

ЛОКАЛЬНЫЕ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ УДАРНОМ РАЗРУШЕНИИ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Розглядаються екзотермічні ефекти, що супроводжують ударний механізм руйнування захисних футерівок.

LOCAL EXOTHERMIC EFFECTS AT AN IMPACT FRACTURE OF RUBBER LININGS OF BARREL GRINDING MILLS

The exothermic effects tracking a percussion arrangement of fracture of defensive linings are considered.

Настоящая работа посвящена исследованию механизмов разрушения резиновой футеровки в барабанных шаровых мельницах. Для объяснения некоторых особенностей разрушения элементов футеровки авторы использовали два малоизученных (к тому же малоизвестных широкому кругу пользователей) эффекта: первый связан с эффектом объёмного сжатия в месте контакта при ударе шара о плоскость; второй эффект связан с экзотермическими повышениями температуры в устьях усталостных трещин. Рассмотрим эти эффекты более подробно. Некоторые сведения по этим вопросам опубликованы в [1-16].

Эффект объёмного сжатия. В 1906 году в своей докторской диссертации (она была опубликована в 1952 г. в Избранных трудах [15]) А.Н. Динник, исследуя прочность различных материалов в условиях ударных напряжений, в том числе и таких, которые вызывают разрушение плоскости, отметил весьма важный факт: материалы (в основном металлы, А.Н. Динник не исследовал резину) локально могут выдерживать большие напряжения без видимых следов разрушения. Причины такого поведения, по его мнению, заключаются в следующем: время удара незначительно и напряжения благодаря релаксационным свойствам материала не успевают проявиться в полной мере; в зоне контакта материал находится в условиях объёмного сжатия.

Несмотря на важность такого открытия, исследователи практически не затрагивали эту проблему, и сколь-нибудь заметных публикаций до сегодняшнего дня не было. Однако проблема осталась и с развитием техники её актуальность не уменьшилась. Для такого конструкционного материала как резина эта проблема возникла в связи с ударными нагрузками, испытывающими защитными футеровками в таких машинах как: рудоизмельчительные мельницы, скипы, вагонетки, грохоты, питатели, тетки и т.д. Во всех случаях применения защитных элементов материал испытывает либо прямой (чаще косою) удар контртел о плоскость футеровки, либо вдавливание.

Рассмотрим сравнительные исследования ударных систем для барабанных мельниц с различными футеровками: металлической и резиновой. Сравнение будем проводить в рамках изложенных ранее [16] моделей, данные эксперимента заимствованы из работ [14-16].

1. *Тип удара.* Согласно данным А.Н. Динника и Н.А. Кильчевского в металлической футеровке преобладает упругопластический короткий удар, в упругой зоне он рассматривается как линейный; в резиновой футеровке удар длинный, упруго-вязкий, в зоне контакта существенно нелинейный.

2. *Продолжительность удара.* А.Н. Динник [15] при ударе шара диаметром 7,62 мм со скоростью $V = 100$ см/с о стальную плоскость определил время удара $t = 0,00022$ с; для резины получено $t = 0,1 \div 0,3$ с.

3. *Глубина вдавливания.* Для металла и резины она существенно разная:

- для металла при сближении двух шаров диаметром от 0,95 см до 2,86 см при нагрузках 300-800 кг А.Н. Динник получил $\alpha = (0,07-0,67) \cdot 10^{-3}$ см [15];
- для резины при сближении шара диаметром 6,0 см и резиновой футеровки (плита толщиной 0,6 см) при нагрузке 500 кг получена лунка глубиной 1,2 см.

4. *Коэффициент восстановления.* Для металлов большинство авторов определяют как 0,55, для резины – приблизительно 0,26.

