

УДК 519.6

О ВОЗМОЖНОСТИ КУМУЛЯТИВНОГО ХАРАКТЕРА РАЗВИТИЯ НАЧАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫХОДЕ НА НЕЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С. М. Бахрах¹, А. Д. Ковалева, С. С. Косарим, Г. Б. Красовский,
С. Е. Куратов, А. Е. Левушов, Е. Е. Мешков, И. Ю. Мышкина,
О. В. Ольхов, А. А. Половников, Е. А. Половников
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Показано расчетно-теоретически и экспериментально, что при выходе ударной волны на искривленную поверхность конденсированного материала поверхность становится неустойчивой, причем развитие неустойчивости может иметь характер кумулятивного струеобразования. Проанализированы основные закономерности, определяющие характеристики образующейся кумулятивной неустойчивости. Теоретически исследовано влияние стабилизирующих факторов на развитие процессов кумуляции на свободной искривленной поверхности.

Введение

Поведение свободной поверхности (СП) конденсированного материала под действием интенсивных динамических нагрузок представляет собой совокупность сложных процессов, детальное понимание которых во многих аспектах пока отсутствует. Одним из слабоизученных явлений остается процесс развития неустойчивости СП конденсированного материала при выходе на нее ударной волны (УВ).

Данный тип неустойчивости приводит к отрыву частиц материала с поверхности, что определяет практическую значимость этого явления и объясняет основные направления проведенных ранее экспериментальных исследований. Выброс частиц со свободной поверхности впервые был обнаружен еще в 50-е годы во ВНИИЭФ С. Б. Кормером, Ф. В. Григорьевым и др. Часть полученных результатов была опубликована позднее в работе [1]. В указанной работе приведены результаты экспериментальных исследований выброса частиц с плоских образцов. В опытах использовались фотохронографическая методика регистрации и метод импульсной рентгенографии. Начальным возмущением СП, формирующим процессы гидродинамической неустойчивости, являлась шероховатость

поверхности с характерной амплитудой (высотой неровностей) $R_z \sim 1 \div 100$ мкм. Из-за малости начальных возмущений в сравнении с масштабами образцов и измерительной базой процесс развития неустойчивости получил название *микроккумуляции*. В пользу кумулятивного характера процесса свидетельствовали экспериментальные данные о независимости объема выбрасываемого с СП материала от состава образцов. Было установлено, что выброс мелких частиц с СП не зависит от внутренней структуры материалов (наличия и размеров примесей, зерен, лакун и т. д.), а определяется чистотой обработки поверхности, или размером шероховатости.

Аналогичные исследования по выбросу частиц с СП проводились в лабораториях Сандии Эсэем и в Ливерморе Даннингом и Якоби [2], где изучалось количество выбрасываемого с поверхности материала и его распределение по скорости. Для выброса материала с СП в этих работах употреблялся термин *пыление поверхности*. Использовались голографические диагностики с высокой разрешающей способностью, которая оценивается в 1 мкм. Эсэй рассмотрел влияние ширины фронта УВ на процесс развития неустойчивости СП.

Все указанные экспериментальные исследования касались достаточно поздней стадии разви-

тия гидродинамической неустойчивости, когда СП разогнанного УВ образца проходит расстояние порядка $10 \div 50$ мм при том, что начальный уровень возмущений, определяющих развитие процесса, как уже сказано, имеет значение порядка десятка микрон. Одной из первых работ по исследованию возникающих возмущений на начальном этапе их развития явилась работа [3]. В ней рентгенографировалась форма возмущений, возникающих при выходе на искривленную СП алюминиевого образца плоской стационарной УВ с амплитудой ≈ 35 ГПа. Было показано, что возмущения (если они вообще развиваются) имеют характер струй. При малых начальных возмущениях СП может не произойти их развития из-за стабилизирующего влияния прочностных свойств металла.

В настоящей работе процесс развития неустойчивости на свободной искривленной границе конденсированного материала, на которую падает УВ, рассматривается как процесс кумулятивного струеобразования. Используемый подход позволяет достаточно просто получить зависимости скорости роста возмущений от геометрических факторов (длины волны и амплитуды начальных возмущений), а также интенсивности нагружения и свойств материалов. Результаты, полученные при рассмотрении кумулятивной природы роста возмущений на СП, были подтверждены экспериментально на специально созданной установке — двухпоршневой ударной трубе, а также результатами численного моделирования, проведенного по методике ЛЭГАК [4].

