1 км/с , через 1 мкс она уменьшилась до $\approx 2 \text{ км/с}$, через 3 мкс движение струи прекратилось вследствие ее торможения в воздухе.

Подобные эксперименты по регистрации струй из отверстий стальной пластины, нагруженной в режиме скользящей детонации, проводились на установке ИГУР-3.5. Низкоплотные струи не диагностируются рентгеновским методом (рис. 8). О наличии струй свидетельствует только пробитие индикаторных фольг/проволок (рис. 8, поз. 7).

2. МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

В экспериментах по исследованию струеобразования в качестве источника тормозного излучения использовалась установка ИГУР-3.5 [3]. Схема опытов и параметры установки показаны на рис. 9. Шероховатость поверхности образцов $Rz = 10$ мкм.

Рентгенограммы струй, выброшенных с поверхности образцов свинца при наличии стыков типа I, II и III, представлены на рис. 10. Плотность струй из стыков на свободной поверхности составила $\leq 120 \text{ мг/см}^3$. Скорость струй из стыков на свободной поверхности образцов типа I и III равнялась $\approx 2.6 \text{ км/с}$, ти-

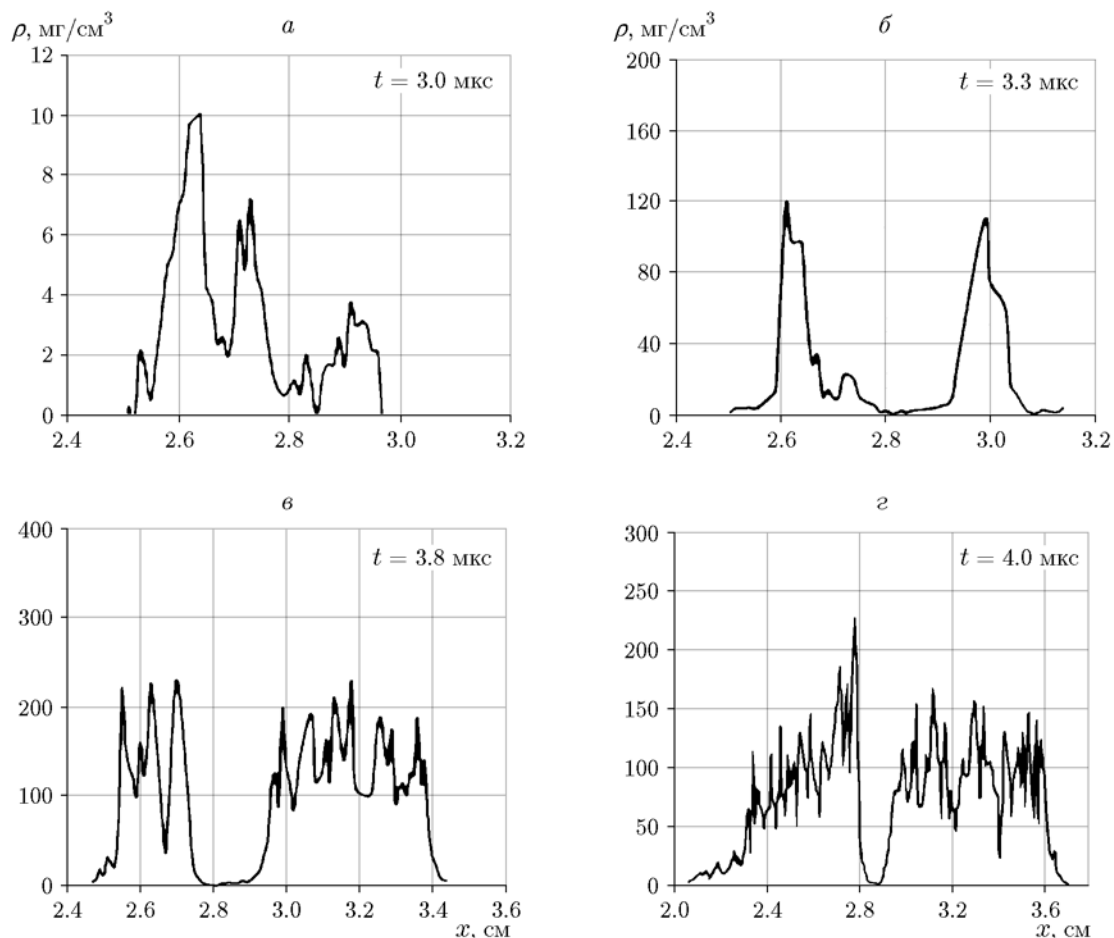


Рис. 5. Плотность струй из стыков типа I с $\lambda = 10$ мм. Образцы олова: ориентация СИ соответствует рис. 1, б и 3