5. *Напряжённо-деформированное состояние.* В зоне контакта шара диаметром 7,62 мм с плоскостью при скоростях движения 100 см/с А.Н. Динник получил величины нормальных напряжений $\sigma_z = 7500-50480$ кг/см²; Н.А. Кильчевский со ссылкой на А.Н. Динника приводит $\sigma_z = 100000$ кг/см²; для контакта шара диаметром 6 см с резиновыми плитами толщиной 6,0 см при скорости $V = 10$ м/с получены величины нормальных напряжений $\sigma_z = 180 \div 250$ кг/см². Как отмечалось выше, такие большие напряжения металл и резина могут выдерживать только благодаря эффекту объёмного сжатия в зоне контакта.

6. *Энергетический баланс.* Такой баланс согласно закону сохранения механической энергии может быть записан в виде

$$U = K + П - \Delta U_1 - \Delta U_2 - \Delta U_3 - \Delta U_4 = \text{const},$$

где U – полная механическая энергия системы, величина для данной системы постоянная;

K – кинетическая энергия;

$П$ – потенциальная энергия;

ΔU_1 – энергия, идущая на трение тела и контртела;

ΔU_2 – волновая энергия футеровки;

ΔU_3 – энергия, идущая на разрушение футеровки;

ΔU_4 – энергия, идущая на теплообразование в зоне контакта.

При прочих равных условиях в металле энергии ΔU_2 и ΔU_3 будут больше, чем в резине; энергия ΔU_4 в резине (благодаря более высокой диссипации энергии) будет больше, чем в металле.

7. *Предельная нагрузка.* Как отмечалось выше, такая нагрузка определяется в основном величиной касательных напряжений в зоне контакта и эффектом объёмного сжатия. Резина как несжимаемый материал имеет модуль объёмного сжатия $K = (15 \div 30) \cdot 10^3$ кг/см² и может выдерживать без видимых следов разрушения напряжение, намного превышающие допускаемые для монофазного сжатия. В стали при коротком ударе развиваются касательные напряжения за пределами упругости материала и разрушение начинается с появления веера трещин на контуре поверхности давления. Следует также отметить, что в зоне удара развивается довольно высокая температура; в резине, в устьях трещин, она может достигать температуры сублимации материала [1, 2, 8]. Вопрос этот практически не изучен, однако, судя по кинетике разрушения резиновой футеровки, такая температура благодаря низкой теплопроводности материала и кратковременности ударного импульса не оказывает такого большого влияния, как следовало бы ожидать.

8. Определить экспериментально температуру в зоне контакта не представляется возможным вследствие отсутствия аппаратуры (по крайней мере, авторам

она неизвестна). Поэтому были использованы модельные образцы и различные доступные на сегодняшний день методы эксперимента.

Локальные экзотермические эффекты при разрушении резин. Во второй половине прошлого века рядом исследователей были открыты локальные экзотермические эффекты при деформировании и разрушении твёрдых тел, в основном – полимеров. Экспериментально, а позже и теоретически, было показано, что в устье движущейся трещины локальная температура может достигнуть температуры теплового распада материала; так, например, для полиметилметакрилата в вершине быстро движущейся трещины была получена температура около 500 К, что вполне может вызвать локальный тепловой распад материала. По механике разрушения полимеров был опубликован ряд работ (часть из них цитируется ниже [1-12]); по резине известна лишь одна публикация автора [13] в журнале «Проблемы прочности» в 1982 году.

Интересно отметить, что открытые экзотермические эффекты, не смотря на несомненную ценность для механики разрушения твёрдых тел, не получили должного признания среди исследователей и в общеизвестной научной литературе они не используются ни при изучении механики трещин, ни в феноменологических моделях разрушения. Вместе с тем, на взгляд авторов настоящей работы, объяснить некоторые механизмы разрушения материалов, например, при ударе шара в футеровку, без рассмотрения экзотермических эффектов в месте контакта весьма затруднительно. Рассмотрим более подробно исследование локальных экзотермических эффектов в устьях движущихся трещин резиновых образцов.

