

УДК 678:539.3

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНЫ ПРИ АБРАЗИВНО- УСТАЛОСТНОМ ИЗНОСЕ

Чижик Е.Ф. НПП «Полимет», генеральный директор  
Дырда В.И. Институт геотехнической механики НАН  
Украины, г. Днепропетровск

### 1. МЕХАНИЗМ АБРАЗИВНО-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК

Некоторые аспекты этой весьма важной проблемы рассматривались ранее [1]. Сущность вопроса сводится к следующему. Поверхность футеровки изначально имеет определенный уровень повреждений как на микроуровне – начальная концентрация повреждений на поверхности на порядок превышает их значение в объеме, – так и на макроуровне: на поверхности футеровки всегда имеются трещины, раковины, каверны, технологические дефекты и т.д. Концентрация этих повреждений может быть самой различной и зависит от многих факторов: качества исходного материала и ингредиентов, технологии изготовления, качества пресс-форм и т.д. К тому же поверхность резины соприкасается с активной внешней средой, что дополнительно повышает концентрацию повреждений; например, озоновые трещины, микроповреждения от солнечной радиации, от  $\text{CO}_2$  и т.д. Бесспорным является одно: в тонком поверхностном слое резины концентрация повреждений всегда выше, чем в объеме. Такая особенность поверхностного слоя присуща всем материалам, и в литературе по трению промежуточный слой между истираемым материалом и контртелом получил название «третьего тела».

При взаимодействии резиновой футеровки с перерабатываемым материалом происходит разрушение ее поверхност-

ного слоя как за счет абразивного износа, т.е. за счет истирания и массопереноса резины, так и за счет процессов усталости от многократных ударов контртела, т.е. металлических шаров и кусков материала с острыми гранями. Разрушению способствуют большие напряжения, возникающие в области внедрения острого конца контртела в резиновый массив, что сопровождается довольно высокой температурой в локальных объемах за счет экзотермических эффектов [2]. В дальнейшем для обозначения некоторого условного объема материала будем использовать термины «локальный объем» и «характерный объем». Ниже эти термины будут рассматриваться более подробно.

В целом такие физические процессы способствуют появлению локальных микрообъемов как бы с «разрыхленной» структурой, отличной от структуры исходного материала. Резина в таких объемах на заключительной стадии разрушения имеет меньший модуль упругости и довольно большой коэффициент диссипации, а ее свойства приобретают существенно нелинейный характер [2,3,4].

Так же, как и в случае циклического усталостного разрушения резин, на поверхности резиновой футеровки при абразивно-усталостном характере износа каждый раз после удаления определенной толщины массива вследствие истирания будет возникать новый слой с измененной структурой. Помимо этого в массиве футеровки за счет старения и усталостного разрушения будут возникать локальные объемы с отличной от матрицы структурой.

Все это вместе позволяет утверждать, что резиновую футеровку можно представить как некий материал композитного типа с включениями в виде локальных объемов с измененной структурой. При объединении таких объемов в процессе длительного нагружения будут появляться микротрещины, слияние которых приведет к образованию макротрещин [3].

Рост последних в резиновом массиве с включениями можно представить в виде модели, показанной на рис. 1. Трещина прорастает от точки А до точки бифуркации М, в которой происходит ее ветвление за счет вероятностного появления локального объема резины с нелинейными свойствами. В точке (а вернее, в микрообласти) М происходит выбор нового термодинамического направления  $A_1$  или  $A_2$ , определяемого вероятностным характером процесса разрушения, структурой материала и т.д.

Рассмотрим более подробно развитие усталостной трещины в массиве резиновой футеровки под действием внешних сил. Предположим, что в точке А (рис. 2) происходит остановка фронта трещины. Причиной может служить вероятностный характер процесса разрушения или невозможность преодоления трещиной энергетического барьера. В этой точке А, а вернее в локальном микрообъеме, который мы условно обозначаем точкой, вследствие концентрации напряжений в устье трещины будет существенно возрастать температура диссипативного разогрева. Это приведет к изменению структуры в некотором объеме К впереди фронта трещины; материал в этом объеме приобретает «разрыхленную» структуру с явно нелинейными свойствами, коэффициент диссипации которой намного больше, чем у исходного материала. Все это вместе приведет к еще большему изменению структуры, уменьшению энергии роста трещины, и последняя скачкообразно переместится в точку В.

Если на пути трещины имеется область с уже ослабленной структурой, то трещина может скачкообразно ее преодолеть; если же между областями К и  $K_2$  (рис. 3) существует своего рода перемычка, т.е. область  $K_1$  исходного материала, то обычно наблюдается остановка фронта трещины в точке В до тех пор, пока под действием внешних сил не произойдет накопление микрповреждений до некоторого критического

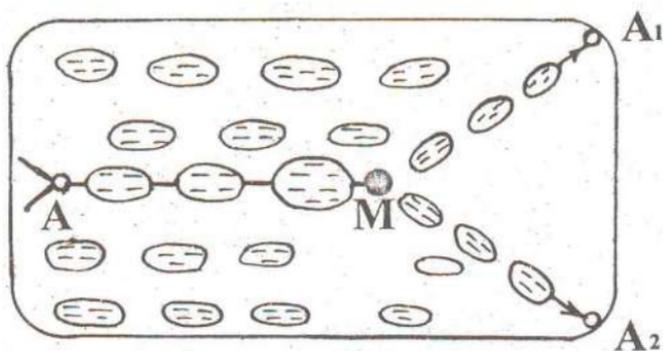


Рис. 1. Модель роста трещины с ветвлением в точке бифуркации М

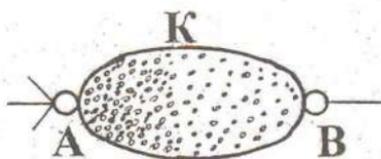


Рис. 2. Модель разрушения локального объема резины

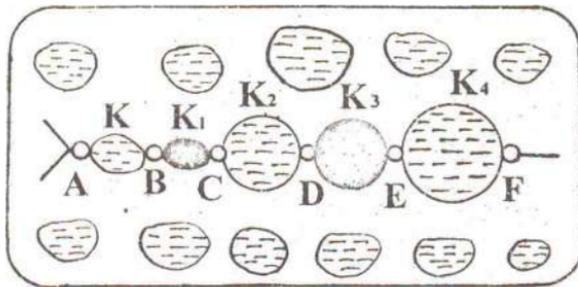


Рис. 3. Модель роста усталостной трещины:

