

01;05;12

## Влияние скоростной неоднородности среды на проникание кумулятивных струй и удлинённых ударников

© Г.Г. Савенков,<sup>1</sup> Ю.И. Мещеряков,<sup>2</sup> Б.К. Барахтин<sup>3</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский институт „Поиск“, 188162 Мурино, Ленинградская область, Россия<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов „Прометей“, 198260 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sav-georgij@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 21 января 2010 г.)

Представлены результаты металлографических исследований материалов преград после внедрения в них плоских кумулятивных струй с начальной скоростью соударения 2.5–3.5 km/s. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что процесс проникновения происходит в неоднородном поле скоростей среды. Предложена уточняющая модифицированная гидродинамическая модель высокоскоростного внедрения струй и ударников. Представлены результаты экспериментальной проверки указанной модели.

### Введение

Разработке аналитических моделей высокоскоростного проникания кумулятивных струй и удлинённых ударников, которые учитывают либо одну инерционную составляющую сопротивления материала преград внедрению, либо включают и силовую (прочностную) компоненту сопротивления, посвящено значительное количество работ (см., например, [1,2] и библиографию к ним). Существует несколько классификаций стадийности процесса проникания, в соответствии с которыми различаются от двух до пяти этапов внедрения [1,3,4]. Но независимо от классификации все авторы сходятся во мнении, что основной стадией процесса, на которой диссипируется основная часть кинетической энергии и устанавливаются конечные параметры процесса внедрения, является вторая квазистационарная стадия. И большинство аналитических моделей ограничивается рассмотрением только этой стадии.

Экспериментально установлено [3,5], что при начальной скорости удара  $V_0 = 2.5–3.5$  km/s (этот диапазон и будет являться предметом рассмотрения настоящей работы) большинство металлических преград ведет себя на второй стадии как вязкопластические жидкости (выше указанного диапазона скоростей принято считать материал преграды идеальной несжимаемой жидкостью). Поэтому в ряде моделей высокоскоростного проникания струи (ударника) на стационарной стадии наряду с прочностью учитывается динамическая вязкость материала преграды [5,6], в том числе и турбулентная вязкость [6]. Последняя, как известно, характеризует вихревую пластическую деформацию.

Однако в связи с большим многообразием процессов, протекающих в толще материалов преград при внедрении ударников и струй, корректное решение задачи проникания с учетом обеих компонент сил сопротивления

внедрению далеко от завершения, даже при моделировании только одной второй квазиустановившейся стадии. Не в последнюю очередь это связано с тем, что физические процессы, происходящие в материалах преград при высокоскоростном проникании струй и ударников, достаточно слабо поддаются приборному изучению. Имеющиеся результаты импульсного рентгенографирования процесса проникания малоинформативны с точки зрения получения данных о физических явлениях в преградах, а результаты металлографических исследований после внедрения в них ударников и струй требуют тщательного анализа, поскольку являются постфакторными наблюдениями. Тем не менее металлографические исследования дают на сегодняшний день наиболее достоверные данные о физике процесса проникания ударника в металлическую преграду.

В настоящее время благодаря многочисленным экспериментальным исследованиям установлено, что ударно-волновое нагружение материала характеризуется по крайней мере двумя особенностями, не учитываемыми классической механикой сплошной среды [7]:

- 1) процесс распространения волнового фронта в среде протекает на нескольких масштабных уровнях;
- 2) движение частиц среды под действием волнового импульса на каждом масштабном уровне обладает скоростной неоднородностью в скоррелированном поле скоростей.

Первое утверждение для условий высокоскоростного проникания не вызывает сомнения [6], второе, в случае его подтверждения для этих условий, вынуждает уточнить модели высокоскоростного проникания.

С целью проверки второго постулата и разработки соответствующей модели были проведены следующие исследования.

## 1. Металлографические исследования материалов преград

Металлографические исследования металлических преград после внедрения в них плоских медных струй, составляющих кумулятивный „нож“, образующийся при схлопывании облицовки удлиненного кумулятивного заряда, применяющегося для резки различных объектов гражданского назначения и ракетно-космической техники [8], проводились методами световой и растровой электронной микроскопии на световом микроскопе ММУ-9 и электронном растровом SEM 535.