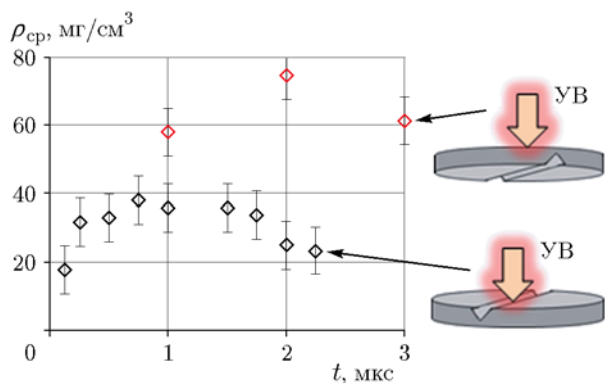


Рис. 6. Плотность струи при наличии проточки на наружной поверхности образца: ориентация СИ соответствует рис. 1, а

па II — 2.7 км/с, скорость свободной поверхности образцов ≈ 2 км/с.

Результаты рентгенографирования пылины из стыков образцов свинца качественно согласуются с результатами регистрации СИ в опытах на образцах меди и олова и наглядно подтверждают факт образования струй из стыков на внутренней и наружной поверхностях металла по результатам синхротронной диагностики.

На рис. 11 представлены результаты регистрации с использованием МИР струи с поверхности образцов свинца, нагруженных скользящей детонацией. Глубина канавок $a_0 = 50, 100, 200$ мкм, расстояние между канавками $\lambda = 5$ мм. Выброс с поверхности шероховатостью $Rz = 20$ мкм представляет собой пылевое облако удельной массы ≈ 2 мг/см².

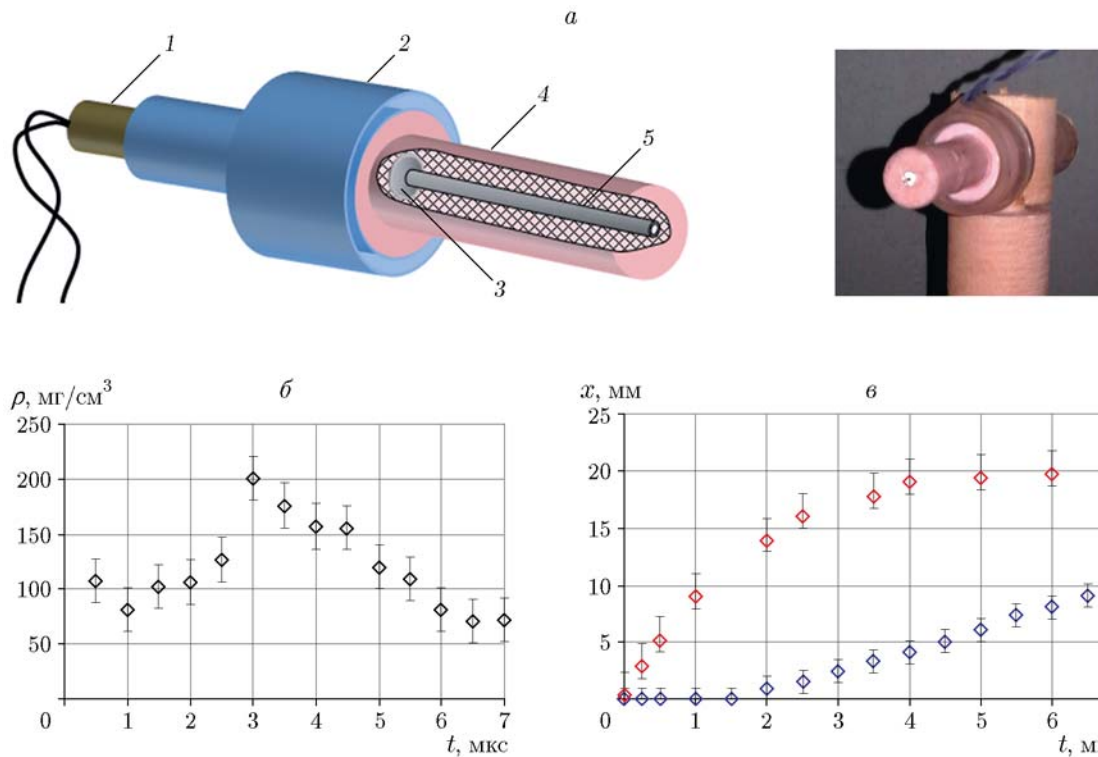


Рис. 7. Параметры струи из стальной трубки:

