

# ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ

Том (A) XIX

# СОЕДИНЕНИЯ

№ 9

1977

УДК 541(127+64)

## О КИНЕТИКЕ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ \*

Регель В. Р.

### Обзор

Формулируется постановка задач по исследованию кинетики разрушения композиционных материалов, исходя из представлений кинетической концепции прочности. Приводится обзор экспериментальных данных о кинетике разрушения однородных волокнистых композитов по работам, выполненным в ФТИ имени А. Ф. Иоффе АН СССР. Сочетание феноменологических исследований кинетики разрушения с прямыми методами изучения атомного механизма разрушения положено в основу дальнейшего развития физики прочности композиционных материалов.

Композиционные материалы, в том числе и полимерные композиты (т. е. композиты, в которых оба или один компонент являются полимерными), играют все более важную роль в ассортименте применяемых на практике материалов [1–7]. Поэтому задачи всестороннего изучения механических свойств композитов с целью разработки научных основ технологии их изготовления, их оптимального конструирования и прогнозирования их работоспособности приобретают особую актуальность.

Композиты, будучи макроскопически гетерогенными системами, представляют собой сложные объекты исследования. Тем не менее, в настоящее время успехи в развитии физики прочности твердых тел позволяют продвигаться в решении задач углубленного анализа природы разрушения композитов.

Основой для изучения природы разрушения композитов могут служить кинетические представления о разрушении твердых тел, развитые на основании изучения кинетики разрушения гомогенных материалов [8–10]. Согласно этим представлениям, разрушение следует рассматривать не как некоторое критическое событие, а как процесс накопления нарушений, развивающийся в теле с момента приложения к нему нагрузки, ведущий, в конечном счете, к разделению тела на части. В основе этого процесса лежат элементарные акты термоактивируемых разрывов межатомных связей — акты образования мельчайших нарушений сплошности (повреждений), накоплением которых может быть объяснено появление и более крупных нарушений (полостей и трещин) и их разрастание.

Важнейшей задачей для изучения физической природы разрушения твердых тел разных классов согласно таким представлениям является исследование кинетики накопления нарушений в теле, находящемся под нагрузкой. Скорость накопления нарушений или обратная ей интегральная величина — долговечность (время с момента приложения к телу нагрузки до его распада на части) — основные характеристики процесса

\* Публикуется в связи с шестидесятилетием доктора физико-математических наук проф. В. Р. Регеля (родился 7 апреля 1917 г.). Редколлегия ж. «Высокомолекулярные соединения» сердечно поздравляет юбиляра.

разрушения, и их изучению придается большое значение в физике прочности.

Феноменологические исследования на разных материалах зависимости долговечности  $\tau$  от приложенного напряжения  $\sigma$  и температуры  $T$ , подытоженные в [10], показали, что для всех материалов в достаточно большом интервале температур и напряжений справедлива закономерность [8–10]

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT} \quad (1)$$

Анализ вида этой закономерности и данные о свойствах коэффициентов  $\tau_0$ ,  $U_0$ , и  $\gamma$  для разных материалов привели к выводу о том, что в основе разрушения твердых тел лежат элементарные акты термоактивируемых разрывов межатомных связей. В результате накопления таких актов и происходит разрыв тела на части.

Для подтверждения подобных выводов, наряду с феноменологическими исследованиями температурно-силовой зависимости долговечности, на гомогенных материалах, особенно подробно на ориентированных полимерах выполнен большой комплекс исследований атомного механизма разрушения тел с использованием прямых методов эксперимента, способных регистрировать процессы разрушения на всех уровнях, начиная с атомно-молекулярного.

Проиллюстрированные в [8–10] успехи в исследовании физической природы разрушения полимеров и других гомогенных твердых тел, достигнутые путем сочетания феноменологических исследований долговечности с изучением атомного механизма разрушения, дают основание попытаться использовать такой же подход и при исследованиях физики прочности композиционных материалов. Следует ожидать, что распространение кинетических представлений о разрушении твердых тел на композиционные материалы позволит получить новую информацию о природе разрушения этого важного и перспективного класса материалов. Вместе с тем, можно надеяться и на то, что систематические исследования кинетики разрушения композитов могут способствовать решению некоторых вопросов физики прочности твердых тел, которые не удалось пока решить путем исследований на гомогенных материалах [10].

