

ЯВЛЕНИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ КУМУЛЯЦИИ**В.М. Фомин, В.И. Звегинцев, Е.Я. Брагунцов**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, СО РАН, 630090, Новосибирск

Фомин Василий Михайлович fomin@itam.nsc.ruЗвегинцев Валерий Иванович zvegin@itam.nsc.ruБрагунцов Егор Яковлевич braegor@yandex.ru**Реферат**

Процесс формирования кумулятивной струй при косом соударении пластин, метаемых продуктами детонации, или при взрывном обжати 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 поведения 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. 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.

На основе дислокационных механизмов пластической деформации объяснен ряд особенностей в процессах растяжения 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 обжатия облицовки.

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

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

Ключевые слова: кумулятивная струя, облицовка, дислокации, пластическая деформация, скорость деформации, фрагментация.

Введение

Процесс формирования кумулятивной струй при косом соударении пластин, метаемых продуктами детонации, или при взрывном обжати 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 поведения металла в условиях формирования и растяжения кумулятивной струи, а также при ее проникании в преграду послужили причиной уточнения гидродинамической теории.

Бронепробивное действие кумулятивных зарядов в значительной степени определяется длиной струи, поэтому изучению процессов растяжения и разрушения кумулятивных струй

уделяли внимание многие исследователи. Получено большое количество экспериментальных и теоретических результатов, обобщение которых можно найти в обзорах [1-5]. Тем не менее, в практике прогнозирования разрушения струи, а также ее предельного растяжения остаются вопросы, которые до сих пор не нашли объяснения:

1. Существующие модели растяжения и разрушения струй, и выводы, полученные различными авторами, не согласуются между собой [1-3], хотя сопоставление теоретических зависимостей с экспериментальными данными в целом удовлетворительно.
2. В экспериментах проявляется зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла (величины зерна, наклепа, текстуры) [1,5-8], несмотря на то, что гидродинамическая модель поведения металла в условиях кумулятивной струи таких зависимостей не предсказывает.
3. Неизвестны причины возможного аномального удлинения материала кумулятивной струи перед разрушением на 1000% - 2000%, а также зависимость величины этого предельного удлинения от начального диаметра и плотности струи [1-3].
4. Неизвестны причины появления начальных возмущений, вызывающих разрушение струи на множество фрагментов [1-3].
5. Зависимость предельного удлинения и характера разрушения струи от химического (фазового) состава и степени чистоты металла, которая выявлена в [9].

В данной работе анализ процесса растяжения и разрушения кумулятивных струй и объяснение особенностей деформационного поведения металла в условиях кумулятивной струи выполнены с использованием дислокационных механизмов пластической деформации металлов и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи.

Предлагаемый подход является ключевым для более глубокого адекватного понимания и объяснения физических явлений, происходящих при деформировании металла струи.

1. Применимость дислокационного механизма для описания процесса пластической деформации при растяжении кумулятивной струи

Преобладание дислокационных механизмов пластической деформации металла при взрывных нагружениях убедительно подтверждается многочисленными исследованиями. Особенности механизма деформации и упрочнения, формирования структуры металлов и механических свойств в условиях высокоскоростного взрывного нагружения достаточно полно представлены, например, в работах [10,11]. Показано, что при высокоскоростных взрывных нагружениях в гранцентрированных кубических (г.ц.к.) и объемно-центрированных кубических (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 [1,12]. Данные металлографического анализа пестов и фрагментов струй показывают (рис.1.), 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. В тоже время мелкозернистость свидетельствует о высокой плотности зернограницных дислокаций ($\rho > 10^{10} \text{ см}^{-2}$) достаточной для 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. Сверхпластичность (СП) является универсальным состоянием металлических материалов, возникающим при создании в них ультрамелкозернистой структуры и деформировании в определенном температурно-скоростном интервале. Общность структурных изменений свидетельствует о единой природе эффекта проявления больших деформаций металла в кумулятивной струе и больших деформаций мелкозернистых материалов при 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.

