

# ПРОЧНОСТЬ. КОНВЕРСИЯ

И. В. ЗАНЕГИН, В. Н. ХВОРОСТИН

Для исследования поведения и оптимизации конструкций как создаваемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ, так и эксплуатирующихся в различных отраслях промышленности, требуются знания прочностных свойств обширного перечня конструкционных материалов, в том числе взрывчатых веществ и радиоактивных материалов при ударно-волновом и квазистатическом нагружениях.

В ИФВ разработано множество экспериментальных методик нагружения образцов материалов при скоростях деформации от  $10^2$  до  $10^9$  с<sup>-1</sup> в широком диапазоне изменения температур и времени нагружения. Многие из этих направлений исследований в связи с модернизацией и расширением в ИФВ методической и расчетно-теоретической базы получают свое логическое продолжение и развитие в настоящее время.

Разработана и внедрена в практику пневматическая пушка для метания образца в методе Тейлора и ударника в методе составных стержней Гопкинсона, что наряду с модернизацией информационно-измерительной системы для регистрации сигналов позволило создать удобный лабораторный комплекс (рис. 1) для проведения исследований динамического деформирования конструкционных материалов. Проведены исследования влияния размера зерна и условий предварительного нагружения на динамическую прочность и структурные изменения, происходящие в материале. Полученные экспериментальные данные применяются для уточнения расчетно-экспериментальных моделей опи-

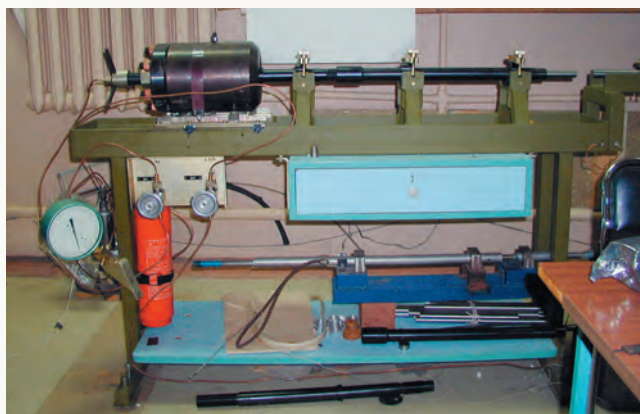


Рис. 1. Установка для метания образцов в методе Тейлора

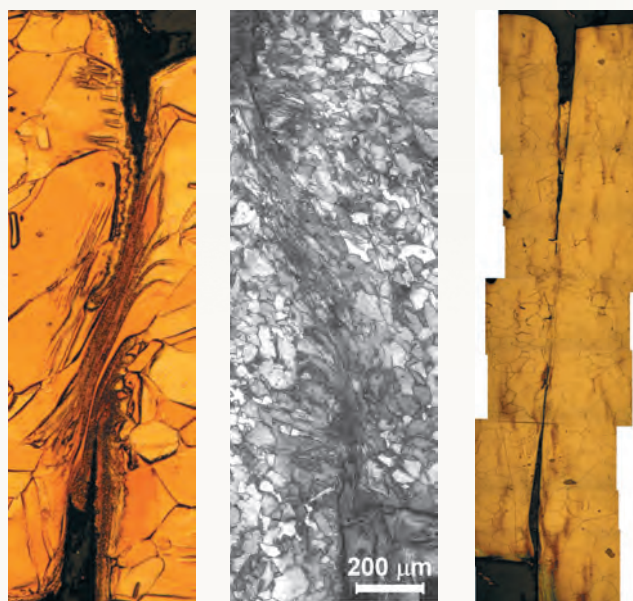


Рис. 2. Адиабатический сдвиг в меди М1, стали 09Г2С и стали ЭП543

сания поведения конструкционных материалов при динамическом нагружении и работы изделий в целом. Широко проводятся исследования локализованного адиабатического сдвига в различных материалах (рис. 2), что позволяет исследовать их поведение при скорости деформации до  $10^7$  с<sup>-1</sup> в узкой полосе материала и прогнозировать процессы разрушения.