Наибольший интерес с точки зрения структурных изменений в материале преграды представляет область, примыкающая к берегам каверны. В этой области наблюдается целый спектр изменений, которые носят приблизительно одинаковый характер как для металлов с ГЦК-решеткой, так и для преград с ОЦК-решеткой. В преградах из титана и его сплавов, имеющих ГПУ-решетку, структурные изменения резко отличаются от таковых в предыдущих металлах и в настоящей работе рассматриваться не будут.

В качестве представителей ГЦК-металлов преград были исследованы технически чистый алюминий АВ-0 и алюминиевые сплавы Амгб и Д16, а также нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. В последней на металлографических шлифах на расстояниях до  $500\ \mu\text{m}$  от края каверны практически по всей ее глубине были обнаружены характерные следы пластической деформации в виде движения совокупности мезопотоков (их ширина не превышала  $10\ \mu\text{m}$ ), что проявляется через регулярную извилистую полосчатую структуру (рис. 1) и микротрещины между ними, указывающими на различную скорость между мезопотоками. Как видно из рисунка, в ряде случаев эти мезопотоки формировали потоки частиц среды более высокого масштабного уровня шириной до  $200\ \mu\text{m}$ .

Алюминий марки АВ-0 был выбран в качестве модельного экспериментального материала преграды. Путем многократного одноосного растяжения на небольшую величину остаточной деформации (3–7%) и последующего рекристаллизационного отжига заготовок при  $500^\circ\text{C}$  в образцах были выращены зерна диаметром до  $\sim 15\ \text{mm}$  (рис. 2). Далее образцы подвергались воздействию кумулятивной „ножа“ УКЗ 5/2.3 [8], с таким фокусным расстоянием, чтобы струя попадала в одно зерно, не проходя в следующее. Такой способ испытаний позволял выявлять структурные изменения в преграде — монокристалле.

Металлографические исследования шлифов из АВ-0 выявили на полированной поверхности большое количество пор, которые, вытягиваясь в цепочки, создавали рисунок, повторяющий своими очертаниями контур каверны. Концентрация пор на единице поверхности шлифа постепенно уменьшалась по мере удаления от берегов каверны. Наблюдения, выполненные по кромкам каверны, показали, что поры на шлифах есть не что

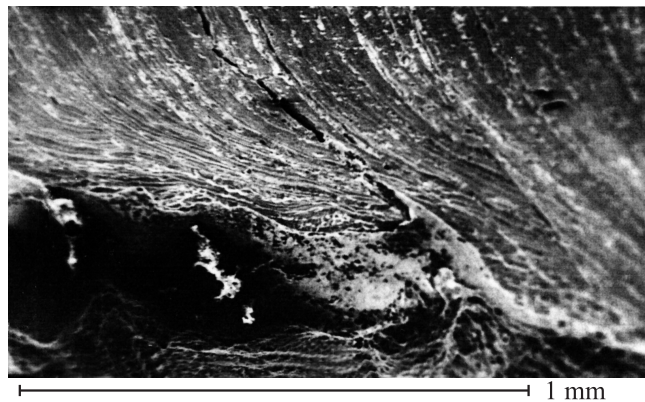


Рис. 1. Микроструктура преграды из стали 12Х18Н10Т после внедрения кумулятивной струи.

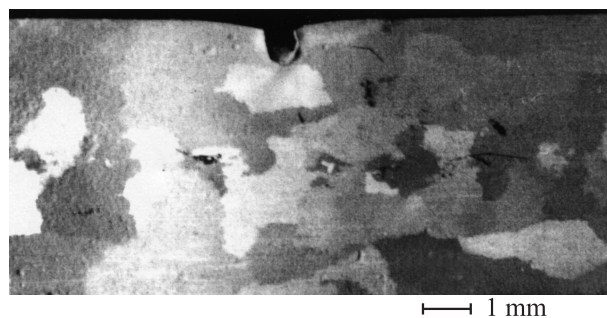


Рис. 2. Общий вид преграды из монокристаллов алюминия марки АВ-0 после внедрения кумулятивной струи.

