

УДК 623.094

ОСОБЕННОСТИ РАСТЯЖЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mails: fomin@itam.nsc.ru, zvegin@itam.nsc.ru, braegor@yandex.ru

С использованием дислокационных механизмов пластической деформации и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи, исследованы процессы растяжения и разрушения кумулятивных струй и деформационного поведения металла в этих условиях. Установлены закономерности растяжения и разрушения кумулятивной струи. Получены уравнения, позволяющие анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных и пластических свойств и микроструктуры материала, а также геометрических параметров и кинематических характеристик.

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

DOI: 10.15372/PMTF20200203

Введение. Бронепробивное действие кумулятивных зарядов в значительной степени определяется длиной струи, поэтому исследованию процессов растяжения и разрушения кумулятивных струй уделяется большое внимание. Экспериментальные и теоретические результаты обобщены в работах [1–5]. Однако остаются проблемы, требующие исследования.

1. Существующие модели растяжения и разрушения струй и результаты, полученные различными исследователями, не согласуются между собой [1–3], несмотря на то что теоретические зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

2. В экспериментах проявляется зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла (размера зерна, наклепа, текстуры) [1, 5–8], однако в гидродинамической модели поведения металла при растяжении и разрушении кумулятивной струи таких зависимостей не содержится.

3. Неизвестны причины возможного аномального (на 1000–2000 %) удлинения кумулятивной струи перед разрушением, а также зависимость значения предельного удлинения от начального диаметра и плотности струи [1–3].

4. Неизвестны причины появления начальных возмущений, вызывающих распад струи на множество фрагментов [1–3].

5. Не объяснена зависимость предельного удлинения и характера разрушения струи от химического (фазового) состава и степени чистоты металла, которая выявлена в [7].

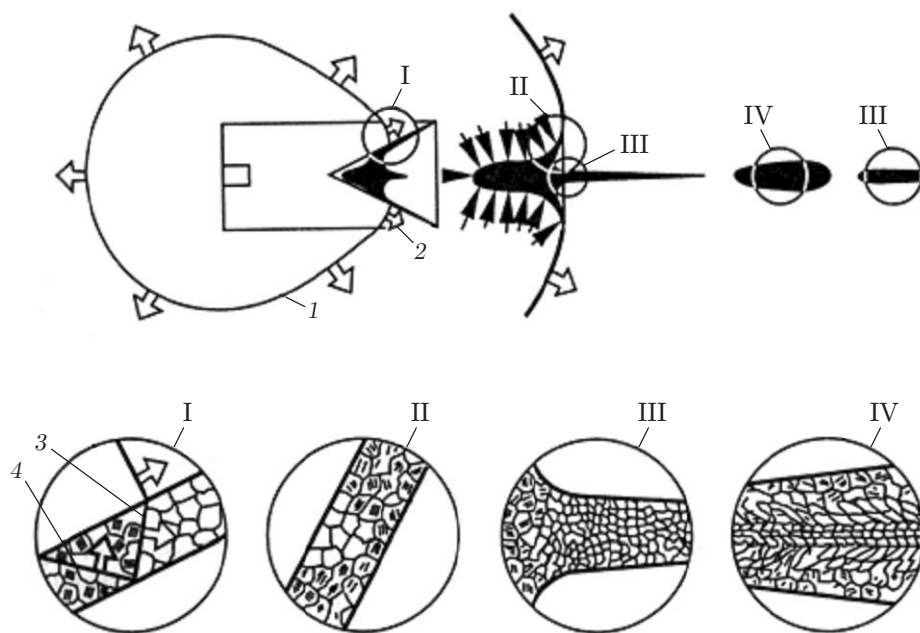


Рис. 1. Деформирование металлической кумулятивной облицовки и формирование струи и песта [1]:

I — зона взаимодействия ударной волны и кумулятивной облицовки, II — зона схлопывания облицовки, III — зона формирования струи, IV — зона деформирования песта; 1 — граница области разлета продуктов детонации, 2 — фронт детонационной волны, 3 — фронт ударной волны, 4 — фронт волны разрежения

В настоящей работе исследуются процессы растяжения и разрушения кумулятивных струй и особенности деформационного поведения металла в этих условиях с использованием дислокационных механизмов пластической деформации и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи.

