

## ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

*С.А. Жданок, Институт Тепло- и Массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси*

### 1. Введение.

Водород является одной из важнейших компонент многих физико-химических процессов, использующихся в промышленном масштабе. В Беларуси основными потребляемыми водородом отраслями являются нефтехимическая (например, Гродненский «Азот», где на получение водорода из природного газа с его последующим использованием при синтезе аммиака, метанола и других химических продуктов расходуется более 10% всего потребляемого нашей страной российского газа), пищевая (маргариновые заводы, где с использованием водорода осуществляется гидролиз жиров), машиностроительная (химико-термическая обработка деталей машин с целью упрочнения поверхности с использованием в печах водородосодержащей атмосферы) и многие другие. Одним из наиболее перспективных направлений использования водорода является его применение в качестве топлива в химических источниках тока для нужд малой и средней энергетики.

Среди перспективных проблем энергетики важное место занимают проблемы непосредственно преобразования химической энергии природных и синтезированных видов топлива в электрическую энергию. Актуальность этой проблемы очевидна, если учесть, что в настоящее время около 90% всей полезной энергии (электрической и механической) получается из тепловой энергии природного топлива, средний коэффициент преобразования которой в энергоустановках не превышает 25%. Известно, что КПД непосредственного преобразования химической энергии в электрическую в современных химических источниках тока в 2-3 раза больше указанного, однако энергия этих устройств ограничена запасом содержащихся в них активных материалов. Особой разновидностью химических источников тока является топливный элемент (ТЭ), представляющий собой устройство для прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, минуя стадию превращения в тепловую энергию. В отличие от гальванических элементов, рабочий ресурс которых ограничен запасом заложенных в них активных веществ, ТЭ может работать без остановок длительное время. Для этого в него должны непрерывно подаваться топливо и окислитель и отводиться продукты реак-

ции и тепло.

Создание топливных элементов - одно из крупнейших научно-технических достижений нашего времени. Сохраняя главные достоинства химических источников - высокую эффективность, бесшумность работы и отсутствие вредного воздействия на окружающую среду - ТЭ в то же время обладают достаточно высоким рабочим ресурсом, что делает возможным их широкое применение в различных областях.

### 2. Возможные области применения ЭХГ и тенденции в их развитии

В течение последних лет во многих развитых странах (США, Германии, Великобритании, Франции, Италии, Японии, Корее, Канаде) интенсивно ведутся разработки в области технологий топливных элементов. Наряду с ведущими научными центрами в разработках участвуют сотни мелких и средних фирм, а также такие гигантские корпорации как «Даймлер-Крайслер», «Форд», «Дженерал Моторс», «Тойота». В ряде стран созданы государственные программы по разработке и внедрению ТЭ в различных областях промышленности. Так в США существует программа по замене ДВС на ТЭ в сфере грузовых перевозок (Heavy Vehicle Trucks) и в вооруженных силах. Разрабатывается концепция перехода на распределенное энергоснабжение с использованием ТЭ (Distributed Power Production). В Великобритании ТЭ внедряют на городском автотранспорте, а Япония первой сертифицировала для промышленного производства легковой автомобиль на основе ТЭ.

Анализ имеющихся разработок показывает, что к числу наиболее перспективных областей применения ЭХГ относятся:

- источники энергии для транспортных средств,
- стационарные, автономные энергоустановки,
- источники энергопитания переносных электронных приборов,
- энергоустановки специального применения.

#### 2.1. Источники энергии для транспортных средств

Автомобильный транспорт является основным потребителем продуктов переработки нефти и вносит значительный вклад в загрязнение атмосферы, особенно в крупных городах. За почти столетнюю историю своего развития двигатель

внутреннего сгорания (ДВС) был доведен до большой степени совершенства по многим своим характеристикам, и пока что не имеет альтернативы на легковом транспорте. Тем не менее, попытки найти замену ДВС ведутся в течение многих лет. Это связано с главным недостатком этого двигателя - весьма низким КПД. На оптимальном рабочем режиме КПД стационарной энергоустановки с ДВС удается поднять максимум до 35%. Среднее же значение КПД даже для лучших автомобильных двигателей, работающих в широком диапазоне рабочих режимов, не превышает 15%. Указанный недостаток, вытекающий из принципиальных ограничений, накладываемых термодинамикой рабочего цикла, не может быть преодолен никакими конструктивными ухищрениями. Что касается отрицательного воздействия ДВС на окружающую среду, то введение в ряде стран строгих нормативов на содержание вредных веществ в выхлопных газах и оснащение автомобилей дорогостоящими каталитическими устройствами позволило значительно улучшить ситуацию с выбросами наиболее вредных веществ (окислов углерода и азота). Однако по-прежнему актуальной остается проблема уменьшения выброса в атмосферу углекислого газа, накопление которого считается причиной глобального потепления климата.