ориентация СИ соответствует рис. 1, а; а — схема экспериментальной модели: 1 — электродетонатор, 2 — корпус линзы, 3 — герметизирующая пластина из Д16 толщиной 0.5 мм, 4 — пластическое взрывчатое вещество (на основе тэна) диаметром 15 мм, длиной 50 мм, 5 — трубка 12Х18Н10Т диаметром 3 мм, толщина стенки 1 мм, длина 50 мм; б — изменение плотности струи во времени; в — $x-t$ -диаграмма переднего фронта струи и ненагруженного торца трубки

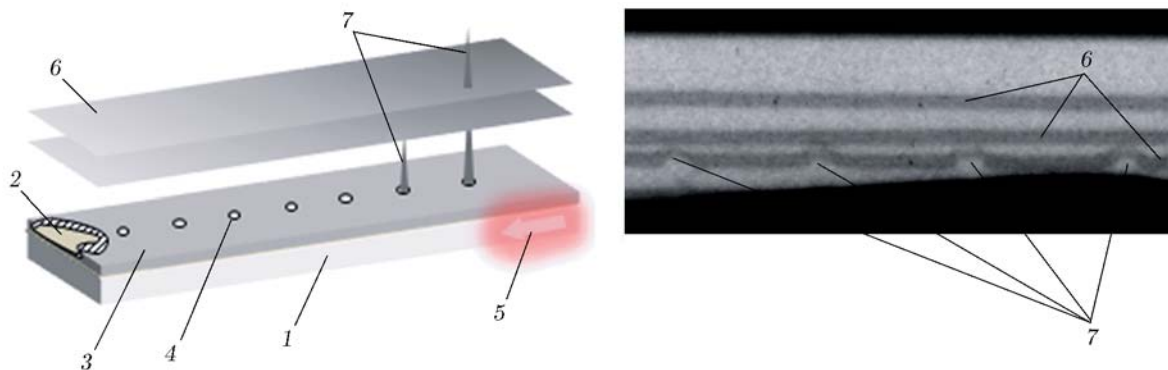


Рис. 8. Результаты экспериментов по регистрации струй с использованием МИР на установке ИГУР-3.5:

1 — пластическое взрывчатое вещество (на основе гексогена), 2 — герметизирующая пластина из Д16 толщиной 0.5 мм, 3 — пластина из стали толщиной 4 мм, 4 — отверстия диаметром 1 мм, 5 — детонационная волна, 6 — индикаторные фольги толщиной 50 мкм, 7 — струи

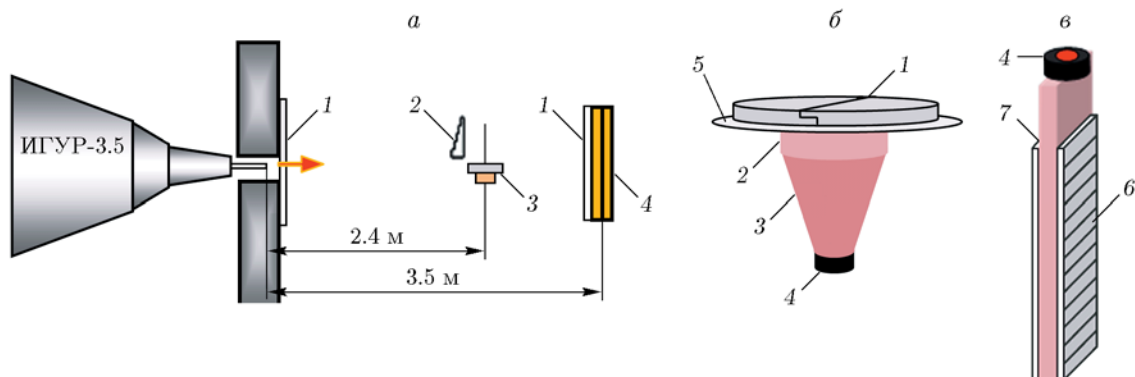


Рис. 9. Постановка рентгенографических опытов на установке ИГУР-3.5 и типы экспериментальных сборок:

