

Явления неидеальной кумуляции

В.М. Фомин, В.И. Звегинцев,
Е.Я. Брагунцов

Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича, СО РАН,
Новосибирск

Процесс формирования кумулятивной струй при косом соударении пластин, метаемых продуктами детонации, или при взрывном обжатии осесимметричных металлических облицовок, впервые объяснила гидродинамическая теория кумуляции, основанная на модели идеальной несжимаемой жидкости. В целом гидродинамическая теория кумулятивного эффекта остается простым и универсальным приближением.

Однако некоторые факты, наблюдаемые экспериментально, в частности особенности поведение металла в условиях формирования и растяжения кумулятивной струи, а также при ее проникании в преграду послужили причиной уточнения гидродинамической теории.

На сегодняшний день прикладной интерес к кумулятивному эффекту растет. Разнообразие прикладных задач, растущий практический интерес диктуют необходимость более полного и адекватного чем гидродинамическая теория описания процесса кумуляции.

В данной работе предложен подход к объяснению особенностей деформации металла в процессе кумуляции основанный на использовании дислокационных механизмов пластической деформации и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи.

На основе дислокационных механизмов пластической деформации объяснен ряд особенностей в процессах растяжении и разрушения кумулятивных струй, которые наблюдаются на практике и не нашли до сих пор адекватного объяснения, в частности, зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла (величины зерна, наклепа, текстуры), а также причины аномально большого удлинения материала кумулятивной струи перед разрушением.

Показано влияние структурной неоднородности материала облицовки на характер разрушения кумулятивной струи при ударно-волновом воздействии на стадии взрывного обжата облицовки.

Установлена практически целесообразная степень чистоты металла облицовки, которая определяется пределом растворимости легирующих элементов и примесей.

Получены аналитические выражения для определения предельного удлинения и времени разрушения кумулятивной струи, которые позволяют анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных и пластических свойств материала, его структурных характеристик, геометрических параметров облицовки и кинематических характеристик струи.

Предлагаемый подход позволяет получить более глубокое понимание физических явлений, происходящих в процессе кумуляции.

На сегодняшний день закономерности растяжения и разрушения кумулятивных струй хорошо изучены. Однако, в целом вопрос прогнозирования разрушения струи и ее предельного растяжения в настоящее время является проблемой. Модели растяжения и разрушения струй, и выводы, полученные различными авторами, не согласуются, например [1,2,3]. Выводы противоречат статическим и динамическим испытаниям образцов на растяжение. Кроме того существует ряд особенностей деформационного поведения материала (металла) в условиях кумулятивной струи (температуры $\approx 0,5T_{пл}$, скорости деформации $\approx 10^3-10^5 \text{ с}^{-1}$) которые до сих пор не нашли объяснения.

В таблицах 1-4 и на рисунках 1-4 в качестве примера приведены некоторые особенности поведения материала КО [1-4, 11,12]:

- **Сильная зависимость предельного удлинения и пробивного действия струи от структурно-механических характеристик металла (величина зерна, наклеп, текстура, химический состав и степень чистоты металла) несмотря на то, что поведение металла в условиях кумулятивной струи рассматривается как «квазижидкое» (см.табл.1-4, рис.1-3) ;**
- **Кумулятивная струя разрушается одновременно на множество фрагментов (см. рис.1.);**
- **Материал кумулятивной струи деформируется на 1000% - 2000% (табл.3);**
- **Наличие трех видов разрушения струи, причем форма фрагментов в случае хрупкого разрушения не с плоскими торцами, а в виде вложенных друг в друга усеченных конуса (рис.1,2);**
- **Величина предельного удлинения струи прямо пропорциональна её диаметру (табл.4);**
- **Наличие зависимости предельного удлинения от плотности металла (табл.4).**

Влияние содержания углерода на пробивное действие КО из сталей
(немонотонная зависимость).

Таблица 1.

Материал облицовки	Содержание углерода, %	$\bar{L}$, %
Армко-железо	0,01	122
Сталь 20	0,20	117
Сталь 45	0,45	100
У8А	0,80	117
У10А	1,0	110

Влияние степени чистоты на пробивное действие КО из железа.

Таблица 2

Материал	Содержание углерода и примесей, %											L, %
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	S	P	N ₂	O ₂	
№1	0,004	0,004	0,01	0,008	0,01	0,005	0,009	0,004	0,003	0,01	0,01	100
№2	0,005	0,004	0,01	0,008	0,01	0,005	0,009	0,004	0,003	0,001	0,002	114

Коэффициенты уравнения $N_{пр} = A + B \cdot r_0 \cdot \text{grad} \cdot V_0$.

Таблица №3

Материал КО	Коэффициенты		Относительное изменение $B/B_{\text{сталь20}}$, %
	A	B, мкс/мм	
Сталь 20	1,6	8	100
Армко-железо	1,6	10,4	130
Материал №1	1,6	10,6	133
Материал №2	1,6	11,3	141,2

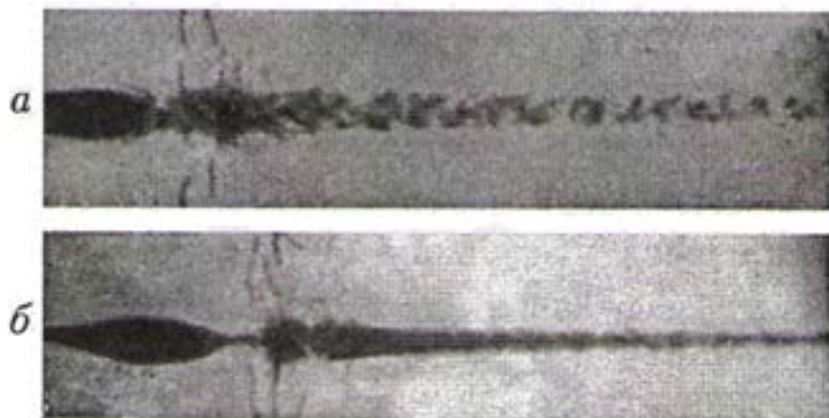


Рис.1 Разрушение КС из стали марки Сталь 45 в момент времени $t=26$ мкс (а) и из армко-железа в момент времени 24 мкс (б).