На ранних стадиях исследований в качестве альтернативы автомобилю с ДВС предполагалось использовать электромобили с аккумуляторными батареями большой емкости, однако это направление не получило достаточного развития из-за невозможности обеспечить требуемый пробег без подзарядки. В настоящее время многие ведущие автомобильные компании, в числе которых «Форд», «Дженерал Моторс», «Даймлер-Крайслер», «Тойота» и др., работают над созданием легкового электромобиля с энергоустановкой на базе топливного элемента. Поскольку эффективность использования химической энергии топлива в ТЭ намного выше, чем в двигателе внутреннего сгорания, замена даже небольшой части традиционных автомобилей электромобилями позволяет добиться существенного сокращения потребления нефти. Последнее обстоятельство считается чрезвычайно важным с точки зрения экономической безопасности, особенно для тех государств, которые сильно зависят от импорта энергоносителей, поскольку мировые запасы нефти неуклонно сокращаются. Только в США легковой транспорт потребляет около 1 млн. куб. метров нефти в день, что составляет 85% от общего ко-

личества импортируемой нефти. Если бы только на 1% автомобилей использовались топливные элементы, годовое потребление нефти в США уменьшилось бы на 2,6 млн. куб. метров. Не менее впечатляющим было бы сокращение выбросов в атмосферу двуокиси углерода.

Наиболее важными проблемами, от решения которых зависит возможность коммерческого применения ТЭ на автомобильном транспорте, являются:

- улучшение весовых и габаритных характеристик,
- снижение стоимости конструкции,
- выбор оптимального варианта топливной системы.

Рассмотрим кратко основные требования к электромобилю по вышеперечисленным параметрам. Считается, что конкурентоспособный электромобиль должен иметь пробег между заправками не менее 600 км, иметь двигатель мощностью порядка 50 кВт, причем стоимость двигателя не должна превышать 50\$/кВт. Приемлемой считается удельная мощность в диапазоне 6-8 кг/кВт. Большинство разработчиков отдает предпочтение мембранным ТЭ, которые обладают высокими удельными характеристиками и таким важным качеством, как малое время выхода на рабочий режим. Стоимость ТЭ еще не доведена до приемлемого уровня, хотя за 15 лет удалось снизить стоимость каталитических электродов почти в 30 раз, доведя ее до 6-8 \$/кВт. Все еще высока стоимость второго важнейшего компонента ТЭ - полимерной мембраны - около 95 \$/кВт. Правда, по оценкам производителя мембраны - фирмы «Дюпон» - в случае массового производства электромобилей (на уровне 250 000 в год) стоимость мембраны снизится на порядок. Пока еще окончательно не решена проблема выбора исходного топлива. Существует различные подходы к этой проблеме. Один из них - это заправка автомобиля обычным жидким топливом (бензином, пропаном, дизельным топливом, метанолом), из которого путем конверсии вырабатывается водород для питания ТЭ. Основная проблема состоит в создании дешевых, компактных и простых в управлении конверторов и очистка продуктов конверсии от угарного газа, который отравляет каталитические электроды ТЭ. Ведутся также работы над созданием ТЭ, которые могут работать на указанных видах топлива напрямую, без предварительной конверсии в водород. Другой подход - это использование в качестве топлива автомобиля чистого водорода. Это снимает

проблемы отравления катализаторов ТЭ, но требует решения проблемы заправки водородом и его хранения на борту автомобиля. Для 500-километрового пробега небольшого автомобиля требуется около 3 кг водорода, который при атмосферном давлении занимает объем 36000 литров. При сжатии даже до 20 МПа требуется баллон емкостью 180 литров, что для автомобиля очень много. Если такой баллон изготавливать из современных композиционных материалов, то его вес будет ~25 кг. Еще сложнее хранить водород в жидком виде. Бак для хранения 3 кг жидкого водорода весит 45 кг и занимает объем 100 литров. В связи с перечисленными проблемами во всех развивающих водородную энергетику странах ведутся интенсивные исследования по разработке накопителей водорода на металлгидридных системах и на таких новейших материалах, как углеродные нанотрубки. Несмотря на перечисленные проблемы, ряд ведущих автомобильных концернов рассчитывает приступить к серийному выпуску электромобилей на основе ТЭ к 2005 году. На рис.1 показана схема электромобиля, работающего на водороде.