- локальный объём поврежденного материала;
- локальный объём неповрежденного или малоповрежденного материала

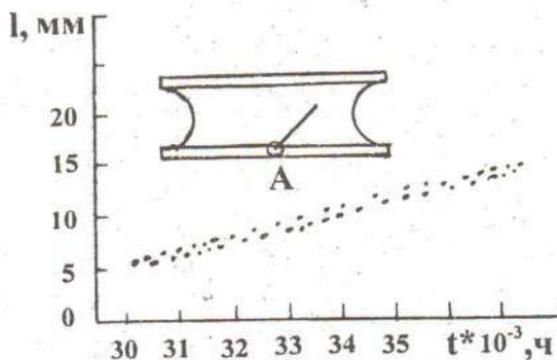


Рис. 4. Временная зависимость роста длины усталостной трещины в БРМ 101 (35\*60\*100 мм) из малонаполненной резины 51-1562

уровня; затем следует повышение температуры, изменение структуры и трещина скачкообразно продвинется до точки С.

Процесс этот будет повторяться с различной продолжительностью по времени утомления, и усталостная трещина будет расти от точки А до точки F, оставляя на своем пути следы остановки фронта, т.е. следы медленного или быстрого скачкообразного движения. При этом одному скачку будет соответствовать различное количество циклов (или ударов) нагружения. Это, как уже было отмечено ранее, связано с вероятностной природой процесса разрушения резины. На поверхности разрушения при фрактографических исследованиях такому движению трещины будут соответствовать различные особенности: гребни, сколы, усталостные бороздки, волокнистая структура и т.д.

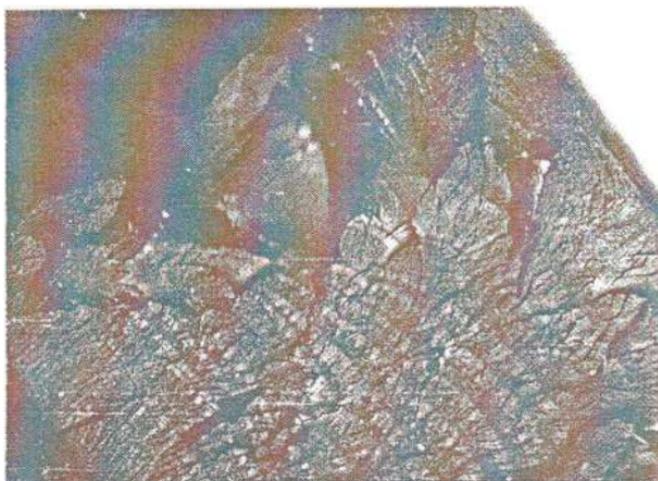
Такая модель разрушения резиновой футеровки достаточно хорошо подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями. Рассмотрим некоторые особенности абразивно-усталостного разрушения футеровки и сравним механизм роста трещин с аналогичным по своей сущности механизмом разрушения резиновых деталей при многократном циклическом нагружении.

На рис. 4 показана временная зависимость роста усталостной трещины на поверхности резинометаллического блока типа БРМ101 из малонаполненной резины. Ранее этот блок был подвергнут циклическим деформациям сдвига в вибрационном конвейере КВ2Т при следующих параметрах нагружения: амплитуда сдвига  $A=10,5$  мм (относительный сдвиг  $\gamma=0,33$ ), частота  $\omega=10,8$  Гц, статическое торцевое поджатие  $\Delta=3$  мм, внешняя среда обычная. После примерно 5 лет непрерывной эксплуатации (время циклического нагружения составило  $t=31000$  ч) блок был снят в связи с появлением в точке А усталостной трещины. После «отдыха» он был подвергнут циклическому разрушению в лабораторных условиях при аналогичных параметрах нагружения. Рост трещины

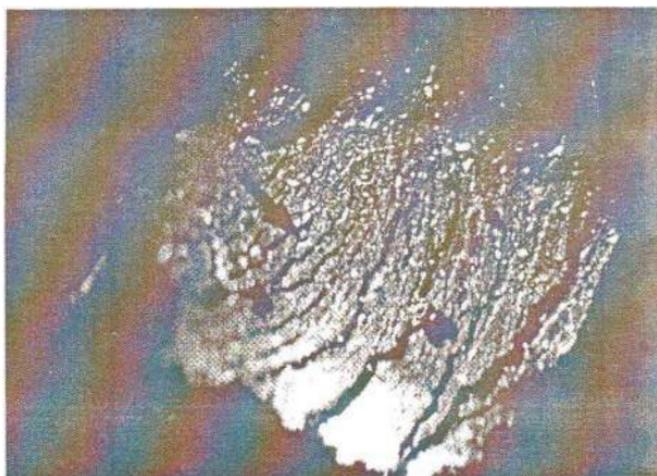
фиксируется периодически с помощью измерительного микроскопа только на поверхности резины. Как видно, рост трещины во времени носит линейный характер, что подтверждается и другими исследованиями [1]. При расчленении образца была исследована поверхность разрушения. Фрактографические особенности этой поверхности показаны на рис. 5,а; четко видны усталостные бороздки в виде чередующихся темных и светлых полос, свидетельствующих о скачкообразном движении трещины. Шероховатые полосы соответствуют медленному росту усталостной трещины, светлые – быстрому. Рядом с такой полосчатой особенностью на поверхности разрушения имеются и другие типы усталостных бороздок (рис. 5,б), в которых хорошо просматриваются следы остановки фронта трещины. Все эти фрактографические особенности поверхности трещины свидетельствуют о сложности и неоднозначности процессов, происходящих в движущейся трещине; характер этих процессов, как правило, определяется структурой материала.

Агрессивная среда вносит свои особенности в процессе развития усталостных трещин. Вследствие существенной поврежденности поверхностного слоя резины под действием внешних сил и влиянии активной среды линейный рост трещин наблюдается лишь на ограниченных участках; в областях бифуркации происходит ветвление трещин, быстрый рост одних и остановка других. Все это объясняется вероятностным характером процесса разрушения.