1. Дислокационный механизм пластической деформации при растяжении кумулятивной струи. Преобладание дислокационных механизмов пластической деформации металла при взрывных нагружениях подтверждается результатами многочисленных исследований. Механизм деформации и упрочнения, формирование структуры металлов и механические свойства в условиях высокоскоростного взрывного нагружения достаточно полно описаны, например, в работах [8, 9]. Показано, что при высокоскоростных взрывных нагружениях в металлах с гранецентрированными кубическими (ГЦК) и объемно центрированными кубическими (ОЦК) решетками (обычно используемых для изготовления кумулятивных облицовок) пластическая деформация обусловлена движением краевых дислокаций.

Дислокационный механизм деформации металла в кумулятивной струе уточнен с использованием металлографического анализа фрагментов струй и пестов в зоне образования струй [1, 10]. Согласно данным металлографического анализа пестов и фрагментов струй (рис. 1) металл в струеобразующем слое песта имеет мелкозернистую структуру. Наличие мелких равноосных зерен в рекристаллизованном (отожженном) состоянии свидетельствует о малой плотности внутризеренных дислокаций и о высокой плотности ($\rho > 10^{10} \text{ см}^{-2}$) зернограницных дислокаций, достаточной для реализации больших деформаций металла.

Наблюдаемая структура струи (наличие очень мелких, размером порядка 1 мкм, зерен, которые не деформируются либо деформируются слабо, сохранение равноосности зерен, отсутствие накопления внутризеренных дислокаций) не характерна для процесса пласти-

ческой деформации металла, однако именно она предопределяет природу сверхпластического течения металлов. Сверхпластичность является универсальным состоянием металлических материалов при образовании в них ультрамелкозернистой структуры и деформировании в определенном температурно-скоростном диапазоне. Одинаковые структурные изменения свидетельствуют о единой природе больших деформаций металла в кумулятивной струе и больших деформаций мелкозернистых материалов при сверхпластическом течении. Большое значение при сверхпластической деформации ультрамелкозернистых металлов и сплавов имеют формы границ зерен, являющихся источниками и стоками дефектов решетки (дислокаций, вакансий). При сверхпластическом течении преобладающим является процесс зернограницного проскальзывания. Высокая плотность зернограницных дислокаций и их смещение вдоль общей границы обуславливают проскальзывание зерен относительно друг друга таким образом, что количество зерен уменьшается в поперечном сечении и увеличивается по длине [11].

Результаты металлографического анализа песта и струи позволяют сделать следующие выводы:

- в процессе деформации при обжатии облицовок в материале струи наблюдается высокая плотность зернограницных дислокаций;
- в процессе растяжения струи существенного изменения плотности дислокаций и упрочнения металла не происходит;
- большая деформация металла при растяжении струи обусловлена движением большого (близкого к предельному) количества зернограницных дислокаций, образовавшихся при деформации металла на стадии обжатия кумулятивной облицовки.

2. Аналитические зависимости для определения предельного удлинения и времени разрушения кумулятивной струи. Подход к получению аналитических зависимостей, как правило, основан на том, что напряженное состояние струи формируется вследствие инерционного деформирования при перепаде осевой скорости $\Delta v_{z0} = \dot{\epsilon}_{z0} l_0$, где $\dot{\epsilon}_{z0} = (dV_z/dz)|_{t=0} = \eta_0 = dV_z/dz_0$ — скорость деформации или градиент скорости вдоль струи в начальный момент растяжения; 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 металла

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

где $n = l + \epsilon = l/l_0$ — коэффициент текущего удлинения участка струи; ϵ — деформация металла.

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

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

(t_b — время разрушения струи).

Для определения n_b и t_b предложен ряд аналитических зависимостей, построенных на основе статистической обработки экспериментальных данных (эмпирические уравнения) или результатов численных экспериментов, полученных расчетно-аналитическим методом при моделировании процесса растяжения кумулятивной струи [1–3].

В табл. 1 приведены аналитические зависимости для расчета параметров предельного удлинения кумулятивной струи, полученные различными исследователями [2]. Из табл. 1 следует, что показатели степени в зависимостях времени разрушения струи t_b и предельного удлинения n_b от градиента скорости η_0 и начального радиуса струи r_0 различаются. Также наблюдается зависимость параметров t_b , n_b от характеристик материала, а именно от плотности и предела текучести.