a: 1 — защитные экраны, 2 — калибровочный клин, 3 — образец, 4 — детектор Image Plate; *б*, *в*: 1 — образец свинца размером $\varnothing 70 \times 3.5$ мм, 2 — пластиковое взрывчатое вещество (на основе тэна) размером $\varnothing 60 \times 20$ мм, 3 — линза, 4 — электродетонатор, 5 — герметизирующая прокладка из Д16 размером $\varnothing 80 \times 1.7$ м, 6 — образцы размером $250 \times 50 \times 1$ мм, 7 — пластиковое взрывчатое вещество (на основе гексогена) размером $300 \times 50 \times 6$ мм

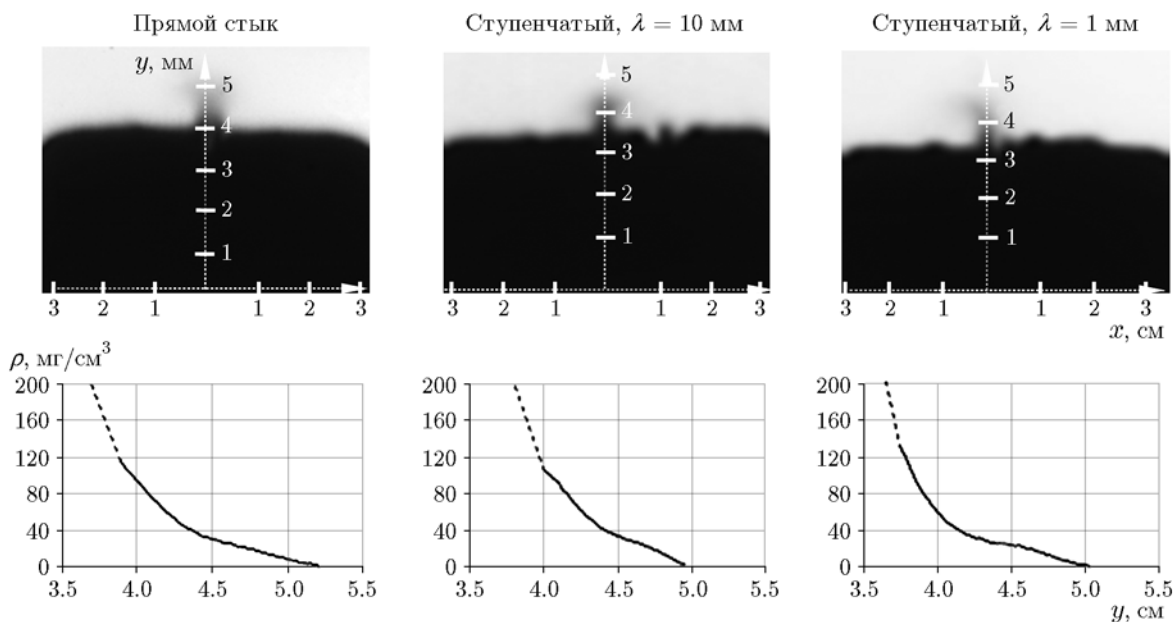


Рис. 10. Струеобразование в стыках образцов свинца (регистрация МИР)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования пыления стыков образцов меди и олова показали:

- максимальная плотность струи из стыков типа II и III (ступенчатый стык с $\lambda = 1$ мм и прямой стык) достигается в интервале времени ≤ 1 мкс после выхода УВ на свободную поверхность образца;

- выброс из стыков типа I происходит волнообразно в две стадии. На первой осуществляется выброс из стыка на свободной поверх-

ности образца, на второй стадии скачок плотности обусловлен выбросом из стыка на нагружаемой поверхности оболочки;

- передний фронт струи с поверхности оловянной оболочки достигает скорости 3.7 км/с, с поверхности медной — 2.9 км/с;

- поперечный размер диагностируемых струй из стыковочных зазоров оловянных и свинцовых образцов (рис. 4, 5, 10) составляет $0.3 \div 0.7$ см.