Основные закономерности струйного характера развития неустойчивости СП

Выход УВ на искривленную СП конденсированного материала можно трактовать как частный случай неустойчивости Рихтмайера—Мешкова (НРМ) при большом начальном отношении плотностей по обе стороны разрыва, когда число Атвуда стремится к 1. Однако особенности поведения конденсированных материалов могут существенно изменить характер процесса по сравнению с классическим вариантом НРМ, когда УВ переходит через искривленную границу двух разноплотных газов. Физической основой указанной разницы является наличие в уравнении состояния конденсированного вещества параметра $\rho_0 c_0^2$ с размерностью давления. Волновая конфигурация в конденсированном ве-

ществе приводит к течениям, несколько отличным от тех, которые реализуются на контактной границе разноплотных газов. На рис. 1 дана иллюстрация течения, возникающего при выходе УВ на клиновидную выемку.

В конденсированном веществе при сравнительно невысоких интенсивностях УВ сжатие материала на фронте незначительно, и поведение вещества за фронтом определяется в основном холодной составляющей давления в уравнении состояния. После снятия нагрузки в волне разрежения (ВР) вещество практически возвращается к своему первоначальному состоянию с плотностью ρ , лишь немного меньшей начальной плотности ρ_0 . Суммарное изменение удельного объема материала за весь процесс меняется мало, следовательно, мало меняется и форма поверхности, описывающей границу конденсированного вещества после прохождения УВ. Но возникающее течение вдоль образующей начальной искривленной границы приводит при выполнении ряда условий к образованию кумулятивных струй в месте соударения потоков на плоскости симметрии выемки. Топология и динамика формирующихся при этом возмущений существенно отличаются от наблюдаемых в случае классической НРМ.

Для получения количественных соотношений, описывающих развитие неустойчивости на СП в рамках кумулятивной концепции, рассмотрим двумерную свободную границу материала, изображенную на рис. 1. Для простоты считаем профиль границы пилообразным. Будем пренебрегать многоволновой конфигурацией потока в окрестности свободной границы, рассматривая только падающую УВ и ВР, отходящую от точки пересечения фронта этой волны с поверхностью. Поведение вещества будем описывать уравнением состояния $P = A(\delta^n - 1)$, $\delta = \rho/\rho_0$.

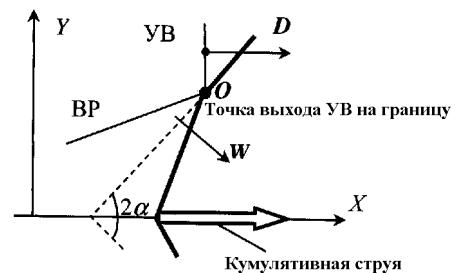


Рис. 1. Выход УВ на клиновидную выемку

В предположении слабости падающей УВ можно пренебречь шириной ВР, отраженной от СП, заменив ее бесконечно тонким разрывом. Угол падения УВ на СП в рамках сделанных предположений будет в точности совпадать с углом отражения ВР. Из законов сохранения на разрывах нетрудно получить (см., например, [5]), что в разгруженной области в окрестности СП поток будет иметь скорость W , направленную по нормали к первоначальному положению границы (пунктирная линия на рис. 1). Компоненты скорости в неподвижной системе координат определяются соотношениями

$$W_x = U_{FS} \sin^2 \alpha; \quad W_y = -2U_{FS} \sin \alpha \cos \alpha,$$

где U_{FS} — скорость СП в случае отсутствия первоначальной искривленности границы.

Наличие y -составляющей скорости в области разгруженного материала может привести к формированию кумулятивного струйного течения, направленного к оси выемки [6]. Можно оценить скорость образующихся струй аналогично тому, как это сделано в классической теории кумулятивных струй в приближении несжимаемой жидкости:

$$V_{jet} \approx U_{FS} \left(1 + \frac{\cos \alpha}{1 + 2(\delta - 1) \cos^2 \alpha} \right), \quad (1)$$

где δ — сжатие вещества на фронте падающей УВ.

