

## **Оборудование для испытания листовых конструкционных материалов при двухосном растяжении. Сообщение 1. Испытания односторонним давлением рабочей среды**

**Н. Р. Музыка**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Рассмотрены конструктивные особенности оборудования для исследования прочности и закономерностей разрушения листовых конструкционных материалов при двухосном растяжении путем нагружения образцов односторонним давлением рабочей среды. Предложены решения ряда проблем методического характера, связанных с испытаниями при высоких уровнях давления рабочей среды, что позволяет обеспечить необходимые режимы охлаждения образцов, снизить уровень энергии разрушения, повысить надежность и безопасность испытаний.*

Разработка новых изделий криогенного и химического машиностроения, энергетики, хранения и транспортировки сжиженных газов, повышение эффективности и надежности их работы требуют проведения соответствующих исследований прочности и закономерностей разрушения конструкционных материалов в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Широко известные методики испытаний листовых материалов достаточно сложно реализовать в случае их применения для исследования конструкций (сосудов, мембран и др.), эксплуатируемых при высоких уровнях давления рабочей среды, особенно при температуре, отличающейся от комнатной. Большие трудности возникают при создании испытательного оборудования, удовлетворяющего вышеуказанным условиям нагружения образца, начиная с выбора принципиальной схемы устройства и заканчивая обеспечением мер безопасности проведения испытаний. В связи с этим интенсифицировались поисковые работы по созданию новых методик и средств механических испытаний листовых конструкционных материалов при двухосном нагружении в условиях криогенных температур, в частности при одностороннем давлении рабочей среды.

В данной работе предлагаются возможные технические решения по модернизации существующих испытательных средств и созданию нового оборудования для проведения подобных испытаний, что позволит решить ряд методических проблем.

При испытаниях полых изделий внутренним давлением их разрушение может сопровождаться взрывной волной большой энергии. В этом случае изделие устанавливается в защитный корпус, гасящий энергию взрыва [1]. Обеспечение необходимой прочности корпуса при уровнях давления рабочей среды, исчисляемых сотнями атмосфер, приводит к увеличению его материалоемкости. Однако массивность защитного корпуса обуславливает повышенные теплопритоки к испытываемому изделию, что существенно затрудняет испытания при низких температурах. Для исключения теплопритоков испытываемый сосуд размещается внутри тонкостенной легкодеформируемой емкости, выполняющей роль теплового экрана. Пространство между

емкостью и защитным корпусом вакуумируется, а зазор между емкостью и испытуемым образцом заполняется хладагентом, что позволяет установить фиксированную температуру испытаний при небольшом расходе последнего.

На рис. 1 представлена схема криостата для испытаний сосудов внутренним давлением (до 100 МПа) рабочей среды при низких температурах (до 4 К) [2]. Сосуд 1 размещается внутри тонкостенной емкости 2, повторяющей форму сосуда и предназначенной для создания благоприятных условий охлаждения до заданной температуры испытаний. На наружной поверхности тонкостенной емкости закреплен змеевик 3, соединяющий емкость 2 с газгольдером. Защитный корпус 4 окружен автономной охлаждающей рубашкой 5. Пространство между защитным корпусом 4, тонкостенной емкостью 2 и корпусом 6 криостата вакуумируется. После предварительного охлаждения сосуда жидким азотом его продувают газообразным гелием, а в тонкостенную емкость заливают жидкий гелий, пары которого поступают в змеевик, что повышает эффективность экранирования сосуда от теплопритоков. Нагружение сосуда осуществляется парожидкой смесью гелия под высоким давлением. При его разрушении, сопровождающемся взрывом, тонкостенная емкость разрушается, давление газа в объеме защитного корпуса резко возрастает, вследствие чего диафрагма 7 разрушается, открывая доступ газообразного гелия в газгольдер.

