

видно, что ударное и термическое упрочнения идут по разным законам. Интересно, что линейные зависимости предела прочности при растяжении от твердости имеют для всех изученных сталей одинаковые углы наклона, свидетельствующие об одинаковом механизме упрочнения ударными волнами. Физическая причина различия ударного и термического упрочнения металлов известна: ударные волны влияют главным образом на реальную структуру (дробление кристаллитов, разориентация блоков, дислокации, двойники), а термическая обработка изменяет атомную структуру (фазовый состав) металла.

Приведенные выше данные — результат многократно повторенных опытов. Для проверки общности полученного закономерного (одинакового) наклона кривых  $\sigma_v$  ( $HV$ ) поставлены отдельные опыты для сталей марок ХВГ и 40Х13, которые дали такой же угол наклона, что и в исследованных ранее сталях.

Таким образом, зная исходные параметры твердости и прочности металла перед ударным воздействием, можно с достаточной точностью определить прочность после ударного упрочнения по измеренному значению твердости. Это может оказаться полезным при ударном упрочнении деталей, конструкция которых не позволяет изготовить образец для проведения прямых механических испытаний.

*Поступила в редакцию 3/1 1985*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
2. Г. Н. Эпштейн. Стрoение металлов, деформированных взрывом. М.: Металлургия, 1980.
3. З. М. Гелунова, Д. П. Ченрасов. — В кн.: Металловедение и прочность материалов. Вып. 1. Волгоград, 1972.

### ПРЕЖДЕВРЕМЕННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

*Р. З. Людаев, Л. Н. Пляшкевич, А. М. Шувалов  
(Москва)*

Работа магнитокумулятивного генератора (МКГ) сводится к сжатию проводящего контура с предварительно введенными в него магнитным потоком проводниками, ускоренными при детонировании заряда ВВ. Под действием сил магнитного поля проводники в МКГ обычно передают давление на расположенное в непосредственной близости ВВ. Для нормальной работы генератора необходимо, чтобы каждый элемент заряда ВВ сохранял свою работоспособность в течение времени введения начального магнитного потока, а также в начальные моменты работы генератора до того, как этого элемента достигает фронт детонации, возбужденной системой иницирования. Однако при магнитном поле  $\sim 20-30$  Тл давление  $\approx 0,2-0,4$  ГПа, что может вызвать пластическую деформацию ВВ. При длительности порядка десятков микросекунд это воздействие может оказаться достаточным для развития в заряде ВВ начальных стадий взрывчатого превращения.

Такое явление имело место в опытах с дисковым МКГ [1], изображенным на рис. 1. Магнитная кумуляция здесь осуществляется боковыми стенками внутреннего проводника короткого коаксиала под действием расположенного внутри дискового заряда ВВ, иницируемого из центра. Момент иницирования синхронизован с конденсаторной батареей так, что контур генератора замыкается при максимуме начального тока. В опытах использовался заряд пластического ВВ на основе тэна [2].

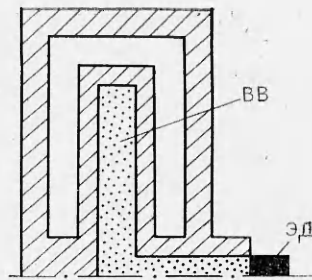


Рис. 1. Схема коаксиального дискового магнитокумулятивного генератора.

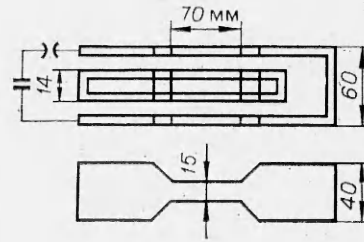


Рис. 2. Плоский МКГ.

В генераторе с толщиной стенок дисковой кассеты с ВВ 2 мм, толщиной заряда ВВ 10 мм и диаметрами  $D_1 = 14$  и  $D_2 = 200$  мм, защитываемым за время 90—100 мкс, максимальное магнитное поле в момент максимума начального тока составляло  $\sim 26$  Тл (магнитное давление  $\sim 0,27$  ГПа). В опытах наблюдалось возбуждение только центральной части дискового заряда ВВ, далее детонация, распространяющаяся от системы инициирования, затухала и весь заряд оставался неподорванным. Эффект устойчиво повторялся от опыта к опыту, избежать его удалось, снизив начальное магнитное поле за счет увеличения  $D$ . По-видимому, этот режим работы МКГ можно объяснить развитием в наиболее нагруженной центральной части заряда начальных стадий реакции разложения, не передающейся на остальные участки. Фронт детонации, который распространяется от системы инициирования, уже не может преодолеть возмущенную зону заряда.