Сказанное обосновывает целесообразность постановки систематических исследований кинетики разрушения композиционных материалов и выявления особенностей атомного механизма разрушения этого класса материалов.

Ниже перечисляются некоторые из задач этого направления и результаты первых опытов из намеченной программы исследований, выполненные в последнее время в ФТИ имени А. Ф. Иоффе АН СССР [11–19].

Рассмотрим эти задачи в следующем порядке. Вначале проанализируем, какую информацию о физике разрушения композитов можно извлечь из исследований их температурно-силовой зависимости долговечности, имея в виду и исследования кинетики разрушения адгезионных связей между компонентами. Затем рассмотрим и задачи исследования прямыми методами истинных напряжений в компонентах композита, накопления субмикро- и микротрешин и изучения атомного механизма разрушения композитов.

Композиты с полимерной матрицей особенно удобны для подобных исследований, поскольку к ним могут быть применены все методики экспериментов, перечисленные в [10], с успехом использовавшиеся для изучения природы разрушения полимерных материалов.

Удобнее всего начинать с изучения однонаправленных слоистых и волокнистых композитов путем растяжения их вдоль направления армирования. Такие опыты и положены в основу исследований температурно-силовой зависимости долговечности композитов в работах [11–19].

## ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ

**Исследование вида функциональной зависимости  $\tau$  ( $\sigma, T$ ) для композитов.** На основе систематических исследований температурно-силовой зависимости долговечности различного рода композитов необходимо выяснить, справедлива ли и для них закономерность (1), и если справедлива, то в каких именно условиях испытания (в каком интервале  $\sigma$  и  $T$ ).

К настоящему времени для ряда композитов, упрочненных волокнами, показана справедливость закономерности (1) в некотором интервале условий испытаний [11–19]. На

рис. 1 для примера приведены опытные данные зависимости  $\lg \tau(\sigma)$  для стеклопластика с эпоксидной матрицей [11]. Видно, что, как и для гомогенных тел, зависимость  $\lg \tau(\sigma)$  при разных

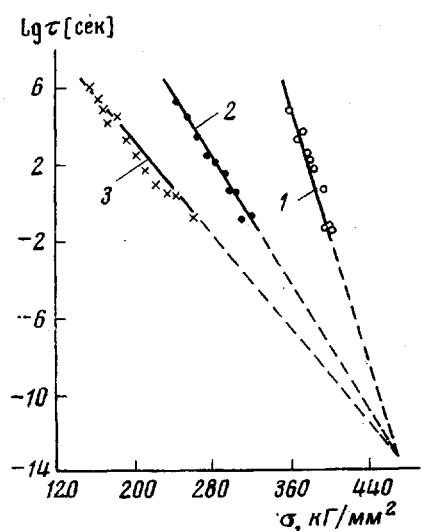


Рис. 1

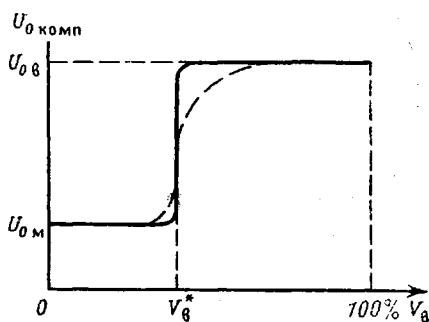


Рис. 2

Рис. 1. Температурно-силовая зависимость долговечности композита стекловолокно (70%)—эпоксидная матрица [11] при температуре испытаний 30 (1); 50 (2) и 100° (3)

Рис. 2. Схематический график зависимости энергии активации процесса разрушения композита от объемного содержания волокон; сплошная линия — скачкообразный переход  $U_0$  комп от  $U_0$  м к  $U_0$  в, пунктир — плавный переход

температурах испытания изображается веером прямых, сходящихся при экстраполяции в одной точке при  $\lg \tau_0 \approx -13$ . Экспериментальные данные подобного рода пока немногочисленны и их целесообразно расширять в дальнейшем. Однако имеющиеся опытные данные уже сейчас дают основание считать, что для композитов, как и для других твердых тел, разрушение следует рассматривать как термоактивируемый процесс накопления нарушений.