Легко видеть, что в пределе малых начальных возмущений $ak \ll 1$ формула (1) сводится к классическому выражению Рихтмайера [7]:

$$V_{jet} \approx U_{FS} (1 + ak).$$

На основе выражения (1), полученного в приближении слабых УВ (пренебрегается тепловой составляющей давления в уравнении состояния, сжатие на фронте $\delta = 1 + \varepsilon$, $\varepsilon \ll 1$), а также с применением результатов численного моделирования было получено выражение, которое можно использовать для произвольных начальных возмущений на СП и произвольных амплитуд давления на фронте УВ [8]:

$$V_{jet} = U_{СП} \left(1 + \frac{2,7 \cos \alpha}{1 + 2(\delta - 1) \cos^2 \alpha f(a/\lambda)} \right). \quad (2)$$

Здесь угол α связан с начальной амплитудой a и длиной волны λ соотношением $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda/2}{2a} =$

$\frac{1}{4} \frac{\lambda}{a}$, а функция $f(x)$ определяется следующим образом:

$$f(x) = 8,61x^2 - 13,92x + 6,31.$$

Выражение (2) можно применять к произвольному профилю начальной гофрировки, в том числе для синусоидального начального возмущения, а также к произвольной амплитуде УВ.

Прочность оказывает стабилизирующее влияние на возникновение струй и их скорость. В работе [8] получено выражение для минимально возможной интенсивности УВ $P_{крит}$, при которой на СП с возмущениями, имеющими длину волны λ и амплитуду a , возможно возникновение струйного течения:

$$P_{крит} \approx \frac{\sqrt{2\sigma_T \rho_0 c_0^2}}{\sin 2\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_T \rho_0 c_0^2} \left(\frac{\lambda}{4a} + \frac{4a}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Здесь σ_T — параметр, характеризующий прочностные свойства материалов, он близок к динамическому пределу текучести [6].

Расчеты по методике ЛЭГАК [4] подтверждают полученную зависимость (3). Уменьшение скорости струи (2) из-за прочностных эффектов определяется выражением [8]

$$\frac{V_{jet}^{UP}}{V_{jet}} \approx 1 - \frac{\sigma_T}{\rho_0 U_{СП}^2} \frac{1 + [1 - 2(\sigma - 1) \sin^2 \alpha] \cos \alpha}{\sin^2 \alpha \cos \alpha (1 + 2,7 \cos \alpha)}. \quad (4)$$

Различие между классической НРМ и неустойчивостью свободной границы конденсированного материала со струйным характером развития иллюстрирует рис. 2.

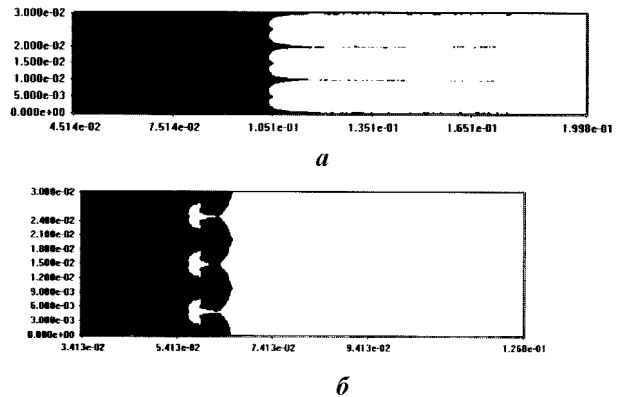


Рис. 2. Распределение веществ в расчетах развития неустойчивости на СП материала при выходе на нее УВ, $t = 0,3$ мкс: a — с уравнением состояния Ми—Грюнайзена; b — с уравнением состояния идеального газа

Постановка экспериментов

В основе постановки экспериментов на ударной трубе по исследованию неустойчивости СП конденсированной среды лежит схема, изображенная на рис. 3. Ударник 1, разогнанный до скорости u_1 , ударяет по образцу исследуемой среды 3 через прокладку 2, в результате чего СП

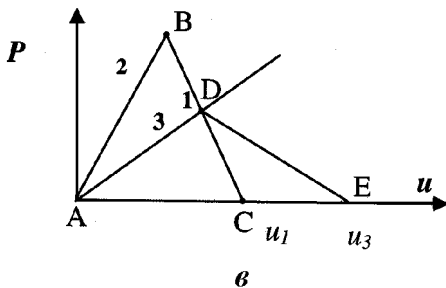
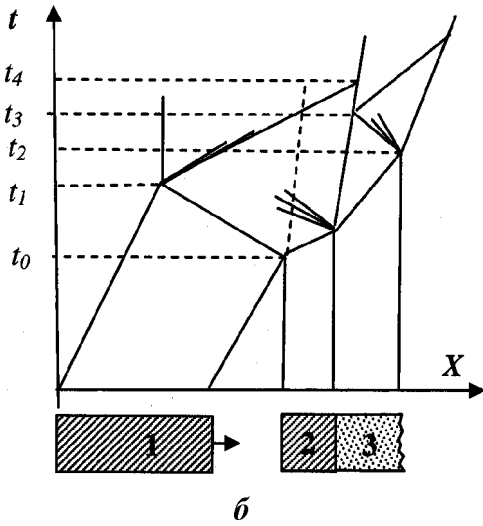
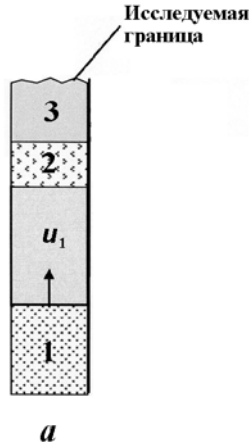