Рис.2. Разрушение КС из свинца

Автор	Предельное удлинение, n_{ult}	Время разрыва, t_b
В. М. Маринин	$1,8 + 15,2r_0\eta_0$	$\frac{0,8}{\eta_0} + 15,2r_0$
Г. Пфеффер	$2,4 + 48,5 \frac{r_0\eta_0}{C_0}$	$\frac{1,4}{\eta_0} + 48,5 \frac{r_0}{C_0}$
Е. Хирш	$1 + \frac{2}{v_{pl}} r_0\eta_0$ $v_{pl} = C_p = \sqrt{Y/\rho}$	$\frac{2r_0}{v_{pl}}$
В. Хаугстад	$\frac{2}{C_p} r_0\eta_0$ $v_{pl} = 0,87C_p$	$\frac{2r_0}{C_0} - \frac{1}{\eta_0}$
П. Чоу, В. Флис	$2 + 3,75 \frac{r_0\eta_0}{C_p} - 0,125 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^2$	$\frac{1}{\eta_0} \left[3,75 \frac{r_0\eta_0}{C_p} - 0,125 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^2 + 1 \right]$
Е. Хеннекью	$I_{FG} \left[\frac{2r_0\eta_0}{v_{pl}} + 1 \right]$ $I_{FG} = 1,46$	$I_{FG} \left[\frac{2r_0}{v_{pl}} + \frac{1}{\eta_0} \right] - \frac{1}{\eta_0}$
Дж. Куртис	$\frac{\pi}{v_{pl}} r_0\eta_0$	$\frac{\pi r_0}{v_{pl}} - \frac{1}{\eta_0}$
П. И. Уляков	$18,67(r_0\eta_0)^{0,62}$ (медь М1) $15,06(r_0\eta_0)^{2/3}$ (медь М2)	$\frac{1}{\eta_0} [A(r_0\eta_0)^{2/3} - 1]$
Дж. Карлеон	$5,4427 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{0,7047}$ $v_{pl} = 0,6807C_p$	$\frac{1}{\eta_0} \left[5,4427 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{0,7047} - 1 \right]$
А. В. Бабкин	$5,38 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{0,772}$ $v_{pl} = 0,65C_p$	$\frac{1}{\eta_0} \left[5,38 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{0,772} - 1 \right]$
П. Чоу	$5 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{2/3}$	$\frac{5}{\eta_0} \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{2/3}$
П. Шантере	$7,5 \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{2/3}$	$\frac{7,5}{\eta_0} \left(\frac{r_0\eta_0}{C_p}\right)^{2/3}$
Ж. Пети	$\left(\frac{\pi R_e^2}{I}\right)^{1/3} \left(\frac{r_0\eta_0}{v_{pl}}\right)^{2/3}$	$\left(\frac{\pi R_e^2}{I}\right)^{1/3} \frac{1}{\eta_0} \left(\frac{r_0\eta_0}{v_{pl}}\right)^{2/3} - \frac{1}{\eta_0}$

Аналитические зависимости для расчета параметров предельного удлинения кумулятивной струи[2].

Таблица 4.

V_{pl} - скорость пластического разрушения;

C_{pl} - пластическая скорость звука;

r_0, η_0 - начальный радиус и скорость деформации струи соответственно.

Остается открытым вопрос:

почему формулы в таблице 4 имеют такой вид [3]?

Тем не менее, сопоставление приведенных зависимостей с экспериментальными данными в целом удовлетворительно, что свидетельствует о существовании в исследуемом процессе растяжения и пластического разрушения кумулятивных струй некоторых фундаментальных закономерностей, пока в сущности не понятных, но проявившихся при численном моделировании и обобщении результатов расчета.

В данной работе анализ процесса растяжения и разрушения кумулятивных струй и объяснение некоторых особенностей деформационного поведения металла в условиях кумулятивной струи проведены с использованием:

- **физического подхода основанного на использовании дислокационных механизмов пластической деформации;**
- **учета влияния ударно-волновых и деформационных процессов происходящих на стадии обжатия облицовки на процесс растяжения струи.**

Этот подход является путем не только объяснения и более глубокого понимания физических явлений происходящих при деформировании металла струи, но и получения количественных данных о высокотемпературной высокоскоростной пластической деформации металла которым является процесс растяжения струи.

Обоснование дислокационного механизма процесса растяжения кумулятивной струи.

С микроскопической точки зрения могут быть только два механизма пластической деформации металла:

- перенос вещества путем направленной напряженными диффузии без участия дислокаций;
- формоизменение путем движения дефектов (дислокаций) кристаллической решетки.

Преобладание дислокационных механизмов пластической деформации металла при взрывных нагружениях убедительно подтверждается многочисленными исследованиями.

Например, в работах [7,8]. показано, что при высокоскоростных взрывных нагружениях в г.ц.к. и о.ц.к. металлах (обычно используемых для изготовления кумулятивных облицовок) пластическая деформация протекает благодаря движению краевых дислокаций.

Уточнение дислокационного механизма деформации металла в кумулятивной струе произведено на основании металлографического анализа фрагментов струй и пестов в зоне струеобразования [1,9,10].