На рис. 6 показана усталостная трещина на поверхности резино-металлического элемента типа ВРМ (диаметр 180 мм, высота 100 мм, средненаполненная резина типа 6620) после 6 лет непрерывной эксплуатации в качестве виброизолятора подвески окомкователя-смесителя (г. Мариуполь, аглофабрика завода им. Ильича). Эксплуатация осуществлялась при амплитуде сжатия 0,5-1,7 мм, частота 2,1-5,2 Гц, статическом поджатии 20 %, режим стохастический, близкий к гармониче-



а



б

Рис. 5. Усталостные бороздки и следы остановки фронта трещины на поверхности разрушения: стрелки показывают направление движения трещины (увеличение \*30)

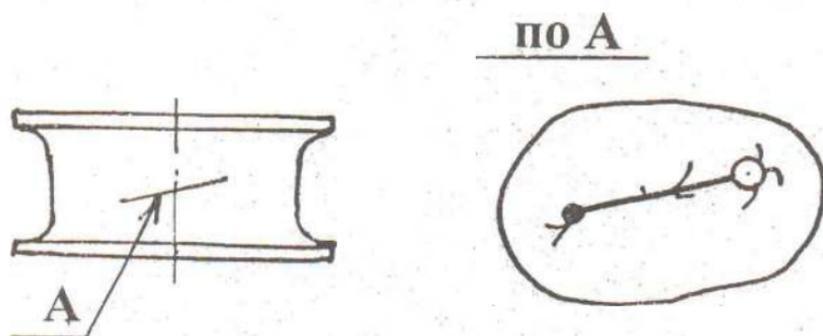


Рис. 6. Ветвление усталостной трещины для случая активного влияния внешней среды на поверхности резинового элемента типа ВРМ

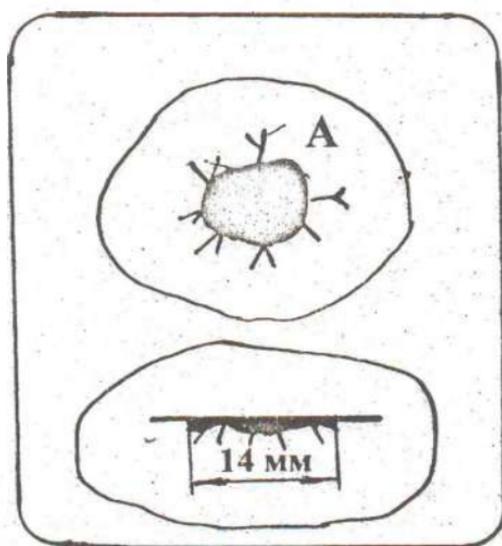


Рис. 7. Характер макроразрушения резинового образца при ударном разрушении

скому; внешняя среда агрессивная: горячая вода до  $85^{\circ}\text{C}$ , повышенная концентрация  $\text{CO}_2$ . Фрактографические особенности поверхности разрушения аналогичны предыдущему случаю: наблюдались гребни, ступеньки скола, усталостные бороздки.

Что же касается изучения механизма усталостного разрушения резиновых футеровок в массиве от действия перерабатываемого материала, то эти исследования весьма сложны, так как в реальных условиях эксплуатации их рабочие поверхности подвергаются интенсивному износу и фрактографические особенности практически не сохраняют.

Поэтому такие исследования целесообразно проводить избирательно в лабораторных условиях, выделяя интересные эффекты с помощью специально подобранных режимов, материалов и т.д. С этой целью образец с размерами  $60 \times 100 \times 100$  мм из средненаполненной резины типа 2959 подвергался циклическому нагружению на установке с гармоническим режимом работы. Образец был вырезан из резино-металлического блока типа БРМ106, ранее подвергнутом циклическому деформированию со следующими параметрами нагружения: амплитуда сдвига  $A=3$  мм; частота  $\omega=12,5$  Гц; время нагружения  $t=4900$  ч. (время эксплуатации вибрационного питателя с фазами отдыха примерно 3 года), среда активная, характерная для горного производства – шахтные воды с повышенным РН. В качестве контртела использовался металлический шар диаметром 80 мм; параметры нагружения (амплитуда ударного сжатия  $A=3$  мм, частота 5 Гц) примерно соответствовали эксплуатационным, характерным для шаровых мельниц типа МШУ 36х50.

Толщина образца  $h=120$  мм также сравнима с реальной толщиной резиновых футеровок мельниц. Нагружение проводилось в течение 2 месяцев с фазами отдыха (влияние последних не исследовалось); образец получил  $8 \cdot 10^6$  циклов ударного нагружения. Испытания были прекращены после

того, как на поверхности резины появились трещины, длина которых была достаточна для фрактографических исследований.

Характер макроразрушения поверхности образца показан на рис. 7. Лункообразная каверна с множеством ветвящихся трещин имела усредненный диаметр около 14 мм; глубина проникновения трещины в резиновый массив примерно 2-3 мм. Фрактографические особенности поверхности трещины показаны на рис. 8. Четко видны усталостные бороздки, свидетельствующие об остановке фронта трещины и о ее скачкообразном движении.

Что же касается поверхности резиновой футеровки в реальных условиях, то ее фрактографические особенности характерны для поверхности при интенсивном истирании и здесь не рассматриваются.

Из рассмотренного выше следуют весьма важные для дальнейших исследований выводы:

- в процессе абразивно-усталостного разрушения поверхность резиновой футеровки приобретает особые свойства: концентрация повреждений в тонком поверхностном слое на порядок больше, чем в массиве;

- при длительной эксплуатации в массиве резиновой футеровки образуются локальные объемы с измененной структурой материала; спонтанное объединение таких объемов приводит к зарождению и дальнейшему росту трещин; все это вместе позволяет представить резину как некий материал композитного типа, матрица которого имеет включения с отличной структурой;

- рост усталостных трещин как на поверхности, так и в объеме происходит скачкообразно; скорость роста трещин определяется как внешними условиями - стохастический режим нагружения, активная внешняя среда, - так и структурой материала: наполнением, степенью поврежденности, прочностными характеристиками исходного материала и т.д.



Рис. 8. Усталостные бороздки на поверхности разрушения: стрелка показывает направление трещины (увеличение\*30)

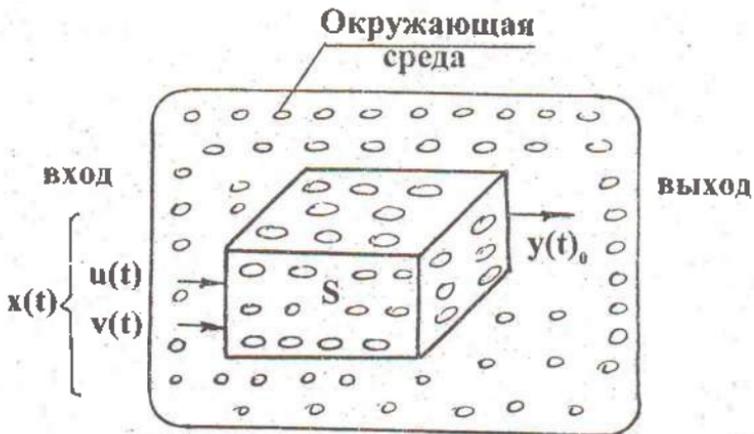


Рис. 9. Модель состава системы:  $S$  - система

Как видно, наполненная резина представляет собой некоторую композитную структуру, состоящую из матрицы с включениями типа микротрещин, неоднородностей структуры, технологических дефектов (каверны, пустоты и т.д.) и, следовательно, к ней можно применить метод Валпола [1].