Возникновение начальных стадий взрывчатого превращения наблюдалось также в исследованиях чувствительности ВВ к слабым ударным волнам [3—6] для тротила, тетрила, сплава ТГ при давлениях порядка нескольких десятых гигапаскаля и времени воздействия порядка десятков микросекунд, причем с увеличением времени — при меньших давлениях. Форма импульса давления, действующего на ВВ в МКГ, отличается от такового в ударной волне: в МКГ давление обычно непрерывно нарастает до момента подхода фронта детонации. Но поскольку давления в слабых волнах невысоки, можно приближенно полагать, что при аналогичных параметрах импульса воздействие на ВВ будет в обоих случаях аналогичным.

Для проведения прямых наблюдений превращения заряда ВВ использован плоский МКГ (рис. 2). Наружные шины генератора, выполненные из меди толщиной 5 мм, утяжелялись свинцом. Внутри размещалась короткозамкнутая кассета с ВВ, образованная медными полосками толщиной 2 мм. Для локализации максимального воздействия на ВВ сделаны боковые вырезы, сужавшие генератор до 15 мм. Наблюдение осуществлялось с боковой поверхности генератора. В качестве заряда использовалось пластическое ВВ, а также сплав ТГ 50/50. В опытах регистрировалось также прохождение фронта детонации через деформируемый участок заряда ВВ.

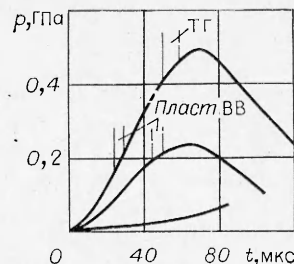


Рис. 3. Профили давления, действующего на наружную поверхность кассеты с ВВ в средней точке ее сужения в различных опытах. Прямыми линиями отмечено начало появления видимых струй продуктов разложения ВВ.

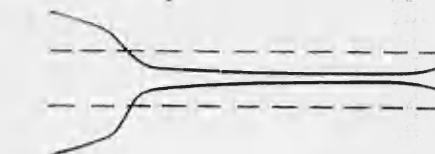
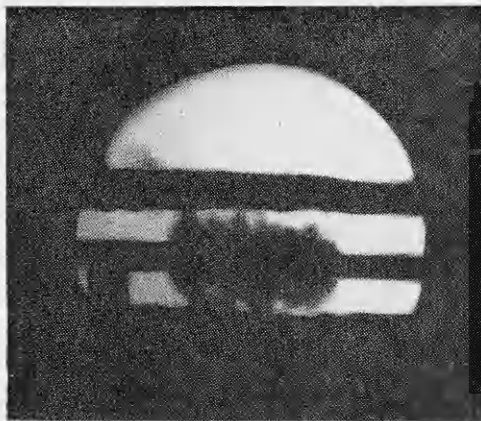


Рис. 5. Профиль стенок суженной части кассеты с ВВ. Детонация не проходит через суженную часть кассеты. Штриховыми линиями показано начальное положение стенок.

Рис. 4. Плоский МГГ с пластическим ВВ. Вид сбоку,  $t = 44$  мкс.

МГГ питался конденсаторной батареей емкостью 6000 мкФ. Индукционный датчик размещался в конечной части генератора. Из-за разрывов паружных шин при работе МГГ ток не увеличивался, однако это не столь существенно, поскольку основной вклад в развитие деформаций в данном случае вносит начальный ток. На рис. 3 приведены значения давления  $p$  на поверхность кассеты, равного разности магнитных давлений на поверхности и внутри кассеты. Соответствующее эффективное магнитное поле посередине узкой части кассеты  $\sim (0,23 \cdot 10^{-4}) \times I$ , где  $I$  — ток в паружной шине, при этом поле в заряде ВВ полагается равным нулю.

