

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

© 2012 г. А. Н. Никитин, Р. Н. Васин, Т. И. Иванкина, А. А. Круглов, Т. Локаичек¹, Л. Т. Н. Фан²

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
E-mail: nikitin@nf.jinr.ru

¹ Институт геологии Академии Наук Чешской Республики, Прага

² Тульский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 23.03.2012

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик волновых полей, наблюдаемых при прохождении квазипродольных ультразвуковых волн через образцы поликристаллического графита. Рассмотрены особенности распространения упругих волн в двухслойной среде, где один из слоев (изотропный), представляет собой полусферу из оргстекла, а другой (анизотропный) — полусферу из поликристаллического пористого графита. Скорости и времена прохождения квазипродольных волн в поликристаллических графитовых образцах и двухслойном образце оргстекло—графит в различных направлениях определены экспериментально методом ультразвукового пространственного зондирования. Проведено сопоставление результатов эксперимента с теоретическими расчетами. При этом использованы данные о кристаллографической текстуре графита, полученные ранее методом нейтронной дифракции. Установлены и проанализированы причины расхождения между теоретическими и экспериментально измеренными характеристиками упругих волн в исследуемых средах.

ВВЕДЕНИЕ

В литературе по акустике [1] и сейсмологии [2] отмечался сложный характер распространения упругих волн при отражении и преломлении от границ раздела изотропных и неоднородных сред. Современное развитие сейсмологии привело к необходимости учета анизотропии упругих свойств геологических сред [3–5]. С помощью оригинального аналитического подхода был подтвержден факт [6–8], состоящий в том, что в анизотропных средах упругие волны, проходя через границу раздела, при определенных углах скольжения испытывают в общем случае тройное расщепление отраженных и преломленных волн. Аналогичное свойство акустических волн обсуждалось в [9].

Однако эксперименты по наблюдению расщепления упругих волн при прохождении через контакты различных горных пород отсутствуют, также подобные эффекты не наблюдались на контактах многих конструкционных материалов. В связи с этим важно на основе расчетов, выполненных разными методами, провести пробные эксперименты на модельных образцах из материалов с хорошо известными свойствами с целью оценить условия, при которых возможно обнаружение подобного эффекта при прохождении

упругих волн через границу раздела двух сред. На первом этапе в экспериментах участвовали образцы, состоящие из оргстекла и монокристаллического кварца [10]. Развитием этих экспериментальных исследований является создание модели сборной конструкции, в которой в качестве анизотропного материала используется поликристаллический графит, а изотропным слоем является оргстекло. Анизотропия графита обусловлена не только кристаллографической текстурой, но и текстурой формы, а также преимущественными ориентировками пор и трещин несферической формы.

Для лабораторных экспериментов был выбран технический графит марки ГР-280, который используется в качестве замедлителей реакторов типа РБМК на атомных электростанциях. В [11–13] исследовались физические свойства графита в связи с задачей прогнозирования сроков безаварийной эксплуатации графитовой кладки реакторов в процессе их работы. Производство технологического графита базируется на применении в качестве наполнителей коксов различной микроструктуры и пеков как связующих веществ, получаемых из каменноугольных смол. При этом из смеси экструзивно прессуют блоки, затем их термически обрабатывают при температуре около 2400 °С [14, 15]. В результате процесса

экструзии в графите возникает слабая преимущественная ориентировка зерен, которая благодаря исключительно высокой анизотропии монокристалла графита вызывает заметную анизотропию физических свойств [12]. Пористость такого графита составляет ~20% [12]. В процессе охлаждения от температуры графитизации до комнатной в материале появляются микротрещины [16].

В настоящей работе анизотропия упругих свойств реакторного графита изучена ультразвуковым методом с использованием различных длин волн. Скорости распространения квазипродольных упругих волн в графитовых образцах и их времена прохождения в двухслойном образце оргстекло–графит исследованы экспериментально и сопоставлены с теоретическими расчетами.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ОРГСТЕКЛО–ГРАФИТ

Рассмотрим первоначально распространение упругих волн отдельно в образцах оргстекла и графита в рамках классической теории упругости, в основу которой положено решение уравнений Кристоффеля [17, 18].