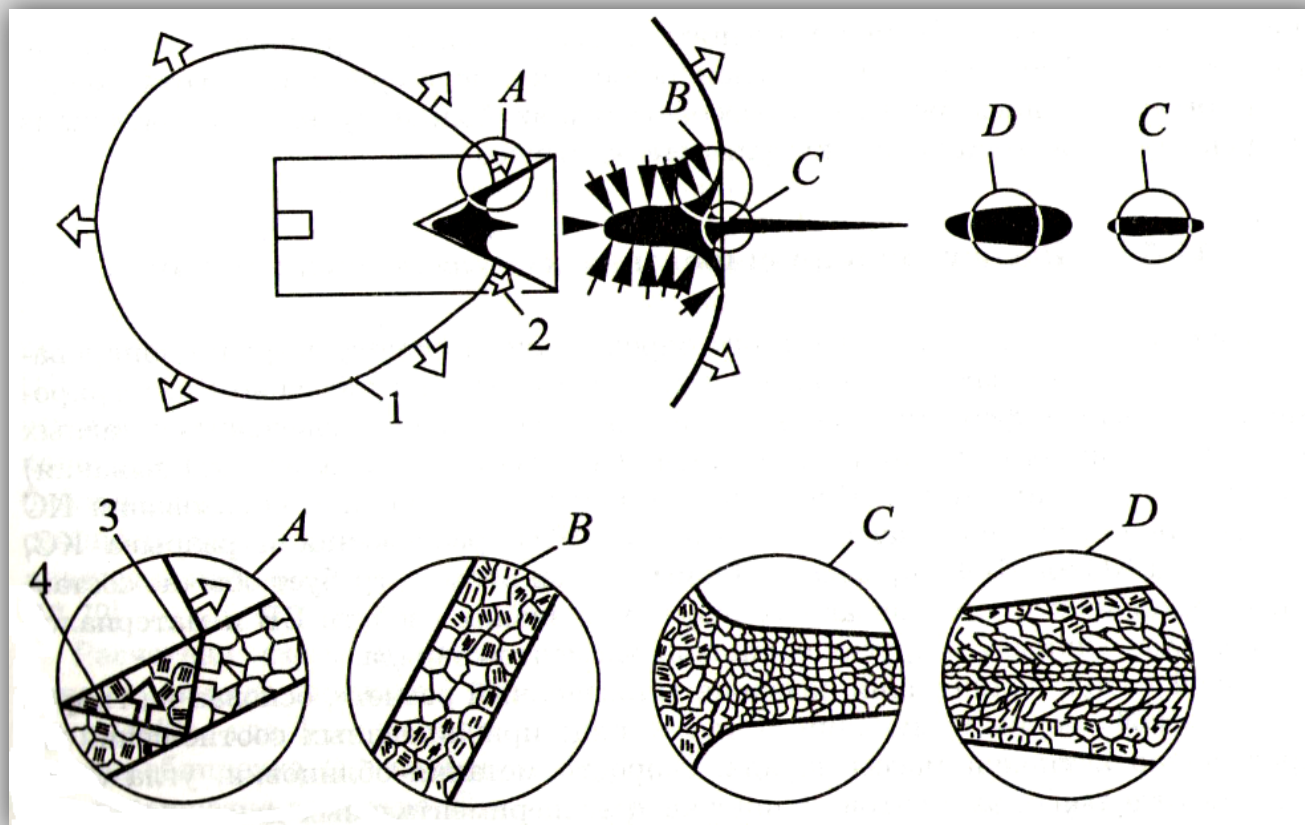


Рис.3. Схема процессов деформирования металлической кумулятивной облицовки (КО), формирования струи и песта [1]:

А – зона взаимодействия ударной волны (УВ) и КО; **В** – зона схлопывания облицовки; **С**- зона формирования струи; **Д** – зона деформирования песта; **1** - граница разлета продуктов детонации (ПД); **2** – фронт детонационной волны; **3** – фронт ударной волны; **4** – фронт волны разрежения.

Данные металлографического анализа пестов и фрагментов струй показывают (рис.3.), что структура металла в струеобразующем слое песта и в струе состоит из мелких равноосных зерен в рекристаллизованном (отожженном) состоянии, что свидетельствует о малой плотности внутризеренных дислокаций и отсутствии остаточной внутризеренной деформации.

В тоже время мелкозернистость свидетельствует о высокой плотности зернограницных дислокаций ($\rho > 10^{10} \text{см}^{-2}$) достаточной для последующей реализации больших деформаций металла.

Характерные для струи изменения структуры (наличие очень мелких порядка **1 мкм** зерен, которые совсем не деформируются, либо деформируются слабо, сохранение равноосности зерен, отсутствие накопления внутризеренных дислокаций) нетипичны для обычных представлений о пластической деформации металла, однако именно они определяют природу сверхпластического течения металлов.

Общность структурных изменений свидетельствует об единой природе эффекта больших деформаций металла в кумулятивной струе и деформаций мелкозернистых материалов при сверхпластичном (СП) течении.

Определяющее значение при СП деформации ультрамелкозернистых металлов и сплавов играют границы зерен. Границы зерен являются источниками и стоками дефектов решетки (дислокации, вакансии). При СП течении доминирует процесс зернограницного проскальзывания. Высокая плотность зернограницных дислокаций является причиной проскальзывания[13].

Проскальзывание зерен происходит вследствие их смещения вдоль общей границы, в результате чего зерна скользят относительно друг друга таким образом, что число зерен уменьшается в поперечном сечении и увеличивается по длине.

Таким образом данные металлографического анализа песта и струи позволяют сделать важные выводы:

- в процессе деформации при обжатии облицовок в материале струи формируется высокая плотность зернограницных дислокаций;
- в процессе растяжения струи внутри зерен упрочнения металла и существенного изменения плотности дислокаций не происходит;
- большая деформация металла при растяжении струи реализуется за счет движения большого (околопредельного) количества зернограницных дислокаций, образованных при деформации металла на стадии обжатия КО;
- для описания СП деформации металлов в струе можно применять уравнения дислокационной кинетики и

уравнения механического состояния в форме $\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$ связывающие действующие напряжения σ , деформацию ε скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ (n и m структурно-чувствительные коэффициенты).

Напряженное состояние струи формируется за счет инерционного деформирования перепадом осевой скорости $\Delta v_{z0} = \dot{\epsilon}_{z0} l_0$,

где $\dot{\epsilon}_{z0} = (dv_z/dz)|_{t=0} = dv_z/dz_0$;

z - осевая координата;

l_0 - длина рассматриваемого участка струи в момент его формирования;

$t=0$ - момент формирования рассматриваемого участка струи.

Начальный градиент осевой скорости $\dot{\epsilon}_{z0}$ определяет скорость деформации $\dot{\epsilon}$ металла

$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{z0}/n$.

(1)

$n = 1 + \epsilon = l/l_0$ - коэффициент текущего удлинения участка струи.