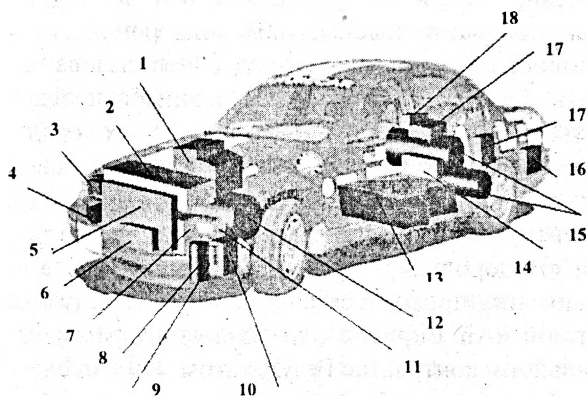


Рис.1. Схема электромобиля с ТЭ: 1 - преобразователь напряжения, 2 - ТЭ, 3 - электрокоммутационный блок, 4 - компрессор, 5 - теплообменник ТЭ, 6 - теплообменник преобразователя, 7 - конвертор пиковой мощности, 8 - насос системы охлаждения ТЭ, 9 - насос системы увлажнения, 10 - бак для деионизированной воды, 11 - воздушный компрессор, 12 - индукционный двигатель трансмиссии, 13 - аккумуляторная батарея, 14 - резервный конвертор, 15 - баки с водородом, 16 - заправочный фильтр, 17 - блок управления воздушного компрессора, 18 - преобразователь напряжения.

## 2.2. Стационарные автономные энергоустановки

Это класс установок охватывает диапазон мощности от 5 до 1000 кВт и развивается по следующим

направлениям:

- аварийные системы энергопитания для таких объектов как больницы, банки, крупные институты и т.д.;
- энергоустановки для экологически замкнутых комплексов переработки отходов (например, комплекс в составе: биогазовая установка - конвертор - топливный элемент);
- объекты малой энергетики (буи, метеозонды, питание аэродромных систем);
- энергетика стартовых комплексов, локационных станций и аналогичных систем, требующих высокой надежности;
- теплоэнергетические установки для жилых и офисных зданий.

В случае использования твердоокисного ТЭ с рабочей температурой 800°C наряду с электроэнергией здание обеспечивается также системой подачи горячей воды и нагрева помещения теплым воздухом. Схема такой установки представлена на рис.2. Использование тепла, выделяющегося в процессе работы ТЭ, для систем отопления здания и подачи горячей воды позволяет довести коэффициент использования химической энергии топлива до 90%. Предполагается, что дома такого типа в США и Германии появятся на рынке в 2003 году.

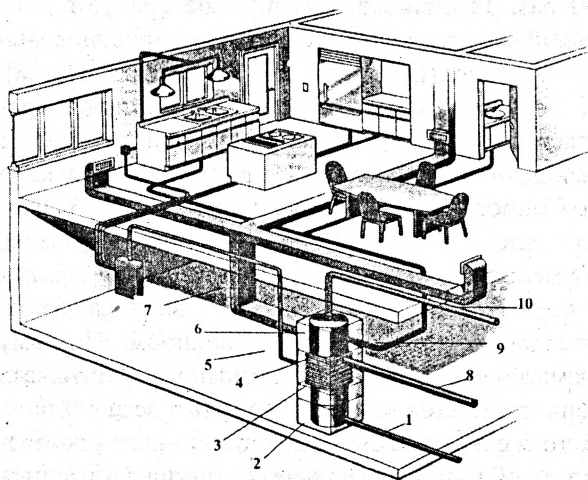


Рис.2. Схема теплоэнергоустановки для коттеджа на базе ТЭ: 1 - подвод природного газа, 2 - конвертор, 3 - теплообменник, 4 - ТЭ, 5 - электрический кабель, 6 - бак с горячей водой, 7 - воздуховоды системы отопления помещения, 8 - подвод воздуха, 9 - горячая вода, 10 - отработанное тепло

Несмотря на высокую эффективность использования энергии топлива, экологическую чистоту, бесшумность и возможность работы на различных видах топлива (природный газ, пропан, продукты нефтепереработки, метанол, биогаз и др.)