Известно, что в изотропном твердом теле распространяются две упругие волны – продольная со скоростью $\sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho_1}$ и поперечная со скоростью $\sqrt{\mu/\rho_1}$, где ρ_1 – плотность изотропной среды; λ , μ – параметры Ламэ.

Оргстекло имеет плотность $\rho_1 = 1.19$ г/см³ и параметры Ламэ: $\lambda = 4534 \pm 136$ МПа, $\mu = 1943 \pm 58$ МПа [10].

В анизотропной среде в общем случае распространяются три смешанные волны: одна квазипродольная и две квазипоперечные. Направление колебательных смещений в квазипродольной волне близко к направлению распространения волны. Смещения в квазипоперечных волнах лежат в плоскостях, которые в различной степени отклоняются от волнового фронта. Эти волны распространяются со скоростями, величины которых удовлетворяют уравнению Кристоффеля:

$$\rho_2 V^2 \delta_{il} - c_{ijkl} n_j n_k = 0, \quad (1)$$

где ρ_2 – плотность анизотропной среды; c_{ijkl} – тензор упругости; n_j , n_k – компоненты единичного вектора, параллельного волновому вектору; δ_{il} – символ Кронекера; V – фазовая скорость волны; $i, j, k, l = x, y, z$.

Расчет скоростей упругих волн предполагает знание плотности среды и ее модулей упругости. Плотность графита составляет 1.765 г/см³ [12].

Для оценки эффективных модулей упругости поликристаллических сред используются различные методы усреднения, например Фогта; Ройсса; Хашина–Штрикмана; обобщенного сингулярного приближения; условных моментов и др. [19–23], отражающие различные микромеханические модели взаимодействия зерен. Эти методы предполагают использование данных об упругих модулях монокристаллов, образующих поликристаллический образец, а также информацию о кристаллографической текстуре, т.е. преимущественной ориентировке зерен в образце. Текстура количественно описывается трехмерной функцией распределения зерен по ориентациям (ФРО). Эта функция не зависит от формы зерен и взаимодействия между зернами, а также от наличия в образце пор и микротрещин [24].

В настоящей работе использован тензор упругих модулей, полученный в [25]. Автором был применен оригинальный метод, заключающийся в сочетании самосогласованного алгоритма и геометрического метода усреднения для того, чтобы получить тензор упругости неоднородного текстурированного поликристаллического графита с учетом наличия в нем неравноосных зерен, пор и микротрещин. Модельный поликристаллический графит на 78.6% состоит из эллипсоидальных зерен. Поскольку ориентировка кристаллической решетки графита в каждом зерне зафиксирована, то текстура формы зерен графита описывается посредством кристаллографической текстуры, т.е. ФРО, полученной из эксперимента. Остальной объем материала заполнен сферическими порами и плоскими микротрещинами. Компоненты тензора упругости c_{ijkl} в эквивалентной матричной форме c_{ij} (нотация Фогта) имеют следующие значения (ГПа) [25]:

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6
1	6.22	0.68	0.63	−0.00	0.06	0.04
2	0.68	9.81	0.71	−0.05	0.00	0.05
3	0.63	0.71	7.38	−0.04	0.08	0.00
4	−0.00	−0.05	−0.04	3.90	0.02	0.04
5	0.06	0.00	0.08	0.02	3.08	−0.02
6	0.04	0.05	0.00	0.04	−0.02	3.56

На рис. 1 приведена стереографическая проекция вычисленных по формуле (1) скоростей квазипродольных (рис. 1а), быстрых (рис. 1б) и медленных (рис. 1в) квазипоперечных волн на плоскость XY, изолинии которых рассчитаны по 649 точкам. Такое количество направлений позволяет построить стереографическую проекцию с