Эти существенные особенности механизма абразивно-усталостного разрушения резиновых футеровок позволяют при создании их феноменологических моделей использовать методы системного анализа и теории катастроф, получивших в последние годы признание в общей механике разрушения.

## 2. МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Резиновые детали, используемые в качестве защитных футеровок, устанавливаемых в горных машинах, например, шаровых мельницах, и активно взаимодействующих с окружающей средой (перерабатываемым материалом) можно представить в виде некоторой системы. Чтобы получить модель этой системы, необходимо придать формальной модели конкретное содержание. В принципе, это означает, что для реальной системы, в рассматриваемом случае для резиновой футеровки, необходимо решить, какие ее особенности следует включать как элементы модели, а какие следует исключить как несущественные. Рассматривая механизм микро- и макроразрушения наполненных резин под действием циклических нагрузок, абразивного износа и старения, можно отметить весьма важную особенность: в процессе эксплуатации в резиновом массиве происходит образование определенных включений, изменяющих его структуру. Эта внутренняя характеристика системы, выражаемая через макрохарактеристики резины, например, через модуль упругости и коэффициент диссипации, и будет представлять состояние системы. Значение макрохарактеристик резины в каждый момент вре-

мени будет определять текущее значение выходных параметров системы. По определению, состояние системы есть информация для предсказания в каждый момент времени характеристик системы.

Если использовать методы системного анализа [5], то резиновую футеровку можно представить в виде нестационарной (свойства зависят от времени), динамической системы, представляющей собой совокупность взаимосвязанных элементов, обособленной от внешней среды и взаимодействующей с ней как единое целое; при этом система обладает внутренней целостностью и способностью функционировать. Под функционированием системы подразумевается следующее: в системе во времени благодаря действию внешних условий происходят некоторые процессы, например, изменение массы, структуры и т.д., изменяющие ее свойства или, используя терминологию системного анализа, изменяющие ее цель.

В качестве структурной схемы такой системы наиболее удобно использовать динамическую модель состава системы (по определению *partition model*) - т.е. модель, описывающую, из каких подсистем и элементов состоит система (рис.9). Эта модель весьма близка к модели т.н. "черного ящика".

Выход системы  $y(t)$  является результатов некоторого преобразования  $\Phi$  процесса  $x(t)$ , т.е.  $y(t)=A(x(t))$ . Если рассматривать выход  $y(t)$  системы как ее реакцию на управляемые  $u(t)$  и неуправляемые  $V(t)$  выходы, т.е.

$$x(t)=\{u(t), v(t)\},$$

то модель системы можно выразить как совокупность двух процессов

$$X^T = \{x(t)\} \text{ и } Y^T = \{y(t)\}, t \in T,$$

где  $X, Y$  - элементы множества возможных значений  $x$  и  $y$ ;

$T$  - элементы множества "моментов времени"  $t$ .

При этом в качестве входящих величин  $x(t)$  можно принимать поле сил от действия перерабатываемого материала (например,  $u(t)$  - управляемые входы) и от действия влияния

агрессивной внешней среды (например,  $v(t)$  - неуправляемые входы), вызывающих в резиновом массиве абразивный износ и усталостное повреждение материала, т.е. изменение структуры. В этом случае состояние системы  $z(t)$  в каждый момент времени будет определяться текущим значением выходной величины (рис. 9)

$$y(t) = \eta(t, z(t)), t \in T.$$

Здесь  $\eta$  - некоторое отображение параметров выхода  $y(t)$ .

Суммируя изложенное, систему в процессе ее функционирования можно представить следующим образом: в исходном положении при  $t=0$  система обладает определенной начальной поврежденностью  $\Delta p_1$ , изначально присущей любому реальному материалу. Это поврежденность можно представить как изменение структуры в определенных микрообъемах материала [1,4]. Со временем эксплуатации системы количество таких микрообъемов возрастает и они объединяются между собой, образуя так называемые локальные объемы: дальнейший их рост приводит к зарождению микротрещин и к изменению структуры в целом.

Таким образом, задаваемое на входе поле сил  $x(t)$  преобразует структуру материала, т.е. характеризующие его параметры, например, модуль упругости, не остается постоянным, а существенно изменяется во времени. При этом изменения происходят большей частью в матрице; структура включений изменяется в меньшей степени.

### 3. МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Рост усталостной трещины, модель которой показана на рис. 3, с энергетической точки зрения, можно представить в виде Z-образной кривой (рис. 10). Предположим, что в силу флуктуаций параметров структуры все последующие области включений (рис. 3) имеют более высокий энергетический