Из рис. 4 видно, что через ≈ 3 мкс после вы-

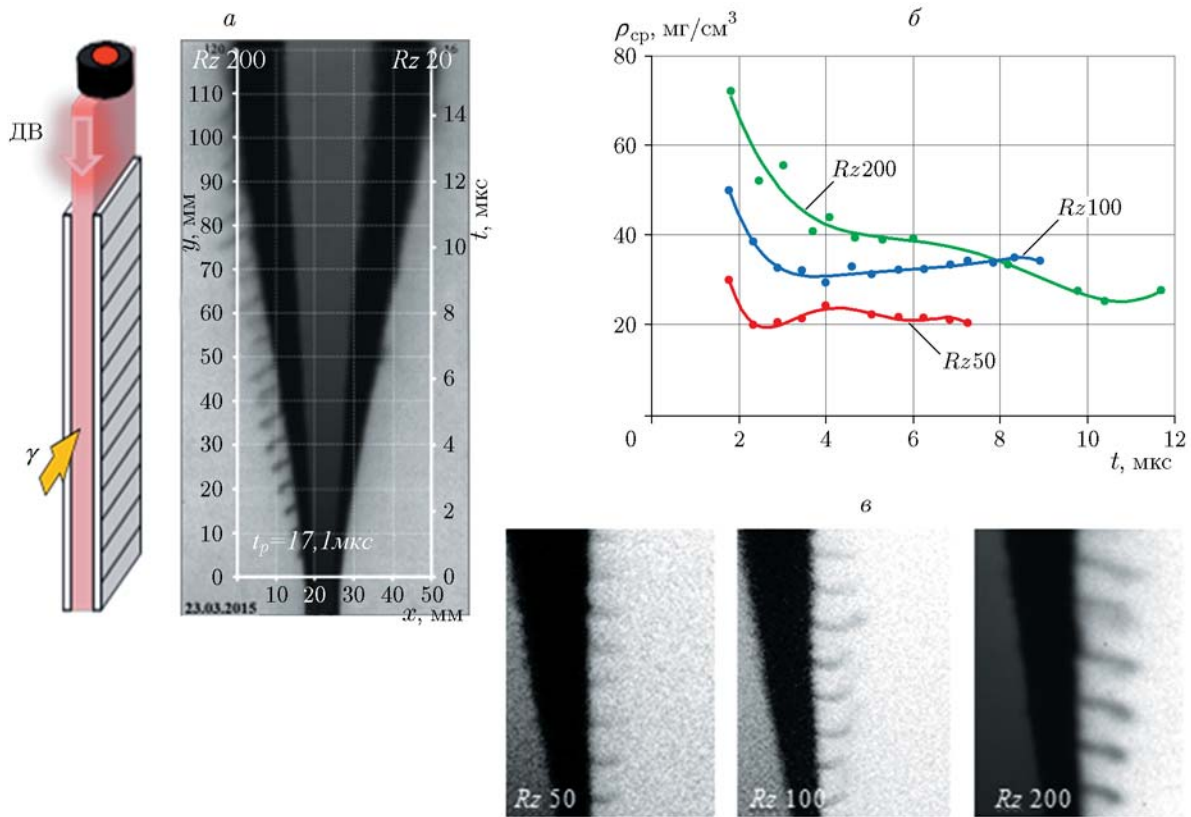


Рис. 11. Плотность струй в зависимости от времени и глубины канавок на поверхности свинца. Скользящая детонация (регистрация МИР): пластическое взрывчатое вещество, $\rho = 1.6 \text{ г/см}^3$, толщина пластины 1 мм, давление УВ 16 ГПа; *а* — схема экспериментальной модели, *б* — рентгенограмма эксперимента, *в* — изменение плотности струй во времени