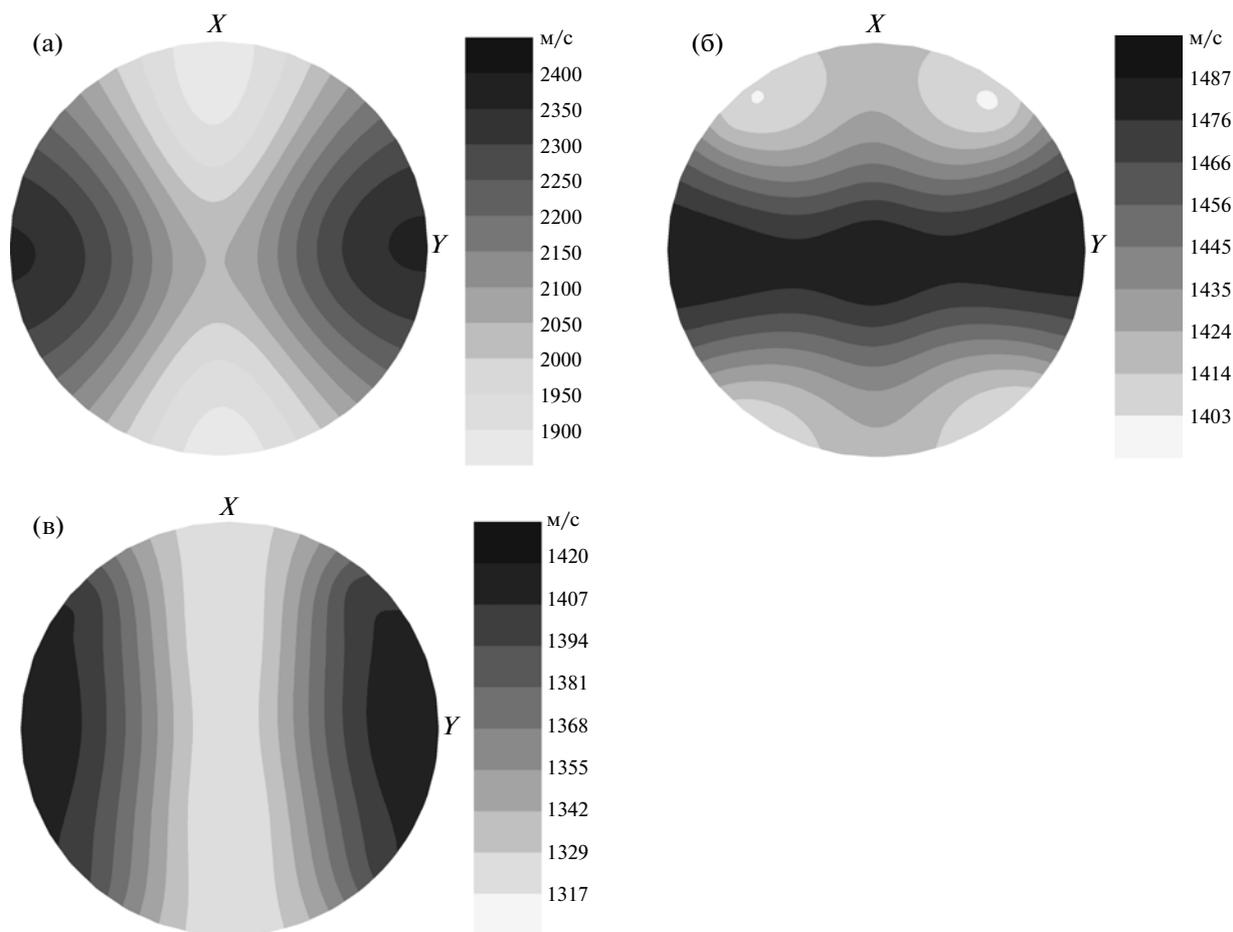


Рис. 1. Стереографическая проекция скоростей квазипродольных (а), быстрых (б) и медленных (в) квазипоперечных волн в графите. Плоскость проекции совпадает с плоскостью XY лабораторной системы координат.