Величина действующих напряжений в струе неизвестна. Если установить уравнение механического состояния типа $\sigma = k\epsilon^n \dot{\epsilon}^m$, то можно определить величину действующих в струе напряжений σ , время t_b существования струи в нагруженном состоянии с момента ее образования до разрыва и, следовательно, определить предельную кратность растяжения n_b кумулятивной струи [3]:

$$n_b = 1 + \dot{\epsilon}_{z0} t_b \quad (2)$$

Уравнение механического состояния кумулятивной струи. Существующие уравнения механического состояния в форме $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ и их коэффициенты установлены на основании исследований явлений высокотемпературной пластической деформации металлов и сплавов. Поскольку в исследованиях использовались различные подходы: феноменологический, эмпирический и физический, то, соответственно, существуют различные уравнения состояния.

Трактовка экспериментальных данных с помощью физических теорий с разработкой микроскопических моделей высокотемпературной деформации более плодотворна. Изучение физической природы пластической деформации с установлением математических зависимостей связывающих переменные и содержащих коэффициенты, отражающие определенные свойства материала с подтверждением экспериментом зависимостей и физического смысла всех его членов позволяют установить закономерности, адекватно отражающие процесс.

Поскольку установлено, что деформация металла в процессе растяжения струи вызывается движением зернограницных дислокаций, следовательно, она контролируется теми же процессами, которые контролируют движение дислокаций.

Эти процессы адекватно описаны с помощью атомной теории термически активированного скольжения дислокаций с позиций преодоления дислокациями препятствий (барьеров) под воздействием приложенного напряжения и теплового воздействия одновременно.

Использовано уравнение Орована [9,10,13,14,16-18]

$$\dot{\epsilon} = \alpha b \rho_m v_d,$$

полностью и адекватно выражающее зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от ρ_m (плотности подвижных дислокаций, перемещающихся в результате скольжения или переползания), вектора Бюргерса b и скорости дислокаций V_d . Для чистых металлов $V_d = b \gamma = b \gamma_0 \exp[-H_0(1 - \beta T)/kT] \exp(\sigma A b / kT)$.

Связь между параметрами, характеризующими процесс перемещения дислокаций и экспериментально установленным влиянием V_d температуры, напряжения и скорости деформации выглядит следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \alpha b^2 \rho \gamma_0 \exp[-H_0(1 - \beta T)/kT] \exp(\sigma A b / kT) \quad (3)$$

где H_0 – энтальпия активации движения дислокации при равном нулю напряжении; A -поверхность, обметаемая дислокацией при переходе из начального положения в положение, соответствующее высоте барьера;

σ -напряжения; T -температура; k -постоянная Больцмана; γ_0 -дебаевская частота; α -ориентационный фактор; b -вектор Бюргерса; ρ –плотность подвижных дислокаций (длина линий дислокаций в единице объема), см/см³, $\beta = -1/\mu_0(d\mu/dT)$, μ -модуль сдвига, μ_0 -модуль сдвига при 0 °K.

Напряжений σ , действующие в струе, будут равны

$$\sigma = H_0(1 - \beta T) / Ab + kT / (Ab) \ln[\dot{\epsilon} / (\alpha b^2 \rho v_0)] \quad (4)$$

Время разрушения кумулятивной струи t_b .

Существует ряд широко используемых критериев прочности применительно к динамическому нагружению. Они подобны критерию Журкова, который определяет полное время до разрушения (время долговечности τ_d) при заданном напряжении и некоторой температуре [7]:

$$\tau_d = \tau_0 \exp((U_0 - \gamma \sigma) / kT) , \quad (5)$$

где: U_0 -энергия активации процесса разрушения; γ -«структурно-чувствительный» коэффициент; k -постоянная Больцмана; T -температура испытания; σ -действующие напряжения; τ_0 - константа (10^{-13} с).

Учитывая, что в полученном выражении переменными являются только температура, скорость деформации и плотность подвижных дислокаций, оно приводится к виду

$$t_b = C(1/T) (\rho / \dot{\epsilon}_{z0})^{\gamma/(Ab)}$$

Предельное удлинение кумулятивной струи. Используя выражения (2) и (6) получим уравнение для определения предельного удлинения кумулятивной струи в виде

$$n_b = 1 + \dot{\epsilon}_{z0} t_b = 1 + C(T) \dot{\epsilon}_{z0}^{[(1-\gamma/(Ab))]} \rho^{\gamma/(Ab)} \quad (7)$$

Полученные уравнения подобны уравнениям, приведенным в таблице 4. Они позволяют анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных σ_T , μ , μ_0 , U_0 , γ и пластических свойств материала H_0 , A , а также структурных характеристик (размера зерна d), геометрических параметров облицовки и кинематических характеристик струи $\dot{\epsilon}_{z0}$.

Определение физических величин в уравнениях осуществляется в независимых испытаниях на ползучесть или в экспериментах по определению скорости движения дислокаций.

Плотность подвижных дислокаций ρ в струе определяется исходной структурой материала. Кроме того она увеличивается в процессе деформации металла на стадии обжатия облицовки, т. е. $\rho = \rho_{исх} + \rho_{обж}$.

Для деформации обжатия облицовки $\epsilon_{обж}$ связь между степенью деформации металла и плотностью подвижных дислокаций [8-10] можно записать в виде:

$$\rho_{обж} = (\epsilon_{обж} / \alpha b k)^2, \quad (8)$$

Влияние исходной структуры материала.

Известны различные физические модели, описывающие влияние размера зерна, величины субзерен, предела текучести на плотность исходных подвижных дислокаций [5,8-10]. Например [5], $\rho_{исх} = [(\sigma_T + k_y d^{-1/2}) / (\alpha b \mu)]^2$, где α, σ_T, k_y - константы определяемые микроструктурой материала (величиной субзерен, концентрацией примесей и т.д.), d – средний размер зерна. Это позволяет выявить (проследить) влияние структуры материала на время разрушения струи и ее предельную кратность растяжения.