Рис. 3. Постановка экспериментов на ударной трубе: 1 — ударник, 2 — прокладка, 3 — приемник (исследуемый образец); а — схема постановки экспериментов; б — (X, t) -диаграмма работы трубы; в — (P, u) -диаграмма течения

образца приобретает скорость u_3 . Такая двухпоршневая схема позволяет получать интенсивность УВ до ~ 50 МПа, а также в широких пределах варьировать уровень и характер нагрузки в исследуемых образцах.

В качестве исследуемой конденсированной среды использовался студень водного раствора желатина (с весовой концентрацией $C = 4\%$) или глина. При этом бралась глина, разбавленная водой до консистенции сливочного масла при комнатной температуре.

На наружной границе слоя задавалось начальное двумерное возмущение, по форме приближающееся к синусоидальному, с длиной волны λ и амплитудой (от вершины *горба* до нижней точки *впадины*) Δ_0 .

Разгон ударника, его удар по прокладке и последующее развитие возмущения на исследуемой границе регистрировались при помощи скоростной камеры СФР в режиме *лупы времени в проходящем свете*.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Была проведена серия опытов, в которых варьировались материал исследуемого слоя, длина волны λ и амплитуда Δ_0 начального возмущения исследуемой границы. В таблице приведены данные постановки экспериментов. Здесь же приведены результаты измерения скорости ударника из полиэтилена (плотность $\rho = 920$ кг/м³, скорость звука $c_0 = 2900$ м/с) перед ударом по прокладке из оргстекла (плотность $\rho = 1180$ кг/м³, скорость звука $c_0 = 2950$ м/с), а также оценка давления в квадратном поршне. Оценка выполнялась в акустическом приближении по (P, u) -диаграмме.

На рис. 4 приведены фотохронограммы экспериментов и результаты их обработки.

На рис. 5 приведены (X, t) -диаграммы ударника, прокладки, вершин горбов и впадин исследуемой границы и зависимость амплитуды возмущения границы от времени в опыте 1. При этом расстояние X измерялось от границы первоначального положения прокладки. Время везде отсчитывалось от начала регистрации процесса (от первого кадра фотохронограммы).

На рис. 6—8 приведены зависимости амплитуды возмущения границы от времени и (X, t) -диаграммы СП и головных частей струй в опытах 2—4.

Постановка экспериментов

Номер опыта	Материал исследуемого слоя	Начальное возмущение		Скорость удара, м/с	Скорость прокладки, м/с	Давление в прокладке, МПа
		λ , мм	Δ , мм			
1	Студень	~ 10	$\sim 3,7$	32,4	23,8	49,1
2	Студень	~ 20	~ 3	30,8	20,8	46,7
3	Глина	~ 10	$\sim 3,7$	30,9	17,0	46,8
4	Глина	~ 20	~ 3	28,5	15,5	43,2