Для композитов, как и для других материалов [10], при определенных условиях испытаний наблюдаются отклонения от закономерности (1), свидетельствующие о проявлении в этих условиях непостоянства коэффициентов, входящих в (1). Наблюдаются выпадения прямых  $\lg \tau(\sigma)$  из нормальных «вееров» типа, показанных на рис. 1, изгибы и изломы зависимостей  $\lg \tau(\sigma)$ , явление «смещения полюса» и другие перечисленные в [10] усложнения процесса разрушения.

Задача исследований таких случаев для композитов особенно интересна потому, что причины наблюдаемых усложнений для композитов часто выяснить легче, чем для гомогенных тел. Так, например, при температурах испытаний, превышающих температуру размягчения полимерной матрицы, наблюдаются отклонения от зависимости (1), причина которых ясна. Выяснив же на композитах причины тех или иных видов усложнений, можно прояснить и причины аналогичных усложне-

ний, наблюдаемых для гомогенных тел. Поэтому задача моделирования ряда усложненных случаев разрушения, перечисленных в [10] путем постановки специальных опытов на композитах, представляется перспективной.

Исследование свойств коэффициентов  $\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  в формуле (1) для композитов и выявление их физического смысла. Убедившись, что закономерность (1) справедлива и для композитов, следует перейти к исследованию свойств коэффициентов, входящих в формулу (1). Для этого необходимо изучить температурно-силовую зависимость долговечности ряда композитов, отличающихся по структуре и свойствам своих компонент и их разным объемным содержанием. Вначале следует выбирать такие условия испытаний, при которых соблюдается закономерность (1), чтобы в условиях сохранения постоянства входящих в (1) коэффициентов изучить их изменения при переходе от одного типа композитов к другому или при изменениях объемного содержания наполнителя. Затем можно изучить и усложненные случаи, когда коэффициенты в формуле (1) меняют свои значения при изменениях условий испытания. Это даст дополнительную информацию о свойствах и физическом смысле этих коэффициентов.

К настоящему времени из указанного комплекса трудоемких исследований зависимости  $\tau(\sigma, T)$  проведены опыты только на нескольких однонаправленных волокнистых композитах при испытаниях их на растяжение вдоль направления армирования [11–19]. Однако уже эти опытные данные позволяют сформулировать некоторые выводы о свойствах и смысле коэффициентов  $\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  в формуле (1) для волокнистых композитов. Приведем эти выводы, имея, однако, в виду, что они требуют еще проверки в дальнейших опытах на большем числе различных композитов.

**Свойства коэффициента  $\tau_0$  для композитов.** Для нескольких исследованных композитов при условиях соблюдения закономерности (1) (см., например, рис. 1, а также работы [11–19]) было найдено, что  $\tau_0 \approx 10^{-13 \pm 2}$  сек. Из имеющихся данных можно сделать вывод, что для композитов предэкспоненциальный множитель  $\tau_0$  в формуле (1) не отличается по свойствам и своему физическому смыслу (и по величине) от  $\tau_0$  для гомогенных материалов. Для композитов  $\tau_0$ , видимо, также структурно-нечувствителен, как и для гомогенных материалов и не меняется даже при изменении природы и свойств материалов компонент композита. Не исключено, однако, что в дальнейших опытах будут обнаружены случаи, где  $\tau_0$  для композитов будут существенно отличаться от  $10^{-13}$  сек.

