

Проявления неустойчивости при схлопывании металлических облицовок кумулятивных зарядов и в родственных струйных течениях динамически деформируемых профилированных тел

© А.В. Бабкин, А.С. Новосельцев, С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлен краткий анализ ряда опубликованных работ, посвященных исследованию особенностей кумулятивного взрыва в условиях возможного развития поверхностной неустойчивости схлопывающейся облицовки кумулятивного заряда. В большинстве работ поверхностная неустойчивость изначально инициировалась гармоническими поверхностными возмущениями или возмущениями параметров задаваемой нагрузки, имитирующей взрывную. Неустойчивость проявлялась в форме развития с течением времени поверхностных возмущений, отсутствие или ограниченный рост рассматривались как сохранение устойчивости деформируемой оболочки. Помимо влияния неустойчивости на кумулятивные процессы были исследованы и родственные им струйные течения. Это так называемое взрывное диспергирование (пыление), происходящее как под воздействием интерференции ударных волн и волн разгрузки, так и при наличии начальных возмущений формы поверхности. Анализ исследований построен в рамках феноменологического подхода — рассматривались как основные результаты опытов, так и их математические описания, которые в большинстве случаев выполнялись с позиций, установившихся в механике сплошных сред, а также с помощью численного моделирования. По результатам были сформулированы выводы о причинах и формах проявления поверхностной неустойчивости схлопывающихся металлических облицовок кумулятивных зарядов, характере развития и параметрах процесса функционирования таких зарядов, а также об особенностях и закономерностях данного процесса.

Ключевые слова: кумуляция, кумулятивный заряд, облицовка, схлопывание, струйное течение, динамическое деформирование, поверхностные возмущения, неустойчивость

Введение. В настоящей статье представлены и проанализированы различные исследования по устойчивости металлических облицовок кумулятивных зарядов (КЗ) и других оболочек при их схлопывании, а также сопутствующих струйных течений профилированных тел при их динамическом деформировании.

Рассмотренные работы [1–30] условно можно разделить на три группы, взяв за предметную основу:

1) работы непосредственно по схлопыванию металлических оболочек (в том числе, металлических облицовок КЗ) под действием взрывного нагружения, учитывая при этом возможную неустойчивость процесса;

2) работы по исследованию развития поверхностных возмущений и струйных течений, отдельных или групповых, возникающих под действием ударной волны;

3) работы по взрывному диспергированию (или «взрывному пылению») металлов и элементов конструкций под действием ударных волн.

У этих трех групп просматривается общий признак: все они предметно заострены на проблематике создания устройств, предназначенных для всестороннего сжатия материалов при сверхвысоких давлениях. Однако работы группы 1 к тому же имеют и самостоятельное значение, так как относятся к традиционной «механической» кумуляции, прежде всего, к ее технологическим аспектам.

Среди приведенных здесь работ [1–30] выделялись использованные авторами методы решения — экспериментальные и расчетно-теоретические. Особое внимание уделялось полученным результатам: физике развития поверхностных возмущений, определяющим параметрам процесса и обобщенным соотношениям, характеризующим процесс развития неустойчивости. Основная цель работы заключалась в оценке текущего состояния этих вопросов.

Неустойчивость при схлопывании металлических оболочек под действием взрыва. По-видимому, первой работой, в которой рассматривались эффекты неустойчивости деформирования металлических оболочек, схлопывающихся под действием взрывной нагрузки, была [1] с численным решением этой задачи. В ней рассматривалось течение имплозивного типа при движении сферической оболочки к центру симметрии. Авторами предполагалось, что форма оболочки может отклоняться от сферической как в начале, так и в процессе схлопывания. На наружной или на внутренней поверхности оболочки задавались начальные гармонические поверхностные возмущения. Изучалось поведение возмущений по мере схлопывания оболочки — их развитие или подавление с течением времени. Одним из выводов, полученных в результате исследования [1], стал следующий: малопрочные сферические оболочки становятся более чувствительными к несовершенству своей формы, чем высокопрочные, а их схлопывание сопровождается более значительным проявлением неустойчивости на внутренней и на внешней поверхности.