Развитие численного моделирования и сквозного проектирования наших изделий требует уточнения прочностных и термодинамических характеристик конструкционных материалов. Это в свою очередь требует развития прецизионных установок и новых методик измерений и методов испытаний. С этой целью в ИФВ создается комплекс стационарных газодинамических метательных установок «ЭКИП» для исследований материалов в широком диапазоне скоростей нагружения 0,1–4 км/с и скоростей деформации  $10^2$ – $10^8$  с<sup>-1</sup>. Некоторые установки уже изготовлены (электровзрывная установка ЭВУ, пороховая нагружающая установка калибром 100 мм (рис. 3)), и на них начаты экспериментальные исследования.

В введенной в эксплуатацию в 2004 г. камере высокого давления (рис. 4) проведены ис-



Рис. 3. Пороховая нагружающая установка

следования с целью развития и валидации расчетных методик по действию взрыва ВВ на макет шпации подводной лодки, на сферические крешеры, эффективности действия пластизольных взрывчатых составов и др. Особый интерес вызывает перспективная работа по расчетно-экспериментальному исследованию возможности защиты подводных объектов с помощью

конструктивного расположения гибких защитных слоев, самогерметизирующихся при нарушении их целостности (например, при пробитии кумулятивной струей).

Значительный прогресс за последние годы достигнут в области математического моделирования динамического поведения материалов. В основе моделей лежат современные представления о дислокационном механизме деформирования. Модели описывают основные эффекты ударно-волнового нагружения: релаксацию упругих предвестников, структуру фронта за упругим предвестником, скорость нарастания нормального напряжения до его максимального значения, структуру волн разгрузки и т. д. Кинетическая модель откольного разрушения внедрена в практику газодинамических расчетов и протестирована на большом количестве материалов.

Изучение динамических прочностных свойств материалов, получение их количественных характеристик при квазистатических и ударно-волновых нагружениях позволило в последнее десятилетие создать ряд взрывных технологий, которые были успешно применены сотрудниками ИФВ как в различных отраслях отечественной промышленности, так и в международном сотрудничестве с зарубежными партнерами.

Одной из наиболее интересных из разработанных взрывных технологий является технология фрагментации стальных конструкций, основанная на результатах фундаментальных

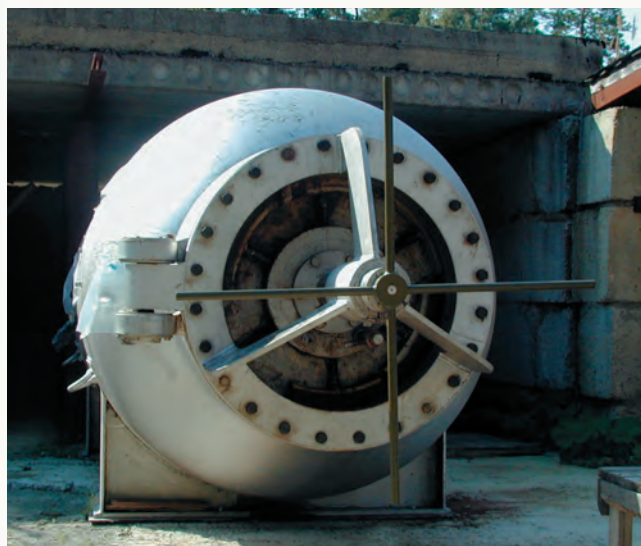


Рис. 4. Внешний вид камеры высокого давления. Диаметр камеры — 1600 мм, длина — 5 м; оснащена двумя люками диаметром по 800 мм; максимальное начальное давление до 40 МПа; масса подрываемого внутри камеры сферического заряда ВВ до 0,5 кг тротила

### Постановка опыта



Заряд ВВ

Разрушаемый стальной образец

### Результаты опыта



«Гладкий» откол



Рис. 5. Иллюстрации образования ударных волн разрежения

научных исследований в ИФВ образования гладких отколов при взаимодействии ударных волн разрежения в железе при ударном нагружении выше точки фазового  $\alpha \rightarrow \epsilon$  перехода. При взаимодействии ударных волн разрежения огромные растягивающие напряжения действуют в очень узкой зоне, что и приводит к образованию отколов с очень «гладкой» поверхностью, инициирующих самопроизвольное распространение магистральной трещины по всей массе металла и приводящей к его разрушению (рис. 5). На использовании этого явления разработаны взрывные режущие устройства, предназначенные для демонтажа стальных опор морских нефтяных и газовых платформ. Взрывные устройства предназначены для внутренней и внешней резки толстостенных труб с внешним диаметром 762 мм и толщиной стенок ~51 и ~45 мм. Метод позволяет использовать минимальные количества ВВ, разрезать толстостенные трубы и осуществлять размещение устройства и его функционирование с поверхности, опуская устройство в опору на глубину до 300 м. При подрыве ВВ массой не более 6 кг происходит разделение трубы в месте среза.

