

УДК: 678.01:539.3/4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Мартышенко В.А.

(Военная академия радиационной, химической и бактериологической защиты и инженерных войск)

Работа посвящена определению деформационных характеристик полимерных и композитных материалов.

Ключевые слова: деформация, полимер, композит.

Основными деформационными характеристиками изотропных металлических материалов являются продольный модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль упругости при сдвиге. Для полимерных материалов, занимающих промежуточное положение между твердыми материалами и жидкостью, вводится дополнительно деформационная характеристика – вязкость. В зависимости от технологии изготовления пластмасс их деформационные характеристики могут меняться в зависимости от направления, в которых они определяются. Для армированных пластмасс и композитных материалов имеет место, кроме того, и неоднородность в значениях показателей этих характеристик. Деформационные характеристики очень чувствительны к температурным условиям. Принципиально важным для оценки этих характеристик является то, что все они функционально зависят от параметров времени.

Простейшие модели для описания зависимостей между напряжениями и деформациями, учитывающие временные соотношения, это известные модели Максвелла и Кельвина-Фойгта.

Применение математических моделей для описания закономерностей деформирования полимерных материалов возможно только при условии, что деформационные характеристики материалов известны. Поэтому актуальным является задача по экспериментальному определению деформационных характеристик полимерных и композиционных материалов.

Для этих целей разработаны специальные методики проведения экспериментов и разработаны лабораторные стенды, установки и специальное оборудование. Работа в этом направлении продолжается. Представляет интерес использование для этих целей тех приборов и оборудования, которые были созданы для другого назначения, но являющихся широко распространенными и доступными. Это позволяет расширить объем работ по исследованию деформационных свойств полимерных материалов и обогатить существующую базу данных.

Рассмотрим возможность применения широко распространенных и имеющихся в любой материаловедческой лаборатории прибора – твердомера для определения вязкости полимерных материалов. Прибор ТР 5006М представляет собой твердомер для испытания на твердость по Бринеллю и Роквеллу. Имеется возможность испытания на твердость на различных шкалах твердости в зависимости от величины нагрузки на индентор и диаметров шарика.

Так как общая нагрузка при испытании назначается до проведения испытания, то в процессе испытания она не контролируется и не фиксируется. Исключением является только нагрузка предварительная, которая составляет 98.1 Н независимо от испытываемого материала. Таким образом, с точки зрения силового нагружения известно начальное положение образца при нулевой нагрузке, фиксированное положение образца при предварительной нагрузке, фиксированное положение образца при общей нагрузке и фиксированное положение образца после снятия основной нагрузки. Как изменяется нагрузка во времени в остальном процессе испытания, остается неопределенным.

С помощью индикатора часового типа с точностью до 0,002 мм в процессе испытания определяется глубина внедрения индентора. При этом вручную устанавливается положение шкалы при предварительной нагрузке и снимается показание по шкале после снятия основной нагрузки.

Наблюдения за испытанием на твердость полимерных материалов показывают, что после снятия основной нагрузки показания индикатора глуби-

ны внедрения индентора изменяются во времени. Стандартизованные методы испытания требуют определенной временной выдержки перед снятием показаний по шкале индикатора. Причем временной параметр рекомендуется одинаковый независимо от испытываемого материала, хотя наблюдения показывают, что стабилизация показаний для различных материалов достигается за разные интервалы времени. Таким образом, признается факт зависимости изменения показаний глубины внедрения индентора от времени протекания процесса, но отсутствует описание этого процесса.

Чтобы установить закономерности изменения глубины внедрения от времени, необходимо провести эксперимент и обработать опытные данные. Исследуем процесс деформации материала образца на приборе ТР 5006М на участке снятия основной нагрузки. Данный участок представляет интерес тем, что при снятии нагрузки происходит деформация, соответствующая только вязко-упругим свойствам материала. Это позволит в дальнейшем определить опытным путем деформационные вязко-упругие характеристики материала.