сеткой $10^\circ \times 10^\circ$. Квазипродольная и медленная квазипоперечная волны распространяются с максимальной скоростью вдоль направления экструзии графитового блока (ось Y прямоугольной лабораторной системы координат образца XYZ) и с минимальной скоростью вдоль оси X (в плоскости, перпендикулярной направлению экструзии). Коэффициент упругой анизотропии AVp можно рассчитать по формуле $AVp = (V_{\max} - V_{\min})/V_{\text{mean}}$, где V_{\max} , V_{\min} , V_{mean} – максимальная, минимальная и средняя скорости распространения упругих волн. Для рассматриваемого образца графита коэффициент анизотропии упругих свойств составляет $AVp = 22.9\%$ для квазипродольных волн [12], $AVp = 5.7\%$ и $AVp = 7.6\%$ для быстрых и медленных квазипоперечных волн соответственно.

Рассмотрим задачу об отражении и преломлении упругих волн, распространяющихся через границу раздела оргстекло–графит, для двух случаев. Пусть падающая продольная волна с волновым вектором \mathbf{k}_0 проходит через слой стекла (рис. 2), но в первом случае в плоскости падения лежит плос-

кость XZ лабораторной системы координат графита (рис. 2а), во втором – плоскость YZ (рис. 2б).

Упругие волны, образующиеся на границе раздела при отражении и преломлении, можно представить с помощью сечений поверхностей волновых векторов, представляемых графически [26]. Зная скорости распространения упругих волн в оргстекле и поликристаллическом графите, можно построить картину сечения поверхностей волновых векторов для системы двух слоев оргстекло–графит (рис. 2). В оргстекле существуют две ветви акустических волн: L – продольная волна, T – поперечная волна; в графите существуют три ветви: qL – квазипродольная волна, qFT и qST – быстрая и медленная квазипоперечные волны (рис. 2), их фазовые скорости $V_{qST} < V_{qFT} < V_{qL}$. Обозначим физические характеристики падающей волны индексом 0 , соответственно волновой вектор \mathbf{k}_0 . При отражении и преломлении упругих волн на границе раздела двух сред выполняется закон Снеллиуса, т.е. компонента волнового вектора, касательная к границе раздела, остается постоян-