Проведенный в рамках договорных работ с ОАО «Газпром» комплекс расчетно-экспериментальных исследований трещиностойкости различных зон двухшовной трубы производства ОАО «ЧТПЗ» позволил выработать новые критериальные подходы для обоснования конструкционной прочности труб, используемых при проектировании современных магистральных газопроводов высокого давления, а также провести оценки возможностей трубы данного производителя сопротивляться развитию катастрофического (протяженного) разрушения и выдать некоторые конкретные рекомендации по ее применению. Выработаны предложения по модернизации действующих и разработке новых методик приемочных испытаний труб большого диаметра для магистральных газопроводов, в том числе с применением методов взрывного нагружения. Созданы новые и адаптированы существующие в ИФВ методики для измерений скорости распространения трещины, деформаций, давления, температуры, которые позволили повысить точность и информативность измерений.

За более чем 40-летний период исследовательских разработок в области сварки взрывом ИФВ

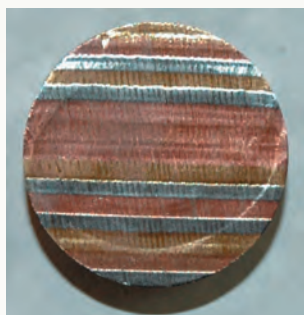
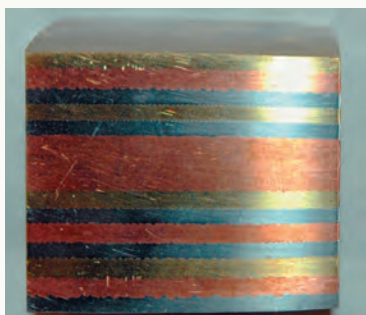


Рис. 6. Результаты сварки взрывом

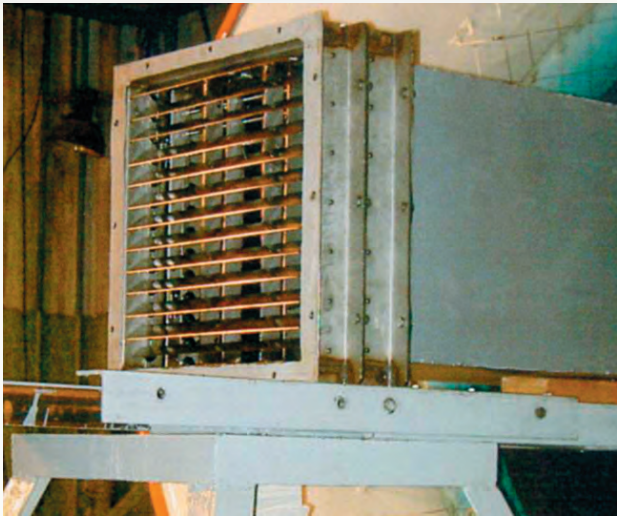


Рис. 7. Типовая конструкция устройства перекрытия вентиляционных каналов

добился уникальных технологических приемов прочного соединения металлов и сплавов (рис. 6). Это — получение матрицы, состоящей из 10 и более различных металлов и сплавов; получение биметаллов для промышленности (Cu–Ti; Ni–Ti; SS–Ti); приваривание стальных фланцев к трубам из ниобия (элемент перспективного криомодуля линейного ускорителя). При сварке взрывом труб применяется внешнее плакирование — в качестве заполнителя для гашения радиальной деформации применяется емкость с водой, а также внутреннее плакирование — для минимизации радиальных деформаций используется созданное в ИФВ смесевое порошковое ВВ, способное устойчиво детонировать ( $D \approx 2$  км/с) в тонких слоях ( $\Delta \approx 2$  мм).