где k -константа материала (≈ 6).

$$t_b = C(T) \{ [(\sigma_T + k_y d^{-1/2})^2 / (\alpha b \mu)^2 + (\epsilon_{обж} / \alpha b k)^2] / \epsilon_{z0} \}^{1/(Ab)} \quad (9)$$

Из выражений (7) и (9) видно, что вклад в повышение пластичности струи вносит и исходная структура обратно пропорционально величине зерна. Влияние наличия мелкозернистой структуры в облицовке проявляется в ее дополнительном вкладе в формирование плотности подвижных дислокаций. Формирования исходной мелкозернистой структуры происходит, как правило, в процессе формообразования облицовки и ограничено технологическими возможностями.

Из выражения (8) видно, что уже на стадии обжатия облицовки в металле формируется повышенная плотность дислокаций. Это и является причиной больших деформаций металла в струе.

Влияние радиуса струи

на динамическую пластичность струи.

Величину $\varepsilon_{\text{обж}}$ в выражении $\rho_{\text{обж}} = (\varepsilon_{\text{обж}} / \alpha b k)^2$ можно определить, если рассмотреть обжатие конического элемента облицовки как обжатие кольцевого элемента[1]:

$$\varepsilon_{\text{обж}} = \varepsilon_i = 2^{1/2} / 3 [(\varepsilon_r - \varepsilon_\Theta)^2 + (\varepsilon_\Theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2]^{1/2}, \quad (9)$$

где ε_r – радиальная деформация кольцевого элемента; ε_Θ – угловая деформация; ε_z – деформация вдоль оси элемента.

Принято, что $\varepsilon_z = 0$, $\varepsilon_r = \ln(R_{\text{остр}} / [(k h_0)])$, $\varepsilon_\Theta = \ln(R_{\text{остр}} / R_0)$.

Здесь h_0 – начальная толщина стенки кольцевого элемента, $k h_0$ – внутренний слой элемента переходящий в струю, R_0 – начальный радиус кольцевого элемента, $R_{\text{остр}}$ – радиус кумулятивной струи в момент схлопывания.

Обнаруживается причинноследственная связь динамической пластичности струи и времени ее разрушения с начальным радиусом струи $R_{\text{остр}}$. Она возникает по причине влияния на динамическую пластичность деформации металла на стадии обжатия облицовки посредством формирования повышенной плотности подвижных дислокаций. И деформация металла и начальный радиус струи определяются одними и теми же геометрическими параметрами облицовки.

Влияния плотности материала облицовки на динамическую пластичность струи не обнаружено.

Определение показателя степени в степенной зависимости времени разрушения струи и предельного удлинения от градиента скоростей.

Сопоставление полученных уравнений (7) и 8) с уравнениями, приведенными в таблице 4, показывает, что различие показателей степени в степенной зависимости времени разрушения струи и предельного удлинения от градиента скоростей у разных авторов объясняется тем, что показатель степени зависит от вида материала и его структуры ($1 - \gamma/(Ab)$).

Определение коэффициента A в уравнении предельного растяжения кумулятивной струи

$$n_b = A + B \cdot d_0 \cdot \text{grad } V,$$

По трактовке физического смысла коэффициента A нет однозначного мнения. Экспериментально неоднократно было доказано, что A не равно 1. Например, для меди A равно 1,8, для стали 1,6.

Если исходить из уравнения неразрывности механики сплошной среды, то этот коэффициент должен быть равен 1.

Коэффициент текущего удлинения участка струи равен $n = 1 + \varepsilon = l/l_0$. Здесь l_0 подразумевается длина участка струи в момент ее образования.

Указанное противоречие разрешается следующим способом.

Процесс растяжения струи при определении коэффициентов уравнения контролируется по перемещению меток. Коэффициент предельного удлинения определялся как отношение суммы длин разорвавшихся кусочков l_i между метками к расстоянию между метками l_0 на исходной облицовке:

$$n_b = \sum l_i / l_0$$

Где l_0 - расстояние между метками на исходной облицовке (Рис.4.)

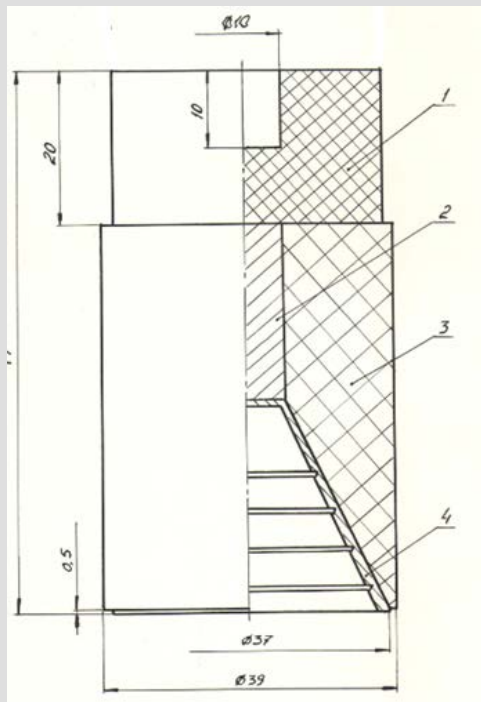


Рис.4. Кумулятивный заряд.