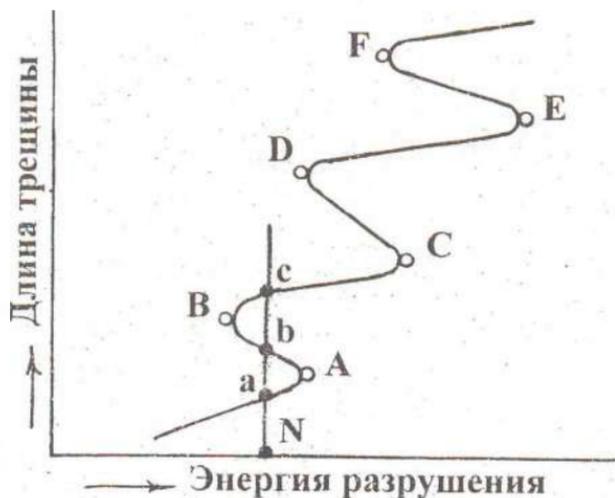


Рис. 10. Энергетическая кривая роста усталостной трещины

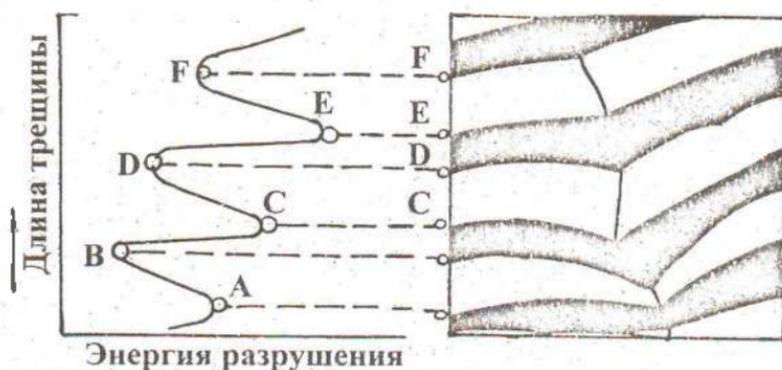


Рис. 11. Энергетическая кривая роста трещины и соответствующая ей фрактограмма поверхности разрушения: светлые зоны – быстрое движение трещины; темные зоны – медленное движение трещины (рисунок взят из реальной фрактограммы – увеличение \*40)

барьер (на рис. 3 они для наглядности показаны различного размера). Будем считать, что в точках А-Г (рис. 10) происходит остановка фронта трещины, а ее движение от точки А до точки В и от точки С до точки Д и т.д. проходит по ослабленному "разрыхленному" материалу. Движение трещины от точки В до точки С проходит по исходному материалу и встречает большее сопротивление для преодоления энергетического барьера. Для наглядности на рис. 11 показана энергетическая кривая роста усталостной трещины и соответствующие ей точки на фрактограмме поверхности разрушения.

Полученная информация позволяет определить коэффициент интенсивности разрушения  $K_{Ic}$  по формуле [6]

$$K_{Ic} = \frac{Gu_0\Delta}{1-\nu^2},$$

где  $u_0$  - энергия активации связей;  $\Delta$  - ширина бороздок;  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

Для средненаполненных резин получено значение  $K_{Ic} = 6,1 \text{ кг/мм}^{3/2}$ , что удовлетворительно совпадает с другими данными [1].

Как уже отмечалось ранее, движение трещины от А до В происходит скачкообразно. В этом случае в точке N энергия разрушения может иметь одинаковое значение для трех значений длины трещины. На z-образной кривой этому соответствуют три точки: а, б и с (рис. 10). Теоретически это возможно, однако на практике процесс потери устойчивости локальным объемом происходит в очень короткий промежуток времени: наблюдается мгновенное преодоление энергетического барьера и резкий скачок трещины. Время скачка при циклическом одноосном растяжении резиновой пластинки составляет сотые доли секунды [7]. По сути, в локальном объеме материала происходит потеря устойчивости системы.

Такая мгновенная потеря устойчивости относится к типу катастрофических явлений. По классификации катастроф [8] такое внезапное изменение поведения системы имеет назва-

ние элементарной фундаментальной катастрофы типа сборки. Элементарная катастрофа имеет следующую структуру и название элементов: поверхность отклика, пространство управления и пространство переменных состояния.

Для рассматриваемого случая механики разрушения резины к пространству переменных состояния можно отнести параметры, характеризующие изменения структуры материала, эволюционирующего во времени нагружения, т.е. поврежденность  $\Delta r$  или энергия разрушения  $\Delta u$ ; к пространству управления - параметры, определяющие процессы разрушения: поле напряжений, поле температур от диссипативного разогрева, поле внешней среды: температура,  $\text{CO}_2$ , влияние щелочей, кислот, ионизирующих излучений и т.д.

В нашем примере можно выделить два основных случая.

1. Если пространство управления одномерно и пространство переменных состояния также одномерно, то бифуркационное множество представляет собой точку  $P$  на оси пространства управления (рис. 12), а  $z$ -образная кривая имеет название кривой отклика. На кривой четко наблюдаются зоны устойчивого и неустойчивого состояния системы, т.е. локального объема материала.

2. Второй случай предусматривает, что пространство управления двумерно (например, напряжение  $\sigma$  и температура  $T$ ), а пространство переменных одномерно (как и в первом случае это может быть поврежденность  $\Delta r$  или энергия разрушения  $\Delta u$ ). В этом случае бифуркационное множество представляет собой сборку, а точка катастрофы - это точка сборки (рис. 13).

Такая модель достаточно четко позволяет понять физический смысл и механизм разрушения локального объема материала.

**Выводы:**

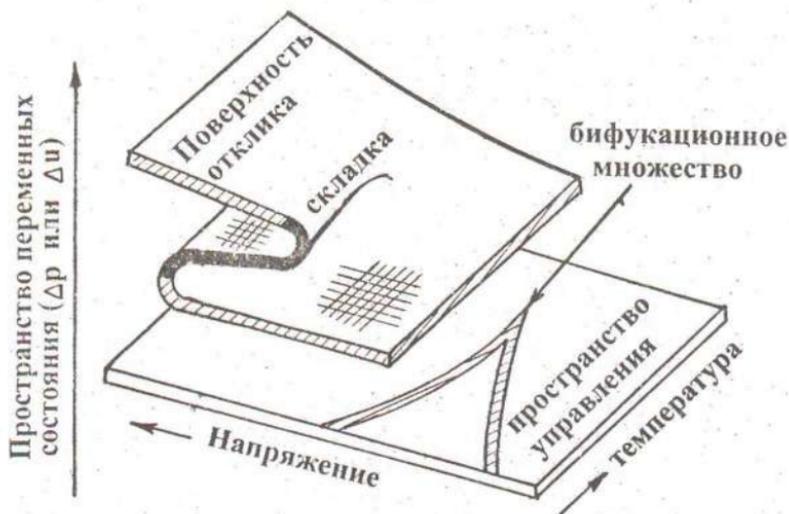


Рис. 12. Г-образная кривая, характеризующая потерю устойчивости локального объема резины