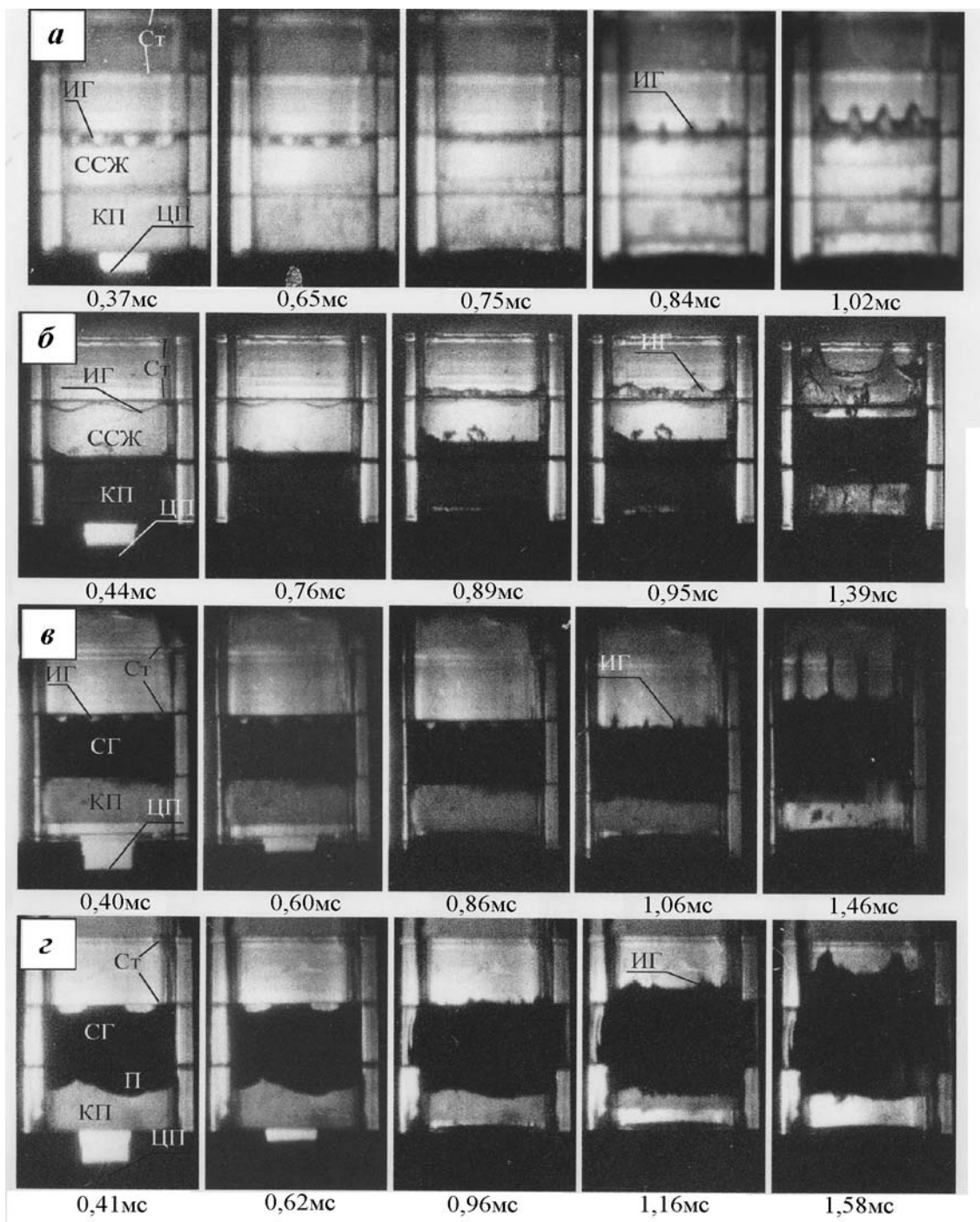
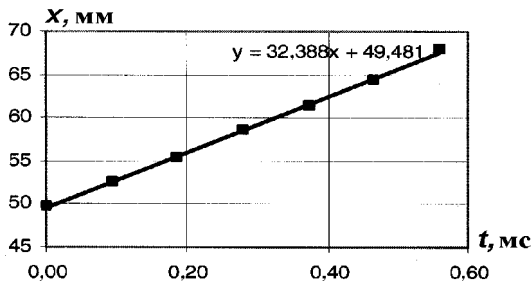
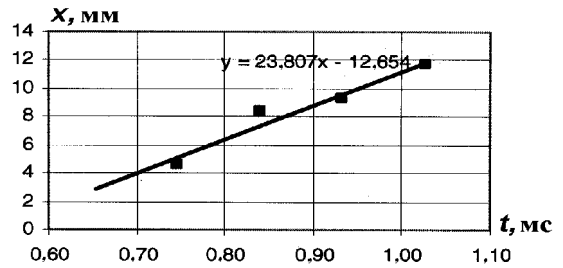


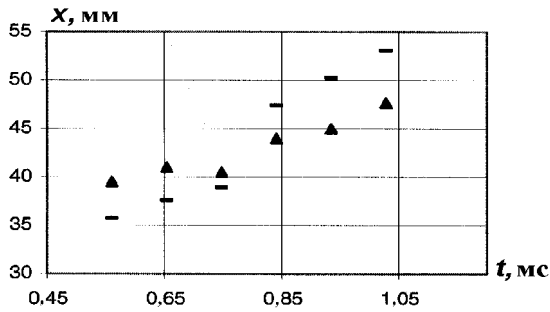
Рис. 4. а — опыт 1; б — опыт 2; в — опыт 3; г — опыт 4; ИГ — исследуемая граница с возмущением; ЦП — ударник из полиэтилена; КП — прокладка из оргстекла; СГ — стыки блоков канала квадратного сечения; ССЖ — слой студня; СГ — слой глины; П — глина, попавшая в зазор между стенкой и квадратным поршнем