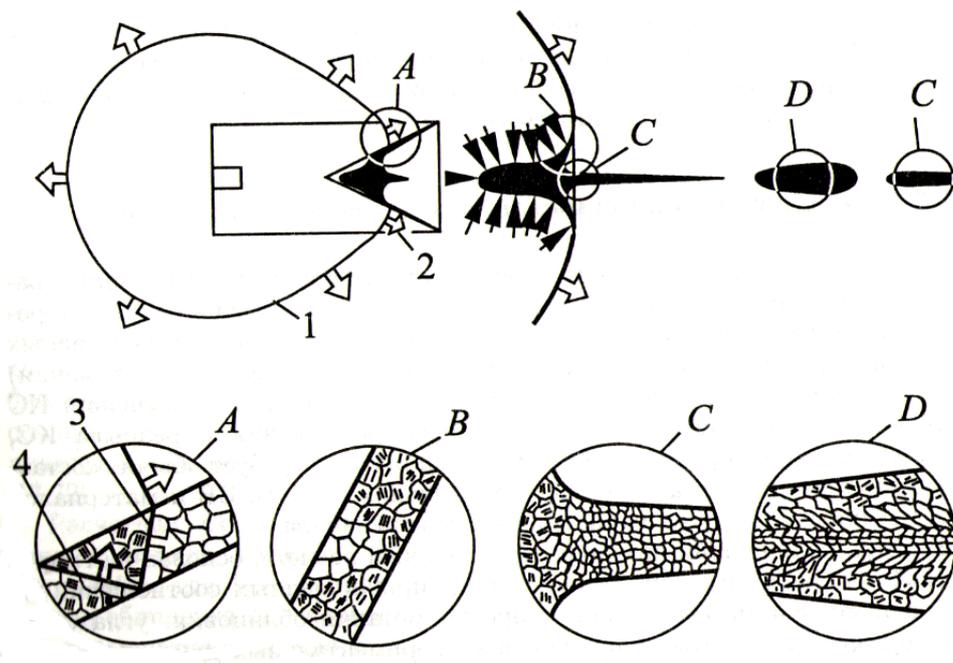


Рисунок 1. Схема процессов деформирования металлической кумулятивной облицовки (КО), формирования струи и песта [1]. А – зона взаимодействия ударной волны (УВ) и КО; В – зона схлопывания облицовки; С- зона формирования струи; D – зона деформирования песта; 1 - граница разлета продуктов детонации (ПД); 2 – фронт детонационной волны; 3 – фронт ударной волны; 4 – фронт волны разрежения.

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 существенного изменения плотности дислокаций и упрочнения металла не происходит;
- большая деформация металла при растяжении струи реализуется за счет движения большого (околопредельного) количества зернограницных дислокаций, образованных при деформации металла на стадии обжатия кумулятивной облицовки (КО).

Поэтому для описания СПдеформации металлов в струе можно применять уравнения дислокационной кинетики и уравнение механического состояния в форме $\sigma = k\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$, связывающие действующие напряжения σ , деформацию ε и скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ (n и m структурно-чувствительные коэффициенты).

2. Аналитические зависимости для определения предельного удлинения и времени разрушения кумулятивной струи

Обычный подход к получению аналитических зависимостей основан на том, что напряженное состояние струи формируется за счет инерционного деформирования перепадом осевой скорости $\Delta v_{z0} = \dot{\varepsilon}_{z0} l_0$,

$$\text{где } \dot{\varepsilon}_{z0} = \left. \left(\frac{dv_z}{dz} \right) \right|_{t=0} = \frac{dv_z}{dz_0};$$

z - осевая координата;

l_0 – длина рассматриваемого участка струи в момент его формирования;

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

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

$$\varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon}_{z0}}{n} \quad (1)$$

$n = l + \varepsilon = \frac{l}{l_0}$ - коэффициент текущего удлинения участка струи.

Предельная кратность растяжения n_b кумулятивной струи определяется из выражения [3]:

$$n_b = 1 + \dot{\varepsilon}_{z0} t_b, \text{ здесь } t_b \text{ время разрушения струи.} \quad (2)$$

В таблице 1 приведены аналитические зависимости для расчета параметров предельного удлинения кумулятивной струи полученные различными авторами [2].