рассмотренные выше энергоустановки еще не получили широкого применения. Это связано с их высокой стоимостью: минимальный уровень затрат лежит в пределах \$3000-4000 на кВт, в то время как у обычных газотурбинных энергоустановок он составляет \$500-1000 на кВт. По мнению специалистов, широкое распространение ЭХГ наступит, когда их стоимость снизится до \$1500 на кВт.

### 2.3. Источники энергопитания переносных электронных приборов

В настоящее время во многих переносных электронных устройствах в качестве источников питания используются гальванические элементы (батарейки) или подзаряжаемые аккумуляторы мощностью -20 Вт. Это видеокамеры, портативные ПК, сотовые телефоны, игрушки и т.д. Современного потребителя не устраивает ограниченный рабочий ресурс батареек, требующий частой их замены или перезарядки. Кроме того, они дороги, имеют большой вес и могут протекать.

Альтернативой имеющимся батареям могут выступить ТЭ. Оценки показывают, что замена традиционных никель-кадмиевых батареек топливным элементом, работающим на метаноле, увеличивает ресурс источника питания не менее чем в 20 раз. Топливные элементы не требуют длительной перезарядки; достаточно просто добавить топливо (например, ампулу с метанолом). Так, энергоемкость одного литра метанола превышает 5000 Вт-часов, что достаточно для более чем недельной непрерывной работы переносного ПК. Сопоставимый объем литиево-ионного, наиболее энергетически - плотного аккумулятора, дает меньше десятой части этой энергии. Так как ТЭ может работать на кислороде воздуха, то заправлять его нужно только топливом. Поэтому при массовом производстве можно рассчитывать на снижение стоимости, габаритов и веса.

В то же время возникают различные технические проблемы, связанные с миниатюризацией ТЭ. Последняя требует оптимального выбора между такими факторами, как удельная мощность, габариты, удобство и стоимость. В рассматриваемом случае большая доля веса и объема приходится не на сам ТЭ, а на его вспомогательные подсистемы (охлаждения, заправки и хранения топлива, отвода продуктов реакции).

### 2.4. Энергоустановки специального назначения

К числу областей специального назначения относятся энергоустановки космических аппаратов,

подводных лодок, морских буев, надводных судов, радиолокационных станций, автономных объектов оборонного назначения и т.д.

В этой области широко применяются щелочные ТЭ, обладающие наивысшим КПД. Известным примером успешного применения ТЭ являются бортовые энергоустановки пилотируемых космических кораблей, которые, используя в качестве компонентов жидкий водород и кислород, наряду с энергией вырабатывают воду для жизнеобеспечения экипажа.

К числу главных требований, предъявляемых к ТЭ специального назначения, относятся высокая эффективность, надежность, габариты и др. специальные требования. При этом стоимость изделия не играет особой роли. Наиболее совершенные и эффективные (хотя и очень дорогие) топливные элементы были разработаны именно для специального применения.

### 3. Состояние исследований в области водородной энергетики в Беларуси.

В настоящее время в НАН Беларуси ведутся исследования по различным направлениям, связанным с получением, хранением и использованием водорода. Так, в ИТМО им. А.В. Лыкова разрабатываются различные методы конверсии углеводородного топлива в водород с использованием неравновесной плазмы и сверхadiaбатического фильтрационного горения в пористых средах. Фундаментальные проблемы такой конверсии предполагается исследовать в рамках программы ориентированных фундаментальных исследований «Водородная энергетика», а прикладные исследования проводятся совместно с французской фирмой «Air Liquide» (Эр Ликид) в рамках специального контракта. Результатом этих исследований стали разработка и испытания каталитического реактора конверсии природного газа, позволяющего производить до 100м<sup>3</sup>/ч синтез-газа. На рис. 3 показана соответствующая экспериментальная установка.