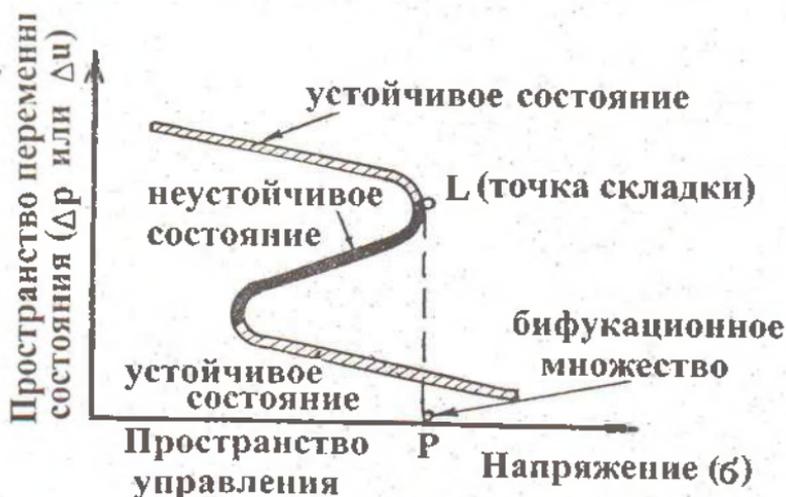


Рис. 13. Катастрофа типа сборки для случая разрушения локального объема резины

1. Механизм абразивно-усталостного разрушения резиновой футеровки обладает дуальными свойствами: процесс разрушения поверхностного слоя от действия внешних сил сопровождается сложным механизмом разрушения внутри резинового массива, протекающего эволюционно за счет изменения структуры от эффектов утомления и старения; в связи с этим при выборе параметров материала и толщины футеровочных плит следует использовать методы механики разрушения, содержащие двухпараметрические критерии разрушения.

2. При определении толщины резиновой футеровки на ударные нагрузки можно использовать усредненные значения модуля упругости исходного материала, т.к. влияние свойств поверхностного слоя на его величину несущественно.

3. При определении толщины резиновой футеровки на истирание следует использовать значение эффективного модуля сдвига  $G_3$ , так как благодаря более высокой концентрации повреждений в тонком поверхностном слое его механические характеристики отличаются от аналогичных в объеме резины: модуль сдвига и прочностные характеристики всегда ниже.

Этот эффект достаточно хорошо подтверждается и в реальных условиях эксплуатации резиновых футеровок, например, в шаровых мельницах. При прочих равных условиях - внешняя среда и режим работы машин оставались неизменными - скорость износа футеровки в процессе работы не остается постоянной, а увеличивается.

На рис. 14 показана кривая в координатах  $h_T/f(t)$ , где  $h_T$  - текущее значение толщины футеровки;  $H$  - первоначальное значение толщины футеровки;  $t$  - время эксплуатации. Данные получены для резиновой футеровки ( $H=160$  мм, предельная толщина изношенной футеровки, при которой прекращается ее эксплуатация  $h_{пред}=50$  мм,  $t = 12$  месяцев), установленной в шаровой мельнице МШ1(36x50: руда абразивная,

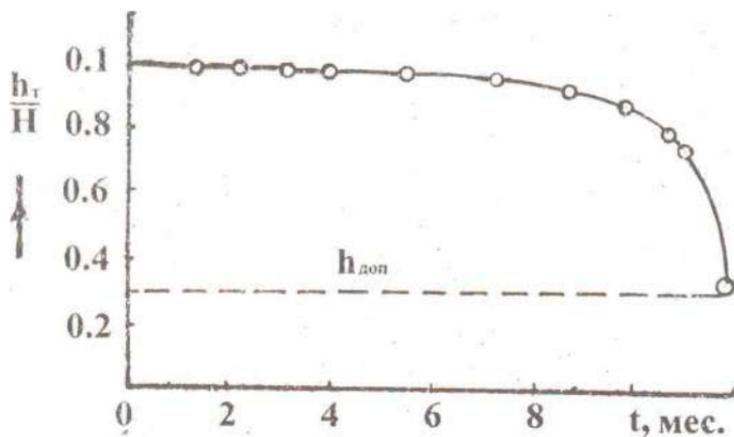


Рис. 14. Временная зависимость износа резиновой футеровки в шаровой мельнице

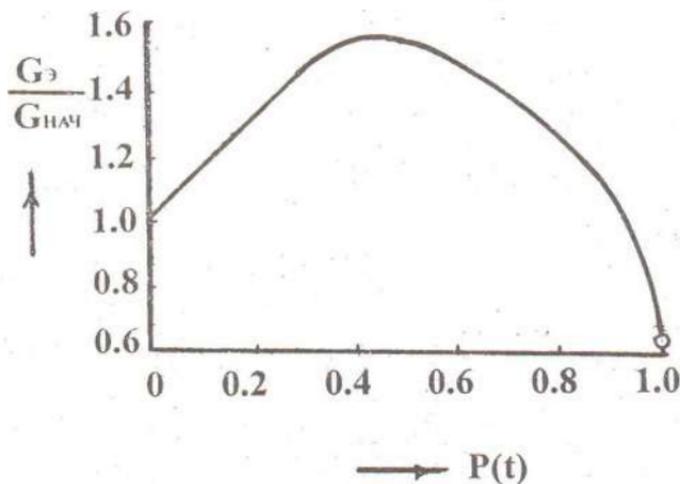


Рис. 15. Зависимость эффективного модуля сдвига резины от степени ее поврежденности при абразивно-усталостном износе

крепостью по Протодяконову 14-17, крупность -6, металлические шары диаметром 80 мм.

Как видно, на первой стадии разрушения продолжительностью примерно 4-5 мес. эксплуатации износ футеровки составляет около 8-10 %. Это связано с тем, что структура материала в объеме от действия усталостных процессов и процессов старения претерпела незначительные изменения; в дальнейшем, по мере накопления поврежденности, скорость износа резко возросла и для заключительной стадии она стала фактически катастрофической. За последние 20-30 дней, т.е. за 8-9 % времени эксплуатации, износ футеровки составил более 30 %: от первоначальной толщины такая особенность процесса качественно совпадает с данными, полученными для усталостного разрушения резины [1].

Такое увеличение износа футеровки имеет следующие причины: во-первых, со временем эксплуатации поврежденность в объеме резинового массива возрастает, а, следовательно, прочность и сопротивление износу уменьшаются; во-вторых, с уменьшением толщины футеровки при ее взаимодействии с крупнокусковым материалом, возрастают напряжения в местах контакта, что опять-таки приводит к увеличению поврежденности.