Таблица 1. Аналитические зависимости для расчета параметров предельного удлинения кумулятивной струи (фамилии авторов взяты из [2]).

Автор	Предельное удлинение, n_b	Время разрыв, t_b
1	2	3
В.М. Маринин	$1.8 + 15.2 r_0 \eta_0$	$\frac{0.8}{\eta_0} + 15.2 r_0$
Г. Пфеффер	$2.4 + 48.5 \frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}}$	$\frac{1.4}{\eta_0} + 48.5 \frac{r_0}{C_0}$
Е. Хирш	$1 + \frac{2}{v_{pl}} r_0 \eta_0 v_{pl} = C_{pl} = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$	$\frac{2r_0}{v_{pl}}$
В. Хаугстад	$\frac{2}{C_{pl}} r_0 \eta_0 v_{pl} = 0.87 C_{pl}$	$\frac{2}{C_{pl}} r_0 - \frac{1}{\eta_0}$
П. Чоу В. Флис	$2 + 3.75 \frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} - 0.125 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^2$	$\frac{1}{\eta_0} \left(3.75 \frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} - 0.125 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^2 + 1 \right)$
Е. Хеннекью	$I_{FG} \left[\frac{2r_0 \eta_0}{v_{pl}} - 1 \right] I_{FG} = 1.46$	$I_{FG} \left[\frac{1}{\eta_0} + \frac{2}{v_{pl}} r_0 \right] - \frac{1}{\eta_0}$
Дж. Куртис	$\frac{\pi}{v_{pl}} r_0 \eta_0$	$\frac{\pi}{v_{pl}} r_0 - \frac{1}{\eta_0}$
П.И. Уляков	$18.67 (r_0 \eta_0)^{0.62} \text{ Медь}(M1)$ $1506 (r_0 \eta_0)^{2/3} \text{ Медь}(M2)$	$\frac{1}{\eta_0} \left[A (r_0 \eta_0)^{2/3} - 1 \right]$
Дж. Карлеон	$5.4427 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{0.7047} v_{pl} = 0.6807 C_{pl}$	$\frac{1}{\eta_0} \left(5.4427 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{0.7047} - 1 \right)$
А.В. Бабкин	$5.38 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{0.772} v_{pl} = 0.65 C_{pl}$	$\frac{1}{\eta_0} \left(5.38 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{0.772} - 1 \right)$

П. Чоу	$5 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{2/3}$	$\frac{5}{\eta_0} \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{2/3}$
П. Шантере	$7.5 \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{2/3}$	$\frac{7.5}{\eta_0} \left(\frac{r_0 \eta_0}{C_{pl}} \right)^{2/3}$
Ж. Пети	$\left(\frac{\pi R_e^2}{I} \right)^{1/3} \left(\frac{r_0 \eta_0}{v_{pl}} \right)^{2/3}$	$\left(\frac{\pi R_e^2}{I} \right)^{1/3} \frac{1}{\eta_0} \left(\frac{r_0 \eta_0}{v_{pl}} \right)^{2/3} - \frac{1}{\eta_0}$

Здесь V_{pl} - скорость пластического разрушения, C_{pl} -пластическая скорость звука.

Сопоставление уравнений, приведенных в таблице 1, показывает различие показателей степени в степенной зависимости времени разрушения струи t_b и предельного удлинения n_b от градиента скоростей η_0 и начального радиуса струи r_0 . У некоторых авторов наблюдается зависимость параметров t_b и n_b от свойств материала, а именно, от плотности и предела текучести.

Нет однозначного мнения по трактовке физического смысла коэффициента А, являющегося свободным членом в уравнениях для степенной зависимости предельного удлинения струи от градиента скоростей η_0 и начального радиуса струи r_0 . Если исходить из уравнения неразрывности механики сплошной среды, то этот коэффициент должен быть равен 1. Экспериментально неоднократно было доказано, что коэффициент А больше 1. Например, в таблице 1 для меди он приводится равным 1; 1,8; 2,4. Остается открытым вопрос: почему формулы в таблице 4 имеют такой вид [3]?