Общие сведения. Джоуль, пожалуй, первым экспериментально показал, что при адиабатическом растяжении вулканизированного каучука образец нагревается; при этом спай термопары помещался непосредственно в образце. Типичную кривую «приращение температуры ΔT – относительная деформация образца ε » для вулканизированного каучука (рис. 1) привёл Трелоар в своей известной монографии «Физика упругости каучука», опубликованной в 1953 году. Ю.К. Годовский [8] при изучении тепловых эффектов, вызванных механическим разрушением химических связей в полимерах, с помощью калориметрического измерения показал, что каждый акт разрыва макромолекул приводит к выделению тепловой энергии, в несколько раз превышающей энергию диссоциации связей.

Аналогичные эффекты отмечали и другие исследователи.

Итак, к началу семидесятых годов прошлого века уже существовало мнение, что в процессе деформирования полимеров происходит обратимое превращение работы в тепловую энергию и это явление находит своё объяснение в рамках кинетической теории высокоэластичности; при этом считалось, что энергия, диссипируемая в некоторой точке образца, приводит к локальному увеличению температуры в этой точке. Многие исследователи по механике разрушения полимеров также высказывали мнение, что в зоне разрушения локальная температура будет существенно отличаться от средней температуры тела. Для полимерных материалов такие утверждения имеются в работах

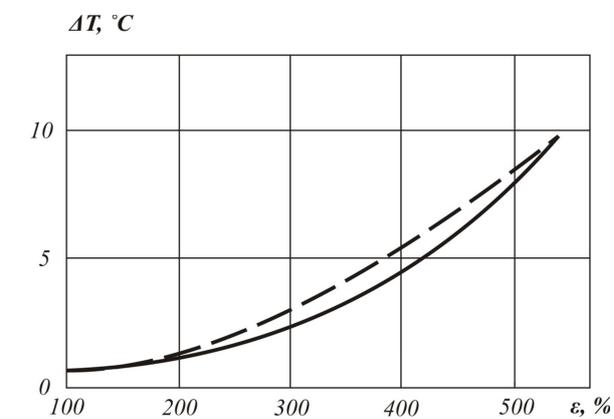


Рис. 1 – Изменение температуры вулканизированного каучука при растяжении (по Трелоару)

С.Н. Журкова, Г.М. Бартенева, Д.Л. Федюкина, Э.Е. Томашевского, Г.А. Петрикеева и ряда других. Об этом свидетельствуют и теоретические исследования температурного поля в устье трещины, проводимые многочисленными учёными, для линейных полимеров, например, [1, 2]. Однако убедительных экспериментальных подтверждений наличию подобных эффектов не было и, прежде всего, в связи с отсутствием экспериментальной техники. Появление жидких кристаллов позволило установить ряд закономерностей, например, профиль нагретой зоны [1, 3] в устье трещины, однако полученные результаты не объяснили многих эффектов, в том числе и фрактографического характера. И только создание ИК-радиометра [4, 5] позволило сотрудникам школы С.Н. Журкова детально исследовать экзотермические эффекты при разрушении линейных полимеров. Из зарубежных исследователей известны работы [1, 2, 6, 7] в основном для стёкол и линейных полимеров.

Суммируя полученные в цитируемой литературе результаты исследований, можно сделать следующие обобщения. При разрушении полимеров возникает локальный разогрев материала: Камбор [2] для стеклообразных полимеров получил 485 К; Фуллер [1] для ПММА при скоростях нагружения 200-650 м/с до 500 К; Е.А. Егоров [4] для полиэтилентерефталата 473-500 К.

По мнению авторов работ [4, 5, 7, 8] локальное повышение температуры связано с деформацией (за счёт диссипации энергии при пластическом перемещении микрообластей относительно друг друга) и разрушением (за счёт диссипации энергии, выделяющейся при разрыве полимера); причём вклад второго механизма более существенен: Е.А. Егоров [4] считает его до 55 % от общей энергии, Камбор [2] – до 75 %, Вильямс [7] – до 80-90 %.

