

3. Ревуженко А. Ф., Бобряков А. П., Шемякин Е. И. О возможном механизме перемещения масс Земли//Докл. АН СССР. 1983. № 5. 1097—1099.
4. Ревуженко А. Ф. Один класс сложных нагружений неупругой среды//Прикл. матем. и теор. физ. 1986. № 5. 150—158.
5. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. Приливное деформирование планет: опыт экспериментального моделирования//Геотектоника. 1991. № 6. 21—35.
6. Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. Моделирование перемещений внутренних масс Земли//Междунар. конф. Тессалоники (Греция), август 1990: Тез. конф.
7. Шемякин Е. И. Задача о хрупком шарнире//Изв. АН СССР. Механ. твердого тела. 1996. № 2.

Поступила в редакцию
05.05.96

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 1, МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА. 1996. № 5

УДК 539.4

Д. Л. Быков, В. С. Дельцов, Д. Н. Коновалов

О ВЛИЯНИИ ГРАДИЕНТОВ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАЗРУШЕНИЕ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Известно, что в условиях существенно неоднородного напряженного состояния разрушающие напряжения могут заметно превосходить значения, получаемые при испытаниях образцов, в которых реализуются однородные напряженные состояния. В работе [1] был предложен образец, позволяющий воспроизводить в цилиндрическом слое исследуемого материала достаточно широкий спектр напряженных состояний как по их виду (соотношению главных напряжений), так и по степени неоднородности полей напряжений. В настоящей работе излагается подход к оценке разрушающих напряжений в зоне их концентрации, основанный на результатах, полученных до разрушения указанного образца. В качестве исследуемого материала был выбран мелкопористый пенопласт марки Рипор-2Н, обладающий следующими стандартными прочностными характеристиками: разрушающее напряжение при одноосном растяжении $\sigma_c = 2,4$ кгс/см²; разрушающая деформация при одноосном растяжении $\epsilon_c = 5\%$. Диаграмма одноосного растяжения этого материала весьма близка к линейной вплоть до момента разрушения. Различие в величинах начального модуля диаграммы и секущего модуля в точке разрушения не превышает 13%.

На рис. 1 изображена конструкция образца, который представ-

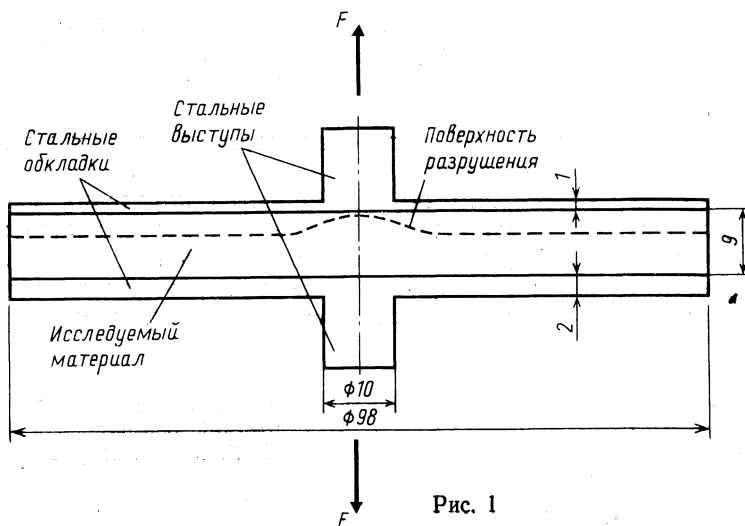


Рис. 1

ляет собой две тонкие стальные обкладки, приклеенные к торцевым поверхностям цилиндрического слоя исследуемого материала. Центрирование обкладок производилось в патроне токарного станка с высокой точностью. В качестве клеевого состава применялась пластифицированная смола с наполнителем, повышающим ее вязкость, что исключало глубокое проникновение смолы в поры исследуемого материала. Клеевой состав отвердевал в течение трех суток при комнатной температуре, при этом обкладки находились под равномерной нагрузкой, создаваемой силой 20 кгс.