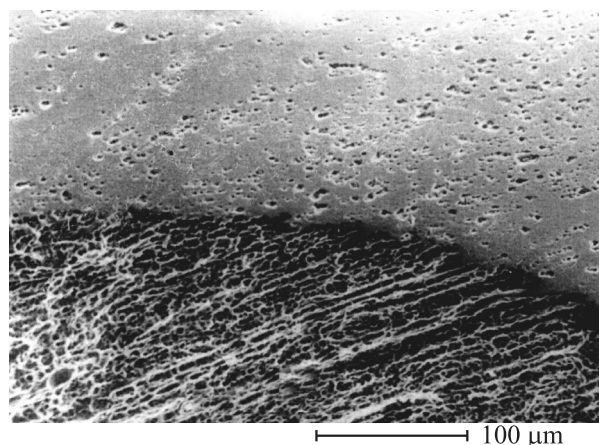
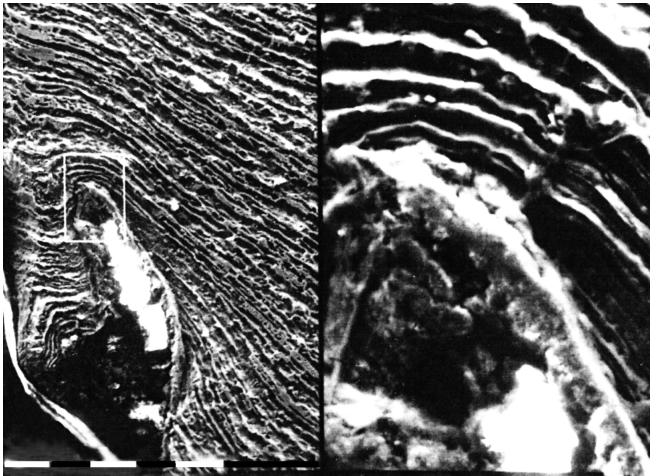


Рис. 3. Поверхность разрушения в АВ-0.

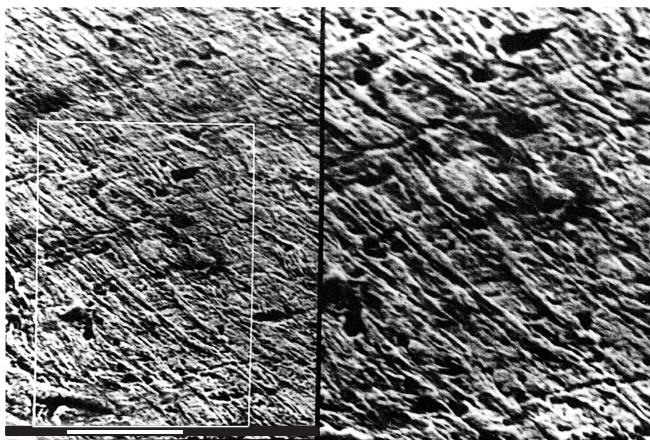
иное, как выходы мезопотоков, которые хорошо видны на поверхности разрушения (рис. 3). Между мезопотоками в АВ-0, так же как и в случае стали 12Х18Н10Т, наблюдаются микротрещины.

Исследования преград из алюминиевых сплавов Д16 и Амгб дали тот же результат, что и в предыдущем случае: пластическая деформация осуществляется в виде движения совокупности мезопотоков с различными скоростями относительно друг друга (рис. 4). На это обстоятельство, как и в предыдущих случаях, указывают



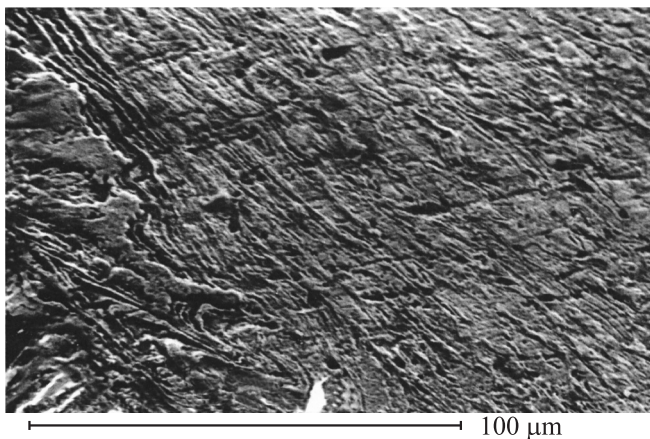
50 μm

Рис. 4. Микроструктура преграды из алюминиевого сплава Амг6 после внедрения КС.



50 μm

Рис. 5. Микроструктура преграды из стали марки Ст. 4.



100 μm

Рис. 6. Микроструктура преграды из Стали 45.

микромезотрещины между мезопотоками, которые являются результатом микромезосдвигов при проскальзывании мезопотоков с различными скоростями относительно друг друга.