В том же институте в течение последних 20 лет интенсивно ведутся исследования по созданию металлгидридных накопителей водорода, которые нашли применение на ряде предприятий нашей страны и в странах СНГ. В настоящее время металлгидридные технологии используются при разработке устройств по очистке, компримированию и компактному хранению водорода а также его применения в качестве рабочего тела современных тепловых насосов. На рис.4 представлены фотографии стенда для исследования металлгидридов и одного из металлгидридных аккумуляторов.



муляторов водорода.

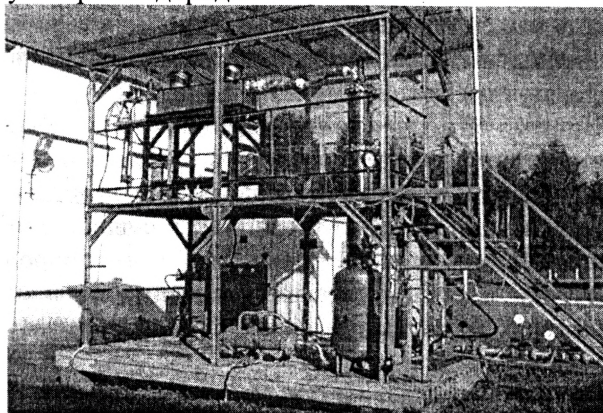


Рис.3 Экспериментальная установка высокого давления (10 атм) для конверсии углеводородов в водород производительностью до 100 м<sup>3</sup>/час по синтез-газу.

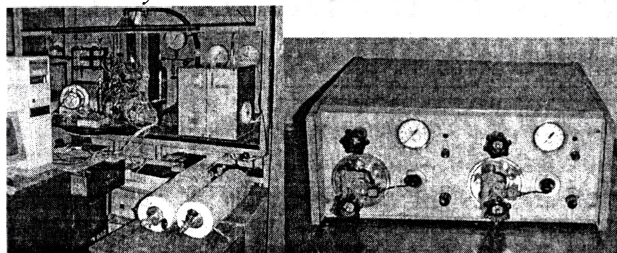


Рис.4. Стенд для исследования металлгидридов и образец металлгидридного аккумулятора водорода

В самое последнее время в ИТМО начались исследования по синтезу углеродных наноматериалов, способных существенно увеличить емкость систем связанного хранения водорода. Именно с развитием нанотехнологий и их применением в водородной энергетике связывают многие эксперты перспективы широкомасштабного применения углеродных наноматериалов.

Таким образом, в НАН Беларуси имеются все необходимые предпосылки для развития фундаментальных и прикладных исследований в области водородной энергетике и при наличии определенной политической воли и соответствующего финансирования уже в течение ближайших 2-3 лет можно было бы создать первые отечественные демонстрационные энергетические водородные системы и подготовить квалифицированные кадры для широкомасштабного развития водородной энергетике в нашей стране.

#### 4. Перспективность и целесообразность развития водородной энергетике в Республике Беларусь

Подводя итоги, можно сформулировать следующие причины, по которым представляется целесообразным развивать исследования по водородной энергетике и топливным элементам в

Республике Беларусь:

1. Возможность значительной экономии энергоресурсов за счет более эффективного их использования в энергетике, на автомобильном транспорте, в нефтехимическом комплексе, в других отраслях промышленности, что особенно важно в виду отсутствия в нашей стране собственных энергоносителей.

2. Более полное использование ныне теряемых энергоресурсов в замкнутых циклах переработки отходов.

3. Решение проблем экологии больших городов, загазованности атмосферы токсичными соединениями, содержащимися в выхлопных газах автомобильного транспорта.

4. Создание новых эффективных источников питания повышенной энергоемкости для переносных электронных приборов, что будет стимулировать развитие новых технологий и производств.

5. Положительное влияние на развитие науки и техники в Республике.

6. Создание новых рабочих мест для квалифицированных рабочих и инженерно-технических кадров.

Беларусь имеет все предпосылки для успешного развития водородной энергетике и технологий топливных элементов, главные из которых - это квалифицированные научные и технические кадры и производственная база (предприятия электронной промышленности и машиностроения).