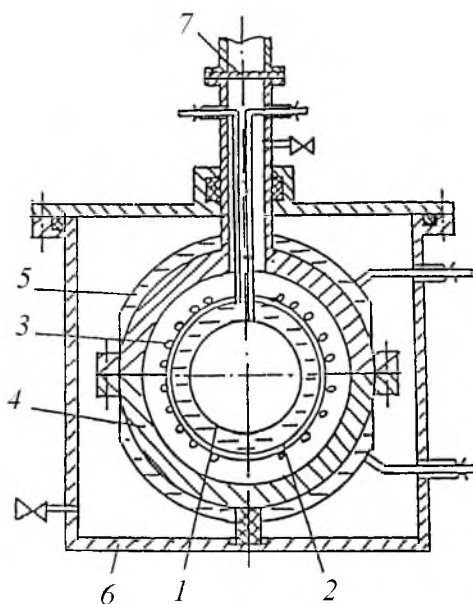


Рис. 1. Схема криостата для испытания полых изделий внутренним давлением.

В существующих конструкциях испытательных устройств для проведения низкотемпературных испытаний плоских образцов односторонним давлением рабочей среды образец закрепляется путем защемления его периферийной части с помощью фланца, зажимной гайки или гидроприжима, снабженного системой генерации давления. При этом с целью предотвра-

щения затягивания в матрицу периферийной части образца ее ширина должна быть не менее  $0,25 \dots 0,3$  диаметра матрицы [3]. Выполнение этого требования приводит к большим габаритам заборного блока и, как следствие, к увеличению его массы, что существенно затрудняет получение требуемой температуры образца при его охлаждении.

На рис. 2 показана схема устройства для испытаний плоских образцов на выпучивание при низких температурах. Для данного устройства характерны низкий уровень рабочих усилий закрепления образца и малая материалоемкость заборного блока [4].

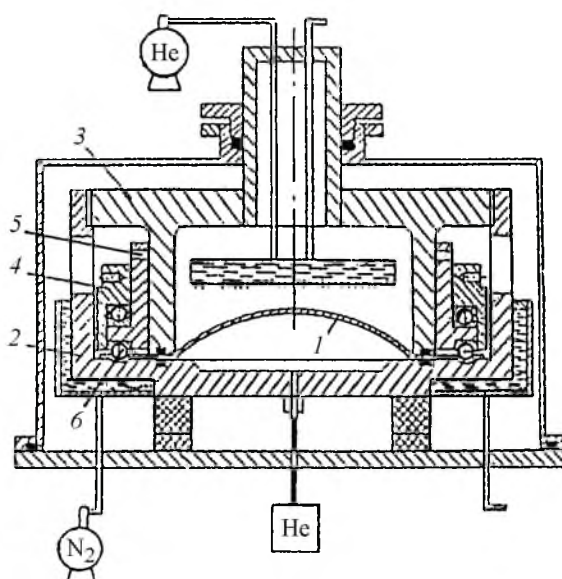


Рис. 2. Схема устройства для двухосного растяжения листового материала.

Образец 1 устанавливается в стакане 2 и зажимается матрицей 3, соединенной со стаканом посредством упорной резьбы. С помощью нажимной гайки 4 и вращения поворотной обоймы 5 производится деформирование фланцевой части образца. При этом шарики 6, обкатываясь по поверхности образца, формируют кольцевой зиг, после чего с помощью нажимной гайки они жестко зажимаются между образцом и обоймой. Охлаждение образца до заданной температуры испытаний осуществляется путем подачи парожидкой смеси гелия к образцу через распылитель. Деформирование образца под действием газообразной рабочей среды сопровождается появлением сил утяжки фланцевой части образца в матрицу. Это приводит к заклиниванию шариков и появлению большой величины сил трения вращения шариков вокруг собственной оси, исключая проскальзывание образца.

Не менее важно принимать меры по снижению уровня рабочего давления в системе нагружения образца. Это особенно актуально при проведении испытаний в условиях низких температур, поскольку рабочая жидкость, применяемая для нагружения образца, становится вязкой или затвердевает.