Что же касается резин, то в известной литературе исследования в этом направлении до сегодняшнего времени отсутствуют; известна лишь статья автора [13].

Методика экспериментальных исследований. При фрактографическом исследовании поверхности разрушения резиновых элементов были обнаружены микрообласти термомеханического разрушения, и в работах [11, 12] было высказано предположение, что их появление связано с локальным перегревом резины. Для появления таких микрообластей необходимо, чтобы температура в них достигала 420-470 К, т.е. температуры термодеструкции резины. Для фиксации таких температур использовались три экспериментальных метода: термопары, жидкие кристаллы и ИК-радиометр.

Определение локальных температур с помощью точечных термопар. Экспериментально определялась температура в вершине усталостной трещины при циклическом разрушении массивных резинометаллических элементов типа БРМ-101 (размер 35×60×100 мм) и БРМ-102 (размер 50×100×200 мм) из малонаполненной резины 51-1562 (5 масс. ч. технического углерода). Параметры нагружения были следующие: амплитуда динамического сдвига $A = (10-15)$ мм, частота нагружения $\omega = 70 \text{ с}^{-1}$. Точечные хромель-алюминиевые термопары вводились непосредственно в устье усталостной трещины (длина трещины от металлической арматуры до вершины равнялась примерно 25-30 мм). Результаты измерений: для БРМ-101 при $A = 10$ мм и $\omega = 70 \text{ с}^{-1}$ температура в вершине трещины зафиксирована в пределах 353-358 К; для БРМ-102 при $A = 15$ мм и $\omega = 70 \text{ с}^{-1}$ температура была примерно 367-372 К. Средняя температура в прилегающей к трещине области была примерно на 15-20 К ниже. При этом следует отметить, что фиксируемые локальные температуры не соответствуют реальным, т.е. являются результатом уже прошедшего теплообмена в областях, примыкающих к вершине усталостной тре-

щины. В целом точечные (или игольчатые) термопары оказались неприемлемыми по следующим причинам: они обладают значительным теплоотводом, что вносит искажения в результаты измерений; не позволяют определить профиль нагретой зоны; размер спая термопар соизмерим с размерами неровностей берегов трещины.

Определение локальных температур с помощью жидких кристаллов. Использование жидких кристаллов оказалось более результативным. Они представляют собой смесь пеларгона, алеата, ундецилата и валериата холестерина. В зависимости от температурного интервала, эти компоненты берутся в определённых соотношениях и при изменении температуры готовая смесь изменяет свой цвет последовательно от фиолетового, синего, красного до зелёного через каждые 0,5 градусов. Каждое соотношение компонентов имеет свой диапазон; в данном случае использовались жидкие кристаллы, позволяющие измерять температуру от 294 до 373 К через каждые 3-5 градусов. Разрешающая способность таких кристаллов зависит от многих факторов, но корректно определяемый линейный размер температурной области составляет примерно 50 мкм при точности $\pm 0,5$ градусов. Техника измерения довольно проста: жидкие кристаллы растворяют в хлороформе и наносят тонким слоем на поверхность резины вблизи усталостной трещины. После приложения динамической нагрузки визуально можно наблюдать изменение цвета поверхности в области непосредственно перед трещиной и вдали от неё. Фиксировать цветное температурное поле можно через микроскоп известными способами, после чего по тарировке определять его градиент. Температура в устье трещины обычно зависит от свойств материала и режима нагружения. Резинам с большим коэффициентом поглощения свойственны и более высокие локальные температуры в устье трещины. С увеличением частоты нагружения локальная температура также увеличивалась. Максимальные температуры в устье трещины, полученные с помощью жидких кристаллов, были порядка 353-363 К.