1-иницирующая шашка; 2-линза;
3- кумулятивный заряд; 4-облицовка

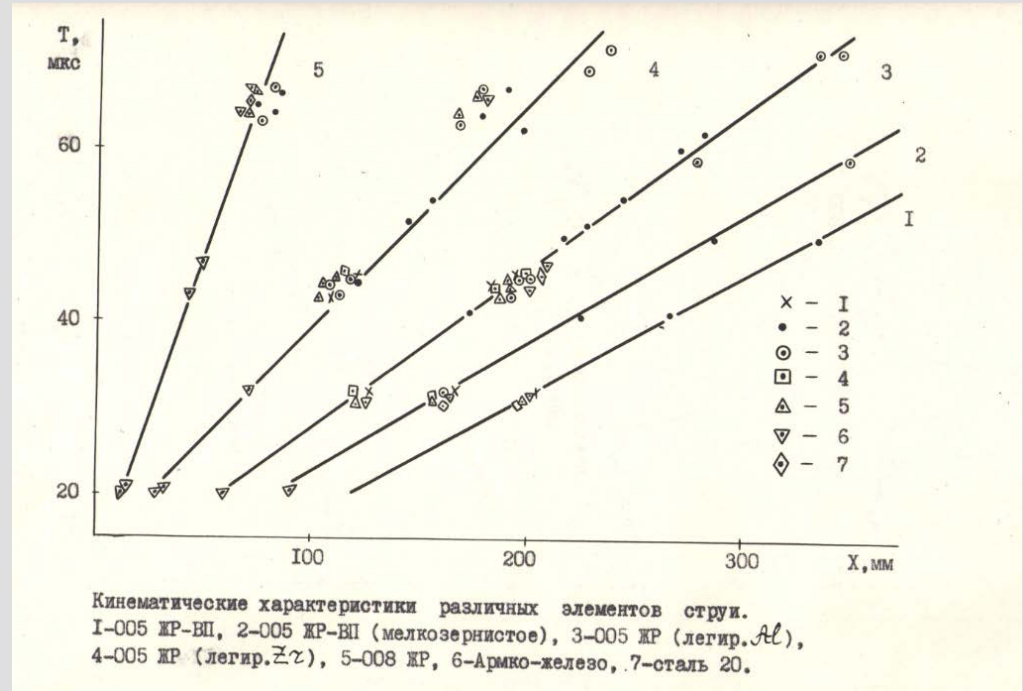


Рис.5

Противоречие $A \neq 1$ возникает вследствие того, что при определении n_b использовано l_0 (расстояние между метками на исходной облицовке). Это неправомерно, потому что, исходя, из процесса растяжения струи необходимо было брать отношение к длине элемента струи в момент его образования, а он не равен l_0 . Дело в том, что при обжатии струи из-за немгновенности процесса детонации и обжатия облицовки образование растягивающегося элемента струи происходит немгновенно.

В начале формируется передняя часть элемента струи а через некоторый отрезок времени задняя часть. За время формирования всего элемента струи его передняя часть успевает значительно продеформироваться .

В существующем методе определения $N_{пр}$ коэффициент A будет являться функцией кинематических и геометрических параметров кумулятивного заряда. При определении кратности растяжения разных металлов в случае использования кумулятивных зарядов одинаковой геометрии коэффициент A будет зависеть от плотности материала потому что кинематические параметры струи сильно зависят от плотности материала. Этот эффект и зафиксирован в эмпирических уравнениях.

Коэффициенты уравнения

Таблица №4

Материал струн	Коэффициенты	
	A	B, мкс/мм
Медь	1,8	15,2
Никель	1,8	14,0
Ниобий	2,4	17,7
Тантал	2,2	18,0
Сталь20	1,6	8,0

Относительная погрешность метода "меченой струи" можно оценить по величине превышения единицы коэффициентом A .

Анализ причин фрагментации кумулятивной струи.

При растяжении струи в эффективной ее части возникает множество шеек, по которым во времени происходит разрушение струи на отдельные элементы. Чрезвычайно большая доля равномерной пластической деформации позволяет сделать вывод, что существует периодическое воздействие, усиливающие напряжения в отдельных местах струи. Локализации напряжений приводит к повышенной сосредоточенной пластической деформации, которая ускоряет разрыв струи и снижает ресурс пластичности струи. Предположение о наличии начальных поверхностных возмущений и их развитии в струе предсказывает фрагментацию струи, однако, причины появления периодических возмущений и прогрессирующей локализации деформирования в области шейки не найдены.

В данной работе причины разрушения струи на отдельные кусочки связываются с ударно-волновыми явлениями, имеющими место на различных стадиях процесса кумуляции. Учет волновых процессов на стадии детонации взрывчатого вещества и стадии обжатия позволяет сделать вывод, что скорость стенок облицовок нарастает скачками, соответствующими отражению волны разрежения от их внутренней поверхности [1].

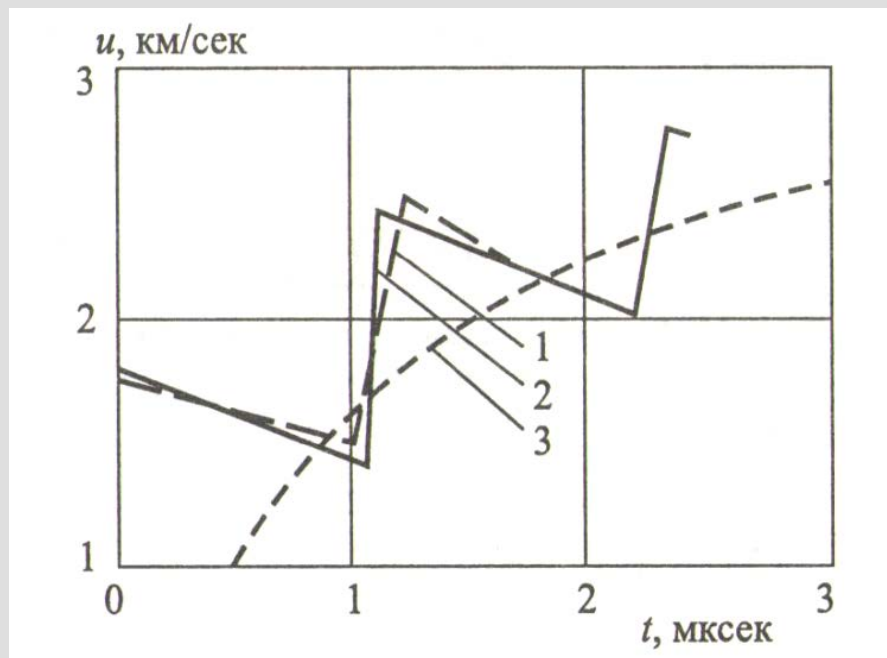


Рис.6. Закон изменения скорости свободной границы стальной пластины со временем полета: 1-опыт; 2- численный расчет для сжимаемой пластины; 3-расчет для жесткой пластины.

«Пульсация» скорости обжатия при наличии ненулевого угла облицовки и немгновенность процесса детонации приводит к формированию не непрерывного, а скачкообразного изменения распределения скорости вдоль струи (градиента скорости). Следовательно, возникают периодические зоны с повышенными скоростями деформации и более высокими растягивающими напряжениями, где и происходит разрушение.