Как и при испытании на твердость по Роквеллу образец нагружают сначала предварительной нагрузкой, затем нагружают основной нагрузкой. После успокоения стрелки индикатора, фиксирующей глубину внедрения индентора, начинается интересующий нас процесс снятия основной нагрузки, характеризующийся изменением ряда показателей. Наиболее важными являются два параметра – изменение глубины внедрения индентора и время. Дополнительными параметрами процесса являются величина нагрузки на индентор и диаметр отпечатка, но их значения не фиксируются прибором. Глубину внедрения отмечаем по показаниям на шкале индикатора, а время – секундомером, так как прибор не имеет встроенного таймера. Как показывают испытания, первоначальный этап разгрузки образца протекает достаточно скоротечно, так как упругая деформация характеризуется большой скоростью. Точность измерения времени с помощью секундомера оказывается недостаточной для опытной обработки данного участка разгрузки. После ис-

чезновения упругой деформации, практически совпадающей с завершением разгрузки, начинается процесс ползучести материала. Дискретно снимаются одновременно показания по шкалам индикатора и секундомера. С одной стороны, снятие этих показаний является достаточно простой процедурой, с другой стороны, синхронизировать эти показания и быстро зафиксировать (от этого зависит количество экспериментальных точек) достаточно трудно. Относительно точности показаний можно отметить следующее: точность показаний по шкале индикатора составляет 0,002 мм, а точность показаний по шкале секундомера - 1 секунда часто оказывается недостаточной, особенно в области быстрого изменения деформации. По полученным опытным данным строится график в осях координат - глубина внедрения и время. Пример такого графика в MS Excel изображен на рисунке 1.

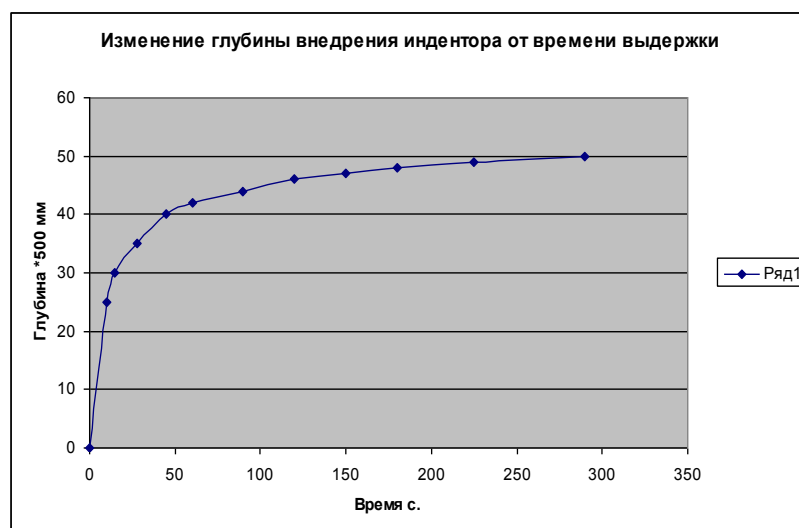


Рис. 1

На графике заметны некоторые погрешности эксперимента, так как опытные точки не всегда дают идеальную графическую зависимость. И тем не менее данные такого эксперимента представляют интерес для дальнейшего исследования.

Апробация технологии опыта выполнена на образцах различных полимерных материалов, резинах, композитах и для всех испытаний получались стабильные графические зависимости закономерностей процесса ползучести

материалов. Для различных материалов отличия проявлялись лишь в количественных значениях параметров.

Для повышения точности опытных данных предложена технология видеозаписи процесса с помощью видеосъемки процесса разгрузки образца. Производится видеосъемка шкалы индикатора с помощью видеокамеры или портативных средств мобильной связи, являющихся широкодоступными, файл видеосъемки загружается в компьютер и просматривается с целью сканирования значений по шкале индикатора и по таймеру. Остановка изображения процесса разгрузки может быть произведена пользователем в любое время и сканированы значения показаний по шкале индикатора и таймера. Синхронизация показаний гарантирована, точность показаний по шкале индикатора сохраняется такой же, а параметр времени измеряется с точностью до 0,01 с. Количество экспериментальных точек при обработке опытных данных, записанных в файл, определяется пользователем и для повышения точности графического изображения может быть достаточно большим.

Таким образом, видеосъемка процесса разгрузки образца и получение результатов эксперимента с помощью компьютера представляет собой применение информационных технологий для экспериментального исследования деформационных характеристик материалов. Обращаем внимание на то, что речь идет не о том, чтобы на компьютере обрабатывать опытные данные, а о том, чтобы с помощью компьютера получать опытные данные, введенные в виде файла видеосъемки экспериментального процесса. Это позволило повысить точность показаний фиксируемых параметров процесса и синхронизировать их.