Несмотря на простоту экспериментирования, жидкие кристаллы оказались малоэффективными для исследования локальных экзотермических эффектов при разрушении резин. Локальные температуры, возникающие в устье движущейся трещины, несмотря на низкую теплопроводность полимеров, существуют весьма ограниченное время (порядка 10-100 мкс) вследствие того, что нагретые зоны материала занимают крайне малый объём. Поэтому для регистрации истинных значений температур необходимы достаточно быстродействующие, безинерционные и бесконтактные приборы.

Определение локальной температуры методом инфракрасной радиометрии. Способ бесконтактной регистрации тепловыделения с помощью ИК-радиометра [4] позволяет исключить указанные выше ошибки измерения. Суть этого метода основана на принципе регистрации инфракрасного излучения нагретой зоны. Испускаемое тепловое излучение фиксировалось светосильным зеркальным объективом радиометра на приёмнике, которым служит фоторезистор на основе сурьмянистого индия или германия, активированного золотом и работающего при температуре жидкого азота. Экзотермический сигнал, возникающий на выходе приёмника, пропорционален мощности теплового излучения. Этот сигнал усиливался и регистрировался на экране двухлучевого запоминающего осциллографа. Схема регистрации теплового излучения, возникающего в устье движущейся трещины, показана на рис. 2.

Для осуществления разрыва образцов в динамике была разработана специальная установка: электродвигатель через шатун приводил в движение по Т-образной направляющей зажимы с образцом резины. В этом случае образец нагружался симметрично, а бритвенный надрез образца и подобранный режим нагружения обеспечивали движение трещины под объективом ИК-радиометра. Трудность эксперимента состояла в том, что было необходимо достичь устойчивого движения трещины и при этом необходимо также, чтобы устье трещины не выходило из поля зрения радиометра.

ИК-излучение от нагретой зоны в устье движущейся трещины в диапазоне длин волн 2-8 мкм регистрировалось германиевым резистором, активированным золотом и работающим при температуре 77 К. Изменение сопротивления фоторезистора при попадании на него потока ИК-излучения преобразовывалось в электрический сигнал и после предварительного усиления регистрировалось на экране запоминающего осциллографа С1-51 в виде импульса, развернутого во времени. Амплитуда импульса пропорциональна мощности потока теплового излучения.

Локальные температуры регистрировались при разрыве образцов в виде пластинки шириной 10 мм, длиной 60 мм, толщиной 2 мм, из резин 2959 и 51-1562 с искусственным бритвенным надрезом длиной примерно 2 мм, более точно измеряемым впоследствии при топографическом исследовании поверхности разрушения. Разрыв образцов осуществлялся импульсным нагружателем, обеспечивающим скорость подвижного зажима 1 м/с. Время разрыва, т.е. время прорастания магистральной трещины, составляло 2-3 мс. Экспериментальным исследованиям предшествовала калибровка прибора. Образец резины нагревался внешним источником тепла до различных значений температур, регистрируемых медь-константановой термопарой с диаметром спая 0,01 мм. Тепловое излучение от нагретой поверхности принималось фоторезистором, и величина сигнала после усиления сопоставлялась с температурой образца. Полагалось, что при толщинах 5-15 мкм резина непрозрачна для ИК-излучения.

Схема эксперимента показана на рис. 2, а. Образец 1 закреплялся в неподвижном зажиме 2 под углом 30° по направлению к фоторезистору. Разрывная сила P прилагалась к подвижному зажиму 3 вдоль оси образца. Благодаря искусственному надрезу магистральная трещина была локализована заранее. Площадь поверхности разрушения определялась впоследствии при топографическом изучении образца.