Так, жидкий азот кристаллизуется при  $T = 63$  К под давлением 1,7 МПа, а жидкий гелий – при  $T = 4,3$  К под давлением 14 МПа [5]. Кроме того, снижение уровня рабочего давления способствует уменьшению материалосмкости запорного блока и повышению безопасности испытаний.

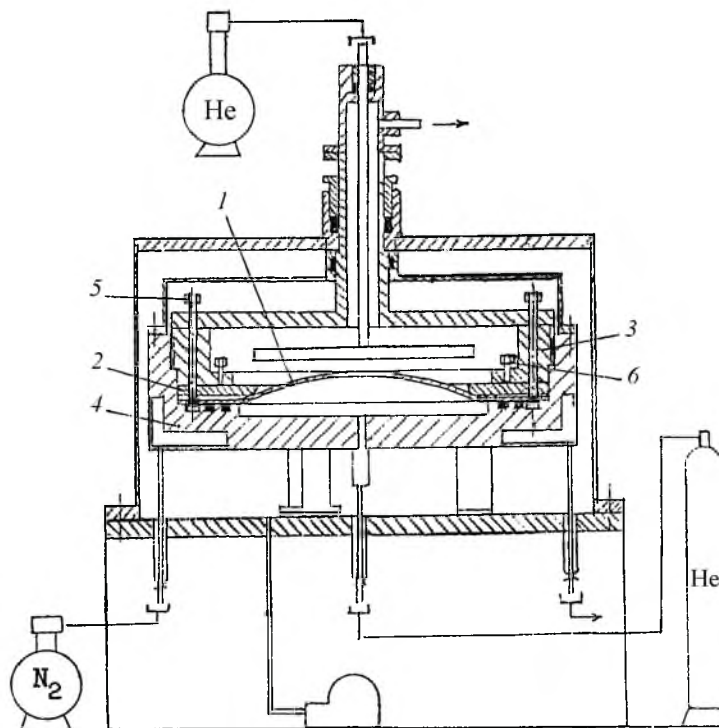


Рис. 3. Схема установки для испытания плоских образцов большого диаметра при низких температурах.

На рис. 3 показана схема установки для испытаний плоских образцов (толщина 1-2 мм, рабочий диаметр 400 мм) односторонним давлением рабочей среды (до 10 МПа) в диапазоне низких температур (20...293 К). При проведении испытаний в нормальных температурных условиях образец 1 по периферийной части закрепляется в матрице 2 с помощью гайки 3 и равномерно расположенных над кольцевой канавкой в днище стакана 4 болтов 5 и нажимных болтов 6. Этому способствует также выполненная на опорной для образца плоскости матрицы кольцевая насечка, вершины зубцов которой направлены в сторону, противоположную утягиванию образца. Уплотнение образца осуществляется за счет резиновых колец. При низкотемпературных испытаниях закрепление и герметизация образца достигаются путем приварки его по торцу к промежуточной шайбе (рис. 4). Такое конструктивное решение закрепления образца по сравнению с принятым в практике закреплением подобных образцов с помощью гидроприжимов [3] обеспечило уменьшение нормы [6] на ширину периферийной защемляемой части до 0,18...0,2 диаметра матрицы и позволило отказаться от схемы закрепления его массивным поршнем с гидросистемой, которые являются источником

теплопритоков к испытываемому образцу. Благодаря этому стало возможным проводить испытания образцов достаточно больших размеров, что, в свою очередь, позволило снизить уровень давления рабочей среды при испытании в условиях криогенных температур. Недостаток конструктивного решения состоит в том, что после каждого испытания разрушенный образец удаляется путем обработки промежуточной шайбы.

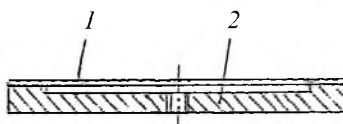


Рис. 4. Схема уплотнения образца: 1 – образец; 2 – шайба.

