

# УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДО ДАВЛЕНИЯ 370 ГПА

Мочалова Валентина Михайловна, Уткин А.В., Николаев Д.Н., Малков Г.В.

Композиционные материалы находят широкое применение в различных элементах конструкций авиационной и космической техники, так как они снижают вес всего изделия, а расход топлива при этом уменьшается. В таких условиях композиты могут подвергаться высоким динамическим нагрузкам, так как велика вероятность столкновения аппарата с космическим мусором или другими мелкими объектами. Поэтому очень важно понимать, как ведет себя при высоких давлениях не только композиционный материал, но и связующий компонент - эпоксидная смола. Подобным исследованиям посвящено немало экспериментальных работ, однако диапазон давлений как правило не превышает 60 ГПа, что существенно ниже тех параметров, которые реализуются при столкновении космических объектов. Целью данной работы является экспериментальное исследование ударной сжимаемости однонаправленного композита на основе углеродных волокон и эпоксидной смолы, являющейся матрицей многих композиционных материалов.

Ударные волны в исследуемых образцах создавались металлическими ударниками, разогнанными продуктами взрыва до 7 км/с. Для исследования ударной адиабаты при давлениях выше 100 ГПа использовались маховские взрывные кумулятивные генераторы. Регистрация профилей массовой скорости осуществлялась лазерным интерферометром VISAR. Показано, что ударная адиабата композита практически не зависит от ориентации углеродных волокон, за исключением области низких давлений, когда массовая скорость не превышает 1 км/с. Влияние ориентации волокон наиболее ярко проявляется на структуре волновых профилей: при продольной ориентации формируется двухволновая конфигурация с амплитудой предвестника от 1.5 до 3 ГПа в зависимости от амплитуды ударного сжатия. В интервале давлений от 23 до 35 ГПа зарегистрирован фазовый переход графит/алмаз, который приводит к характерным изломам на ударной адиабате с отчетливо выраженной областью двухфазного состояния.

Проведены также экспериментальные исследования ударно-волновых свойств двух эпоксидных смол, различающихся температурой полимеризации (160 и 200 °С), в диапазоне давлений до 300 ГПа, что соответствует скоростям столкновения с алюминиевым ударником порядка 20 км/с. Показано, что данные по ударной сжимаемости обоих образцов в пределах экспериментальной погрешности аппроксимируются единой ударной адиабатой, на которой в окрестности 25 ГПа регистрируется излом, свидетельствующий о деструкции эпоксидной

смолы. Выше фазового перехода наблюдается изменение структуры фронта ударной волны, за ударным скачком скорость продолжает плавно возрастать в течение примерно 30-40 нс до своего максимального значения. Проведено сопоставление ударных адиабат эпоксидной смолы и однонаправленного углепластика на основе эпоксидной матрицы до давлений 370 ГПа. Показана применимость аддитивного метода для оценки ударной адиабаты композита при известных ударных адиабатах графита и эпоксидной смолы. При этом удовлетворительно описывается не только зависимость давления от объёма выше и ниже фазового перехода, но и правильно определяется местоположение самого фазового перехода.

Публикации по теме доклада:

Mochalova V., Utkin A., Nikolaev D., Savinykh A., Garkushin G., Kapasharov A., and Malkov G. Shock response of two epoxy resins at up to 330 GPa pressure // Journal of Applied Physics. – 2024.- V. 136. – Issue 4, P. 045902 [doi: 10.1063/5.0217287](https://doi.org/10.1063/5.0217287)

Mochalova V., Utkin A., Nikolaev D. Shock response of unidirectional carbon polymer composite up to pressures of 200 GPa // Journal of Applied Physics. – 2023. – V. 133. – N. 24, P. 245902 [doi.org/10.1063/5.0155414](https://doi.org/10.1063/5.0155414)