После разрыва и удаления части образца открывалась поверхность магистральной трещины, т.е. поверхность разрушения. Избыточное тепловое излучение от этой поверхности (по сравнению с комнатной температурой) регистрировалось фоторезистором и в виде импульса на экране осциллографа фотографировалось с помощью фотоприставки. Характерные формы ИК-импульсов, зарегистрированные при разрушении резин 2959 и 51-1562 показаны на рис. 2, б. Время нарастания импульса соответствовало времени разрушения образца, а макси-

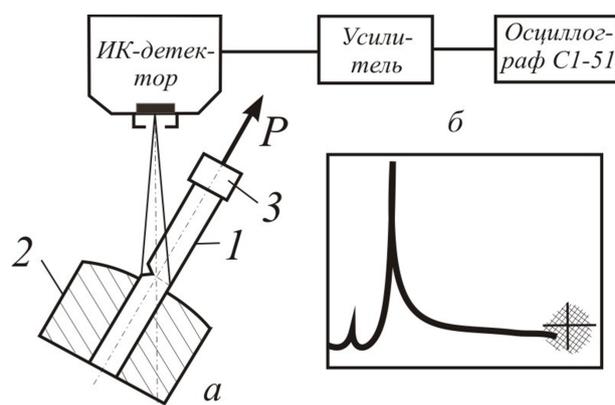


Рис. 2 – Схема эксперимента (а) и ИК-импульс, возникающий при разрушении резины (б)

мальная амплитуда – максимальной температуре горячей зоны поверхности разрушения, определяемой с помощью тарировочной кривой. Спад импульса соответствовал остыванию поверхности разрушения и состоял из двух стадий: быстрой стадии, порядка 1 мс и более длительной – порядка десятков мс. Длительность этих стадий определялась, в основном, площадью поверхности разрушения и её отношением к площади сечения образца в целом. При разрушении образца разогревается лишь поверхность разрыва, которая быстро остывала (узкая часть импульса на рис. 2, б) за счёт теплоотвода в образец, в результате чего его температура повышалась, и сам процесс остывания замедлялся. Остывание горячей зоны за 1 мс свидетельствовало о том, что толщина нагретого слоя резины в начальный момент была порядка нескольких десятков мкм.

Эксперименты проводились на образцах одного изготовителя (партии образцов порядка 50 шт. каждой марки резины) при комнатной температуре 393 К, точность измерения температуры порядка $\pm 15\%$. Максимальные регистрируемые температуры в зоне разрушения образцов из двух марок резин были порядка 396-438 К.

Обсуждение результатов. Полученные значения локальных температур несколько занижены по сравнению с истинными величинами. Причины этому следующие:

- при снятии тарировочной кривой использовались образцы толщиной 200 мкм, заведомо непрозрачные для ИК-излучения;
- приведённая в работе оценка толщины горячей зоны примерно в 30 мкм является весьма приближённой и требует дальнейшего уточнения;
- полученная локальная температура является усреднённой по поверхности разрушения; на осциллографах довольно часто наблюдались кратковременные всплески, связанные, по-видимому, с наличием микроскопических перегретых областей, быстро остывающих за счёт теплоотвода. Такое предположение не лишено смысла, поскольку мощность излучения резко возрастает с температурой, и области с малой площадью, но с более высокой (по сравнению с окружающими) температурой, могут быть заметными на общем фоне в виде резкого удлинения импульсов. По приближённой оценке температура в этих микрообластях достигала порядка 453-473 К, что вполне достаточно для термодеструкции резины. Этим можно объяснить и появление на поверхности разрушения микрообластей с термодеструктированной резиной, подобно рассмотренных в [9, 11].

Следует также отметить следующие предположения:

- области локальных температур, особенно при циклическом нагружении, возникают, очевидно, впереди магистральной трещины (этот эффект отмечал также Е.А. Егоров [4] для полиэтилентерефталата), что в целом способствует ускорению процесса разрушения;
- вследствие появления зон термомеханического разрушения время разрушения некоторых микрообластей будет, очевидно, малым, а скорость движения трещины – большой. Эти предположения требуют проверки и уточнения не лишены смысла, однако требуют проверки и уточнения.