При испытании листового материала весьма актуальной задачей является уменьшение аккумулируемой упругой энергии сжатого газа, что обеспечивает повышение безопасности. Эту задачу можно решить путем сохранения первоначального объема газовой полости под образцом, независимо от величины его деформирования. Схема такого устройства представлена на рис. 5 [7]. Образец 1 из листового материала жестко закрепляется между фланцами корпуса 2 и съемного днища 3. Корпус заполняется сыпучим балластом 4 из мелких металлических шариков диаметром 1–3 мм. С корпусом соединена по резьбе шайба 5, скрепленная со штоком 6, имеющим уплотнительные фторопластовые кольца. При испытании образец выпучивается вниз. Под действием силы тяжести уровень балласта в корпусе понижается, клемма 7 опускается вместе с балластом и перестает контактировать со штоком 6. В этот момент электродвигатель 8 опускает шток до соприкосновения с клеммой 7, включенной в цепь управления 9 работой электродвигателя. Таким образом, на протяжении всего испытания шток автоматически перемещается вслед за поверхностью сыпучего балласта, поддерживая объем полости над испытываемым образцом постоянным. Это позволяет избежать при разрушении образца взрыва большой силы.

Существенная проблема при испытании листовых материалов односторонним давлением рабочей среды – снижение влияния на плоское напряженное состояние в образце краевого эффекта у жестко заземленного контура образца, обусловленного действием в заделке изгибающих моментов и перерезывающих сил, искажающих картину мембранных напряжений [8]. Вследствие этого зона однородного напряженно-деформированного состояния значительно уменьшается, а вероятность разрушения образца в области заземления увеличивается. Для повышения надежности проведения испытаний и уменьшения степени влияния краевого эффекта в устройстве, схема которого показана на рис. 6, между образцом 1 и матрицей 2 размещается упругий элемент 3 переменной жесткости, выполненный в виде набора кольцевых рессор [9]. Последние изготавливают из листовой стали марки 60С2А, термообработанной до твердости 45...50 HRC<sub>2</sub>. С наружной и внутренней стороны рессоры выполнены радиальные прорези (рис. 7). При работе рессоры прогибаются, не позволяя испытываемому образ-

цу резко перегибаться по контуру отверстия матрицы. Вследствие того что изгиб рессор сопровождается их относительным скольжением между собой, трение между рабочей поверхностью матрицы и образцом существенно снижается, что позволяет, в свою очередь, увеличить степень деформирования образца при испытании. Кроме того, применение кольцевых рессор уменьшает износ матрицы.

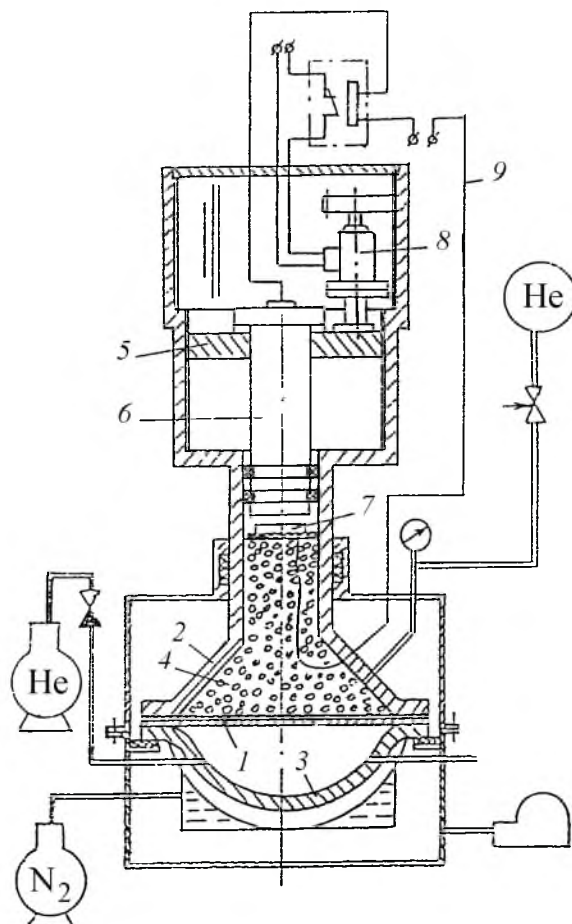


Рис. 5. Схема устройства для испытания листовых материалов при двухосном растяжении в условиях низких температур.