**Свойства величины  $U_0$  для композитов.** Изучая свойства и количественные значения  $U_0$ , можно получать определенную информацию о природе разрушения композитов и даже об элементарных актах, лежащих в основе этого процесса, если придавать величине  $U_0$  и для композитов смысл энергии активации процесса разрушения, подобный тому, который придается в [8–10] смыслу  $U_0$  в формуле (1) для гомогенных тел. Однако вопрос о том, какой смысл можно придавать  $U_{0\text{комп}}$  требует еще изучения и обсуждения. Действительно, даже для наиболее простого случая испытаний на растяжение вдоль направления армирования композитов, упрочненных однонаправленными волокнами, возникает вопрос, какие значения должен принимать для композита температурный коэффициент  $U_{0\text{комп}}$  при разных объемных содержаниях компонент, если энергия активации разрушения волокон  $U_{0\text{в}}$  и матрицы  $U_{0\text{м}}$ , измеренные вне композита, известны и достаточно заметно отличаются друг от друга. Помимо теоретического рассмотрения этого вопроса\* необходимо изучить его и экспериментально. К настоящему вре-

\* В ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР в последнее время выполнен ряд теоретических исследований по физике процессов разрушения композитов [20–26].

мени на нескольких композитах проведены соответствующие опыты (например, на композитах медь – вольфрам и стекловолокноэпоксидная смола в [11–15]). Полученные результаты позволяют предложить следующие варианты ответа на поставленный вопрос.

Прежде всего можно сделать вывод, что, начиная с некоторого достаточно большого объемного содержания волокон, энергия активации разрушения композита численно равна энергии активации процесса разрушения волокон (а не энергии активации процесса разрушения матрицы или энергии активации разрушения адгезионных связей между матрицей и арматурой) и не зависит от их объемного содержания. Наоборот, при объемных содержаниях волокон в композите ниже некоторого значения параметр  $U_{0\text{комп}}$  совпадает по величине с энергией активации разрушения матрицы. Интересны данные о характере перехода  $U_{0\text{комп}}$  от значения  $U_{0\text{м}}$  до  $U_{0\text{в}}$  по мере изменения объемного содержания волокон  $V_{\text{в}}$ . Исследования на композитах с компонентами, характеризующимися сильным различием величин  $U_{0\text{м}}$  и  $U_{0\text{в}}$  (медь – вольфрам, углепластик) привели к выводу, что функция  $U_{0\text{комп}}(V_{\text{в}})$  претерпевает сравнительно резкий скачок от  $U_{0\text{м}}$  до  $U_{0\text{в}}$  вблизи некоторого значения  $V_{\text{в}}=V_{\text{в}^*}$  (иначе говоря, разрыв композита определяется разрывом одной из его компонент). Вопрос о том, имеет ли место действительно скачкообразный или плавный переход значений  $U_{0\text{комп}}$  от  $U_{0\text{м}}$  до  $U_{0\text{в}}$ , т. е. принимает или не принимает  $U_{0\text{комп}}$  промежуточные между  $U_{0\text{м}}$  и  $U_{0\text{в}}$  значения в некотором интервале изменения  $V_{\text{в}}$ , вблизи от  $V_{\text{в}^*}$  (схематический рис. 2), представляется особенно интересным, если считать, что подобные опытные данные могут в какой-то мере моделировать процессы, развивающиеся на микроуровне в «гомогенных» материалах, например, в аморфно-кристаллических полимерах. Однако корректность моделирования микропроцессов опытами на грубогетерогенных композитах может вызывать сомнения и для их разрешения необходимы серьезные доказательства в каждом конкретном случае.

Чтобы ответить на вопрос, плавным или скачкообразным (пунктирная или сплошная линия на рис. 2) является переход функции  $U_{0\text{комп}}(V_{\text{в}})$  от  $U_{0\text{м}}$  до  $U_{0\text{в}}$  вблизи  $V_{\text{в}^*}$ , необходимо провести дополнительные исследования на композитах, в которых различия между  $U_{0\text{м}}$  и  $U_{0\text{в}}$  не столь велики, как в исследованных случаях [11, 15].