В ИФВ разработано устройство для аварийного перекрытия вентиляционных каналов. Разработка защищена патентом. Устройства предназначены для защиты вентиляционных проемов сооружений АЭС от воздушной ударной волны детонационного взрыва и волны сжатия дефлаграционного взрыва. По направлению воздействия избыточного давления и разрежения



Рис. 8. Установка для фрагментации автомобильных шин и результат фрагментации

рабочей среды они являются устройствами двустороннего действия пассивного типа многократного использования. Конструкция типового представителя такого устройства представлена на рис. 7. Данное устройство по документации ИФВ серийно выпускается ОАО ИМЗ «Купол» и ООО «ГидроТехАтом» г. Ижевск и реализовано в вентиляционных системах зарубежных и российских АЭС.

В ИФВ разработана установка взрывного типа для фрагментации автомобильных шин различных размеров, в том числе и крупногабаритных, на части, пригодные для дальнейшей переработки по существующим технологиям (крошка, пиролиз и т. д.). Принцип действия установки основан на разгоне режущего модуля продуктами взрыва заряда ВВ, локализованного во взрывной камере (рис. 8).

Взрывной генератор давления позволяет более эффективно вести добычу блочного камня (гранит, мрамор и др.), обеспечивая направленный раскол и отсутствие наведенной техногенной микротрещиноватости в зоне разделительных шпуров (рис. 9).

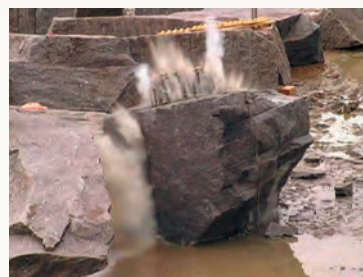


Рис. 9. Работа взрывного генератора давления



Рис. 10. Испытания транспортного контейнера: слева — до испытания, справа — после испытания

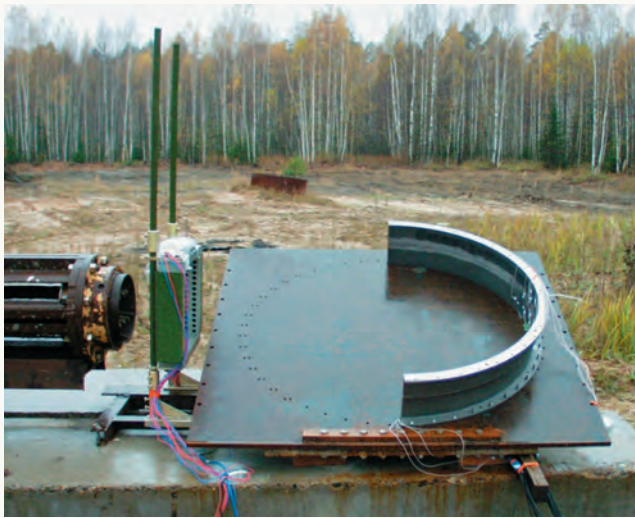


Рис. 11. Постановка опыта и результаты испытаний бронезащиты

На внутреннем полигоне ИФВ проведены испытания противоминной стойкости спецтехники для оснащения силовых структур РФ. На установках серии «Ствол» проводятся испытания транспортных контейнеров, предназначенных для перевозки спецматериалов, испытания на аварийные воздействия, связанные с падением воздушных транспортных средств (самолетов и вертолетов) с больших высот в наиболее опасных условиях соударения контейнера с преградой (рис. 10).

Совместно с ОАО «НПО Сатурн» и ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» успешно проводятся расчетно-экспериментальные работы по разработке проекта комбинированного корпуса первой ступени компрессора низкого давления авиационного двигателя с бронезащитой из композиционных материалов. Одним из этапов этих работ является экспериментальное определение защитных свойств перспективной бронезащиты для обеспечения ударопрочности двигателя при незапланированном аварийном обрыве лопатки компрессора. Типичная постановка испытаний и их результаты приведены на рис. 11.

**ЗАНЕГИН Игорь Владимирович** —  
начальник отдела ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
кандидат технических наук, лауреат премии  
Правительства РФ

**ХВОРОСТИН Владимир Николаевич** —  
начальник лаборатории ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
кандидат технических наук, лауреат премии  
Правительства РФ