Таблица 1

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

Автор модели	n_b	t_b
В. М. Маринин	$1,8 + 15,2r_0\eta_0$	$0,8/\eta_0 + 15,2r_0$
Г. Пфеффер	$2,4 + 48,5r_0\eta_0/C_0$	$1,4/\eta_0 + 48,5r_0/C_0$
Е. Хирш	$1 + 2r_0\eta_0/v_{pl}, v_{pl} = C_{pl} = \sqrt{Y/\rho}$	$2r_0/v_{pl}$
В. Хаугстад	$2r_0\eta_0/C_{pl}, v_{pl} = 0,87C_{pl}$	$2r_0/C_{pl} - 1/\eta_0$
П. Чоу, В. Флис	$2 + 3,75r_0\eta_0/C_{pl} - 0,125(r_0\eta_0/C_{pl})^2$	$[3,75r_0\eta_0/C_{pl} - 0,125(r_0\eta_0/C_{pl})^2 + 1]/\eta_0$
Е. Хеннекью	$I_{FG}(2r_0\eta_0/v_{pl} - 1), I_{FG} = 1,46$	$I_{FG}(1/\eta_0 + 2r_0/v_{pl}) - 1/\eta_0$
Дж. Куртис	$\pi r_0\eta_0/v_{pl}$	$\pi r_0/v_{pl} - 1/\eta_0$
П. И. Уляков	$18,67(r_0\eta_0)^{0,63}$ (медь марки М1) $15,06(r_0\eta_0)^{2/3}$ (медь марки М2)	$[A(r_0\eta_0)^{2/3} - 1]/\eta_0$
Дж. Карлеон	$5,4427(r_0\eta_0/C_{pl})^{0,7047}, v_{pl} = 0,6807C_{pl}$	$[5,4427(r_0\eta_0/C_{pl})^{0,7047} - 1]/\eta_0$
А. В. Бабкин	$5,38(r_0\eta_0/C_{pl})^{0,772}, v_{pl} = 0,65C_{pl}$	$[5,38(r_0\eta_0/C_{pl})^{0,772} - 1]/\eta_0$
П. Чоу	$5(r_0\eta_0/C_{pl})^{2/3}$	$5(r_0\eta_0/C_{pl})^{2/3}/\eta_0$
П. Шантере	$7,5(r_0\eta_0/C_{pl})^{2/3}$	$7,5(r_0\eta_0/C_{pl})^{2/3}/\eta_0$
Ж. Пети	$(\pi R_e^2/I)^{1/3}(r_0\eta_0/v_{pl})^{2/3}$	$[(\pi R_e^2/I)^{1/3}(r_0\eta_0/v_{pl})^{2/3} - 1]/\eta_0$

Примечание. v_{pl} — скорость пластического разрушения; C_{pl} — скорость звука при пластическом деформировании.

Физический смысл коэффициента, являющегося свободным членом в уравнениях для степенной зависимости предельного удлинения струи от градиента скорости η_0 и начального радиуса струи r_0 трактуется по-разному. В соответствии с уравнением неразрывности механики сплошной среды этот коэффициент должен быть равен единице, однако, например, для меди в ряде моделей он равен 0; 1,0; 1,8; 2,4 (см. табл. 1).

В настоящей работе аналогичные аналитические зависимости получены на основе дислокационной модели пластической деформации, в которой деформации обусловлены движением дислокаций, а скорость деформации $\dot{\epsilon}$ определяется из уравнения Орована [12–16, 17]:

$$\dot{\epsilon} = \alpha b \rho v.$$

Здесь ρ — плотность дислокаций, перемещающихся в результате скольжения или ползания; b — вектор Бюргерса; v — скорость дислокаций; $\alpha \approx 1,0$ — ориентационный фактор.

Выше показано, что деформация металла в процессе растяжения струи обусловлена движением зернограницных дислокаций, следовательно, определяется процессами, которые контролируют движение дислокаций. Эти процессы адекватно описаны с помощью атомной теории термически активированного скольжения дислокаций с преодолением препятствий (барьеров) под воздействием приложенного напряжения и тепла одновременно.

Для технически чистых металлов (обычно используемых для изготовления кумулятивных облицовок) препятствием является лес дислокаций или локальное препятствие (атомы примесей). Параметры, характеризующие процесс перемещения дислокаций, связаны с температурой, напряжениями и скоростью деформации следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \alpha b^2 \rho \nu_0 \exp\left(-H_0 \frac{1 - \beta T}{kT}\right) \exp\left(\frac{\sigma S b}{kT}\right).$$

Здесь H_0 — энтальпия активации движения дислокации при равном нулю напряжении; S — “активационная поверхность” (площадь поверхности, покрываемой дислокацией при

переходе из начального положения в положение, соответствующее высоте барьера [16]); σ — напряжения; T — температура; k — постоянная Больцмана; ν_0 — дебаевская частота; ρ — плотность подвижных дислокаций (длина линий дислокаций в единице объема), см/см³; $\beta = \mu_0^{-1} d\mu/dT$; μ — модуль сдвига; μ_0 — модуль сдвига при $T = 0$ К.