Образцы испытывались на разрыв осевой силой, которая прикладывалась к стальным цилиндрическим выступам на обкладках образца. Испытания проводились на разрывной машине с постоянной скоростью перемещения захватов 0,5 мм/мин и автоматической регистрацией величин растягивающей силы и перемещения захватов. На рис. 2

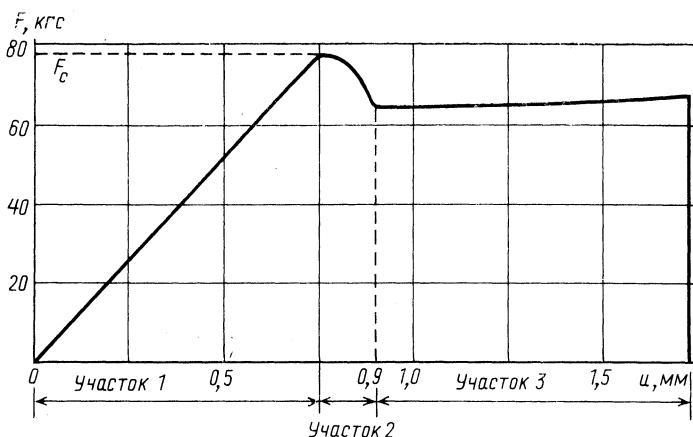


Рис. 2

представлена типичная зависимость растягивающей силы F от перемещения захватов u вплоть до момента разрушения образца. Эта зависимость имеет три достаточно четко выраженных участка. На участке 1 ($u \leq 0,75$ мм, $F \leq 78$ кгс) наблюдается практически линейная зависимость силы от перемещения захватов. На участке 2 ($0,75$ мм $< u < 0,9$ мм) происходит уменьшение силы, что связано с началом процесса разрушения и образованием начальной трещины. Участок 3 ($u > 0,9$ мм) характеризуется незначительным ростом силы. На этом участке происходит подрастание начальной трещины до критического размера. На рис. 1 штриховой линией показана поверхность разрушения, которая в среднем отстоит от тонкой обкладки на расстоянии ≈ 3 мм, а в районе под цилиндрическим выступом имеет локальное сближение с тонкой обкладкой до расстояния $\approx 0,55$ мм.

Напряженное состояние образца на линейно упругом участке деформирования определялось расчетным путем. Соответствующая задача линейной теории упругости решалась в перемещениях методом конечных элементов, при этом использовались осесимметричные четырехугольные изопараметрические элементы второго порядка. В расчет закладывались величина секущего модуля Юнга материала Рипор-2Н в точке разрушения 48 кгс/см² и значение коэффициента Пуассона 0,2. В качестве нагрузки задавалось максимальное, достигнутое в эксперименте значение осевой силы $F_c = 78$ кгс. Сетка, состоящая из 1024 конечных элементов, сгущалась в зоне концентрации напряжений между

двумя цилиндрическими выступами. Конечные элементы в цилиндрической области образца диаметром $2d$ (d — диаметр выступа) имели размер в радиальном направлении $d/20$. В осевом направлении слой исследуемого материала разбивался на 16 слоев элементов, а каждая из обкладок — на 4 слоя элементов. Точность расчета оценивалась с помощью экстраполяционной процедуры Ричардсона [2] на трех последовательно сгущающихся сетках, в которых линейные размеры элементов уменьшались в отношении 1:2:3. Оцененные таким образом величины погрешностей определения максимальных значений растягивающего напряжения и интенсивности напряжений не превышали 1%.