Влияние фазового состава и степени чистоты металла облицовки.

В работе [21] исследован характер деформации и разрушения, проведена количественная оценка динамической пластичности кумулятивных струй от кумулятивных зарядов с облицовками из сплавов, имеющих разный фазовый состав и разную степень чистоты.

Определение пластических свойств кумулятивной струи осуществлено с помощью метода «меченой струи» с установлением уравнений предельного коэффициента растяжения. Установлена закономерность изменения пробивного действия и пластичности кумулятивных струй зарядов с облицовками из различных сплавов с изменением их состава согласно диаграммам состояния.

Значения коэффициентов для определения предельного удлинения кумулятивной струи $n_b = A + B \cdot d_0 \cdot \text{grad } V$

Таблица 5

Материал кумулятивной струи	Значения коэффициентов	
	A	$B \cdot 10^3$, мкс/мм
005ЖР - ВП	1,6	12,1
005ЖР (мелкозеристое)	1,6	14,9
005ЖР (легир. Al)	1,6	13,5
005ЖР (легир. Zr)	1,6	7,9
008ЖР	1,6	11,2
Армко-железо	1,6	10,4
Сталь 20	1,6	8,0

Влияние содержания углерода на пробивное действие КО из сталей (немонотонная зависимость).

Таблица 6.

Материал облицовки	Содержание углерода, %	$\bar{L}$, %
Армко-железо	0,01	122
Сталь 20	0,20	117
Сталь 45	0,45	100
У8А	0,80	117
У10А	1,0	110

При использовании облицовок из структурно-однородных материалов динамическая пластичность и пробивное действие кумулятивных зарядов растут.

Механизм и причины влияния структурной неоднородности и степени чистоты на динамическую пластичность материала струи и пробивное действие кумулятивных зарядов.

Структурные составляющие имеют различные ударно-волновые, прочностные и пластические свойства (рис.7). Это приводит к неоднородности деформации сплава, возникновению напряжений на границах зерен разного состава уже на стадии обжатия облицовки (рис.7) и вызывает ориентированное разрушение струи на ранних стадиях полета, меняет характер разрушения с вязкого на хрупкий с формированием на торцах фрагментов форм поверхности разрушения в виде усеченных конусов (рис.9.).

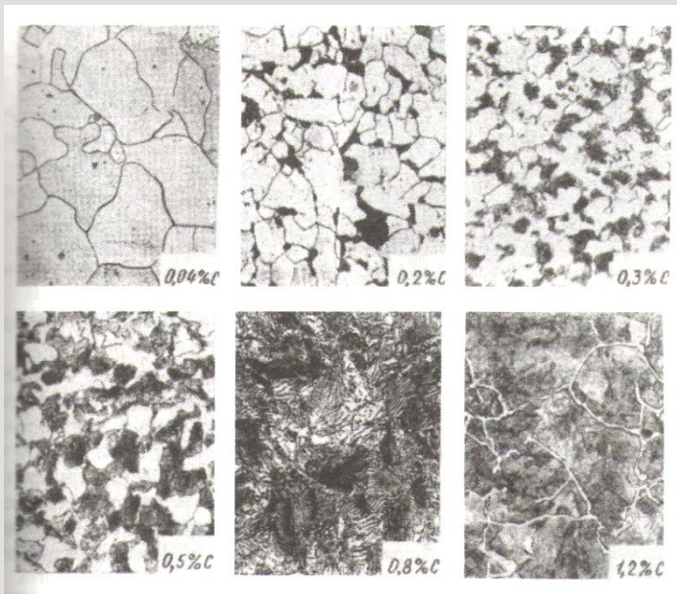


Рис. 7. Структура сталей с различным содержанием углерода

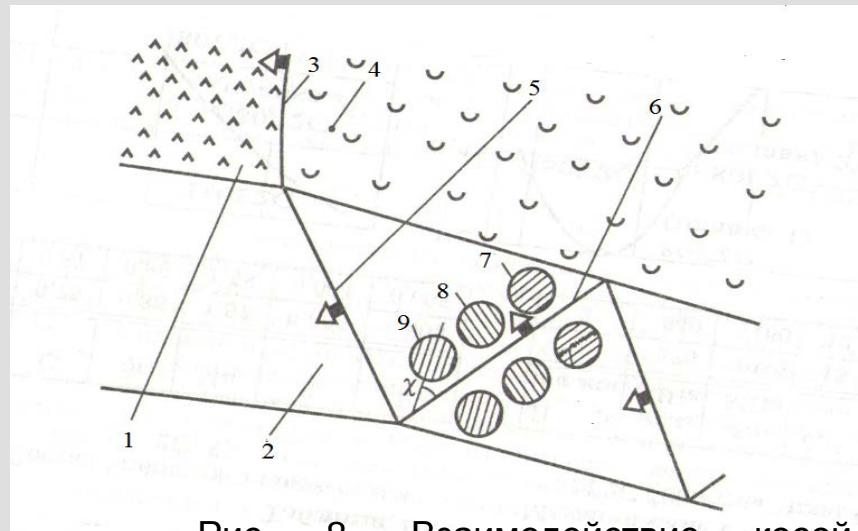


Рис. 8. Взаимодействие косой волны разрежения со структурными неоднородностями: 1-заряд ВВ; 2-облицовка; 3- детонационный фронт; 4- продукты детонации; 5-фронт косой ударной волны; 6-фронт волны разрежения; 7-9 – колонии частиц произвольно ориентированных к фронту волны разрежения.