В данной работе для получения аналогичных аналитических зависимостей предлагается использовать дислокационный механизм описания процесса пластической деформации. Выше было показано, что деформация металла в процессе растяжения струи вызывается движением зернограницных дислокаций, следовательно, определяется 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 [14-18, 20] $\dot{\epsilon} = \alpha b r_m v$, адекватно выражающее зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от r_m (плотности подвижных дислокаций, перемещающихся в результате скольжения или переползания), вектора Бюргерса b и скорости дислокаций v .

Для технически чистых металлов (обычно используемых для изготовления кумулятивных облицовок) препятствиями являются лес дислокаций или локальное препятствие (атомы примесей). Связь между параметрами, характеризующими процесс перемещения дислокаций и экспериментально установленным влиянием температуры, напряжения и скорости деформации выглядит следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \alpha b^2 \rho V_0 \exp \left[-H_0 \frac{1-\beta T}{kT} \right] \exp \left[\frac{\sigma A b}{kT} \right] \quad (3)$$

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; v_0 – дебаевская частота; α – ориентационный фактор; b – вектор Бюргерса; ρ – плотность подвижных дислокаций (длина линий дислокаций в единице объема), $\text{см}/\text{см}^3$, $\beta = \frac{-1}{\mu_0} \left(\frac{d\mu}{dT} \right)$ μ – модуль сдвига, μ_0 – модуль сдвига при 0 °К.

Напряжений σ , действующие в струе, будут равны

$$\sigma = H_0 \frac{1-\beta T}{kT} + \frac{kT}{Ab} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\alpha b^2 \rho V_0} \right) \quad (4)$$

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 [19]:

$$\tau_d = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right) \quad (5)$$

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).

Подставив в уравнение (5) величину действующих напряжений из уравнения (4) получим зависимость времени разрушения кумулятивной струи от кинематических характеристик и констант материала.

$$\tau_d = \tau_0 \left(\frac{\alpha b \rho V_0}{\dot{\epsilon}}\right)^{\frac{\gamma}{Ab}} \exp\left(\frac{U_0 - \frac{\gamma \Delta H_0 (1 - \beta T)}{Ab}}{kT}\right)$$

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

$$t_b = C \left(\frac{1}{T}\right) \left(\frac{\rho}{\dot{\epsilon}_{z0}}\right)^{\frac{\gamma}{Ab}} \quad (6)$$

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

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

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

$$\rho_{обж} = \left(\frac{\epsilon_{обж}}{\alpha b k}\right)^2 \quad (8)$$

где k -константа материала (≈ 6).

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

Определение физических величин в уравнениях (3,6 - 8) осуществляется в независимых испытаниях на ползучесть или в экспериментах по определению скорости движения дислокаций.

В уравнении (7) показатель степени $\left(1 - \frac{\gamma}{Ab}\right)$ зависит от вида материала и его структуры, в отличие от уравнений, приведенных в таблице 1.

Полученные уравнения (6) и (7) подобны уравнениям, приведенным в таблице 1. Но эти уравнения позволяют анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных $\sigma_T, \mu, \mu_0, U_0, \gamma$ и пластических свойств материала H_0, A , а также структурных характеристик (размера зерна d), геометрических параметров облицовки и кинематических характеристик струи $\dot{\epsilon}_{z0}$.

3. Зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла

Известны различные физические модели, описывающие влияние размера зерна, величины субзерен, предела текучести на плотность исходных подвижных дислокаций [14,18]. Например

$$[14], \rho_{исх} = \left(\frac{\sigma_T + k_y d^{-\frac{1}{2}}}{\dot{\alpha} b \mu}\right)^2, \text{ где } \dot{\alpha}, \sigma_T, k_y - \text{ константы определяемые микроструктурой материала}$$

(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.

$$t_b = c(T) \left(\frac{\left(\frac{\sigma_T + k_y d^{-\frac{1}{2}}}{\dot{\alpha} b \mu}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{обж}}{\alpha b k}\right)^2}{\dot{\epsilon}_{z0}}\right)^{\frac{\gamma}{Ab}} \quad (9)$$

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. Формирование исходной мелкозернистой структуры происходит, как правило, в процессе формообразования облицовки и ограничено технологическими возможностями.