Пример графика в Excel с использованием описанной информационной технологии изображен на рисунке 2.

Следующим этапом работы является получение аналитических зависимостей, соответствующих построенным графикам. Так как графики функций имеют ярко выраженный затухающий характер, а сами функции асимптотически стремятся к постоянному значению, то такие функции описываются

экспонентами с отрицательными показателями. Примером таких функций являются уравнение Кельвина-Фойгта.

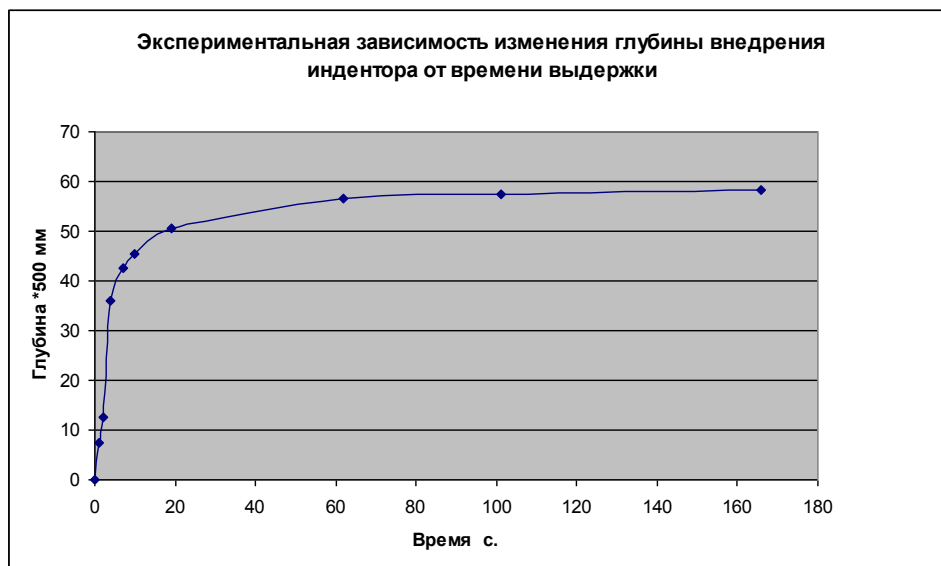


Рис. 2

Первая попытка аппроксимации графической зависимости – это использование самой простой зависимости вида

$$H = C \cdot [1 + \exp(-t/\tau)], \quad (17)$$

где H – глубина, мм; C – постоянная величина; τ – время релаксации – величина постоянная для материала.

Параметры C , τ неизвестны. Их определение производится программно (программа 1), исходными данными для которой являются два одномерных массива размерностью n , где n –размерность массивов, H –глубин внедрения индикатора и времени t . Так как один искомый параметр – τ находится под знаком экспоненты, то задача по определению параметров является нелинейной.

Применим следующий алгоритм поиска. Организуем цикл просмотра экспериментальных попарно расположенных точек, начиная со второй и кончая предпоследней. Для каждой пары точек из системы двух уравнений на основании формулы (17) определяем параметры C , τ и заносим их в массив размерностью $n - 2$.

С помощью полученных значений параметров по формуле (17) определяем массив расчетных значений глубин внедрения индентора размерностью n и сравниваем его с массивом экспериментальных значений. Сравнение оценивается среднеквадратичным отклонением всех значений массивов. Полученное значение среднеквадратичного отклонения также заносится в массив размерностью $n - 2$. После завершения цикла получим сформированные массивы, содержащие значения C , τ и среднеквадратичных отклонений, которые выводим на дисплей для просмотра. Находим наименьшее значение среднеквадратичного отклонения и соответствующие значения C , τ . Таким образом, приближенно определено время релаксации материала образца и постоянная C из условия минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальной и расчетной зависимостей. Построение графиков расчетной и экспериментальной зависимостей и сравнение их показывает хорошее их совпадение в области тех точек, по которым определялись искомые параметры, и значительные расхождения в областях других точек. Это объясняется тем, что одночленной формулой не удастся достаточно точно аппроксимировать реальную экспериментальную кривую.