Расчёт локальной температуры в устье трещины. Используя изложенные в работе [9] результаты исследования механики разрушения и феноменологическую модель циклического разрушения резины, вычислим приращение температуры ϑ в вершине трещины на участке её стабильного роста. Воспользуемся соотношениями вида

$$\theta = \tilde{\theta} \left[1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{ab^2}{16kr} \right)^{0,5} \right], \quad \tilde{\theta} = \frac{k_{ic}^2}{E \rho C b}, \quad k_{ic} = \sqrt{\frac{GU_0 \Delta}{1 - \nu^2}},$$

полученным в работах [3, 10] при ряде допущений и в предположении о существовании в вершине трещины адиабатического процесса.

Для малоуплотненной резины входящие в уравнение параметры были получены экспериментально [9, 11] и имели следующие значения:

$\rho C = 1,84 \cdot 10^7$ Н/м²·с²·град – теплоёмкость резины;

$a = 0,02 \div 0,1$ м/с – скорость роста трещины;

$k = 0,81 \cdot 10^{-7}$ м/с – коэффициент температуропроводности резины;

r – длина пластической зоны;

$b = (0,2 \div 0,4) \cdot 10^{-3}$ м – ширина пластической зоны;

$k_{ic} = (2 \div 5) \cdot 10^4$ Н/м^{3/2} – коэффициент вязкости разрушения;

$U_0 = 133,9$ Дж/(К·моль) – энергия активации связей;

$G = (0,75 \div 0,80) \cdot 10^{-3}$ Н/м² – модуль сдвига;

$E = 22,5 \cdot 10^3$ Н/м² – модуль Юнга;

$\Delta = 0,05 \div 0,1$ мм – расстояние между усталостными бороздками (определено при фрактографическом изучении поверхности разрушения резины);

$\nu = 0,5$ – коэффициент Пуассона;

$i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{ab^2}{16kr} \right)^{0,5}$ – интеграл вероятности ошибок.

При таких значениях параметров для пластинок толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м из малоуплотненной резины значение приращения температуры в устье трещины составляет $\vartheta = 150 \div 205$ град, т.е. $T = 423 - 478$ К, что совпадает с полученными экспериментальными данными.

Выводы

1. При разрушении резин с помощью прямых экспериментальных методов (метода ИК-радиометрии) исследованы локальные изотермические эффекты; экспериментально доказано, что в отдельных макрообластях резины температура разогрева может достигать температуры термодеструкции материала.

2. Для изготовления защитных футеровок барабанных мельниц резина должна обладать высокой энергией распространения трещин и большой диссипацией энергии, чтобы «растянуть» удар во времени.

3. Наряду с большой физической диссипацией энергии необходима также большая конструкционная диссипация непосредственно от способов крепления элементов футеровки (плит, лифтёров) к барабану мельницы, т.е. между этими элементами и барабаном всегда должен быть определённой толщины слой резины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuller K.N.G., Fox P.G., Field J.E. The temperature rise at the tip of fast-moving cracks in glassy polymers // Proc. Roy. Soc. Lond. A. – 1975. – Pp. 537-557.
2. Kambour R.P., Barker R.E. Mechanism of Fracture in Glassy Polymers // J. Polymer Sci. – 1966. – 4. – Pp. 359-363.
3. Parvin M. Theoretical prediction of temperature rise at the tip of a running // Int. J. of Fracture. – 1979. – Vol. 15, № 5. – Pp. 397-404.
4. Экзотермические эффекты при разрыве полимеров / Е.А. Егоров, В.В. Жиженков, А.Я. Савостин, Э.Е. Томашевский // Физика твёрд. тела. – 1975. – 17, № 1. – С. 111-117.
5. Tomashevskii E.E., Egorov E.A., Savostin A.Ya. Thermal effects during in polymers // Int. J. Fracture. – 1975. – 11, N 5. – Pp. 817-827.
6. Attermo R., Ostberg G. Measurements of a fatigue crack // Int. J. Fracture Mech. – 1971. – 7, N 1. – Pp. 122-124.
7. Williams J.G. Visco-elastic and thermal effects on crack growth in PMMA // Int. J. Fracture Mech. – 1972. – 8, N 4. – Pp. 393-401.

