

**НЕКОТОРЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ  
ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ  
В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

УДК 620.171+539.4.019

**А. М. Молитвин, И. П. Борин, В. С. Босамыкин**

**ВНИИ экспериментальной физики, 607200 Саров**

Прогнозирование стойкости элементов и узлов импульсных энергетических и облучательных установок к разрушающему действию проникающего излучения, связанному с быстрым выделением энергии при взаимодействии проникающего излучения с материалами элементов конструкций, может оказаться недостаточно корректным и привести к ошибочным выводам, если не учитывать возможность проявления геометрических эффектов, приводящих к кумуляции напряжений, кумулятивным выбросам материала, потере устойчивости. Эти эффекты могут, например, возникать при импульсном воздействии мощных потоков проникающего излучения на объекты сложной геометрии: конусы, конические оболочки, диски и стержни.

Возможность кумуляции растягивающих напряжений обусловлена волновыми процессами при тепловом ударе. Впервые эффект кумуляции волн напряжений при тепловом ударе в гидродинамической постановке обнаружен Н. Н. Холиным [1]. Величина и местоположение кумуляции напряжений зависят от геометрии объекта, области прогрева и пространственного распределения источников тепла. Вообще говоря, эффект кумуляции напряжений возникает всегда, даже при полном равномерном нагреве плиты. Это основной фактор, указывающий на недостаточную корректность решения подобных задач в одномерной постановке.

В работах [1, 2], посвященных анализу волновых процессов при тепловом ударе в двумерной осесимметричной постановке задачи, показано, что при полном равномерном мгновенном прогреве до 430 °С алюминиевой плиты (отношение диаметра к толщине  $D/h = 6$ ,  $h = 1$  см) кумуляция волн напряжений достигается в периферийной области и незначительна по величине, тогда как в случае компактного цилиндра ( $D = h = 1$  см) растягивающие напряжения на оси превосходят начальные сжимающие напряжения в 3,4 раза. В области кумуляции волн напряжений материал начинает интенсивно разрушаться.

Изучение эволюции макротрещин при тепловом ударе в плите и компактном цилиндре [1, 2] в рамках связанной модели сплошной поврежденной термоупруговязкопластической среды [3] показало, что положение зоны макроразрушений, обусловленных кумуляцией напряжений, зависит от геометрии прогретой зоны: в случае компактного цилиндра зона макроразрушений располагается вдоль его оси, тогда как в равномерно прогретой плите зона макроразрушений возникает по центру периферийной части плиты.

Цель настоящей работы — постановка задачи и экспериментальная регистрация геометрических эффектов, приводящих к кумуляции напряжений, кумулятивным выбросам материала, потере устойчивости при воздействии мощных потоков импульсного рентгеновского излучения ядерного взрыва на конусы, конические оболочки, диски и стержни.