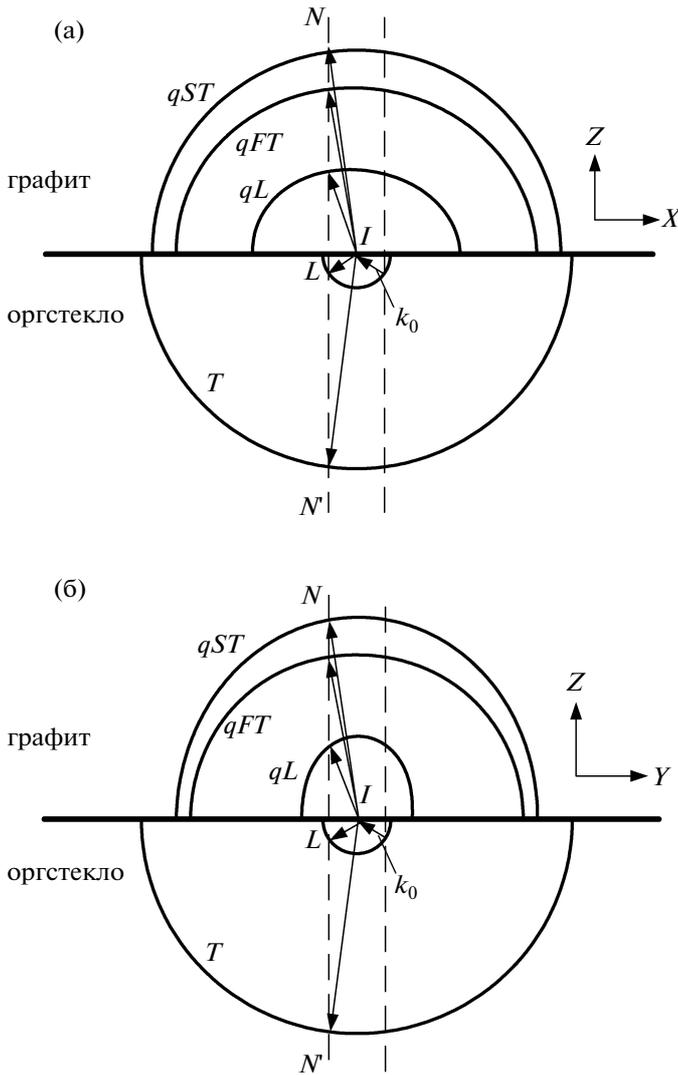


Рис. 2. Рассчитанные сечения поверхностей волновых векторов в двухслойной среде оргстекло–графит. Плоскости XZ (а) и YZ (б) графита находятся в плоскости падения. Величина волнового вектора обратно пропорциональна значению скорости волны.

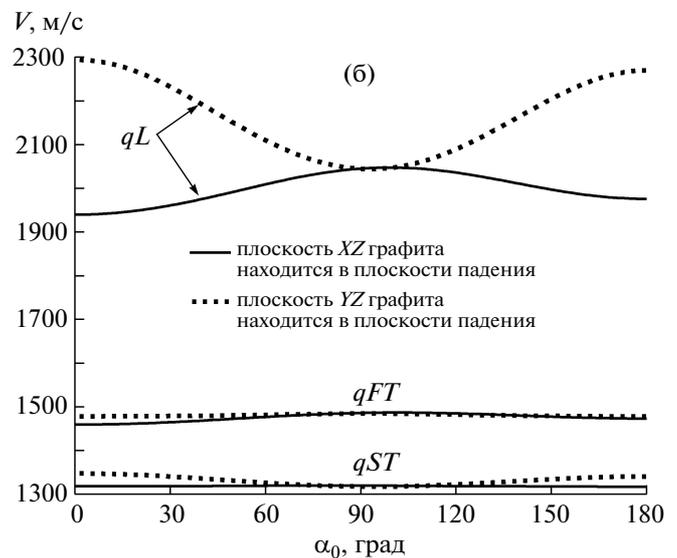
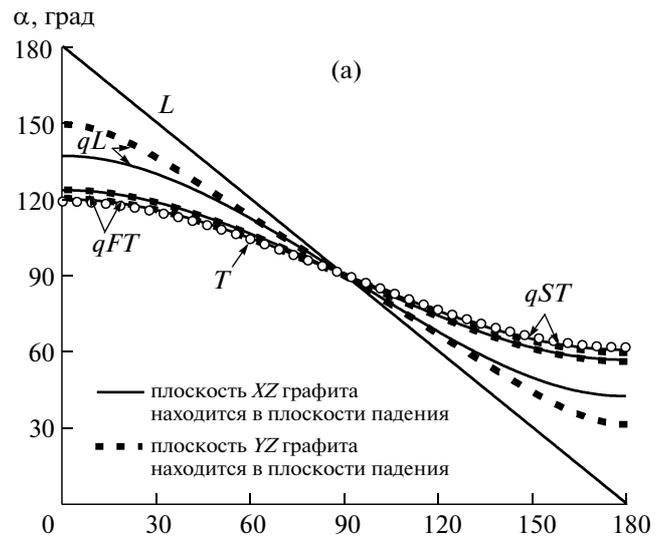


Рис. 3. Зависимости рассчитанных углов скольжения расщепленных волн (а) и скорости преломленных волн (б) от угла скольжения α_0 падающей продольной волны.