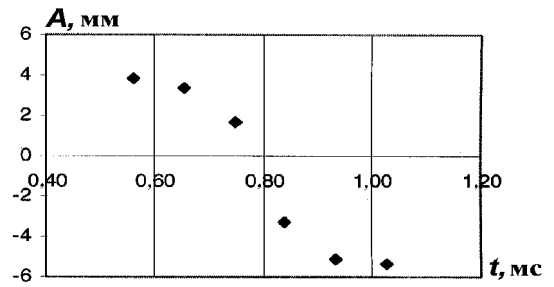
a



б

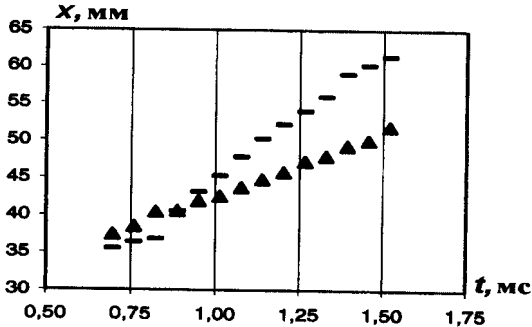


в

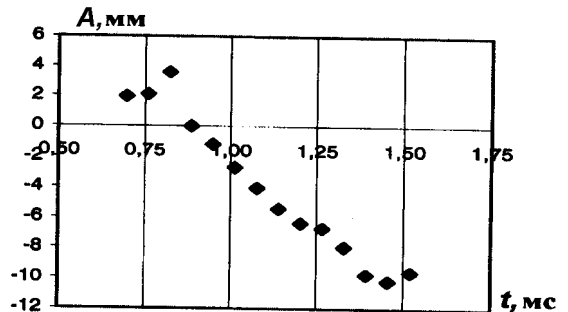


z

Рис. 5. Результаты обработки опыта 1: *a* — (X, t) -диаграмма ударника перед ударом по прокладке, скорость поршня $\sim 32,4$ м/с; *б* — (X, t) -диаграмма прокладки, скорость поршня 23,8 м/с; *в* — (X, t) -диаграмма исследуемой границы; \blacktriangle — вершины горбов начального возмущения; — — нижние точки впадины начального возмущения; *z* — зависимость от времени амплитуды возмущения исследуемой границы



a



б

Рис. 6. Результаты обработки опыта 2: *a* — (X, t) -диаграмма исследуемой границы; \blacktriangle — вершины горбов начального возмущения; — — нижние точки впадины начального возмущения; *б* — зависимость от времени амплитуды возмущения исследуемой границы

Результаты проведенных экспериментов согласуются с результатами расчетных оценок. Наиболее ярко кумулятивный характер развития возмущения наблюдается в опыте 3 (см. рис. 4, в), в котором используется глина и одновременно берется относительно большая амплитуда начального возмущения: $\Delta_0/\lambda \approx 0,37$. Уменьшение относительного начального возмущения (опыт 4, глина, $\Delta_0/\lambda \approx 0,15$, см. рис. 4, з)

приводит к резкому уменьшению скорости роста возмущения, а увеличение прочности материала приводит к быстрому торможению и остановке развития возмущения на самой начальной стадии.

Интересно отметить существенную разницу развития возмущения в случаях глины и студня. Студень, использованный в приведенных выше опытах, имеет низкую прочность (~ 10 кПа) [9],