Основными металлами с ОЦК-решеткой, которые подвергались исследованию после внедрения в них кумулятивных струй, были стали марок Ст. 4 ( $\sigma_B = 525$  МПа,  $\delta_5 = 20\%$ ) и Сталь 45 ( $\sigma_B = 610$  МПа,  $\delta_5 = 14\%$ ). Первое, что показали исследования образцов, вырезанных из различных зон каверны, это заметные структурные изменения, а значит, и пластическая деформация в обеих марках сталей начинается с  $1/4$ – $1/3$  глубины каверны от поверхности соударения. Так же как и в предыдущих случаях, наблюдаются признаки пластической деформации в виде движения совокупности мезопотоков шириной  $5$ – $10$  μm (рис. 5, 6). Между мезопотоками видны микромезотрещины, что свидетельствует об их различной скорости относительно друг друга (более подробно о возникновении микромезотрещин в процессе движения мезопотоков изложено в [9]).

Таким образом, утверждение, касающееся скоростной неоднородности частиц в условиях ударно-волнового нагружения материалов, справедливо и для пластической деформации, осуществляющейся в процессе проникания кумулятивных струй и ударников. Это позволяет уточнить модель высокоскоростного проникания, используя такую количественную характеристику процесса динамического отклика материала, как дисперсия скоростей частиц  $D^2(t)$  [9] (корень квадратный из дисперсии — разброс скоростей ( $\Delta u$ ) относительно средней массовой скорости частиц среды).

## 2. Модель высокоскоростного проникания

Известно [1,10], что процесс высокоскоростного проникания кумулятивных струй и удлиненных ударников часто трактуется как лобовое столкновение собственно струи (ударника) со струей, образующейся из материала преграды в зоне их взаимодействия.

Основное уравнение в такой модели процесса — модифицированное уравнение Бернулли, учитывающее динамическую прочность материалов струи и преграды:

$$0.5\rho_1(V - u)^2 + \sigma_1 = 0.5\rho_2u^2 + \sigma_2, \quad (1)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — плотность материалов струи и преграды соответственно;  $V$  — скорость струи;  $u$  — скорость проникания;  $\sigma_1, \sigma_2$  — характеристики динамической прочности материалов струи и преграды соответственно.

Для учета разброса значений скорости частиц материала преграды относительно средней скорости  $\langle u \rangle$  представим скорость проникания  $u$  в соответствии с известным приемом Рейнольдса [11] в виде суммы

$$u = \langle u \rangle + u', \quad (2)$$

где  $u'$  — пульсационная скорость [11].

В нашем случае  $u' = \Delta u = D(t)$ , тогда с учетом (2) уравнение (1) примет вид

$$0.5\rho_1[V - (\langle u \rangle + \Delta u)]^2 + \sigma_1 = 0.5\rho_2(\langle u \rangle + \Delta u)^2 + \sigma_2. \quad (3)$$

Анализ многочисленных экспериментальных данных, полученных с помощью двухканального скоростного интерферометра в процессе ударных испытаний большого ряда конструкционных металлических материалов (см., например, [12] и результаты, приводимые в разд. 3), показывает, что разброс скоростей  $\Delta u$  по порядку величины не более сотен, а в подавляющем большинстве случаев — десятки метров в секунду. Для процессов высокоскоростного проникания струй и удлиненных ударников очевидно, что скоростная неоднородность частиц среды будет оказывать ощутимое влияние на параметры внедрения только в случае  $\Delta u \geq 100$  м/с, поскольку критическая скорость струи  $V_{cr}$ , при которой прекращается проникание, составляет от 500 до 1000 м/с [2].

Определим влияние пульсационной составляющей инерционной компоненты сопротивления на глубину внедрения струи ( $L$ ), которая определяется по соотношению

$$L = \int_0^t \langle u \rangle dt. \quad (4)$$

Разрешив уравнение (3) относительно средней скорости проникания ( $\langle u \rangle$ ), получим (членами  $\Delta u^2$  пренебрегаем)

$$\langle u \rangle = \frac{1}{\alpha} [(V - \alpha \Delta u) - (\lambda V^2 + \alpha M)^{0.5}], \quad (5)$$

где  $\alpha = 1 - \lambda$ ;  $\lambda = \rho_2 / \rho_1$ ;  $M = 2(\sigma_2 - \sigma_1) / \rho_1$ .