ной [17, 18]. Это граничное условие для первого случая (рис. 2а) записывается в следующем виде:

$$k_{0 \parallel X} = k_{qL \parallel X} = k_{qFT \parallel X} = k_{qST \parallel X} = k_{L \parallel X} = k_{T \parallel X}, \quad (2)$$

для второго случая (рис. 2б):

$$k_{0 \parallel Y} = k_{qL \parallel Y} = k_{qFT \parallel Y} = k_{qST \parallel Y} = k_{L \parallel Y} = k_{T \parallel Y}. \quad (3)$$

Граничное условие Снеллиуса позволяет определить волновые векторы отраженных и преломленных волн на границе раздела посредством пересечения линии NN' с сечением поверхностей волновых векторов (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что при перемещении линия NN' (т.е. при изменении направления падающей продольной волны) всегда пересекает акустические ветви только в одной точке. Это означает,

что в оргстекле всегда образуются две отраженные волны (продольная и поперечная), а в графите – три преломленные волны (квазипродольная и две квазипоперечные). Отраженная продольная волна зеркально отражается относительно падающей продольной волны. В оргстекле угол скольжения отраженной продольной волны α_L меньше угла скольжения отраженной поперечной волны α_T . В поликристаллическом графите угол скольжения преломленной быстрой квазипоперечной волны α_{qFT} больше угла скольжения преломленной квазипродольной волны α_{qL} , но меньше угла скольжения медленной квазипоперечной волны α_{qST} .

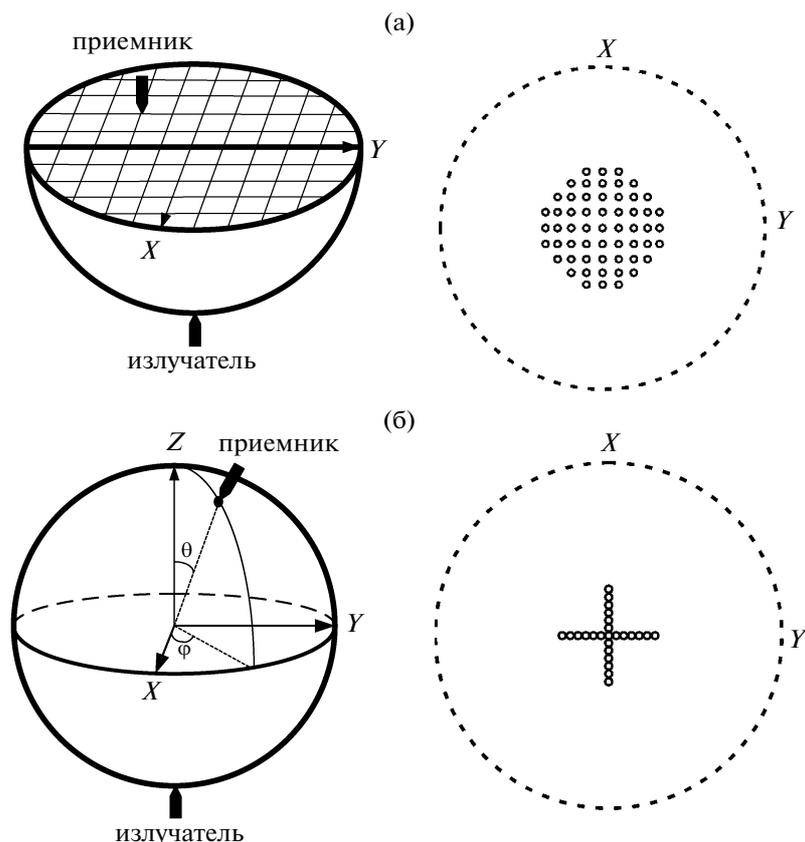


Рис. 4. Схема эксперимента на поликристаллических графитовых образцах. Образец в форме полусферы GRA3 (а), в форме GRA4 (б) и растры стереографических проекций с расположением точек, соответствующих измеренным в эксперименте направлениям распространения квазипродольных волн в образцах.