Напряжения σ , действующие в струе, равны

$$\sigma = H_0 \frac{1 - \beta T}{kT} + \frac{kT}{Sb} \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{ab^2 \rho \nu_0} \right). \quad (2)$$

Существует ряд критериев прочности при динамическом нагружении. Эти критерии подобны критерию Журкова, определяющему полное время до разрушения (долговечность τ_d) при заданном напряжении и некоторой температуре [18]:

$$\tau_d = \tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right). \quad (3)$$

Здесь U_0 — энергия активации процесса разрушения; γ — “структурно-чувствительный” коэффициент; $\tau_0 = 10^{-13}$ с — константа.

Подставляя в уравнение (3) значение действующих напряжений из уравнения (2), получаем зависимость времени разрушения кумулятивной струи от кинематических характеристик и констант материала:

$$t_b = \tau_0 \left(\frac{ab\rho\nu_0}{\dot{\varepsilon}_{z0}} \right)^{\gamma/(Sb)} \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \Delta H_0 (1 - \beta T)/(Sb)}{kT} \right). \quad (4)$$

Учитывая, что в выражении (4) переменными являются только температура, скорость деформации и плотность подвижных дислокаций, можно привести его к виду

$$t_b = C(T) (\rho/\dot{\varepsilon}_{z0})^{\gamma/(Sb)}. \quad (5)$$

Используя выражения (1), (2), получаем уравнение для определения предельного удлинения кумулятивной струи

$$n_b = 1 + \dot{\varepsilon}_{z0} t_b = 1 + C(T) \rho^{\gamma/(Sb)} \dot{\varepsilon}_{z0}^{1-\gamma/(Sb)}. \quad (6)$$

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

При деформации обжатия облицовки $\varepsilon_{обж}$ степень деформации металла и плотность подвижных дислокаций [12, 16] связаны следующим образом:

$$\rho_{обж} = (\varepsilon_{обж}/(abk))^2 \quad (7)$$

($k \approx 6$ — константа материала).

Известны различные физические модели, описывающие влияние размеров зерна, субзерен, значения предела текучести на плотность исходных подвижных дислокаций [12, 16]. Например, в работе [12] использована зависимость

$$\rho_{исх} = ((\sigma_T + k_y d^{-1/2})/(\alpha' b \mu))^2, \quad (8)$$

где α' , σ_T , k_y — константы, определяемые микроструктурой материала (размерами субзерен, концентрацией примесей и т. д.); d — средний размер зерна. Выражение (8) позволяет определить влияние размера зерна в микроструктуре материала на время разрушения струи:

$$t_b = C(T) \left[\frac{1}{\dot{\varepsilon}_{z0}} \left(\left(\frac{\sigma_T + k_y d^{-1/2}}{\alpha' b \mu} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{обж}}{abk} \right)^2 \right) \right]^{\gamma/(Ab)} \quad (9)$$

и предельную кратность растяжения n_b .

Уравнения (5), (6) подобны уравнениям, приведенным в табл. 1, и позволяют анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных и пластических свойств материала (параметры σ_T , μ , μ_0 , U_0 , γ , H_0 , S), а также микроструктурных характеристик (размер зерна d), геометрических параметров облицовки и кинематических характеристик струи $\dot{\varepsilon}_{z0}$.

Значения физических величин в уравнениях (5), (6) определяются в ходе экспериментальных исследований механических свойств материалов и скорости движения дислокаций [12–16, 18].

3. Зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла. Из выражений (6), (9) следует, что мелкозернистая структура облицовки также оказывает влияние на плотность подвижных дислокаций в струе и ее предельное удлинение. Исходная мелкозернистая структура формируется, как правило, при изготовлении облицовки и зависит от технологических возможностей.

4. Причины повышенной пластичности кумулятивной струи. В соответствии с (7) уже на стадии обжатия облицовки в металле формируется повышенная (близкая к предельной) плотность подвижных дислокаций, что является причиной больших деформаций металла в струе.

Величину $\varepsilon_{\text{обж}}$ в соотношении $\rho_{\text{обж}} = (\varepsilon_{\text{обж}}/(\alpha bk))^2$ можно оценить, если рассматривать обжатие конического элемента облицовки как обжатие кольцевого элемента [1]:

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

Здесь $\varepsilon_r = \ln(r_0/(kh_0))$ — радиальная деформация кольцевого элемента; $\varepsilon_\theta = \ln(r_0/R_0)$ — угловая деформация; ε_z — деформация вдоль оси элемента (принято $\varepsilon_z = 0$); h_0 — начальная толщина стенки кольцевого элемента; kh_0 — толщина внутреннего слоя этого переходящего в струю элемента облицовки; R_0 — начальный радиус кольцевого элемента облицовки; r_0 — радиус элемента кумулятивной струи в момент его образования.