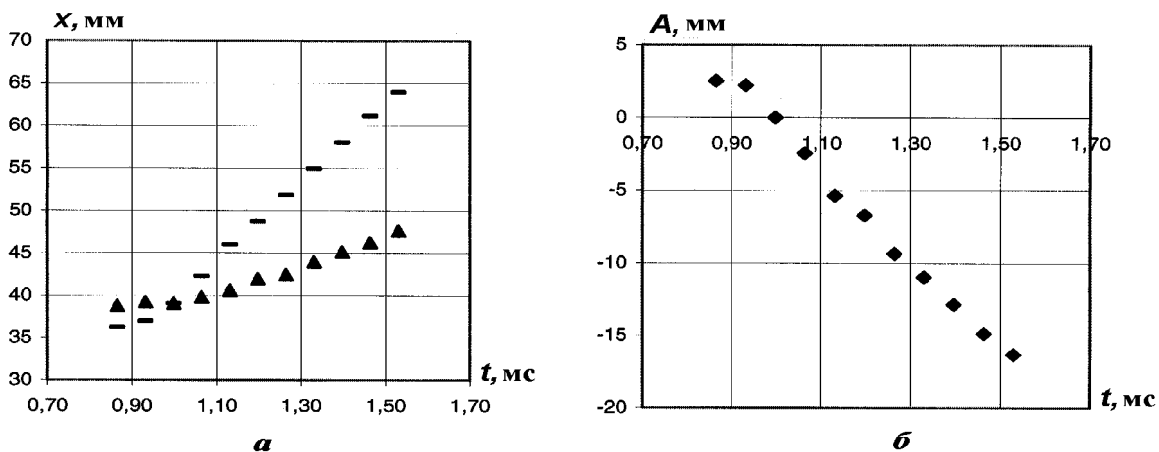


Рис. 7. Результаты обработки опыта 3: *a* — (X, t) -диаграмма исследуемой границы; ▲ — вершины горбов начального возмущения; — — нижние точки впадины начального возмущения; *б* — зависимость от времени амплитуды возмущения исследуемой границы

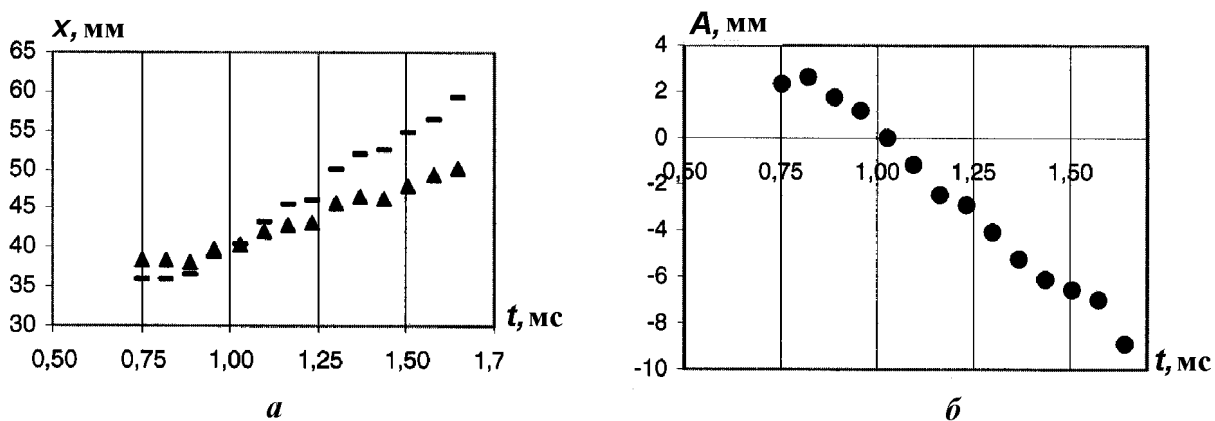


Рис. 8. Результаты обработки опыта 4: *a* — (X, t) -диаграмма исследуемой границы: ▲ — вершины горбов начального возмущения; — — нижние точки впадины начального возмущения; *б* — зависимость от времени амплитуды возмущения исследуемой границы

но характер развития возмущения слоя студня в опыте 1 (см. рис. 4, *a*) существенно отличается от наблюдаемого в аналогичном опыте с глиной (опыт 3). Возмущение не только перестает расти, но и на определенном этапе начинает уменьшаться по амплитуде (см. рис. 5). Этот удивительный, на первый взгляд, результат можно объяснить, если вспомнить о резком различии упругопластических свойств используемых материалов. Если студень имеет аномально протяженный участок упругой деформации при практическом отсутствии пластического участка [9], то глина, наоборот, обладает ярко выраженными пластическими свойствами при практически

полном отсутствии упругого участка. В результате в опыте 1 развившиеся струи студня, после того как на них перестает действовать растягивающее усилие, начинают быстро уменьшаться по длине подобно растянутой и отпущенной пружине. В то же время струя растянутой глины в опыте 3 остается в этом состоянии и после снятия нагрузки.