8. Энергетические эффекты, связанные с процессом разрушения полимеров / Годовский Ю.К., Папков В.С., Слуцкер А.И., Э.Е., Слонимский Г.Л. // ФТТ. – 1971. – 13, Вып. 8. – С. 2289-2295.
9. Потураев В.Н., Дырда В.И., Круш И.И. Прикладная механика резины. – К.: Наук. думка, 1980. – 260 с.
10. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
11. Дырда В.И. Связь между прочностью и диссипацией энергии при циклическом разрушении конструкций / Ин-т геотехн. механики АН УССР. – Днепропетровск, 1976. – 18 с. – Деп. в ВИНТИ № 3801-76.
12. Дырда В.И. Особенности разрушения вязкоупругих систем при циклическом нагружении // Проблемы прочности. – 1979. – № 8. – С. 32-36.
13. Дырда В.И. Исследование локальных экзотермических эффектов при разрушении резины // Проблемы прочности. – 1982. – № 7. – С. 102-104.
14. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твёрдых тел. Удар. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.
15. Динник А.Н. Избранные труды. – К.: Изд-во АН УССР, 1952. – Том 1. – 137 с.
16. Дырда В.И., Евенко С.Л., Маркелов А.Е. Резиновые детали технологических машин. – М.; Днепропетровск: Гамалия. – 2011. – 504 с.

УДК 678.4.06

Дырда В.И., Звягильский Е.А., Булат Е.А., Кобец А.С.

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ УПРУГО-НАСЛЕДСТВЕННЫХ СРЕД

Розглядаються основні проблеми деформування та руйнування пружно-спадкових матеріалів з акцентом уваги на формуванні нових критеріїв руйнування.

LEGITIMACY OF A DEFORMING AND FRACTURE OF ELASTIC-HEREDITARY MEDIUMS

The basic problems of a deforming and fracture are considered is elastic-hereditary materials with accent of attention on formation of new measure of fracture.

1 Взаимосвязь между философскими категориями хаоса, порядка и предела и механикой разрушения упруго-наследственных сред

К упруго-наследственным средам, т.е. к таким средам, для расчёта которых классическая теория упругости не всегда приемлема вследствие наличия в них значительной части вязкой составляющей, памяти о предыдущих воздействиях и нестабильности механических свойств во времени (эффекты старения), относятся многие конструкционные материалы и, прежде всего, эластомеры (резины, полиуретаны). Принцип Больцано-Вольтерра в определённой степени позволяет преодолеть эти разногласия, о чём свидетельствует создание теории вязко-упругости, уже получившей широкое признание. Эта же теория легла и в основу механики разрушения упруго-наследственных сред со всеми специфическими особенностями, присущими этим средам, и, прежде всего, наличием большой диссипации, старения и значительной зависимости физико-механических свойств от режима нагружения, влияния внешней среды, температуры диссипативного разогрева и т.д. Такие особенности механики деформирования и разрушения упруго-наследственных сред предопределили и выбор их критериев разрушения. Обычные критерии разрушения (прежде всего допускаемые напряжения $[\sigma]$ и допускаемые деформации $[\varepsilon]$) оказались приемлемыми для частных случаев и в основном при статических нагружениях. При длительных циклических нагрузках они фактически оказались непригодными.

В настоящей работе излагаются закономерности циклического разрушения упруго-наследственных сред на примере эластомеров в контексте формирования нового критерия разрушения, отображающего специфику этих материалов. Исследования в этой области весьма обширны, часть этих исследований рассматривается в цитируемой ниже литературе [1-160].