Установлено, что динамическая пластичность струи и время ее разрушения зависят от начального радиуса струи вследствие влияния на динамическую пластичность деформации металла на стадии обжатия облицовки путем формирования повышенной плотности подвижных дислокаций. Заметим, что деформация металла и начальный радиус струи определяются одними и теми же геометрическими параметрами облицовки.

Влияния плотности материала на динамическую пластичность струи не обнаружено.

5. Причины фрагментации кумулятивной струи. При растяжении струи по всей ее длине возникает множество шеек, по которым происходит разрушение струи на отдельные элементы. Это позволяет сделать вывод о существовании периодического воздействия, вследствие чего напряжение в некоторых частях струи увеличивается. Развитие напряжений во времени приводит к локальной пластической деформации и как следствие распаду струи на фрагменты. Причины появления прогрессирующих периодических возмущений до сих пор не выявлены.

В настоящей работе предполагается, что множественная фрагментация струи обусловлена ударно-волновыми процессами, имеющими место на стадии обжатия облицовки. Известно, что скорость движения внешней и внутренней поверхностей облицовки в процессе взрывного обжатия увеличивается скачкообразно (немонотонно), в соответствии с периодическим прохождением ударных волн и волн разрежения [1].

На рис. 2 показаны волновые процессы, происходящие при взрывном обжатии кумулятивной облицовки. Зависимость скорости пластины от времени полета при взрывном метании приведена на рис. 3.

Вследствие скачкообразного поведения скорости обжатия облицовки и конечной скорости процесса детонации распределение скорости вдоль струи также имеет периодический

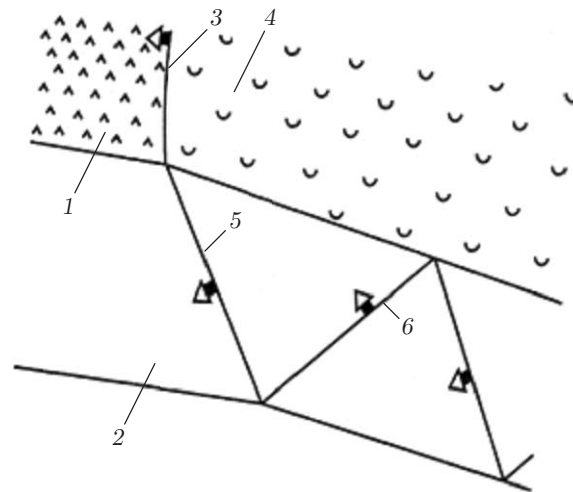


Рис. 2. Волновые процессы при взрывном обжати кумулятивной облицовки:
 1 — заряд взрывчатого вещества, 2 — облицовка, 3 — детонационный фронт, 4 — продукты детонации, 5 — фронт косо́й ударной волны, 6 — фронт волны разрежения

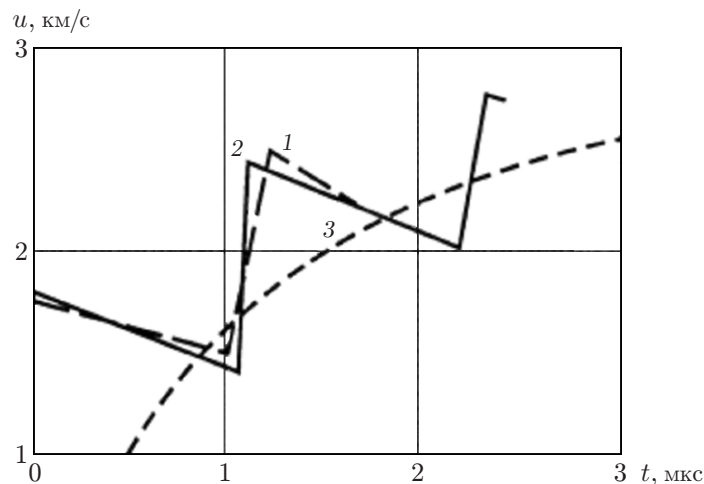


Рис. 3. Зависимость скорости свободной границы стальной пластины от времени полета [1]:
 1 — эксперимент, 2 — численный расчет для сжимаемой пластины, 3 — расчет для жесткой пластины