4. Причины повышенной пластичности кумулятивной струи

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

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

$$\varepsilon_{обж} = \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2} \quad (10)$$

где ε_r – радиальная деформация кольцевого элемента; ε_θ – угловая деформация; ε_z – деформация вдоль оси элемента. Принято, что $\varepsilon_z = 0$,

$$\varepsilon_r = \ln\left(\frac{R_{0стр}}{kh_0}\right), \quad \varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{R_{0стр}}{R_0}\right)$$

Здесь h_0 – начальная толщина стенки кольцевого элемента, kh_0 – внутренний слой элемента облицовки переходящий в струю, R_0 – начальный радиус кольцевого элемента, $R_{0стр}$ – радиус кумулятивной струи в момент схлопывания.

Обнаруживается причинно-следственная связь динамической пластичности струи и времени ее разрушения с начальным радиусом струи. 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 на динамическую пластичность струи не обнаружено.

5. Анализ причин фрагментации кумулятивной струи

При растяжении струи по всей ее длине возникает множество шеек, по которым происходит разрушение струи на отдельные элементы. Разрушение на отдельные фрагменты позволяет сделать вывод, что существует периодическое воздействие, вызывающее повышенные напряжения в отдельных местах струи. Развитие напряжений по времени приводит к локальной пластической деформации, которая вызывает деление струи на фрагменты. Причины появления прогрессирующих периодических возмущений до сих пор не выявлены.

В данной работе причины множественной фрагментации струи объясняются ударно-волновыми явлениями, имеющими место на стадии обжатия облицовки. Известно [1], что скорость движения внешней и внутренней поверхностей облицовки в процессе взрывного обжатия нарастает скачкообразно (немонотонно), в соответствии с периодическим прохождением ударных волн и волн разрежения. На рис.2. показаны волновые процессы, происходящие при взрывном обжатии кумулятивной облицовки.

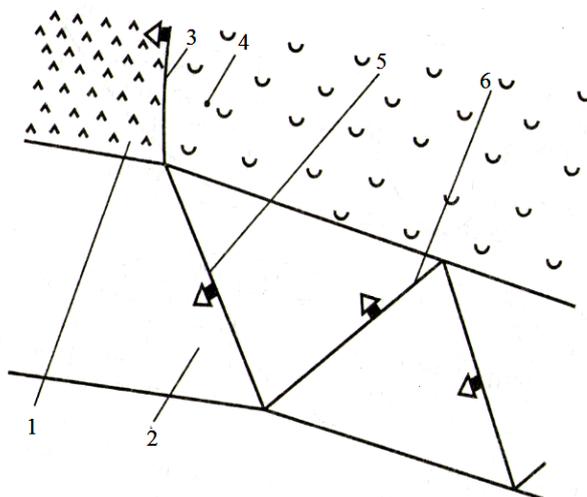


Рисунок 2. Волновые процессы при взрывном обжати кумулятивной облицовки. 1 - заряд ВВ; 2 - облицовка; 3 - детонационный фронт; 4 - продукты детонации; 5 - фронт косой ударной волны; 6 - фронт волны разрезания.

Пример изменения скорости пластины при взрывном метании показан на рис.3.

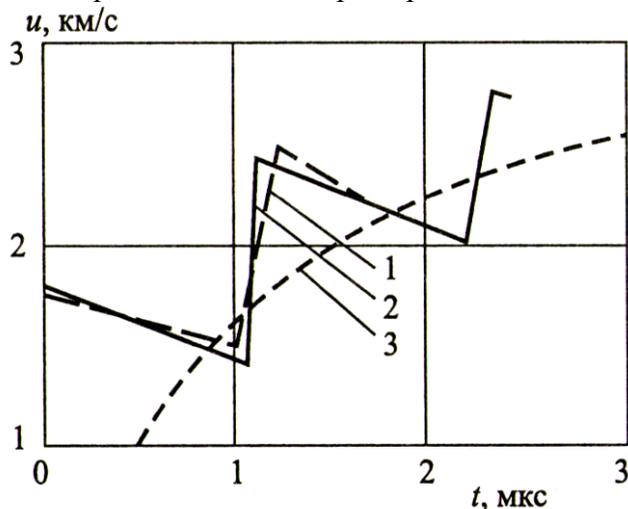


Рисунок 3. Закон изменения скорости свободной границы стальной пластины со временем полета [1]. 1-опыт; 2- численный расчет для сжимаемой пластины; 3-расчет для жесткой пластины.