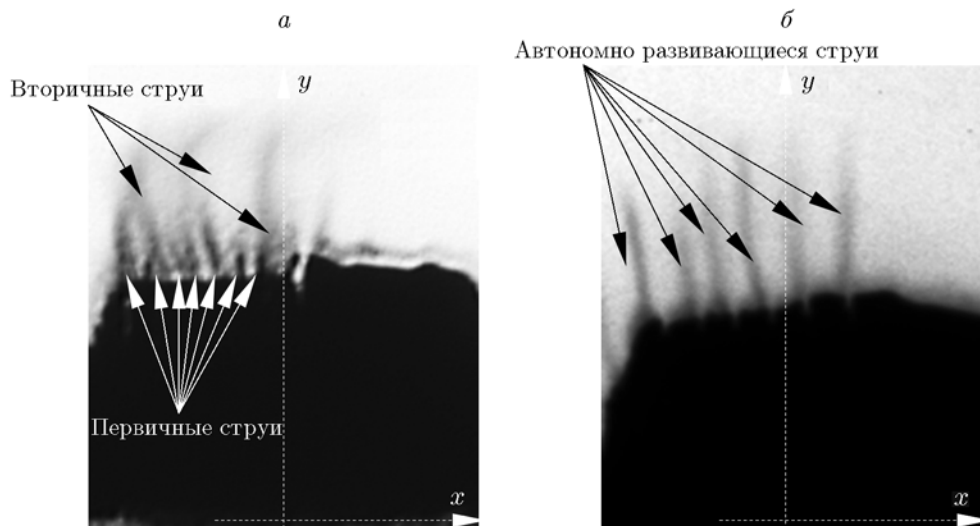


Рис. 12. Результаты опытов по регистрации струй из канавок на поверхности образцов свинца: схему эксперимента см. на рис. 9; *а* — $a_0/\lambda = 0.3 \text{ мм}/0.3 \text{ мм}$, *б* — $a_0/\lambda = 0.1 \text{ мм}/3.0 \text{ мм}$

хода УВ на свободную поверхность образца передний фронт струи плотностью $1 \div 3 \text{ мг/см}^3$ достигает плоскости регистрации СИ. Далее происходит слияние струй из стыков на внутренней и внешней поверхностях образца в общий пылевой поток. На рис. 5 струи из внутренней и наружной оболочек при $\lambda = 10 \text{ мм}$ сливаются в общий поток через $\approx 5.5 \text{ мкс}$ после выхода УВ на свободную поверхность. Возможно, слияние и укрупнение струй в опытах с образцами типа I и II объясняется следующим: при раскрытии стыков реализуются условия для возникновения сдвиговых течений, под действием которых движение струи приобретает тангенциальную компоненту.

Подобное слияние струй зафиксировано МИР при ударно-волновом пылении образцов свинца с $a_0/\lambda = 300 \text{ мкм}/300 \text{ мкм}$ (рис. 12, а). При $\lambda = 3 \div 3.5 \text{ мм}$ струйные течения осуществлялись без взаимодействия (рис. 12, б).

Отметим, что одномерность изображения в опытах с использованием СИ снижает наглядность и очевидность интерпретации экспериментальных данных, чем всегда выгодно отличался от других методик метод импульсной рентгенографии. В этой связи для усиления наглядности и визуализации формы пылевого облака выглядит перспективным совмещение многокадровой синхротронной диагностики с 2-3-кадровой двумерной рентгенографической регистрацией. Подобная постановка экспериментов позволит с использованием СИ получить данные о динамике развития струйных течений и на основе двумерных рентгенограмм, например на этапе формирования струи и на заключительном этапе торможения и рассеяния, проверить правильность интерпретации данных синхротронной диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постановка экспериментов с использованием синхротронного излучения и импульсной рентгенографии позволила получить новые

результаты о взаимодействии струйных течений в области конструктивных элементов типа стыка двух частей исследуемого плоского образца, технологических отверстий.

Данные исследований с использованием СИ и МИР согласуются и дополняют друг друга. Традиционная рентгенография визуализирует общую картину процесса, параметры (форму и плотность) высокоплотной части ($\rho h \geq 10 \text{ мг/см}^2$) пылевого облака или струи. Синхротронная диагностика позволяет получать количественные данные в диапазоне малых плотностей $\rho h \geq 1 \text{ мг/см}^2$ и подробную информацию о динамике процесса, временных масштабах формирования струй и их эволюции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л., Крюков Н. И., Толочко А. П., Голубев В. А. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее УВ и методах диагностики // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 6. — С. 103–107.
2. Тен К. А., Прууэл Э. Р., Кашкаров А. О., Рубцов И. А., Шехтман Л. И., Жуланов В. В., Толочко Б. П., Музыря А. К., Провсирнин К. М., Смирнов Е. Б., Смирнов В. Н., Столбиков М. Ю. Изучение выброса микрочастиц из неоднородностей ударнонагруженных металлов с использованием синхротронного излучения // Забабахинские научные чтения: XIII междунар. конф. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017.
3. Кононенко В. Ю., Кормилицин А. И. и др. ИГУР-3.5 — мощный импульсный ускоритель электронов для регистрации быстропротекающих процессов // Забабахинские научные чтения: междунар. конф. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008.

Поступила в редакцию 02.10.2018.

После доработки 06.11.2018.

Принята к публикации 20.02.2019.