Из граничных условий Снеллиуса (2) и (3) определены направления отраженных и преломленных волн в зависимости от направления падающей продольной волны на границу раздела оргстекло–графит. Обозначим через α_0 угол между направлением распространения упругих волн и границей раздела, т.е. осью X (когда плоскость XZ графита лежит в плоскости падения (рис. 2а)) или осью Y (когда плоскость YZ графита лежит в плоскости падения (рис. 2б)). Рассчитанные зависимости углов скольжения расщепленных волн от угла скольжения α_0 продольной волны представлены на рис. 3а, на котором видно, что продольная волна отражается от границы раздела зеркально. Отраженная поперечная и преломленная медленная квазипоперечная волны распространяются почти симметрично относительно границы раздела.

С учетом рассчитанных значений углов скольжения преломленных волн (рис. 3а) с помощью (1) получены значения скоростей распространения этих волн в зависимости от угла скольжения падающей продольной волны (рис. 3б).

На рис. 3б видно, что, когда плоскость XZ графита находится в плоскости падения, скорость распространения преломленной медленной квазипоперечной волны слабо зависит от угла падения α_0 продольной волны. Когда в плоскости падения находится плоскость YZ графита (рис. 3б), скорость распространения преломленной быстрой квазипоперечной волны практически не зависит от угла α_0 . Как результат технологического процесса производства упругие свойства поликристаллического графита характеризуются отсутствием оси 2-го порядка, совпадающей с осью Z . Поэтому при распространении продольной волны вдоль направлений X или Y скорости преломленных волн отличаются, когда угол скольжения равен 0° , от того случая, когда волна распространяется в противоположном направлении (угол скольжения -180°) (рис. 3б).

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА АКУСТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки полученных теоретически результатов подготовлен и проведен следующий эксперимент.

Из графитового блока были вырезаны полу-сфера GRA3 и сфера GRA4. Образец из оргстекла представляет собой полусферу. Диаметры всех образцов равны 50 мм. Экваториальные плоскости полусфер отшлифованы.

Эксперименты проводились в два этапа. Первый включал экспериментальное исследование скоростей распространения квазипродольных упругих волн в поликристаллических графитовых образцах GRA3 и GRA4 (рис. 4). Физико-механические характеристики этих образцов индивидуальны и не взяты из справочной литературы. На втором этапе проводилась регистрация прохождения упругих волн в двухслойном образце стекло–графит OGRA, образованном из полусфер оргстекла и графита GRA3. Они соединялись по экваториальным плоскостям слоем специального масла и образовывали двухслойный образец в виде сферы (рис. 5).

С помощью генератора сигналов и цифрового осциллографа измерялись волновые формы (зависимости амплитуды сигнала от времени) проходящих через образцы между излучателем и приемником упругих импульсов. Дополнительно были получены волновые формы сигнала с усилением 20 дБ. Датчики-излучатели во всех случаях располагались на нижнем полюсе (рис. 4, 5). У полусферического образца GRA3 приемник перемещался по узлам сетки на экваториальной плоскости с шагом 5 мм (рис. 4а). В случаях образца GRA4 и двухслойного образца OGRA приемник перемещался по поверхности графита по точкам, соответствующим углам $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ для каждого из углов $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$; где θ – полярный угол, φ – азимутальный угол (рис. 4б, 5). Направления, в которых проводились измерения в эксперименте, изображены на рис. 4 в виде их стереографической проекции на плоскости XY лабораторной системы координат.

В экспериментах использовались пьезоэлектрические преобразователи четырех типов со следующими характеристиками:

- датчики P1 и S1: частота излучаемого сигнала ~ 1 МГц;
- датчик D1x: частота излучаемого сигнала ~ 3 МГц;
- датчик S5: частота излучаемого сигнала ~ 5 МГц.

Ультразвуковые волны, проходящие через полусферический графитовый образец GRA3, зарегистрированы в двух случаях: излучатель P1 и приемник D1x; излучатель S5 и приемник S5.