Без учета скоростной неоднородности частиц, когда действительно уравнение (1), скорость проникания определяется зависимостью

$$u = \frac{1}{\alpha} [V - (\lambda V^2 + \alpha M)^{0.5}]. \quad (6)$$

Из соотношений (4)–(6) следует, что при прочих равных условиях глубина проникания меньше в преградах, материалы которых склонны в условиях динамического деформирования к большему разбросу скоростей.

Однако ясно, что разброс скоростей частиц материала при его динамическом нагружении должен влиять и на динамическую прочность  $\sigma_2$ , поскольку при больших скоростях вязкое взаимодействие между мезопотоками будет играть важную роль в поведении материалов [13].

Какой-либо устоявшейся характеристики динамической прочности материала преграды в процессе высокоскоростного проникания нет, каждая группа исследователей трактует ее по-своему.

В настоящей работе будем исходить из того, что, как говорилось выше, большую часть процесса внедрения ударника (вторая стадия проникания) материал преграды находится в вязкопластическом состоянии. Тогда физическое соотношение для динамического сопротивления деформированию в диапазоне высоких скоростей деформаций ( $\dot{\epsilon} > 10^3$  с<sup>-1</sup>) можно записать в следующем виде [14]:

$$\sigma_2 = \sigma_0 + 4\mu\dot{\epsilon}, \quad (7)$$

здесь  $\sigma_0$  — сопротивление деформации при статическом нагружении,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости при сдвиге,  $\dot{\epsilon}$  — скорость пластической деформации. Вязкое трение между мезопотоками учтем, введя поправочный коэффициент  $\beta$  [13], который будет определять эффективный коэффициент динамической вязкости

$$\mu_{\text{eff}} = \mu(1 + \beta). \quad (8)$$

С другой стороны, во-первых, известно, что процесс высокоскоростного проникания ударника сопровождается распространением в преграде ударной волны [1], которая при рассматриваемых скоростях начального взаимодействия опережает ударник. В этом случае перед ударником с большим опережением движутся частицы среды, которые имеют разброс по скоростям. Тогда этот факт может привести вследствие возникновения сдвиговых напряжений между мезопотоками к разрыхлению материала преграды (появлению микромезотрещин типа II — поперечного сдвига) впереди головной части струи и тем самым — к его пластификации и облегчению условий внедрения ударника. Появление трещин поперечного сдвига произойдет в том случае, если будет выполнено условие [9]

$$K_{II} \geq K_{IIc} \quad \text{или} \quad 0.25\rho_2 c_p u (\pi \Delta u t_r)^{0.5}, \quad (9)$$

где  $K_{II}$  — текущий коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге;  $K_{IIc}$  — критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге в динамике;  $c_p$  — скорость пластической волны;  $t_r$  — время взаимодействия мезопотоков.

Во-вторых, среда опережает ударник на характерный размер пространственных неоднородностей, имеющий смысл нелокальной длины корреляции  $l_r$ , что также может привести вследствие тех же причин и условия (9) к разрыхлению материала, но уже на длине  $l_r$ . Нелокальная длина может быть определена либо из нелинейных кинетических уравнений [13], либо экспериментально путем измерения зоны структурных изменений у дна каверны. По нашим данным, эта длина находится в пределах 500 мкм.

Элементарные оценки показывают, что при  $t_r = 10^{-8} - 10^{-7}$  с разброс скоростей частиц должен быть  $\Delta u > 100$  м/с, чтобы условие (9) гарантированно выполнялось для большинства конструкционных материалов.

Учет пластификации материала преграды в процессе проникания расчетно-теоретическими методами в настоящее время вряд ли возможен, поэтому по аналогии с коэффициентом  $\beta$  введем поправочный коэффициент  $0 \leq \gamma \leq 1$ , который будет определять эффективное статическое сопротивление деформированию  $\sigma_{0\text{eff}}$ :

$$\sigma_{0\text{eff}} = \sigma_0(1 - \gamma). \quad (10)$$

С учетом (8) и (10) зависимость (7) примет вид

$$\sigma_2 = \sigma_0(1 - \gamma) + 4\mu(1 + \beta)\dot{\epsilon}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (5), получим

$$\langle u \rangle = \frac{1}{\alpha} [(V - \alpha \Delta u) - (\lambda V^2 + \alpha(\sigma_0(1 - \gamma) + 4\mu(1 + \beta)\dot{\varepsilon} - \sigma_1)/\rho_1)^{0.5}]. \quad (12)$$

Из физических соображений ясно, что  $\beta > \gamma$ , тогда из (12) и (4) следует, что глубина внедрения  $L$  тем больше, чем меньше статическая прочность материала преграды и чем ниже его способность к широкому разбросу скоростей. Соотношение (12) также дает основания полагать, что глубина внедрения может быть не монотонной функцией статической прочности, а определяться характером изменения функции разброса скорости от скорости проникания  $\Delta u = f(u)$ .