На рис. 3 показаны распределения по радиусу максимального от-

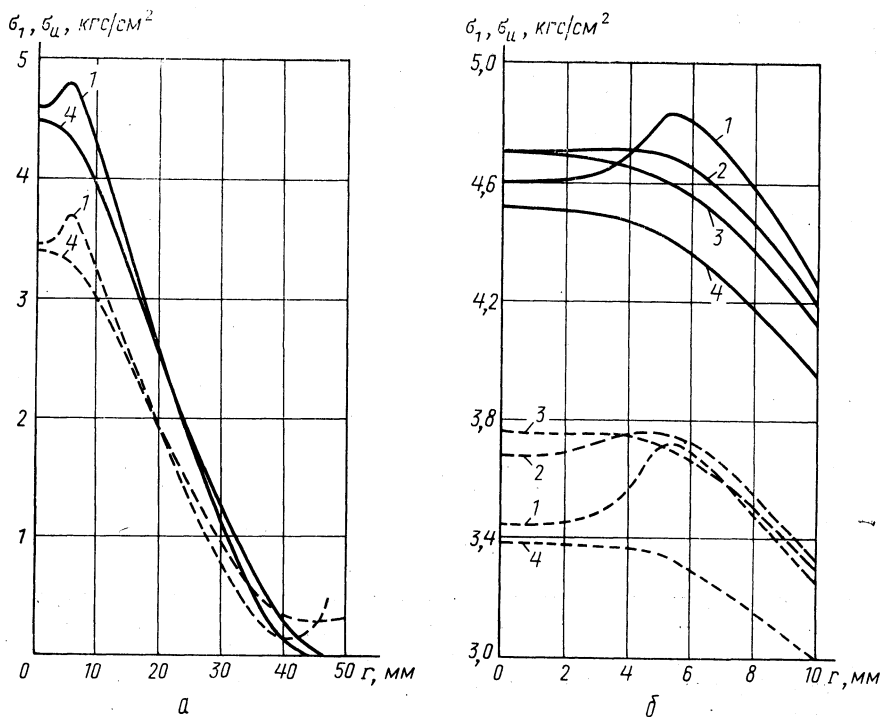


Рис. 3

рывного напряжения σ_1 (сплошные линии) и интенсивности напряжений σ_n (пунктирные линии) на поверхностях контакта с тонкой (кривые 1) и толстой (кривые 4) обкладками, а также в двух внутренних сечениях, отстоящих от поверхности контакта с тонкой обкладкой соответственно на $0,27H$ (кривые 2) и $0,5H$ (кривые 3), где H — толщина слоя исследуемого материала. В рассмотренном случае в зоне концентрации напряжений реализуется трехосное напряженное состояние со следующим отношением величин главных напряжений: $\sigma_2 \approx \sigma_3 \approx 0,22\sigma_1$. Как видно из этого рисунка, максимальное отрывное напряжение $\sigma_{1\text{max}} = 4,84 \text{ кгс/см}^2$ достигается на поверхности контакта с тонкой обкладкой, а максимальное значение интенсивности напряжений $\sigma_{n\text{max}} = 3,75 \text{ кгс/см}^2$ достигается в сечении, отстоящем на $2,4$ мм от поверхности контакта с тонкой обкладкой. Эти результаты согласуются с тем фактом, что в испытанных образцах поверхность разрушения проходила весьма близко от поверхности контакта с тонкой обкладкой (рис. 1). Другим обстоятельством, подтверждающим достоверность

принятой расчетной модели образца, является хорошее соответствие между расчетным значением относительного осевого перемещения выступов образца (0,796 мм) и измеренным значением перемещения захватов испытательной машины (0,75 мм).

В результате проведенного экспериментально-теоретического исследования прочности образца может быть сделан следующий вывод: в условиях концентрации напряжений внутри материала Рипор-2Н, характеризующейся размером зоны концентрации [1] порядка 30—40 мм, и при соотношении главных напряжений в зоне концентрации $\sigma_2 \approx \sigma_3 \approx 0,22 \sigma_1$ величины разрушающих напряжений превосходят стандартное значение прочности этого материала приблизительно в 1,5 раза по интенсивности напряжений и в 2 раза по максимальному отрывному напряжению. Это обстоятельство подтверждает необходимость точного моделирования на специальных образцах пространственных напряженных состояний и их градиентов, реализуемых в опасных зонах натуральных конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 93—013—16531.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков Д. Л., Васильев А. М., Дельцов В. С., Коновалов Д. Н. О моделировании трехмерных напряженных состояний при испытании образцов//Изв. РАН. Механ. тверд. тела. 1994. № 6. 155—161.
2. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М., 1989.

Поступила в редакцию
09.02.96

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. I, МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА. 1996. № 5

УДК 539.3

М. Ш. Исраилов

СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ СЕЙСМОДИНАМИКИ ТРУБОПРОВОДА

Значительный раздел сейсמודинамики протяженных подземных сооружений (в частности, трубопроводов) базируется на предложенной А. А. Ильюшиным модели взаимодействия сооружения и грунта. В одномерном случае продольного движения трубопровода (стержня) и грунта взаимодействие описывается связью между касательным напряжением на границе контакта и относительным смещением в виде операторного соотношения $\tau = -\mathcal{H}(u)$. Если в этом соотношении правая часть есть линейная функция, взаимодействие называется линейно упругим; если $\mathcal{H}(u)$ является оператором типа линейной вязкоупругости — вязкоупругим и, наконец, если $\mathcal{H}(u) = ku[1 - \omega(u)]$, где $k = \text{const}$ и функция $\omega(u)$ обладает свойствами ω -функции Ильюшина теории малых упругопластических деформаций, — упругопластическим. Это предложение Ильюшина имело принципиальное значение в инженерной сейсמודинамике подземных сооружений и привело к большому числу экспериментальных исследований по определению констант и функций, входящих в указанные типы взаимодействия, для грунтов с различными физико-механическими характеристиками (ссылки на некоторые из них содержатся, например, в монографии [1]).

На базе принятых моделей взаимодействия проведены сейсמודинамические расчеты конкретных деформируемых конструкций. В этих