Для повышения точности аппроксимации построим новую формулу, состоящую из двух экспонент и содержащую четыре искомых параметра – постоянные C_1 и C_2 и два параметра времени релаксации τ_1 и τ_2 ,

$$H = C_1 \cdot [1 + \exp(-t / \tau_1)] + C_2 \cdot [1 + \exp(-t / \tau_2)] \quad (18)$$

Предварительно назначаем приближенные значения параметров τ_1 и τ_2 . Для параметра τ_1 принимаем значение, полученное при исследовании функции, описанной одной экспонентой (17), а для параметра τ_2 принимаем значение на порядок большее, чем τ_1 . Постоянные C_1 и C_2 определяем с помощью программы 2. Используя массивы глубин и времени, на основании уравнения (18) строим переопределенную систему линейных алгебраических уравнений относительно C_1 и C_2 . Решая систему, находим C_1 и C_2 . Далее выполняем последовательно условную минимизацию параметров τ_1 и τ_2 . Выби-

раем интервал изменения параметра τ_1 и сканируем эту область с заданным шагом. Для каждого значения τ_1 по формуле (18) вычисляем массив расчетных значений глубин h , сравнивая с соответствующим массивом экспериментальных значений, находим среднеквадратичное отклонение для двух числовых массивов. Заносим это значение в новый массив среднеквадратичных отклонений. После окончания сканирования области параметра τ_1 и просмотра массива среднеквадратичных отклонений находим минимальное значение элемента этого массива и соответствующее ему значение параметра τ_1 , которое является окончательным значением. Далее точно таким же способом уточняем значение параметра τ_2 , считая известными C_1 , C_2 и τ_1 . То есть снова задаем интервал изменения параметра τ_2 , шаг сканирования, по формуле (18) вычисляем массив расчетных значений глубин h , сравнивая с соответствующим массивом экспериментальных значений, находим среднеквадратичное отклонение для двух числовых массивов и формируем массив среднеквадратичных отклонений, находим минимальное значение элемента этого массива и соответствующее ему значение параметра τ_2 , которое является окончательным значением.

После нахождения всех искоемых параметров формулы (18) строим графики расчетных и экспериментальных значений для визуальной оценки.

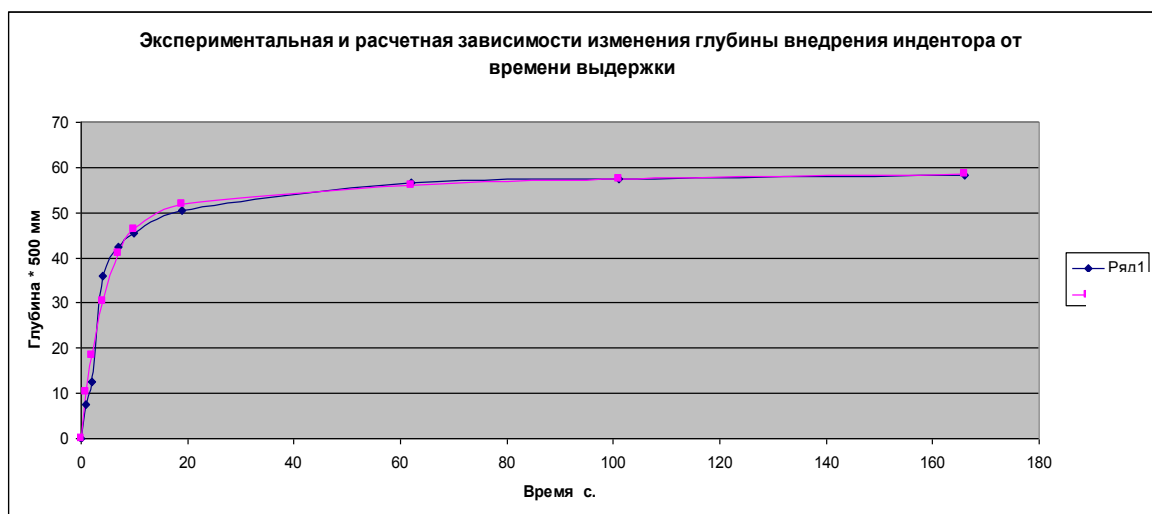


Рис. 3

Полученные значения τ_1 и τ_2 времен релаксации являются экспериментальными деформационными характеристиками материала. Так как время релаксации определяется отношением модуля упругости материала к его вязкости, то для их нахождения необходимо ещё одно уравнение. При известном или полученном опытным путем значении модуля упругости вязкость материала η определяется из зависимости $\tau = E / \eta$.

Литература

1. Уорд И. Механические свойства твердых полимеров. М., Химия, 1975, 350 с.