В качестве объектов для регистрации геометрических эффектов были выбраны стерж-

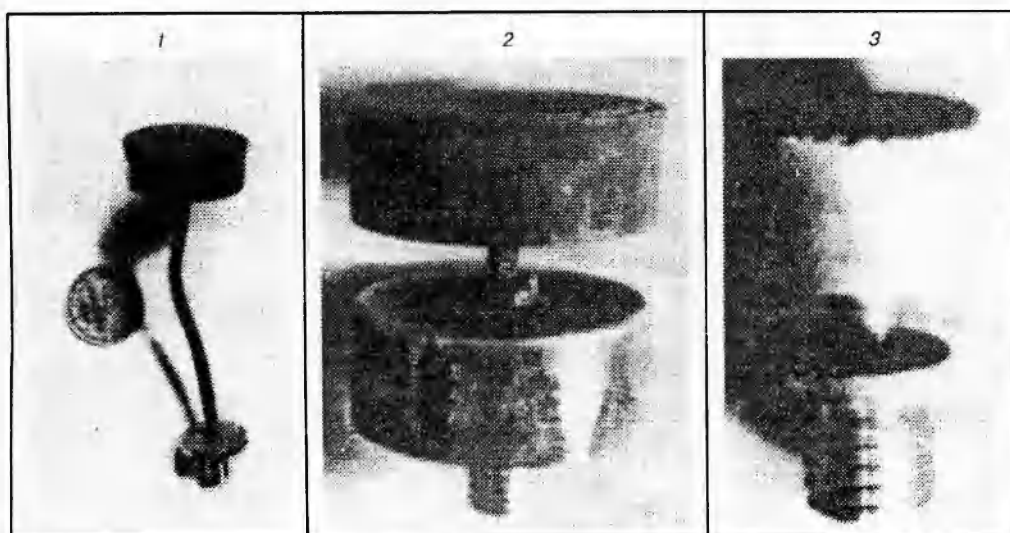


Рис. 1

ни с навесками из дисков, конические оболочки с углами раствора конуса 90 и 45° (с диаметром основания 25 мм), сплошные конусы с диаметром основания 12 мм и углами раствора конуса от 62 до 5° из алюминиевого сплава Д16Т и стали Ст.3.

Исследуемые образцы устанавливались так, чтобы оси их были параллельны направлению облучения. В выполненных экспериментах осуществлялся практически мгновенный и существенно неравномерный по толщине облучаемой конструкции (по сути дела, приповерхностный) разогрев материала рентгеновским излучением ядерного взрыва, приводивший к возникновению большого импульса давления. Представление о степени неравномерности разогрева подвергшихся тепловому удару алюминиевых образцов могут дать следующие цифры. На глубине  $\Delta Z_1 \approx 0,055$  мм от лицевой (обращенной к источнику рентгеновского излучения) поверхности алюминиевого диска концентрация поглощенной энергии составляла 50%, на глубине  $\Delta Z_2 \approx 0,25$  мм — 20%,  $\Delta Z_3 \approx 0,5$  мм — 10%,  $\Delta Z_4 \approx 1$  мм — 5%,  $\Delta Z_5 \approx 10$  мм — 0,27% от концентрации поглощенной энергии на

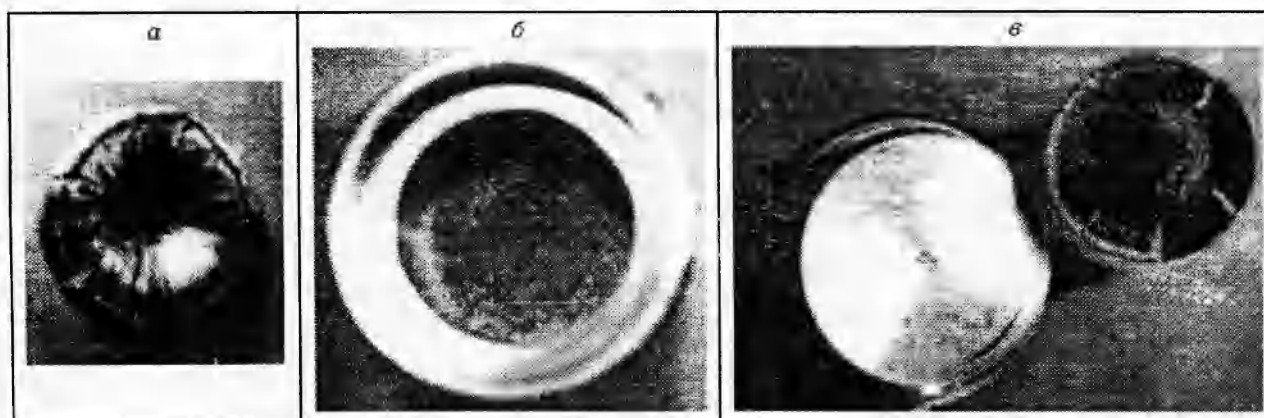


Рис. 2



Рис. 3

лицевой поверхности алюминиевого диска. Концентрация поглощенной энергии уменьшалась в 10 раз на глубине приповерхностного слоя  $\Delta d_1 \sim 0,3$  мм в алюминиевом коническом образце с углом раствора конуса  $62^\circ$  и  $\Delta d_2 \sim 0,03$  мм в алюминиевом коническом образце с углом раствора конуса  $7^\circ$ . Наблюдавшаяся при этом картина разрушения подвергшихся тепловому удару образцов оказалась зависящей как от интенсивности рентгеновского излучения, так и от геометрии облучавшихся образцов и физико-химических свойств материалов, входящих в их состав.