Обсуждая смысл и конкретные значения величины  $U_{0\text{комп}}$  для разных композитов, следует остановиться и на вопросе о том, всегда ли значения энергий активации разрушения компонент при их испытаниях вне композита должны совпадать со значениями этих же параметров для компонент при их разрушении в композите. Опыты, проведенные, например, на стеклопластиках, показывают, что в некоторых случаях значения величин  $U_{0\text{в}}$  вне композита и в композите могут не совпадать. Так, если стекловолокна испытывали вне композита в сухом состоянии, а при изготовлении композита или впоследствии при его хранении и эксплуатации на поверхность волокон проникла влага, энергии активации разрыва стекловолокон вне композита и в композите могут существенно различаться (от 30 до 80 ккал/моль [11]). Подобные эффекты, объясняющиеся в указанном конкретном случае агрессивным действием влаги на стекло (см. подробнее в [11, 23]), должны учитываться как при интерпретации смысла полученных из опытов значений  $U_{0\text{комп}}$ , так и при прогнозировании этой величины для тех или иных конкретных композитов.

В целом, сказанное позволяет придавать коэффициенту  $U_0$  в формуле (1) для композитов смысл величин  $U_{0\text{м}}$  или  $U_{0\text{в}}$  в зависимости от  $V_{\text{в}}$ . В соответствии с этим и по своим свойствам  $U_{0\text{комп}}$  представляет собой структурно-нечувствительную величину подобно величинам  $U_{0\text{м}}$  и  $U_{0\text{в}}$ .

Свойства коэффициента  $\gamma$  для композитов. После ска-

занного о свойствах  $\tau_0$  и  $U_0$ , которые и для композитов оказываются структурно-нечувствительными, ясно, что единственным структурно-чувствительным коэффициентом в формуле (1) и для композитов, как и для всех других твердых тел, оказывается коэффициент  $\gamma$ . Следовательно, структурная чувствительность является общим для любых тел свойством коэффициента  $\gamma$ . Коэффициент  $\gamma$  должен зависеть не только от структурных особенностей матрицы и наполнителя в композите, но и от структуры и прочностных свойств граничных слоев между компонентами, от геометрии расположения наполнителя в связующем и от других характеристик сложного строения реальных композитов.

Обсуждая смысл параметра  $\gamma$  в (1) для композитов, видимо, можно исходить из соображений, высказывающихся в [8–10], о смысле этого же параметра для гомогенных тел. Однако структурная чувствительность  $\gamma$  заставляет проявлять осторожность при попытках обобщений выводов о свойствах этого сложного параметра в столь различном классе материалов, как композиты и гомогенные материалы. С другой стороны, именно в ходе сравнения свойств и смысла  $\gamma$  для грубогетерогенных и гомогенных материалов можно еще более подчеркнуть смысл этого усредненного (интегрального) параметра для самых различных классов материалов.

Параметр  $\gamma$  в формуле (1) является по смыслу, согласно [8–10], произведением усредненного коэффициента перенапряжения  $\bar{q}$  на активационный объем. Коэффициент  $q(t)$  связывает в каждый данный момент среднее действующее напряжение  $\sigma$  с истинным напряжением  $\sigma_{лок}$ , действующим в локальных местах развития разрушения:  $q(t) = \sigma_{лок}/\sigma$ . Со временем эти места перемещаются через сечение образца (перемещение вершин трещин) и соответственно меняется  $q$ .

Корректность применения понятия усредненного по всему сечению образца напряжения  $\sigma$ , действующего в композите, может вызывать сомнения. Ясно, что действительные средние напряжения в матрице и наполнителе будут существенно различаться, т. е. коэффициент перенапряжения  $q$  будет изменяться скачком при переходе от одного компонента композита к другому. Активационные объемы в матрице и наполнителе также должны быть различными. Поэтому смысл  $\gamma$  как усредненного (интегрального) коэффициента в формуле (1) особенно обнажается при попытках применения этой формулы к композитам.