скачкообразный характер. Следовательно, периодически возникают области больших скоростей деформаций и более высоких растягивающих напряжений, 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 [7]. В качестве объекта исследования были выбраны железные и стальные облицовки, поскольку, варьируя в них концентрацию углерода, можно менять фазовый состав, структуру и механические свойства. Показано, что незначительные изменения химического состава облицовки приводят к существенному изменению предельного удлинения, характера разрушения струи и пробивного действия кумулятивных зарядов. В табл. 2 приведены значения коэффициентов предельного удли-

Таблица 2

Значения коэффициентов для определения предельного удлинения кумулятивной струи $n_b = A + Bd_0 \text{ grad } V$ [7]

Материал кумулятивной струи	$C, \%$	A	$B \cdot 10^3, \text{ мкс/мм}$
005ЖР-ВП	0,004	1,6	12,1
008ЖР	0,005	1,6	11,2
Армко-железо	0,010	1,6	10,4

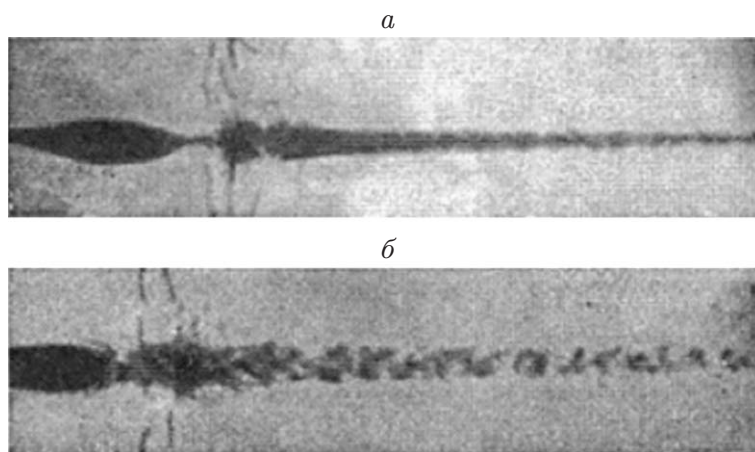


Рис. 4. Разрушение кумулятивной струи из армко-железа в момент времени $\tau = 24$ мкс (*а*) и стали 45 в момент времени $\tau = 26$ мкс (*б*) [7]

нения струй из различных марок железа, полученных методом “меченой струи” [7]. Видно, что при уменьшении концентрации углерода предельное удлинение увеличивается. Разрушение струй из этих материалов имеет вязкий, как у меди, характер (рис. 4, *а*), т. е. разрушение происходит вследствие образования шейки и сопровождается большой пластической деформацией. Фрагменты струи имеют форму цилиндров с вытянутыми торцами.

В работе [7] также показано, что в стальных облицовках изменение концентрации углерода приводит к немонотонному изменению пробивного действия L кумулятивных зарядов (табл. 3). Минимальное значение пробивного действия наблюдается для облицовок из стали 45, однако согласно [1–3] минимальные показатели должны быть у кумулятивных зарядов с облицовками из сталей марок У8 и У10, поскольку эти стали имеют наибольший предел текучести.

Разрушение струй из стальных облицовок имеет хрупкий характер с формированием на торцах фрагментов поверхностей в виде вложенных конусов. При этом наблюдается интенсивный распад фрагментов струи в поперечном направлении на отдельные осколки (рис. 4, *б* [7]). Согласно гидродинамической модели поведения металла в условиях кумулятивной струи таких явлений не должно наблюдаться.

В настоящей работе полагается, что зависимость предельного удлинения и характера разрушения кумулятивных струй от фазового состава и степени чистоты материала обусловлена воздействием на металл ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи. Материалы облицовки имеют различную структуру, соответствующую химическому составу. На рис. 5 приведен участок диаграммы “железо — углерод” для диапазона концентраций углерода $C = 0 \div 1,2 \%$. Структура железных и стальных облицовок показана на рис. 6. В зависимости от концентрации уг-

Таблица 3
Влияние концентрации углерода на пробивное действие L
кумулятивных облицовок из различных материалов

Материал облицовки	C , %	L , %
Армко-железо	0,01	122
Сталь 20	0,20	117
Сталь 45	0,45	100
У8А	0,80	117
У10А	1,00	110