Результат воздействия теплового удара на стержни с навесками из дисков, конические оболочки и на сплошные конусы из алюминиевого сплава Д16Т, находившиеся в одинаковых условиях облучения, показан на рис. 1–5. Пять конусов были облучены в 3,5 раза большим по величине флюенсом энергии рентгеновского излучения. Вид конусов после облучения показан на рис. 6, 7 (рис. 6 — вид сверху (а) и сбоку (б), рис. 7 — увеличенное изображение конусов). Для справки заметим, что максимальное энерговыделение на лицевой (обращенной к источнику излучения) стороне объектов в первом случае равно 10,7 кДж/г, а во втором — 37,45 кДж/г.

Волновые процессы сжатия — разгрузки в подвергшихся тепловому удару сравнительно компактных дисках из алюминиевого сплава Д16Т (отношение диаметра дисков 1–3 на рис. 1 к их толщине  $D_1/h_1 = D_2/h_2 = 2,5$  и  $D_3/h_3 = 1,2$ , причем  $h_1 = h_2 = h_3 = 10$  мм) привели к кумуляции растягивающих напряжений, вследствие чего периферийная область заметно отделилась от центральной части дисков (см. рис. 1). На лицевой стороне облученных дисков отмечены также следы испарения, плавления и дробления материала. Полный унос материала вследствие этих эффектов  $\delta \sim 0,6$  мм. Под действием быстрого сильного удара за счет диска-навески стержень теряет устойчивость, изгибается по извилистой многогорбой кривой и при соответствующей нагрузке раскалывается на несколько кусков. Медленно возрастающая нагрузка переломила бы стержень на две почти равные половинки.

Выбор для экспериментов образцов конической формы дал возможность наблюдения кумулятивных эффектов, качественно подобных тем, что наблюдаются в опытах по взрывному нагружению [4, 5].

На конической оболочке из алюминиевого сплава Д16Т с углом раствора конуса  $90^\circ$

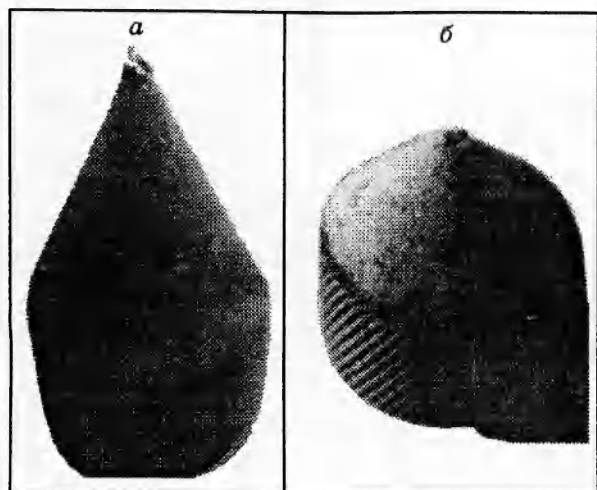


Рис. 4

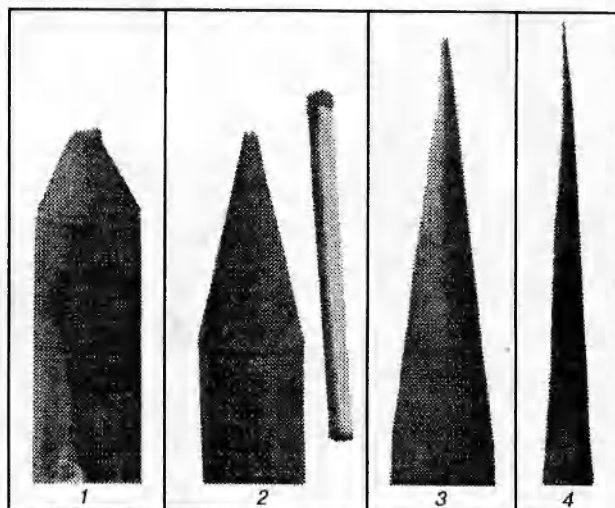


Рис. 5

зарегистрирован кумулятивный выброс из тыльной (теневой) вершины конуса, приведший к образованию небольшого кратера на мишени (см. рис. 2). Произошел и тыльный откол оболочки конуса. Буквой *a* на рис. 2 помечена отколовшаяся тыльная часть конической оболочки, *б* — вид с тыльной (теневой) стороны конической оболочки, *в* — мишень и отколовшаяся тыльная часть конической оболочки.