С целью проверки полученных результатов были проведены следующие экспериментальные исследования.

### 3. Методики и результаты экспериментов по ударному нагружению мишеней и прониканию плоских кумулятивных струй

С целью определения разброса скоростей частиц на легкогазовой пушке калибра 37 мм были проведены эксперименты по ударному нагружению в условиях одноосной деформации мишеней из шести различных марок стали. Стандартные механические характеристики испытанных видов стали приведены в табл. 1.

Испытания проводились в диапазоне значений скорости ударника  $V_0 = 235\text{--}390$  м/с. Регистрация скорости свободной поверхности образцов и дисперсии скоростей частиц осуществлялась с помощью двухканального скоростного интерферометра.

**Таблица 1.** Механические характеристики испытанных видов стали

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	KCU, MJ/m <sup>2</sup>
38ХНЗМФА	1345	800	19	7.32
Сп.28	750	500	25	9.0
Ст.4	525	250	20	1.6
Сталь 45	610	340	14	0.52
Сталь 50	1100	950	9	0.35
12Х18Н10Т	540	340	56	3.2

**Таблица 2.** Разброс скоростей частиц и глубина внедрения кумулятивных струй

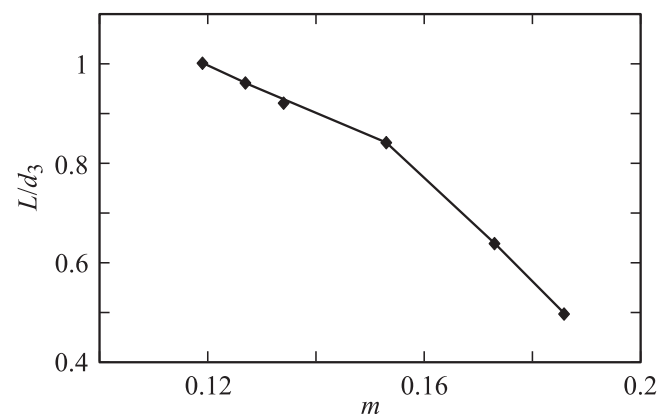
Марка стали	$\Delta u$ , м/с	$m$	$L$ , мм
38ХНЗМФА	62	0.186	2.5
Сталь 50	69	0.173	3.2
Сп. 28	73	0.153	4.2
Ст. 4	84	0.134	4.6
Сталь 45	48	0.127	4.8
12Х18Н10Т	43	0.119	5.0

Многочисленные эксперименты показали, что дисперсия скоростей частиц в процессе динамического нагружения не является постоянной величиной, а непрерывно изменяется вдоль временного профиля средней скорости частиц. Для стационарных волновых фронтов дисперсия достигает своего максимального значения в середине пластического фронта, для нестационарных фронтов изменение дисперсии носит более разнообразный характер. В настоящей работе измерения дисперсий скоростей частиц проводились в условиях стационарных волновых фронтов.

Полученные результаты по разбросу значений скорости частиц для одной и той же скорости удара  $V_0 \approx 350$  м/с (ее удалось реализовать для всех видов испытанных образцов, что связано с особенностью проводимых экспериментов) приведены в табл. 2.

При проведении экспериментов по внедрению плоских кумулятивных струй использовались полубесконечные преграды из тех же шести видов стали, которые представлены в табл. 1, применялись медные удлиненные кумулятивные заряды УКЗ-5/2.3 [8]. Характеристики струй кумулятивного „ножа“, образующегося при схлопывании оболочки УКЗ, приведены в табл. 2 той же работы (скорость головной части струи —  $u_0 = V_0 = 2.57$  км/с, хвостовой — 0.85 км/с). Заряды устанавливались на оптимальное фокусное расстояние — так чтобы разрыва струй на фрагменты не происходило. Длина кумулятивной струи (высота „ножа“) во всех случаях равнялась  $l_c = 5.0 \pm 0.1$  мм. Глубину внедрения струй определяли с точностью  $\pm 2\%$  с помощью мерного индикатора, погрешность определения ( $\Delta h$ ) при измерениях на двух–трех преградах при доверительной вероятности 0.9 составляет  $\Delta h = 0.01\text{--}0.005 L$ .