В качестве примера возможного практического применения топливных элементов в условиях Белоруссии можно указать на производство грузовых автомобилей большой грузоподъемности, и особенно самосвалов для разработки карьеров, по которым Республика занимала лидирующее положение в бывшем СССР. Для карьерных самосвалов наряду с повышением эффективности использования топлива важную роль играет уровень шума и степень загрязнения окружающей среды. Известно, что скопление выхлопных газов самосвалов на дне карьера представляет серьезную проблему, решить которую путем улучшения характеристик традиционно используемого на самосвалах двигателя внутреннего сгорания не представляется возможным. В этой ситуации переход на энергоустановку с ТЭ выглядит очень привлекательным. Так как мировые тенденции в области автомобилестроения тесно увязаны с перспективами использования топливных элементов, то Беларусь не сможет конкурировать на международных рынках автомобилей не имея

собственной технологии и оборудования для перехода на водородное энергообеспечение.

В качестве второго примера, демонстрирующего потенциальные возможности применения ТЭ в Белоруссии, можно рассмотреть системы автономного энерго- и тепло обеспечения фермерских хозяйств, небольших городов и поселков, военных объектов и жилых комплексов, промышленных предприятий и медицинских учреждений. Существенное уменьшение затрат на энергообеспечение производственных процессов, жилищно-коммунального хозяйства и объектов социальной

значимости позволило бы уменьшить зависимость нашей страны от экспорта энергоносителей и улучшить экологическую ситуацию во многих городах и населенных пунктах Беларуси.

И, наконец, применение новейших технологий производства водорода на предприятиях нефтехимического комплекса страны (например, на гродненском азоте) позволило бы существенно сократить потребление импортируемого природного газа и улучшить экологическую обстановку во многих промышленных зонах республики.

УДК 620.178.64

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ С ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕМ

*П.П. Пётух, С.М. Красневский, Ц.Д. Сорохан, И.И. Герасимчик, Г.О. Яровой*

Испытания на ударный изгиб являются важнейшей составляющей метода оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению, как наиболее опасному и происходящему при уровнях действующих напряжений существенно ниже предела текучести материала. Нормативный уровень трещиностойкости ответственных стальных конструкций, таких как, сосуды, работающие под давлением, магистральные трубопроводы, грузоподъемные механизмы и др. оценивается в заводских условиях в основном по величине ударной вязкости, которую определяют при испытаниях на ударный изгиб. Малый размер образца, простота изготовления и проведения испытаний по определению ударной вязкости, достаточно высокая ее чувствительность к изменению свойств материалов способствовали широкому внедрению этой характеристики для оценки качества металла труб и другого оборудования.

В настоящее время характеристики материалов, получаемые при испытаниях на ударный изгиб, являются основополагающими при выборе материалов, расчетах на прочность стальных конструкций и прогнозировании их остаточного ресурса.

Испытания на ударный изгиб проводят по ГОСТ 9454-78, который соответствует аналогичным зарубежным стандартам, например EN 10045-1. Согласно этим стандартам для испытаний используют специальные машины – ударные маятниковые копры.

При этом одним ударом маятника разрушают надрезанный посередине образец, который предварительно располагают на специальных опорах. В результате однократного испытания фиксируют работу разрушения образца  $A$  (Дж) или ударную вязкость  $KC$  (Дж/см<sup>2</sup>) – частное от деления работы разрушения на нетто сечение образца в зоне надреза.

Следует отметить, что результаты проведенных испытаний на ударный изгиб, отражают характер перехода материалов элементов металлоконструкций в хрупкое состояние при снижении климатических температур в процессе эксплуатации.

Однако развитие современных методов оценки прочности конструктивных высоконагруженных элементов при наличии дефектов указывает на то, что недостаточно знать одну лишь характеристику ударной вязкости, как величину, характеризующую весь процесс разрушения в целом. Ударная вязкость является интегральной характеристикой материала, зависящей как от его прочностных, так и пластических свойств, по-разному влияющих на трещиностойкость материалов.

Из анализа поведения образца при испытаниях, становится ясно, что процесс разрушения можно разделить на два основных этапа: зарождение трещины и ее развитие (распространение). В соответствии с этим, разделяются и рассчитываются полная работа и ударная вязкость разрушения. На практике это достигается с помощью метода осциллографирования, путем записи диаграммы