При  $I_{\max} \approx 600$  кА и  $p_{\max} \approx 0,07$  ГПа (индекс max обозначает значение величины в момент максимума тока) не отмечено никаких следов изменения заряда пластического ВВ. В опытах при  $I_{\max} \approx 1$  МА,  $p_{\max} \approx 0,23$  ГПа через  $\sim 50$  мкс от начала токового импульса при  $p \sim 0,2$  ГПа появляются первые, слабо видимые песветящиеся струи продуктов разложения ВВ. В дальнейшем они все более развиваются, заполняя в суженной части генератора все междушинное пространство. Наблюдается деформация заряда — часть ВВ выдавливается из-под кассеты, поэтому толщина его несколько увеличивается. Отмечаются очаги свечения в зазорах между ВВ и стенками кассеты, а также между отдельными листами пластического ВВ (заряд набран по толщине из четырех отдельных листов). Однако степень деформации оказывается не значительной, и фронт детонации, подходящий к деформируемому участку при  $t = 90$  мкс, преодолевает его без осложнений.

В случае  $I_{\max} \approx 1,5$  МА,  $p_{\max} \approx 0,5$  ГПа первые струи продуктов разложения заметны через  $\sim 25-30$  мкс при  $p \sim 0,16 \div 0,2$  ГПа. В дальнейшем они сильно разрастаются, заполняя полость генератора (рис. 4). Примерно с  $t = 50 \div 60$  мкс начинается горение с обильным выделением продуктов по всей видимой боковой поверхности деформируемой зоны. Иногда наблюдалось развитие электрического пробоя по продуктам разложения. При  $t \approx 90$  мкс к деформируемому участку подходит фронт детонации, останавливается и далее не распространяется. В таких случаях после опыта видны остатки ВВ со следами копоти и горения. На рис. 5 приведен профиль кассеты с ВВ, полученный импульсной рентгенографией ( $t = 120$  мкс). К этому моменту фронт детонации должен был миновать деформированный участок. Однако движения стенок кассеты над деформированным участком и далее не наблюдается. К этому времени толщина заряда ВВ сократилась до 2 мм.

С той же величиной  $I_{\max}$  использовался заряд из сплава ТГ 50/50. При  $t \approx 50 \div 60$  мкс ( $p \approx 0,4 \div 0,46$  ГПа) отмечается появление первых струй, которые затем становятся гуще, однако существенно короче, чем для пластического ВВ. Более интенсивное горение (рис. 6) начинается с  $t \approx 90$  мкс. За время наблюдения оно не распространяется на соседние области.



Рис. 6. Плоский МКГ с зарядом из ТГ 50/50,  $t = 120$  мкс.

Проведенные опыты наглядно показывают, что под действием магнитного давления в заряде ВВ в МКГ может развиваться процесс взрывчатого превращения, что необходимо учитывать при разработке генератора. Полученных результатов недостаточно для определения степени допустимой деформации ВВ, однако они объясняют, например, результаты опытов с описанным дисковым МКГ, где внутри зоны с диа-

метром  $\sim 15$  мм будет интенсивно разлагаться заряд.

В результате возникновения горения части заряда ВВ может также нарушаться характер движения проводника, что ухудшает работу МКГ даже, если детонация не затухает. Струи продуктов разложения вызывают электрические пробой внутри МКГ, а при переходе возникшего горения в детонацию развивается произвольного характера аварийный подрыв заряда ВВ.

Выбор способа предохранения заряда существенно зависит от конкретной конструкции МКГ. Например, опасность снижается применением в заряде менее чувствительных к механическому воздействию ВВ, однако такие ВВ обладают и меньшей удельной энергоемкостью, что уменьшает выходную энергию МКГ. Если магнитное давление неравномерно в разных точках поверхности кассеты, то такая замена производится только в наиболее напряженной зоне.

Следует указать на возможность применения импульсов магнитного давления для изучения поведения ВВ при давлениях в  $p \sim 0,1 \div 10$  ГПа и времени воздействия порядка десятков и сотен микросекунд. Такие импульсы получить этим способом существенно легче, чем методами гидродинамики. Можно выбрать простую конфигурацию проводников, что позволит по измеренному магнитному полю измерять временной ход давления, имеется возможность в широких пределах варьировать продолжительность и форму импульса. Прозрачность магнитного поля позволяет при этом вести непрерывные наблюдения за состоянием ВВ.

*Поступила в редакцию 12/VII 1984,  
после доработки — 22/II 1985*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Павловский, Р. З. Людаев и др.— В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. М.: Наука, 1984.
2. D. Stripl, J. Johnson, J. Wackerle. J. Appl. Phys., 1970, 41, 9.
3. С. Г. Андреев и др. ФГВ, 1979, 15, 6.
4. В. С. Соловьев и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногородка, 1977.
5. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак и др. ФГВ, 1977, 13, 2.
6. Ю. В. Батьков, С. А. Новиков и др. ФГВ, 1979, 15, 5.