На конической оболочке из алюминиевого сплава Д16Т с углом раствора конуса  $45^\circ$  зарегистрирован выброс шарика диаметром около 0,9 мм из тыльной вершины конической оболочки, не повредившего мишень (см. рис. 3), зарегистрирован и не полностью заверченный тыльный откол (*a* — вид с тыльной (теневой) стороны конической оболочки, *б* — мишень (слева) и шарик диаметром 0,9 мм, выброшенный из вершины конической оболочки (показан стрелкой)).

На конических оболочках из стали Ст.3 таких же размеров эти эффекты не зарегистрированы, так как кумуляция напряжений при тепловом ударе оказалась в них незначительной по сравнению с кумуляцией напряжений, имевшей место в образцах из алюминиевого сплава Д16Т.

Заметим, что геометрия этих сборок такова, что толщины конических оболочек в направлении, нормальном к поверхности конуса, были примерно одинаковы для обоих типов оболочек ( $\Delta d \approx 4$  мм), в то время как толщины оболочек  $\Delta r$  в направлении, нормальном к оси конуса, и  $\Delta Z$  в направлении облучения заметно отличались:  $\Delta r \approx \Delta Z \approx 5,7$  мм для конической оболочки с углом  $90^\circ$  и  $\Delta r \approx 4,34$  мм,  $\Delta Z \approx 10,5$  мм для конической оболочки с углом  $45^\circ$ .

Кумуляция напряжений в конических оболочках может привести не только к кумулятивному выбросу из тыльной (теневой) вершины конической оболочки, но и к объемному разрушению, вследствие чего вершина конуса приобретает зубчатую форму (см. рис. 4, где показан результат воздействия теплового удара на конические оболочки из Д16Т с углами раствора конуса 45 и  $90^\circ$  (*a* и *б*)).

Особенно наглядно этот эффект зарегистрирован на сплошных конусах 1–5 из алюминиевого сплава Д16Т с углами раствора 62; 27; 14; 7;  $5^\circ$  соответственно, показанных на

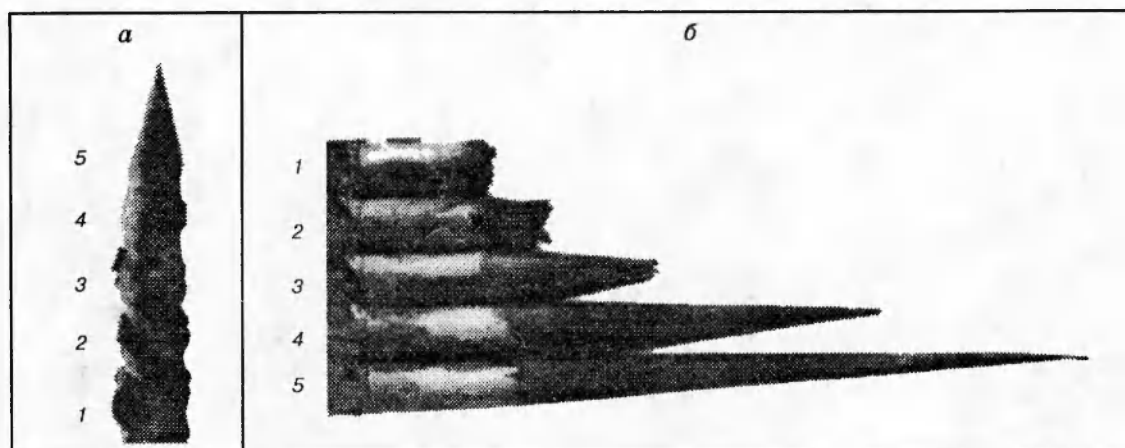


Рис. 6

рис. 5–7, где оси конусов совпадают с направлением облучения.