В дополнение к сказанному представляется, что для композитов целисообразно в некоторых случаях вместо произведения  $\gamma\sigma$  в (1) подставлять произведение  $\gamma(\sigma - \sigma_i)$ , в котором под  $\sigma_i$  подразумевается усредненное внутреннее остаточное напряжение (см. ниже формулу (2)). Величину  $\sigma_i$  необходимо определять экспериментально, например методом ИК-спектроскопии.

В целом видно, что анализ свойств и смысла параметра  $\gamma$  и произведения  $\gamma\sigma$  в зависимости (1) для композитов оказывается наиболее сложной задачей, и для ее решения необходимо будет, помимо феноменологических исследований зависимостей  $\tau(\sigma, T)$  для разных модельных композитов, изучать и истинное распределение рабочих и остаточных напряжений в композите, и кинетику возникновения и роста трещин на всех уровнях от атомно-молекулярного до макроскопического, и истинную структуру граничных слоев между компонентами. Имеющиеся пока опытные данные о свойствах коэффициента  $\gamma$  в композитах весьма ограничены, и их необходимо расширять, используя для этого специальные модельные композиты.

**Исследования особенностей кинетики разрушения граничных слоев между компонентами композита (адгезионных соединений).** Важное влияние на прочностные свойства композитов реальной структуры и прочности переходных граничных слоев между компонентами подчеркивается всеми исследователями, изучающими механические свойства композитов. Поэтому изучению прочностных свойств адгезионных соединений между

компонентами композита и разработке теорий адгезии посвящается много исследований, например, [27–31]. Однако исследованиям кинетики разрушения адгезионных соединений и попыткам интерпретации таких данных с позиции кинетической концепции разрушения посвящены только единичные работы. Не цитируя их все и не останавливаясь на их содержании, ограничимся ссылкой на работу [18]. В ней исследована температурно-силовая зависимость времени вытягивания вольфрамовой проволоки из эпоксидной матрицы  $\tau_{\text{ад}}$  и показано, что оно подчиняется формуле вида

$$\tau_{\text{ад}} = \tau_{0 \text{ ад}} \exp \frac{U_{0 \text{ ад}} - \gamma_{\text{ад}} (\sigma - \sigma_i)}{kT} \quad (2)$$

Здесь, как указано выше, учтено, что на границе между двумя компонентами должны возникать остаточные напряжения  $\sigma_i$ , которые должны изменяться при изменении температуры испытания за счет различия в коэффициентах теплового расширения компонент. В работе [18] показано, что  $U_{0 \text{ ад}} \approx U_{0 \text{ м}}$ ;  $\tau_{\text{ад}} \approx 10^{-11}$  сек.

Дальнейшие исследования кинетики разрушения адгезионных соединений с учетом всей сложности структуры и распределения истинных напряжений в граничных слоях между компонентами должны внести определенный вклад в развитие физической теории прочности адгезионных соединений и композитов. Эти феноменологические исследования, конечно, также должны сопровождаться изучением прямыми методами как истинных напряжений, действующих в адгезионных соединениях, так и их атомного механизма разрушения.

Задачи исследования прямыми методами истинных напряжений на компонентах композита и в граничном слое между ними и кинетики накопления нарушений сплошности на всех уровнях, начиная с атомно-молекулярного. Выше уже указывалось, что для получения информации о природе разрушения композитов феноменологические исследования температурно-силовой зависимости долговечности композитов и адгезионных соединений между компонентами композита необходимо сопровождать прямыми наблюдениями за кинетикой накопления нарушений в композитах, используя для этого методы, способные следить за этим процессом на всех уровнях от атомно-молекулярного до макроскопического.