В работах [2–4] предполагалось, что процесс развития неустойчивости при схлопывании оболочки связан с технологическими погрешностями при изготовлении кумулятивных облицовок, например их разностенностью, или с несовершенством прикладываемой взрывной нагрузки. Основной целью этого исследования был поиск ограничений в работе КЗ с предварительным тепловым воздействием на его облицовку [5, 6]. Ожидалось, что чрезмерное развитие неустойчивости на поверхности схлопывающейся облицовки может воспрепят-

ствовать последующему нормальному образованию кумулятивной струи.

Схлопывание облицовки исследовалось в рамках численного решения двумерной плоской нестационарной задачи с задаваемыми гармоническими возмущениями формы внутренней или внешней поверхности при наличии воздействия давления на ее наружную поверхность. Рассматривалось динамическое деформирование фрагмента оболочки, угол раствора которого соответствовал половине длины волны задаваемого гармонического возмущения. На тангенциальных поверхностях фрагмента принимались граничные условия симметрии в тангенциальном направлении, чтобы учитывалось деформирование фрагмента в составе оболочки.

Первичный параметрический анализ процесса, проведенный в [2, 3], показал влияние на развитие неустойчивости длины волны и амплитуды начальных поверхностных возмущений, места возникновения возмущений (наружная или внутренняя поверхность) и показателя динамической прочности материала оболочки — динамического предела текучести Y_0 . При этом сначала были выявлены особенности механизма неустойчивости и показано, как начальные малые возмущения формы наружной поверхности в процессе динамического деформирования оболочки могут очень сильно, а в ряде случаев даже тысячекратно, изменять ее форму. Подтверждено существенное влияние на амплитуду возмущений динамической прочности материала Y_0 . Однако, в отличие от работы [1], значительное искажение формы оболочки проявляется лишь на наружной поверхности, тогда как внутренняя поверхность оболочки и ее струеобразующий слой деформируются устойчиво. Более того, возмущения, заданные на внутренней поверхности, стремятся к переходу на наружную поверхность. Было отмечено, что наблюдаемая в данной работе неустойчивость развивается в соответствии с закономерностями инерционной неустойчивости Релея — Тейлора [7–9]. Эффекты ударно-волновой неустойчивости Рихтмайера — Мешкова [10] были признаны не имеющими первостепенной значимости. Было сделано предположение, что причина этого — относительно небольшие давления, присущие работе КЗ.

Экспериментальные работы [7–9] последовали за «численной» работой [1], существенно развивая рассмотренные в ней вопросы неустойчивости схлопывающихся оболочек. В [7] методом импульсной рентгенографии исследованы возмущения на внутренней поверхности сходящихся многослойных тонких цилиндрических оболочек. Такие возмущения порождались многоточечным иницированием заряда, обжимающего оболочки по их наружной поверхности. Внутренняя оболочка многослойного цилиндра выбиралась из стали марки Ст3 или из свинца — для оценки влияния прочности на развитие возмущений. В работе показано, что на всем участке схлопывания

оболочек знак возмущений сохраняется, т. е. не наблюдается колебательного характера их изменения, как это следовало из ряда ранее сделанных предположений. Развитие возмущений до определенной амплитуды происходит ограниченно по времени и в пространстве — на стадии разгона оболочек продуктами взрыва. На последующей (инерционной) стадии до больших сжатий и малых радиусов внутренней оболочки амплитуды возмущений сохраняются практически неизменными. Однако в случае для стали возмущения практически сливаются, образуя область пониженной плотности перед основной частью сходящейся оболочки. Для оболочки из свинца этого явления не наблюдается — сохраняется струйный характер возмущений. На малых внутренних радиусах начинается процесс взаимодействия струй между собой, в результате которого отдельные частицы достигают оси симметрии оболочек. Как следует из экспериментов, прочность материала оболочки оказывает существенное влияние не только на форму, но и на амплитуду возмущений. В частности, выяснилось, что у стальных оболочек амплитуда возмущений примерно в 1,5 раза меньше, чем у свинцовых оболочек.