Скачкообразное поведение скорости обжатия облицовки и немгновенность процесса детонации приводят к формированию периодического скачкообразного (немонотонного) распределения скорости вдоль струи (градиента скорости). Следовательно, возникают периодические зоны с повышенными скоростями деформации и более высокими растягивающими напряжениями, что является причиной множественной фрагментации.

6 Влияние химического состава и степени чистоты металла облицовки на предельное удлинение и характер разрушения струи

Влияние химического (фазового состава) и степени чистоты металла облицовки на предельное удлинение и характер разрушения струи исследовалось в работе [9]. В качестве объекта исследования были выбраны железные и стальные облицовки, поскольку их применение позволяет в широких пределах менять фазовый состав, структурное состояние и механические свойства путем изменения содержания углерода. Показано, что небольшие изменения химического состава облицовки приводят к заметному изменению предельного удлинения, характера разрушения струи и пробивного действия кумулятивных зарядов. В таблице 2 приведено сравнение коэффициентов предельного удлинения струй из различных марок железа, полученных методом "меченой струи" [9]. Видно, что, уменьшение содержания углерода повышает предельное удлинение. Характер разрушения струй из этих материалов вязкий как у меди (см. рис. 4а), т.е. разрушение осуществляется путем образования шейки и сопровождается большой пластической деформацией. Форма фрагментов струи цилиндрическая с вытянутыми торцами.

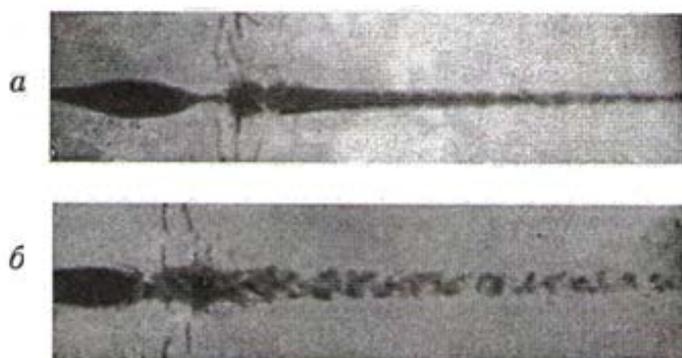


Рисунок 4 Разрушение КС из армко-железа в момент времени 24 мкс (а) и стали марки Сталь 45 в момент времени $\tau=26$ мкс (б) [9]

Таблица 2 Значения коэффициентов для определения предельного удлинения кумулятивной струи $n_b = A + B \cdot d_0 \cdot \text{grad}V$ [9].

Материал кумулятивной струи	Содержание углерода, %	Значения коэффициентов	
		A	$B \cdot 10^3$, мкс/мм
005ЖР - ВП	0,004	1,6	12,1
008ЖР	0,005	1,6	11,2
Армко-железо	0,01	1,6	10,4

Здесь же было показано, что в стальных облицовках изменение содержания углерода приводит к немонотонному изменению пробивного действия кумулятивных зарядов (см. таблицу 3 [9]). Минимальное пробивное действие наблюдается для облицовок из Стали 45. В то же время, согласно представлениям, изложенным в работах [1-3], минимальные показатели должны быть у кумулятивных зарядов с облицовками из сталей марок У8 и У10, поскольку эти стали имеют наибольший предел текучести.

Таблица 3. Влияние содержания углерода на пробивное действие кумулятивных облицовок из сталей (немонотонная зависимость).

Материал облицовки	Содержание углерода, %	L, %
Армко-железо	0,01	122
Сталь 20	0,2	117
Сталь 45	0,45	100
У8А	0,8	117
У10А	1,0	110

Характер разрушения струй из стальных облицовок – хрупкий с формированием на торцах фрагментов форм поверхности разрушения в виде вложенных конусов. При этом наблюдается также интенсивное разрушение фрагментов струи и в поперечном направлении на отдельные осколки (см., рис. 4б [9]). Согласно гидродинамической модели поведения металла в условиях кумулятивной струи таких явлений не должно наблюдаться.