По аналогии с тем, как подобные исследования велись на ориентированных полимерах [8–10], можно, прежде всего, обратить внимание на изучение истинных распределений напряжений в матрице, наполнителе и граничном слое между ними. Необходимы опытные данные как об усредненных напряжениях, так и об локальных, вплоть до напряжений на отдельных молекулах, особенно в адгезионных соединениях.

Затем следует изучить особенности кинетики накопления нарушений в композитах, следя как за накоплением молекулярных продуктов разрушения, так и за образованием субмикро- и микротрещин, их объединением и ростом.

О возможностях применения для этих целей ряда современных методик физического эксперимента можно судить по результатам подобных исследований в ориентированных полимерах, описанных в [8–10], а также по некоторым работам, пока немногочисленным, посвященным таким исследованиям на композитах [12, 16, 17, 32–35].

Не останавливаясь на подробностях, укажем все же некоторые результаты этих работ.

В [16, 17] методом ИК-спектроскопии, по смещениям частот максимумов полос поглощения, оцениваются напряжения в матрице и наполнителе волокнистого композита полимер – полимер, а также в композите, состоящем из полимерной матрицы, наполненной частицами кварца.

В [12] таким же методом удалось зарегистрировать напряжения в граничном слое между волокнами поливинилового спирта и эпоксидной

матрицей, связанными между собой молекулами диизоцианата. Показано, что химические связи между компонентами композита несут на себе значительную нагрузку, и наличие их в граничном слое между компонентами заметно упрочняет композит.

В [32] методом рассеяния рентгеновых лучей под малыми углами удалось обнаружить возникновение в волокнистом композите полимер — полимер субмикротрещин двух разных типов. Один тип этих субмикротрещин приписан появлению в волокнах наполнителя, другой — в матрице или на границе раздела между матрицей и волокнами.

В [33] методом масс-спектрометрии исследовано содержание воды, химически и физически адсорбированной на поверхности стекловолокон, и путем сопоставления с механическими свойствами проанализировано влияние присутствия на поверхности даже мономолекулярного слоя воды на энергию активации процесса разрушения стекловолокон.

В [34, 35] тем же методом исследована кинетика адсорбции полимерных молекул на твердые (металлические) подложки. Показано также, что кинетика термодеструкции тонких полимерных пленок существенно зависит от характера взаимодействия молекул полимера с подложкой. Метод масс-спектрометрии использован также для анализа состава и количества продуктов, остающихся на поверхности наполнителя после разрушения его адгезионного соединения с матрицей.

Перечисленные работы, а также другие исследования, начатые с применением методов оптической поляризационной микроскопии, микрокинематографии, растровой электронно-микроскопической фрактографии, акустоэмиссии и других методов позволяют получить информацию о структуре и распределении напряжений в компонентах композита и в граничных слоях между ними, а также о закономерностях накопления нарушений в композитах на всех уровнях — от атомно-молекулярного до макроскопического.

Можно высказать уверенность, что сочетание феноменологических исследований кинетики разрушения композитов с изучением микромеханизма этого процесса всем арсеналом средств физического эксперимента внесет важный вклад в развитие физики прочности композитов, а следовательно, и в физику прочности твердых тел. Именно такой комплекс исследований физики прочности композитов начал в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР

Поступила в редакцию  
21 III 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Т. Кортен, Разрушение армированных пластиков, «Химия», 1967.
2. Г. С. Холистер, К. Томас, Материалы, упроченные волокнами, «Металлургия», 1969.
3. А. Л. Рабинович, Введение в механику армированных полимеров, «Наука», 1970.
4. А. М. Скудра, Ф. Я. Булавс, К. Я. Роценс, Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков, Рига, 1971.
5. В. С. Иванова, П. М. Колпев, Л. Р. Ботвина, Г. Д. Шермергор, Упрочнение металлов волокнами, «Наука», 1973.
6. А. И. Колпашников, В. Ф. Мануйлов, Е. В. Ширяев, Армирование цветных металлов и сплавов волокнами, «Металлургия», 1974.
7. Composite Materials, Ed. L. J. Broutman, R. H. Krock, v. I—VIII, New York — London, 1974.
8. С. Н. Журков, Изв. АН СССР, серия неорганич. материалы, 3, 1767, 1967.
9. С. Н. Журков, Вестник АН СССР, 1968, № 3, 46.
10. В. Р. Регель, А. И. Случкер, Э. Е. Томашевский, Кинетическая природа прочности твердых тел, «Наука», 1974.
11. В. Р. Регель, А. В. Савицкий, Т. П. Санфирова, Механика полимеров, 1976, 1002.
12. В. Р. Регель, А. М. Лексовский, Л. Г. Орлов, Н. П. Лексовская, А. И. Мазо, К. Е. Перепелкин, Механика полимеров, 1976, 815.
13. В. Р. Регель, Изв. АН СССР, серия физич., 40, 1376, 1976.
14. А. В. Савицкий, Б. Я. Левин, И. А. Горшкова, Механика полимеров, 1976, 368.

15. В. Р. Регель, Х. Бобоназаров, В. И. Бетехтин, Е. А. Киселев, Тезисы доклада на VIII Всесоюзной конференции по физике прочности и пластичности металлов и сплавов, Куйбышев, 1976, стр. 71.
16. В. Р. Регель, А. Д. Габараева, Н. М. Филиппов, А. М. Лексовский, Механика полимеров, 1977 (в печати).
17. А. Д. Габараева, В. Р. Регель, Н. М. Филиппов, А. М. Лексовский, Тезисы доклада на III Международном микросимпозиуме по полимерным композитам, Берлин, 1977.
18. В. Р. Регель, А. М. Лексовский, О. Ф. Киреенко, Механика полимеров, 1977 (в печати).
19. В. Р. Регель, В. П. Тамуж, Механика полимеров, 1977 (в печати).
20. В. И. Владимиров, Д. Н. Карпинский, А. Н. Орлов, Механика полимеров, 1974, 963.
21. В. И. Владимиров, Д. Н. Карпинский, А. Н. Орлов, Физ. мет. и металловед., 39, 952, 1975.
22. В. И. Владимиров, Д. Н. Карпинский, Физ. мет. и металловед., 40, 704, 1975.
23. Д. Н. Карпинский, Физ. мет. и металловед., 40, 215, 1975.
24. А. Н. Орлов, В. А. Петров, В. И. Владимиров, Д. Н. Карпинский, Wiss. Zs. Techn. Hochschule Magdeburg, 19, 133, 1975.
25. В. И. Владимиров, Д. Н. Карпинский, А. Н. Орлов, Физ. мет. и металловед., 41, 19, 1976.
26. В. И. Владимиров, В. И. Монин, Физ. мет. и металловед., 1977 (в печати).
27. С. С. Воюцкий, Аутогезия и адгезия высокополимеров, Гостехиздат, 1960.
28. В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Ю. И. Плескачевский, Адгезия полимеров к металлам, Минск, 1971.
29. Я. О. Бикерман, Успехи химии, 44, 1431, 1972.
30. Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга, Адгезия твердых тел, «Наука», 1973.
31. А. А. Берлин, В. Е. Басин, Основы адгезии полимеров, «Химия», 1974.
32. А. М. Лексовский, Л. Г. Орлов, В. Р. Регель, Тезисы доклада на I Национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов, Варна, 1976.
33. Л. Г. Байкова, О. Ф. Поздняков, В. П. Пух, В. Р. Регель, Б. П. Редков, Изв. АН СССР, серия неорганич. материалы, 2, 144, 1975.
34. В. Р. Регель, О. Ф. Поздняков, Б. П. Редков, Тезисы доклада на I Всесоюзном симпозиуме по активной поверхности твердых тел, Гарту, 1974, стр. 96.
35. О. Ф. Поздняков, А. В. Амелин, В. Р. Регель, Б. П. Редков, В. В. Шалимов, Тезисы доклада на VI Международном симпозиуме по механоэмиссии и механохимии, Берлин, 1977.