Существенное влияние сдвиговой прочности на развитие неустойчивости при взрывном схлопывании и последующем торможении оболочек подтверждается экспериментальными данными работы [8]. Варьирование показателями сдвиговой прочности в этой работе проводилось в условиях, когда обжимаемая оболочка частично или полностью была заполнена более плотной средой и могли возникать условия для инерционной неустойчивости Релея — Тейлора. В случае разгона оболочки эта неустойчивость проявлялась в виде роста возмущений на наружной поверхности, тогда как возмущения на внутренней поверхности не развивались. В случае же торможения оболочки все происходило наоборот. Отмечено существование трех так называемых стадий инерционной неустойчивости: «экспоненциальная», «степенная» и «зона турбулентного перемешивания». Для оценочного использования на первой экспоненциальной стадии предложено следующее соотношение для роста амплитуды поверхностных возмущений:

$$a(t) = a_0 \exp \left[t \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} g \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{1/2} \right],$$

где $a(t)$ и a_0 — текущая и начальная амплитуда возмущений; ρ_1 и ρ_2 — плотности материала оболочки и среды; g — ускорение свободного падения; λ — длина волны возмущения.

Предложено рассматривать в качестве критериев перехода из устойчивости к неустойчивости критическую длину волны λ_* и кри-

тическую начальную амплитуду возмущений a_* с вариантами их приближенной оценки согласно следующим соотношениям:

$$\lambda \geq \lambda_* = \frac{4\pi G}{\rho g}, \quad a_0 \geq a_* = \frac{Y_0}{\rho g}, \quad a_0 \geq a_* = \frac{Y_0}{\rho g} \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_*} \right),$$

где G — модуль сдвига; Y_0 — динамический предел текучести.

Путем импульсного рентгенографирования были исследованы разлетная и подлетная стадии движения стальных и свинцовых оболочек с вкладышами из пенопласта. В целом подтверждено, что сдвиговая прочность материала оболочки по отношению к самой оболочке играет стабилизирующую роль, т. е. препятствует потере оболочкой устойчивости при деформировании ее под действием взрывного нагружения.

В исследовании [11] изучалась задача неустойчивого метания оболочки. Предполагалось, что любые дефекты облицовки с длиной волны, большей некоторого критического значения, будут приводить к неограниченному росту возмущений в процессе ее движения. Рассматриваемые начальные отклонения формы оболочки характеризовались длиной волны большей, чем толщина облицовки. Мелкомасштабные возмущения с длиной волны, гораздо меньшей толщины, в данной работе не рассматривались.

При изучении процесса неустойчивости были использованы предложенные авторами модель слабоупругой оболочки, а также инерционная модель. В первом случае характерным элементом является значение величины перепада давления, которое значительно больше предела упругости материала, но меньше модуля Юнга. Предполагалось, что на начальной стадии разгона возникает продольная упругость оболочки с модулем, пропорциональным действующему давлению, которая препятствует расширению оболочки и подобна модели трехмерной среды Треолара. Инерционная модель используется для описания движения метаемой взрывом пластины или оболочки в тех случаях, когда продольной упругостью можно пренебречь.

Результатом исследования в [11] стало появление теории движения неоднородных упругих оболочек при больших ускорениях. Сделано допущение, что существует критическая длина волны начальных возмущений, которая приводит к наибольшему росту их амплитуды, и что длина такой волны пропорциональна средней толщине облицовки на рассматриваемом участке. Были предложены конструкции экспериментальных рельефных облицовок, в которых устраняется хаотическая неустойчивость и одновременно происходит кумуляция энергии и импульса облицовки в соответствии с заданной на ней системой линий, т. е. предприняты шаги по оказанию влияния на пробивное действие облицовок с помощью неустойчивости. Еще один