Все эти факторы необходимо учитывать при выборе модели расчета футеровки, определении ее толщины и выборе материала с требуемыми механическими характеристиками.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНЫ ПРИ АБРАЗИВНО-УСТАЛОСТНОМ ИЗНОСЕ

Разрушение сложной эластомерной конструкции будем исследовать с помощью феноменологической модели сплошной среды, т.е. некоторого гладкого многообразия, на котором заданы поля различных физико-механических характеристик, определяемых как средние значения "характерного объ-

ема" реального материала. Процесс разрушения будем рассматривать также как преобразование всей совокупности физико-механических характеристик  $\Phi$  модели

$$\Phi(t_0) \rightarrow \Phi(t).$$

Строгое определение таких физико-механических характеристик даже для некоторого "характерного объема" материала с включениями, представляет собой довольно сложную задачу. В связи с тем, что в дальнейших исследованиях понятие "характерного объема" будет широко использоваться, остановимся на его определении более подробно.

Будем считать, что матрица представляет собой макроскопически однородную систему и состоит из двух взаимодействующих подсистем: одна имеет объем  $\Delta v$ , а другая  $v - \Delta v$ . В общем случае это означает, что весь объем  $v$  заполнен аналогичными подсистемами  $\Delta v$ , которые в процессе нагружения испытывают различные флуктуации. В процессе исследования выделяется лишь одна подсистема, а по остальным проводится усреднение. Будем также считать, что в процессе эволюции (т.е. в процессе эксплуатации эластомерной конструкции) система остается макроскопически однородной, а внутри малых подсистем однородность может нарушаться за счет флуктуации термодинамических параметров [2].

В целом это означает, что "характерный объем" композитного материала заменяется макроскопически эквивалентным ему объемом однородного материала. Требование макроскопической эквивалентности означает, что совокупность некоторых средних по "характерному объему" физико-механических характеристик  $\Phi(t)$  композита при любом режиме внешних воздействий может быть представлена соответствующей совокупностью "эффективных" характеристик однородного объема, т.е.

$$\langle \Phi(t_0) \rangle \equiv \Phi_s(t).$$

Таким образом, под "характерным объемом" эластомерного материала с включениями будем понимать объем, кото-

рый содержит достаточное число включений, чтобы считать его макроскопически однородным. То есть, если на поверхности "характерного объема" задать нагрузки, которые создали бы в однородном материале напряженное состояние, то длина волны флуктуации полей тензора напряжений  $T_{\sigma}$  и тензора деформации  $T_{\epsilon}$  должна быть мала по сравнению с линейными размерами "характерного объема".

Размеры "характерного объема" в целом обусловлены выбором исходной модели материала.

Примем, что модуль упругости материала включений в направлении главного растягивающего напряжения равен нулю, а в направлениях, параллельных плоскости трещины, совпадает с упругими характеристиками исходного материала. Здесь следует помнить, что подобные свойства включений проявляются в том случае, когда максимальное нормальное напряжение растягивающее. При деформациях сжатия трещина в этом направлении закрывается и материал работает так же, как в исходном состоянии.

Процессы, происходящие в эластомерах, носят необратимый характер. Поэтому представляется вполне закономерным при построении модели использовать современные методы термодинамики необратимых процессов

Суть этих методов состоит в том, что они позволяют установить связь и взаимодействие различных по своей природе явлений. При этом особый интерес представляет изучение комплексного воздействия различных физико-химических факторов, так как возникающие при их взаимодействии кооперативные эффекты выполняют роль обратной связи, в результате чего резко усиливается протекание каждого процесса в отдельности, даже при их незначительности.

В процессе разрушения эластомерной системы можно условно выделить две стадии. На первой происходит образование микрповреждений. Этот период имеет характер квази-

равновесного процесса. На второй стадии происходит слияние микротрещин и образование магистральной трещины.

В целом процесс накопления микроповреждений можно рассматривать как процесс образования и роста в первоначально однородном и изотропном материале включений с новыми существенно анизотропными упругими свойствами.

В каждой точке среды  $M(x_i)$  ориентация отдельного включения в различные моменты времени  $t$  может быть задана триедром собственных осей, которые определяются углами Эйлера  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  относительно некоторой единой для характерного объема системы координат. Вводится в рассмотрение функция

$$\rho = \rho(\varphi, \theta, \psi, t),$$

характеризующая концентрацию включений различной ориентации в "характерном объеме".

Триедр собственных координатных осей включений ориентируется в соответствии с симметрией материала включений. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в процессе деформирования образцов развитие микротрещин происходит ориентированно по  $\sigma_{\max}$ . Это позволяет материал включений считать трансверсально изотропным и одну из осей триедра совмещать с осью изотропии материала.

При этом

$$\rho(\varphi, \theta, \psi, t) = \rho(\varphi, \theta, t).$$

Направление оси изотропии определяется ориентацией разорванных связей в эластомере и, следовательно, мгновенно-упругие податливости в этом направлении наибольшие.

Предполагается, что мгновенно-упругие модули первоначально однородного материала  $G_0$  и упругие модули материала включений  $G_1$  не зависят от времени, т.е. что свойства включений не меняются в процессе разрушения.

В механике композитных сред, имея выражение для  $G_0(L_0)$  и  $G_1(L_1)$  можно получить выражение для  $G_3$  и  $L_3$ .

В случае, когда в материале имеются включения лишь одной ориентации, концентрация которых  $p(t)$

$$\rho = \rho(\varphi, \theta, t) = \begin{cases} p(t) & \varphi = \varphi^* \text{ и } \theta = \theta^*, \\ 0 & \varphi \neq \varphi^* \text{ и } \theta \neq \theta^*. \end{cases}$$

Соответственно упрощается выражение для  $G_3$  и  $L_3$ .

Таким образом, развитие микрповреждений в материале макроскопически проявляется в изменении мгновенно-упругих эффективных податливостей или модулей. Очевидно, что рост микрповреждений проявляется не только в изменении мгновенно-упругих свойств резины. Однако существование вполне определенных зависимостей между детальными микрохарактеристиками разрушения  $\rho(\varphi, \theta, t)$ ,  $G_1(\varphi, \theta)$ , и  $L_1(\varphi, \theta)$  и макрохарактеристиками  $G_3$  или  $L_3$  позволяет рассматривать последние как простейшие макрохарактеристики поврежденности материала - дополнительные термодинамические параметры состояния.

Для полноты рассматриваемой модели необходимо определить эффективные (усредненные по некоторому объему резинового массива) модули упругости с учетом развивающейся во времени поврежденности. Воспользуемся для этой цели методом Валпола, ранее применяемым для резин в работах [2,9]. Воспользуемся также предположениями, частично высказанными в этих же работах.

1. Исследуемый резиновый массив представляет собой совокупность материальных точек или "характерных объемов", наделенных свойствами исходного материала.