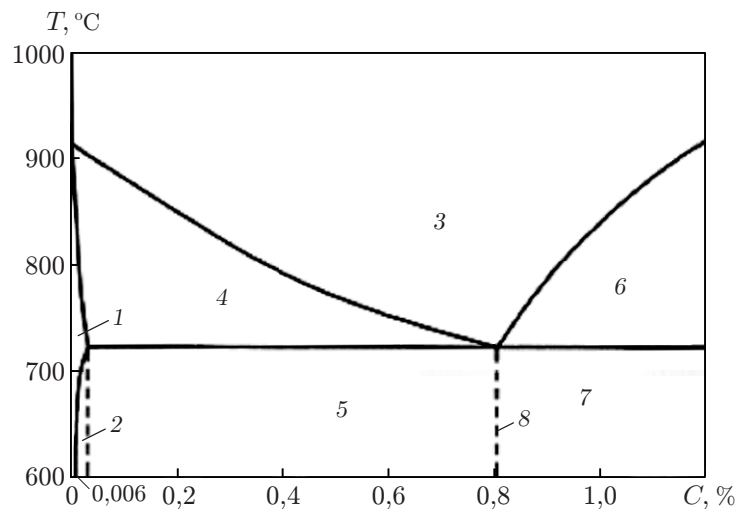


Рис. 5. Структура железных и стальных оболочек при различных значениях температуры и концентрации углерода:

1 — феррит, 2 — феррит и цементит (третичный), 3 — аустенит, 4 — аустенит и феррит, 5 — феррит и цементит, 6 — аустенит и цементит (вторичный), 7 — цементит и перлит, 8 — перлит

лерода структура металла меняется от чисто ферритной фазы до перлитной фазы. При малых значениях концентрации углерода ($C \leq 0,006$ %) структура включает зерна только феррита, при $C = 0,006 \div 0,800$ % — феррита и перлита, при $C > 0,8$ % структура включает зерна перлита и цементита.

При взрывном обжатии облицовки происходит взаимодействие ударных волн и волн разрежения со структурными неоднородностями (рис. 7).

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

Наиболее существенная структурная неоднородность наблюдается у стали 45 (феррит (50 %) — перлит (50 %)), поэтому пробивное действие облицовок из этого материала

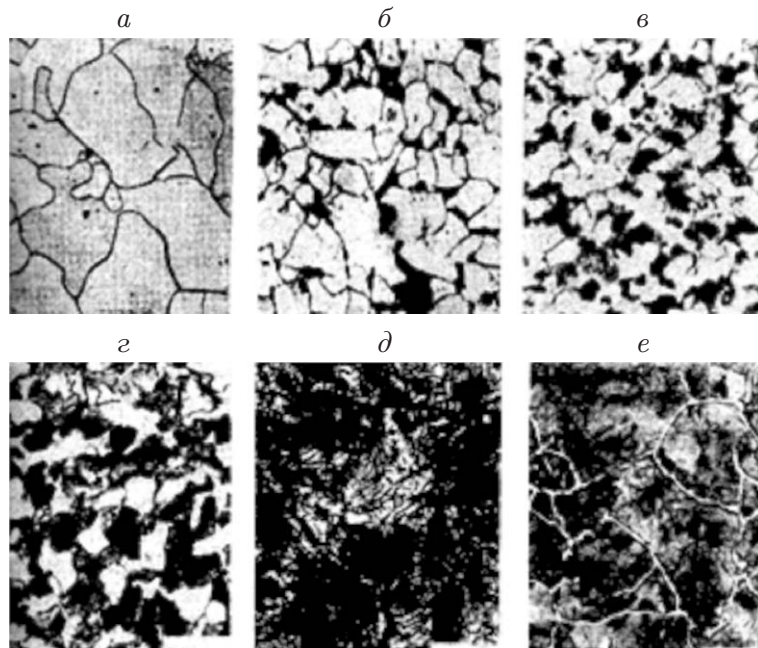


Рис. 6. Структура сталей с различной концентрацией углерода [17]:
a — $C = 0,04 \%$, *б* — $C = 0,20 \%$, *в* — $C = 0,30 \%$, *г* — $C = 0,50 \%$, *д* — $C = 0,8 \%$,
е — $C = 1,2 \%$

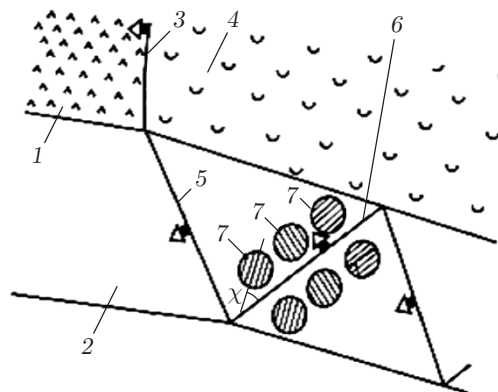


Рис. 7. Взаимодействие ударных волн и волн разрежения со структурными неоднородностями металла при взрывном обжатии кумулятивной облицовки [1]:
1 — заряд ВВ, *2* — облицовка, *3* — детонационный фронт, *4* — продукты детонации,
5 — фронт косой ударной волны, *6* — фронт волны разрежения, *7* — колонии частиц,
 произвольно ориентированных относительно фронта волны разрежения