В данной работе причины зависимости предельного удлинения и характера разрушения кумулятивных струй от фазового состава и степени чистоты объясняются воздействием на металл ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи. Каждый материал облицовки имеет различную структуру, соответствующую химическому

составу. Химический состав и структура определяются диаграммой состояния сплавов. На рис. 5 приведен участок диаграммы «железо-углерод» для железных и стальных облицовок (для концентрации углерода от 0 до 1,2%).

Структура железных и стальных облицовок показана на фотографиях рис. 6. В зависимости от содержания углерода структура металла меняется от чисто ферритной фазы до перлитной фазы. При малых содержаниях углерода до 0,006% структура состоит из зерен только феррита. При концентрациях углерода от 0,006 до 0,8% структура состоит из феррита и перлита. При концентрациях выше 0,8% структура состоит из перлита и цементита.

При взрывном обжиге облицовки происходит взаимодействие ударных волн и волн разрезания со структурными неоднородностями (см. рис. 7).

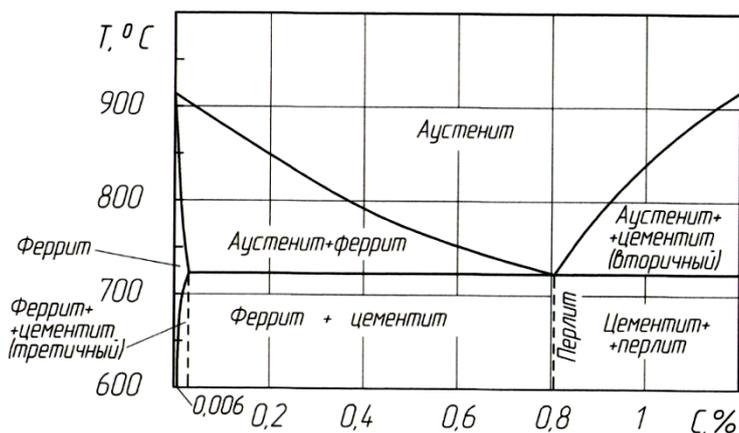


Рисунок 5. Участок диаграммы Fe-C

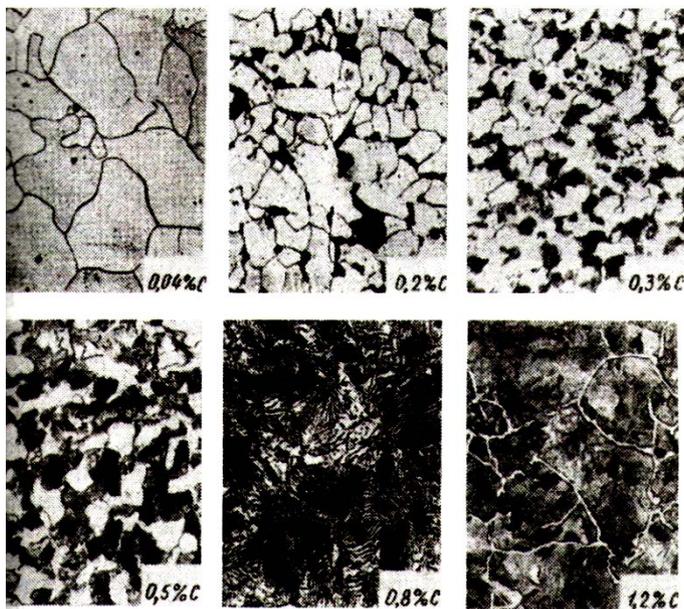


Рисунок 6. Структура сталей с различным содержанием углерода [20].