На рис. 9 приведено сравнение результатов экспериментов с оценками, полученными по выражению (2). Для экспериментальных точек, соответствующих опытам со студнем, использовались значения скорости возмущений на начальном этапе их развития, когда упругие свойства

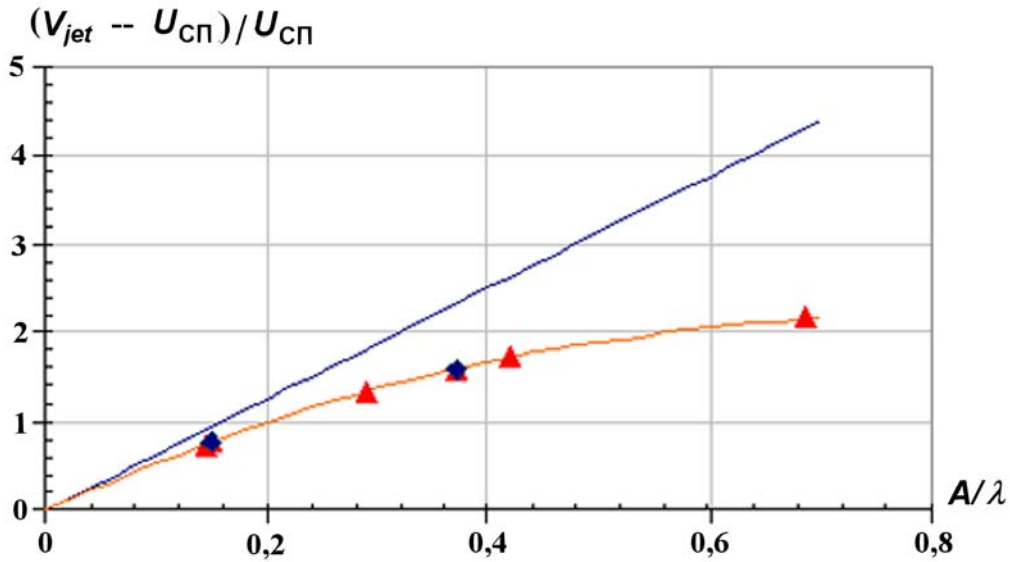


Рис. 9. Отношение относительной скорости головной части струи ($V_{jet} - U_{сп}$) к скорости свободной поверхности $U_{сп}$: ▲ — эксперименты со студнем; ◆ — эксперименты с глиной; — — зависимость Рихтмайера; - - — результаты данной работы

образцов не оказывали еще существенного влияния на развитие процесса нарастания неустойчивости. Видно, что классическое выражение для скорости роста неустойчивости, полученное Рихтмайером ($V_{jet} \approx U_{FS} (1 + (ak))$), не описывает экспериментальных данных при больших начальных амплитудах возмущений. Это свидетельствует о нелинейном, кумулятивном характере рассматриваемых возмущений.

Заключение

В работе показано, что развитие неустойчивости на СП конденсированного материала при выходе на эту поверхность УВ носит характер кумулятивного струеобразования. Получены выражения, позволяющие оценивать скорость нарастания амплитуды возмущений в рассматриваемом процессе в зависимости от некоторых начальных и граничных условий. В пределе малых начальных амплитуд возмущений полученное выражение сводится к классической формуле Рихтмайера. На специально созданной экспериментальной установке — двухпоршневой ударной трубе — проведены эксперименты, демонстрирующие качественное согласие с теоретическими результатами.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05—01—00083).

Список литературы

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах их диагностики // ФГВ. 1998. Т. 34, № 6. С. 103—107.
2. Dunning M. J., Jacoby B. Ejecta production from shocked metal samples // The Fourth Zababakhin Scientific Talks. RFNC-VNIITF, Chelyabinsk region, Russia. October 16—20, 1995.
3. Лебедев А. И., Игонин В. В., Низовцев П. Н., Раевский В. А., Соловьев В. П. Исследования неустойчивости свободной поверхности твердых тел при ударно-волновом воздействии // Тр. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. Вып. 1. С. 590—597.
4. Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А. Метод расчета гидродинамических течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых переменных //

- Докл. АН СССР. 1984. Т. 278, № 4. С. 829—833.
5. *Забабахин Е. И.* Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.
 6. *Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.* Физические аспекты кумуляции // ФГВ. 1980. № 5. С. 26—40.
 7. *Richtmyer R. D.* Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Commun. Pure Appl. Math. 1960. Vol. 13. P. 297.
 8. *Бахрах С. М., Безрукова И. Ю., Ковалева А. Д., Косарим С. С., Ольхов О. В.* Кумулятивный характер неустойчивости поверхности конденсированного вещества при ударноволновом нагружении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 14—25.
 9. *Близнецов М. В., Мешков Е. Е., Невмержицкий Н. В., Низовцев П. Н., Сеньковский Е. Д., Сотсков Е. А., Точилина Л. В.* О возможности моделирования некоторых аспектов развития рэлей-тейлоровской неустойчивости в прочных средах // Там же. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1999. Вып. 3. С. 54—57.
-