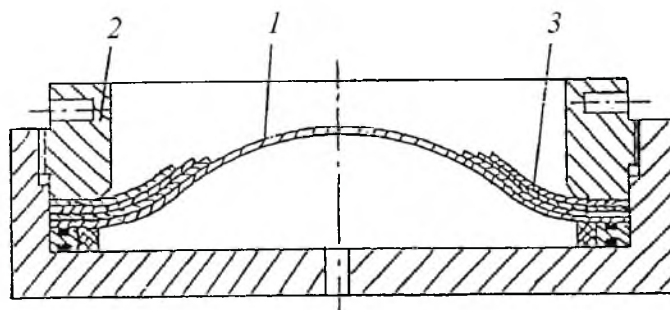


Рис. 6. Схема устройства для испытания плоских образцов на двухосное растяжение.

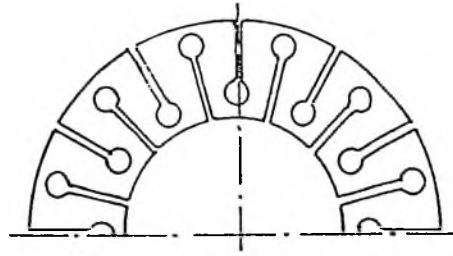


Рис. 7. Кольцевая рессора.

Предложенное оборудование представляет развитие средств испытаний листовых конструкционных материалов односторонним давлением рабочей среды. Идеи, реализованные в рассмотренных устройствах, позволяют решить ряд проблем методического характера, с которыми сталкиваются экспериментаторы при проведении испытаний образцов и натуральных изделий, изготовленных из листовых материалов, на двухосное растяжение при низких температурах.

### Резюме

Розглянуто конструктивні особливості устаткування для дослідження міцності і закономірностей руйнування листових конструкційних матеріалів при двовісному розтязі зразків одностороннім тиском робочого середовища. Запропоновано рішення ряду проблем методичного характеру, що пов'язані з випробуваннями при високих рівнях тиску робочого середовища. Це дозволить забезпечити необхідні режими охолодження зразків, знизити рівень енергії руйнування, підвищити надійність та безпеку випробувань.

1. Новиков Н. В., Филли Н. В., Городыский Н. И. и др. Прочность материалов и конструкций криогенной техники / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: Наук. думка, 1992. – 280 с.
2. А. с. 849040 СССР МКИ<sup>3</sup> G01 N 3/18, G01 N 3/12. Криостат для испытания полых изделий внутренним давлением / Н. Р. Музыка, Б. И. Юрченко, М. Д. Митликин. – Оpubл. 25. 07. 81, Бюл. № 27.
3. Куркин С. А., Лукьянов В. Д., Крумбольдт М. Н. Проектирование установок для испытания при двухосном растяжении // Пробл. прочности. – 1973. – № 12. – С. 89 – 94.
4. А. с. 1322118 СССР МКИ<sup>4</sup> G01 N 3/10. Устройство для двухосного растяжения листового материала / Н. Р. Музыка. – Оpubл. 07. 07. 87, Бюл. № 25.
5. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / Под ред. М. П. Малкова. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 100 с.
6. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. – М.: Машиностроение, 1976. – 134 с.

7. *А. с. 811101 СССР* МКИ<sup>3</sup> G01 N 3/18. Установка для испытаний образцов листовых материалов на прочность при сложном напряженном состоянии / А. И. Петренко, Н. Р. Музыка. – Оpubл. 07. 03. 81, Бюл. № 9.
8. *Канторович З. Б.* Основы расчета химических машин и аппаратов. – М: Машгиз, 1960. – 137 с.
9. *А. с. 706741 СССР* МКИ<sup>2</sup> G01 N 3/10. Устройство для испытаний плоских образцов на двухосное растяжение / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка. – Оpubл. 30. 12. 79, Бюл. № 48.

Поступила 30. 05. 2000