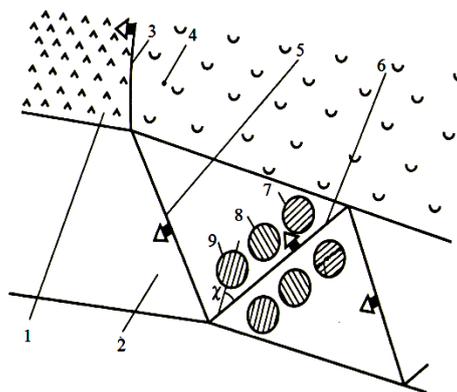


Рисунок 7. Схема взаимодействия ударных волн и волн разрежения со структурными неоднородностями металла при взрывном обжатии кумулятивной облицовки [1]. 1 - заряд ВВ; 2 - облицовка; 3 - детонационный фронт; 4 - продукты детонации; 5 - фронт косой ударной волны; 6 - фронт волны разрежения; 7 - 9 – колонии частиц, произвольно ориентированных к фронту волны разрежения.

Структурные неоднородности металла имеют различные ударно-волновые, прочностные и пластические свойства. Это приводит к неоднородной деформации материала облицовки, возникновению напряжений на границах зерен разного состава на стадии обжатия облицовки и к ориентированному разрушению струи по границам неоднородностей на ранних стадиях растяжения струи. Т.е. наличие структурных неоднородностей приводит к уменьшению предельного удлинения, к преждевременному и хрупкому разрушению кумулятивной струи и, следовательно, к уменьшению пробивного действия. При осевой симметрии облицовок ориентированные напряжения на границах структурных неоднородностей образуют конические поверхности. Соответственно, фрагменты разрушенной струи имеют коническую форму.

Наиболее сильная структурная неоднородность у стали марки Сталь 45 (50% феррита+50% перлита), поэтому пробивное действие облицовок из этого материала наименьшее. Максимальное пробивное действие обеспечивают материалы, не имеющие структурных неоднородностей, т.е. чистые металлы, в которых содержание примесей не превышает пределы их растворимости в данном металле. Эти пределы растворимости химических элементов можно рассматривать, как уровень практически целесообразной степени очистки металла облицовки от примесей. Эти же выводы относятся к сплавам других систем.

Заключение

Предложен подход к объяснению особенностей деформации металла в условиях кумулятивной струи с использованием дислокационных механизмов пластической деформации и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки.

На основе дислокационных механизмов пластической деформации объяснен ряд особенностей в процессах растяжения 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.

С использованием предлагаемого подхода получены выражения для 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.

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

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

Предлагаемый подход позволяет получить более глубокое адекватное понимание физических явлений, происходящих при деформировании металла кумулятивной струи.

Список литературы

1. Физика взрыва/ Под ред. Л.П. Орленко.- Изд, 3-е, переработанное.-В 2 т. Т.2.- М.: Физматлит, 2002,-656 с.
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. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Издательство СО РАН,1999. – 600с.
5. Смеликов В.Г. Устойчивость ограниченной кумуляции. М.:Студия "Этника", 2016.- 120с.
6. Смеликов В.Г., Кузьмин С.М., Зайцев В.П. Влияние направления раскатки на кумулятивный эффект. – Вопросы специального машиностроения. Сер.1.1987 вып.1 (164).
7. Смеликов В.Г., Кузьмин С.М., Дзядух О.Ф., Зайцев В.П. Влияние режимов формоизменения кумулятивной облицовки и ее структуры на кумулятивный эффект. – Вопросы специального машиностроения. Сер.1.1984 вып.3 (118).
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. 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.
10. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов.- М.: Металлургия, -200 с- 1971.
11. Эпштейн Г.Н. Строение металлов, деформированных взрывом.- М.: Металлургия,-280 с.-1988.
12. Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В. Исследование последовательности формирования структур пестов. //Труды МВТУ-1982.- №387 – С.54-59.
13. Сверхпластичность промышленных сплавов. Кайбышев О.А. М.: Металлургия, 1984. 264с.
14. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов./ Под ред. В.С. Ивановой.- М.: Наука,1965,-180с.
15. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Смирнов Б.И. Л.: Наука,1981. 236 с
16. Термически активированные процессы в кристаллах/ Под ред. А.И. Орлова. М.: Мир. 1973. 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. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел.// УФН.1972.Т.106.Вып.2. с.193-227.
20. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: Учебник для вузов. М.: ИД Альянс, 2012.- 644 с