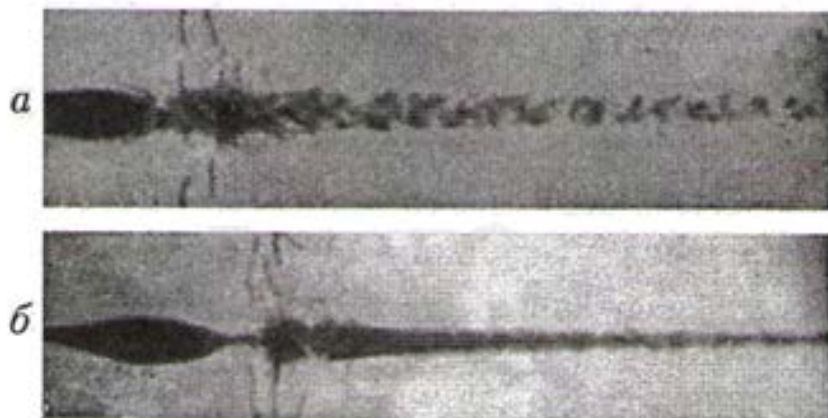


Рис.9 Разрушение КС из стали марки Сталь 45 в момент времени $t=26$ мкс (а) и из армко-железа в момент времени 24 мкс (б).

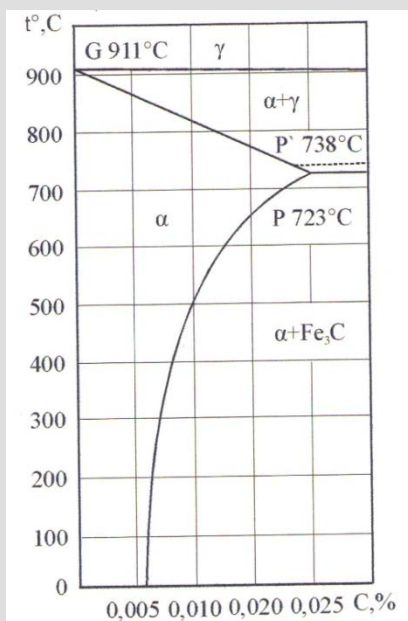


Рис. 9, Начальный участок диаграмма Fe-C.

Поскольку структура и степень чистоты определяются диаграммой состояния сплавов, то это позволяет установить связь между характером деформации и разрушения струи, т.е. пробивным действием кумулятивного заряда и положением материала, из которого изготовлены облицовки на диаграмме состояния, а также типом диаграммы состояния.

Установлено существование практически целесообразной предельной степени чистоты металла облицовки, определяемой пределом растворимости легирующих элементов и примесей.

Понимание механизмов растяжения и разрушения струи позволяет предложить способы их управлением а, следовательно, и пробивным действием кумулятивных зарядов. Такие способы уже есть.

В частности, увеличение пробивного действия достигается увеличением длины фрагментов струи (длины волны «пульсаций») за счет управления ориентацией фронта детонации линзами (старый метод, но новый подход), использование более чистых металлов, уменьшение анизотропии в заготовке а также за счет разработки технологических способов формообразования облицовки с одновременным обеспечением мелкозернистой структуры и оптимальной текстуры (трансверсально изотропное тело), и другие.

Предлагаемый подход
позволяет получить более
глубокое понимание
физических явлений,
происходящих в процессе
кумуляции.

**Спасибо
за внимание!**

Список литературы

1. Физика взрыва/ Под ред. Л.П. Орленко.- Изд, 3-е, переработанное.-В 2 т. Т.2.- М.: Физматлит, 2002,-656 с.- ISBN 5-9221-0220-6.
2. Свирский О.В., Власова М.А., Клопов Б.А. и др. Аналитический метод расчета проникания струй кумулятивных зарядов.// Труды международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии».- Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2004.С. 461-472.
3. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Маринин В.М. Физические аспекты растяжения и разрушения кумулятивных струй в свободном полете.// Труды международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии».- Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2004. С.473-490.
4. Смеликов В.Г. Устойчивость ограниченной кумуляции. -М.:Студия "Этника", 2016.-120с.
5. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Издательство СО РАН,1999.-600с.
6. Hirsh E. A formula for the shaped charge break-up time//Propellants and Explosives.-1979.-V.2,№5-P.89-94.
7. Орленко Л.П., Бабкин А.В., Колпаков В.И. Численное исследование устойчивости динамического растяжения стержня.//Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Материалы VII Всесоюзной конференции.- Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1982.-С.62-70.
8. Колмаков А.И., Ладов С.В., Силаева В.И. Влияние технологии изготовления, структуры и механических свойств облицовок на эффективность работы перфораторов.-Труды МВТУ №340. Вопросы физики взрыва и удара. Вып.2. М.: МВТУ им. Баумана, 1980, с.27-35.
9. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов.- М.: Металлургия, -200 с- 1971.
10. Эпштейн Г.Н. Строение металлов, деформированных взрывом.- М.: Металлургия,-280 с.-1988.
11. Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В. Исследование последовательности формирования структур пестов. //Труды МВТУ-1982.- №387 – С.54-59.
12. Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В. Особенности пластической деформации материала кумулятивной облицовки. //Труды МВТУ-1983-№399-С.35-43.
13. Сверхпластичность промышленных сплавов. Кайбышев О.А.: Металлургия, 1984. 264с.
14. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов/ Под ред. В.С. Ивановой.- М.: Наука,1965,-180с.
15. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел.// УФН.1972.Т.106.Вып.2. С.193-227.
16. Термически активированные процессы в кристаллах/ Под ред. А.И. Орлова.-М.: Мир,-212с.
17. Предельные пластические деформации металлов/ Скуднов В.А. М.: Металлургия, 1989, 176 с.
18. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел /Пуарье Ж.П. Пер. с франц. М.: Металлургия, 1982, 272 с.
19. Брагунцов Е.Я., Демин Р.В., Сотенко А.В. Физические основы процесса растяжения и разрушения кумулятивных струй.//Сборник межрегиональной научной конференции «Наука, промышленность, оборона». – Новосибирск. НГТУ, 2004,с.73-78.
20. Брагунцов Е.Я., Куракин А.П., Сотенко А.В. Особенности динамической пластичности кумулятивной струи.//Сборник межрегиональной научной конференции «Наука, промышленность, оборона». – Новосибирск. НГТУ, 2002, с.51-52.
21. Баранов В.Г., Брагунцов Е.Я., Сотенко А.В. Влияние фазового состава и степени чистоты металла облицовки на пробивное действие кумулятивных зарядов. // Труды международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии».- Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2004.С. 520-545.