Следствием теплового удара являются изгиб и частичное разрушение конца остроконечной конической иглы высотой 13,74 см (5 на рис. 6, 7), практически полное разрушение конуса высотой около 1 см (1 на рис. 6, 7), сильное разрушение с расщеплением верхней части конуса высотой около 2,5 см (2 на рис. 6, 7) и значительно более слабая степень разрушения конусов 3 и 4 на рис. 6, 7. Аналогичные конусы, подвергшиеся воздействию в 3,5 раза меньшего по величине флюенса энергии рентгеновского излучения (рис. 5), претерпели значительно меньшее разрушение. Таким образом, с уменьшением угла раствора конуса в диапазоне от  $62^\circ$  до  $5^\circ$  снижаются эффект кумуляции напряжений и степень разрушения подвергшихся тепловому удару конусов, а увеличение флюенса энергии падающего рентгеновского излучения приводит к более яркому проявлению эффекта кумуляции напряжений и как следствие к увеличению степени разрушения подвергшихся тепловому удару конических образцов.

Из изложенного следует, что геометрические эффекты уменьшают порог разрушения и увеличивают степень разрушения облучаемого объекта за счет кумуляции напряжений, возникновения кумулятивных выбросов материала и потери устойчивости при импульсном воздействии мощных потоков проникающего излучения на конусы, конические оболочки,

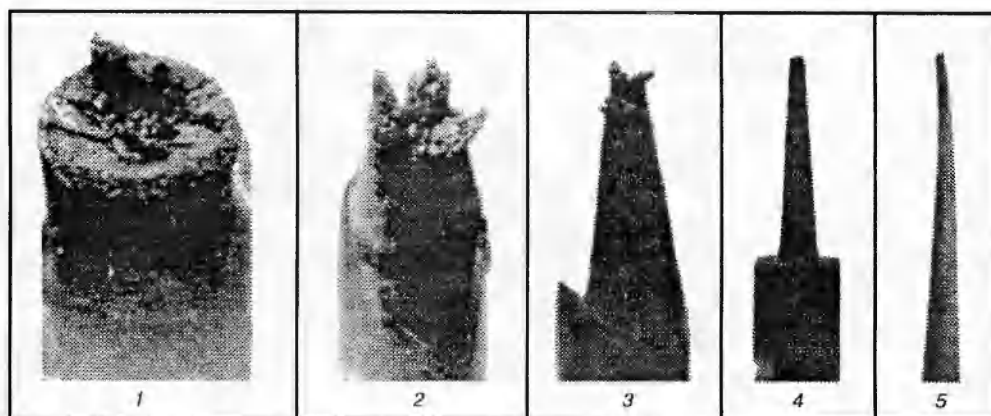


Рис. 7

диски и стержни.

Геометрические эффекты должны стать предметом дальнейших исследований, поскольку учет их необходим при определении стойкости конструкций к разрушающему действию теплового удара, обусловленного быстрым разогревом материалов конструкций проникающим излучением. Количественные оценки для описания зарегистрированных явлений могут дать двумерные расчеты, провести которые на данном этапе работы оказалось трудно вследствие малости объемов интенсивно прогретых областей (доли миллиметра).

Дальнейшие исследования с использованием расчетно-теоретических моделей разрушения позволят выработать рекомендации по прогнозированию и путям повышения стойкости элементов, узлов, конструкций, обладающих различными геометрическими формами и работающих в условиях высокого темпа ввода энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Аптуков В. Н., Поздеев А. А.** Деформирование и разрушение плиты при тепловом ударе // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286, № 1. С. 103–106.
2. **Аптуков В. Н.** Деформирование и разрушение плиты при поглощении электромагнитного излучения большой мощности // Пробл. прочности. 1987. № 12. С. 82–87.
3. **Аптуков В. Н.** Модель термоупруговязкопластической поврежденной среды. Приложение к откольному разрушению // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 2. С. 120–130.
4. **Шалль Р.** Физика детонации // Физика быстропротекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 1. С. 276–349.
5. **Физика взрыва** / Под ред. К. П. Станюковича. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1975.

*Поступила в редакцию 9/III 1995 г.,  
в окончательном варианте — 21/VII 1995 г.*

---