2. Процесс поврежденности резины под действием поля внешних сил можно представить как образование и накопление во времени в первоначально однородном и изотропном материале некоторых областей, имеющих характер включений; физико-механические характеристики всех включений идентичны между собой, но отличаются от таких же характеристик исходного материала.

3. Концентрация включений в "характерном объеме" резины растет во времени и этот рост отражен функцией  $p(t)$ ; при этом упругие модули материала включений не зависят от времени, т.е. в процессе эволюции материала свойства включений не изменяются: модуль упругости материала включений на первом этапе разрушения в  $n$  раз больше, чем модуль исходного материала.

4. Резина в исходном состоянии однородна и изотропна; старение резины характеризуется параллельно протекающими процессами структурирования и деструкции, при этом преобладающими являются процессы структурирования.

С учетом этих предположений было получено [2] выражение для  $G_s(p)$  в виде

$$G_s = G_{\text{нач}} \left[ n + \frac{(1-n)(1-p)(n+3/2)}{(n+3/2) + p(1-n)} \right],$$

$$p(t) = 1 - \exp(-kt),$$

где  $n$  - коэффициент, характеризующий увеличение модуля упругости резины за счет появления включений; в работе [2] для резины на основе СКИ-3 получено  $n = 1,2$ .

Характерно, что полученная при этом матрица модулей упругости исходного материала

$$G_0 = \begin{pmatrix} \frac{2E_0}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2E_0}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2E_0}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2E_0}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2E_0}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2E_0}{3} \end{pmatrix}$$

$$G_3 = \begin{vmatrix} \frac{56E_0(1-p)}{3(17p+28)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2E_0}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2E_0}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2E_0(1-p)}{2p+3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2E_0(1-p)}{2p+3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2E_0}{3} \end{vmatrix}$$

при  $p=0$ , т.е. в начальном состоянии, дает следующие результаты: эффективный модуль  $G_3$  совпадает с начальным модулем резины  $G_{нвч}$ . В дальнейшем при утомлении модуль упругости материала с повреждениями благодаря процессу структурирования возрастает вплоть до кооперативного слияния микрповреждений и появления магистральных трещин. После этого модуль упругости падает, что свидетельствует о переходе материала в некоторое лабильное состояние. Эти эффекты отражены в известных моделях усталостного разрушения резины и исследованы в работах [1,2].

Вместе с тем процесс абразивно-усталостного разрушения резины имеет ряд принципиальных отличий от чисто усталостного процесса. Одно из основных отличий - наличие поверхностного эффекта, характеризующегося особым свойством поверхности и появлением так называемого третьего тела или контртела. Другое отличие - наличие интенсивного абразивного износа, приводящее в конечном счете к массопереносу резины, т.е. к постепенному отделению частиц материала от массива; в процессе эксплуатации эластомерной конструкции происходит уменьшение объема резинового массива в основном за счет уменьшения толщины футеровочных плит. При этом следует отметить различие процессов разрушения в массиве резины и в тонком поверхностном

слое, соприкасающемся непосредственно с рабочей средой, т.е. с перерабатываемым материалом.

Для основного резинового массива эластомерной конструкции отличия практически отсутствуют: под действием внешних сил и общего старения резины в материале образуются микрповреждения, изменяющие структуру исходного материала: эффективный модуль упругости при этом повышается, а коэффициент диссипации снижается [1,2].

Однако в тонком поверхностном слое резины (толщина такого слоя для резиновых футеровок горных машин примерно 0,1-0,2 мм) в процессе абразивно-усталостного износа скорость накопления микрповреждений как было показано ранее [1], во много раз превышает скорость микрповреждений в объеме резины. При этом в качественном смысле сущность физического процесса изменения макрохарактеристик резины остается прежней - модуль упругости сначала увеличивается, а затем падает, - однако временные фазы существенно изменяются. В рассматриваемом случае фаза увеличения модуля упругости занимает значительно меньший промежуток времени, чем фаза его снижения. Следует еще раз подчеркнуть, что в случае типично усталостного разрушения фаза увеличения модуля может достигать 85-95 % от времени глобального разрушения.

Такие эффекты качественно хорошо подтверждаются экспериментально при исследовании механики разрушения тонких резиновых полосок с размером рабочей части 0,05x20x60 мм. Пленки подвергались циклическому разрушению при деформациях растяжения; абразивный износ моделировался периодическим воздействием крупнозернистой наждачной бумаги; кинетика поврежденности  $\Delta p(t)$  в объеме и на поверхности определялась методом ИКС; микрохарактеристики резины - стандартными методами. Зависимость  $G_s/G_{нач} = f(p(t))$  от поврежденности для резины на основе СКИ-3 с наполнением тефуглеродом 60 мас.частей показана на рис.

15. Как видно, модуль сдвига резины разрушенного образца меньше, чем модуль исходного материала примерно на 20-40 %.

Полученные на резиновых пленках результаты носят скорее качественный характер и безусловно полностью не могут быть перенесены на реальные эластомерные конструкции. Тем не менее, в связи с отсутствием в известной литературе каких-либо других данных об изменении механических макрохарактеристик резины от поврежденности при абразивно-усталостном разрушении, коэффициент снижения модуля упругости для наполненных резин можно принимать в рамках полученных экспериментальных данных, т.е.  $k=1,2-1,4$ . При этом эффективный модуль упругости резины будем равен

$$G_3 = k G_{нач}$$

Как видно, рассматриваемая феноменологическая модель позволяет определять модули упругости для резины с поврежденностью и использовать эти данные в общем алгоритме расчета резиновых футеровок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дырда В.И., Чижик Е.Ф., Кияшко В.И., Карачабан Н.Г. Резиновые детали в инженерной практике. - Днепропетровск: Полиграфист, 1998. - 304 с.
2. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. - К.: Наукова думка, 1988. - 232 с.
3. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
4. Разрушение: в 7 т / Под ред. Г.Либовица. - М.: Мир, 1973-1976. - Т. 1-7.
5. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. - М.: Высшая школа, 1989. - 367 с.

6. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа прочности металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 455 с.

7. Потураев В.Н., Дырда В.И., Надутый В.П. Резина в горном деле. - М.: Недра, 1974. - 152 с.

8. Томпсон Дж. М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. - М.: Мир, 1985. - 254 с.

9. Мазнецова А.В. Разработка прикладных методов расчета силовых резиновых деталей горных вибрационных транспортно-технологических машин: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.05 .06 / АН УССР. Ин-т геотехн. механики. - Днепропетровск, 1990. - 17 с.