Результаты экспериментального определения глубины внедрения приведены в табл. 2. На рис. 7 представлена зависимость безразмерной глубины внедрения от параметра  $m$  (его определение см. ниже)  $(L/d_3) = f(m)$ , где  $d_3 = 5$  мм — диаметр кумулятивного заряда.



**Рис. 7.** Зависимость безразмерной глубины от параметра  $m$ .

#### 4. Анализ результатов экспериментов и выводы

В табл. 2 в третьем столбце приведено значение безразмерного параметра  $m = (\Delta u + (\sigma_B / \rho_1)^{0.5}) / u_0$ . Физическая суть введенного параметра — безразмерная критическая скорость проникания, учитывающая дисперсию скоростей частиц материала преграды. Если принять, что вязкое упрочнение компенсируется параметром, характеризующим прочность струи (по экспериментальным оценкам, ее значение  $\sigma_1 \approx 325$  МПа [15]), то  $m$  определяет глубину внедрения  $L$ : чем больше этот параметр, тем меньше глубина внедрения. Разумеется, в рамках тех экспериментальных данных, которые получены в настоящей работе, этот вывод принимается только в первом приближении (на качественном уровне), поскольку из полученного выражения (13) следует более сложная зависимость глубины внедрения от свойств материала и параметров процесса.

Тем не менее из результатов, приведенных в табл. 2 и на рис. 7, следует, что несмотря на достаточно узкий диапазон изменения  $m$  для испытанных марок сталей, глубина внедрения изменяется в соответствии с этим безразмерным параметром. При этом зависимость безразмерной глубины от параметра  $m$  имеет два четко выраженных линейных участка: левая часть графика определяет глубину внедрения для малопрочных сталей, правая — для сталей средней прочности. Можно также отметить, что глубина внедрения ( $L = 5.0$  мм) для преграды из стали 12X18H10T близка к теоретическому значению глубины, рассчитанному по гидродинамической теории без учета прочности и сжимаемости ( $L_{\text{calc}} = 5.34$  мм). Это обстоятельство указывает на то, что сталь 12X18H10T в процессе проникания сильно пластифицируется (об этом говорилось в разд. 3), и тем самым условия проникания для струй кумулятивного „ножа“ существенно облегчаются.

1. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что пластическая деформация в процессе высокоскоростного проникания кумулятивных струй осуществляется в виде совокупности движения мезопотоков частиц среды с различной скоростью относительно друг друга.

2. Разработанная модель проникания, основанная на модифицированном уравнении Бернулли, качественно правильно отражает изменение глубины внедрения с изменением прочности преграды и разброса скоростей частиц ее материала в процессе проникания струи (удлиненного ударника).

#### Список литературы

- [1] Сагомонян А.Я. Проникание. М.: Изд-во МГУ, 1974. 300 с.
- [2] Тришин Ю.А. Физика кумулятивных процессов. Новосибирск: ИГД им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2005. 324 с.
- [3] Антухов В.Н. // Проблемы прочности. 1990. № 2. С. 60–68.

- [4] Orphal D.L. // Int. J. Eng. 1997. Vol. 20. P. 601–616.
- [5] Агафонов А.В. // ПМТФ. 1986. № 3. С. 120–125.
- [6] Барахтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 8–12.
- [7] Мещеряков Ю.И. // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 6. С. 5–21.
- [8] Ефанов В.В., Кузин Е.Н., Тимофеев В.Н., Чельшев В.П. // Полет. 2003. № 10. С. 42–49.
- [9] Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г., Атрошенко С.А. // Проблемы прочности. 1990. № 12. С. 19–23.
- [10] Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 407 с.
- [11] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
- [12] Mecherykov Yu.I. // High Pressure Shock Compression of Solids. VI. Springer, 2002. P. 169–213.
- [13] Хантулева Т.А., Мещеряков Ю.И. // Химическая физика. 1999. Т. 18. № 10. С. 37–43.
- [14] Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наук. думка, 1991. 288 с.
- [15] Савенков Г.Г., Васильев Н.Н. // Проблемы прочности. 1993. № 10. С. 47–52.