наименьшее. Максимальное пробивное действие обеспечивают материалы, не имеющие структурных неоднородностей, т. е. чистые металлы, в которых содержание примесей находится в пределах их растворимости в данном металле. Данные пределы растворимости химических элементов определяют целесообразную степень очистки металла облицовки от примесей. Это справедливо и для других сплавов.

Заключение. Предложен подход к исследованию деформации металла при растяжении и разрушении кумулятивной струи с использованием дислокационных механизмов пластической деформации и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи.

С использованием предлагаемого подхода получены формулы для предельного удлинения и времени разрушения кумулятивной струи, которые позволяют анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных, пластических и структурных характеристик материала, геометрических параметров облицовки и кинематических характеристик струи.

С использованием дислокационной модели пластической деформации объяснены некоторые особенности процессов растяжения и разрушения кумулятивных струй, которые наблюдаются на практике, но до сих пор недостаточно исследованы, в частности зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла (размера зерна, наклепа, текстуры), а также причины аномального удлинения 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** взрыва: В 2 т. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 2.
2. **Свирский О. В., Власова М. А., Клопов Б. А. и др.** Аналитический метод расчета проникания струй кумулятивных зарядов // Тр. Междунар. семинара “Гидродинамика высоких плотностей энергии”, Новосибирск, 11–15 авг. 2003 г. Новосибирск: Ин-т 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 // Тр. Междунар. семинара “Гидродинамика высоких плотностей энергии”, Новосибирск, 11–15 авг. 2003 г. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004. С. 473–490.
4. **Фомин В. М.** Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин, А. И. Гулидов, Г. А. Сапожников, И. И. Шабалин, В. А. Бабаков, В. Ф. Куропатенко, А. Б. Киселев, Ю. А. Тришин, А. И. Садырин, С. П. Киселев, И. Ф. Головнев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
5. **Смеликов В. Г.** Устойчивость ограниченной кумуляции. М.: Студия “Этника”, 2016.
6. **Колмаков А. И., Ладов С. В., Силаева В. И.** Влияние технологии изготовления, структуры и механических свойств облицовок на эффективность работы перфораторов // Тр. Моск. высш. техн. училища им. Н. Э. Баумана. Вопр. физики взрыва и удара. 1980. № 340, вып. 2. С. 27–35.
7. **Баранов В. Г., Брагунцов Е. Я., Сотенко А. В.** Влияние фазового состава и степени чистоты металла облицовки на пробивное действие кумулятивных зарядов // Тр. Междунар. семинара “Гидродинамика высоких плотностей энергии”, Новосибирск, 11–15 авг. 2003 г. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004. С. 520–545.

8. **Эпштейн Г. Н.** Высокоскоростная деформация и структура металлов / Г. Н. Эпштейн, О. А. Кайбышев. М.: Металлургия, 1971.
9. **Эпштейн Г. Н.** Строение металлов, деформированных взрывом. М.: Металлургия, 1988.
10. **Дильдин Ю. М., Колмаков А. И., Ладов С. В.** Исследование последовательности формирования структур пестов // Тр. Моск. высш. техн. училища им. Н. Э. Баумана. Механика импульсных процессов. 1982. № 387. С. 54–59.
11. **Кайбышев О. А.** Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984.
12. **Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов** / Под ред. В. С. Ивановой. М.: Наука, 1965.
13. **Смирнов Б. И.** Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1981.
14. **Термически активированные процессы в кристаллах** / Под ред. А. И. Орлова. М.: Мир, 1973.
15. **Скуднов В. А.** Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989.
16. **Пуарье Ж. П.** Высокотемпературная пластичность кристаллических тел. М.: Металлургия, 1982.
17. **Гуляев А. П.** Металловедение: Учеб. для вузов / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. М.: Издат. дом “Альянс”, 2012.
18. **Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е.** Кинетическая природа прочности твердых тел // Успехи физ. наук. 1972. Т. 106, вып. 2. С. 193–227.

*Поступила в редакцию 31/X 2018 г.,
после доработки — 31/X 2019 г.
Принята к публикации 25/XI 2019 г.*