В экспериментах со сферическим графитовым образцом GRA4 использовались излучатель и приемник типа S1.

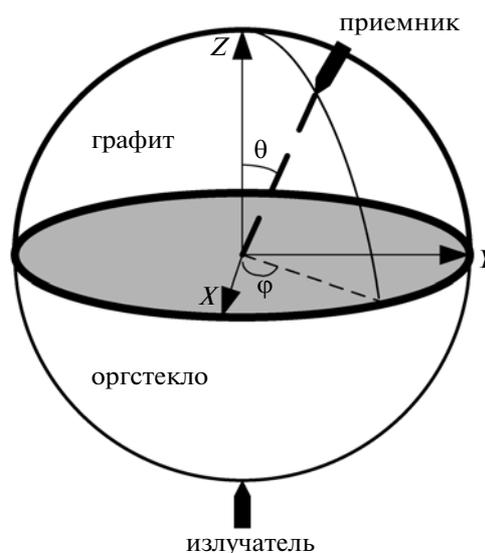


Рис. 5. Схема эксперимента на двухслойном образце оргстекло–графит OGRA.

В экспериментах на двухслойном образце стекло–графит OGRA использовались пьезоэлектрические преобразователи двух типов P1 и S1 в четырех случаях: излучатель P1 и приемник P1; излучатель P1 и приемник S1; излучатель S1 и приемник P1; излучатель S1 и приемник S1.

Частота используемых датчиков составляет несколько мегагерц, что соответствует длинам упругих волн в графите порядка миллиметров. Следовательно, длины акустических волн значительно превышают размеры кристаллитов (~ 55 нм, [14]) и трещин (длина которых имеет порядок мкм, а ширина – Å) [16], характерных для поликристаллического графита, поэтому для расчета скоростей упругих волн в материале можно использовать его эффективные объемные характеристики (тензор упругости и плотность в п. 2), т.е. работать в так называемом “длинноволновом приближении”.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Волновые формы акустических сигналов, зарегистрированных приемниками в образце GRA3, содержат 1891 точку. Частота дискретизации АЦП 40 МГц, т.е. время между последовательными отсчетами – 0.025 мкс, полная длительность каждой зарегистрированной волновой формы равна 47.275 мкс.

Зарегистрированные в эксперименте с образцом GRA4 и двухслойным образцом стекло–графит OGRA акустические сигналы также содержат 1891 точку, но время между последовательными отсчетами составляет 0.05 мкс, и полная длитель-

ность зарегистрированной волновой формы в этом случае равна 94.5 мкс.

Отношение сигнал—шум для зарегистрированных акустических сигналов в полусферическом графитовом образце GRA3 и двухслойном образце оргстекло—графит OGRA меньше, чем у сферического графитового образца GRA4. Для образца GRA3 это отношение ~30 дБ (излучатель P1 и приемник D1x) и ~35 дБ (излучатель S5 и приемник S5), для двухслойного образца оргстекло—графит OGRA оно ~35 дБ, а для сферического образца GRA4 оно составляет ~40 дБ. Это различие обусловило выбор метода обработки. По данным зарегистрированных волновых форм для определения времен пробега квазипродольной волны через полусферический графитовый образец GRA3 и двухслойный образец OGRA использовался метод статистики высокого порядка [27]. Для набора волновых форм сферического графитового образца GRA4 определение времени прохождения проведено методом анализа отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах (LTA/STA) [28]. Полученное время прихода квазипродольной волны затем было скорректировано с учетом конкретного времени излучения упругой волны и задержек в корпусах пьезодатчиков.

Метод статистики высокого порядка. Метод определения времени пробега ультразвуковых волн, использованный в эксперименте с полусферическим графитовым образцом GRA3 и двухслойным образцом оргстекло—графит OGRA, заключается в следующем [27]. Каждый сигнал делился на серии окон по 512 точек, причем соседние окна перекрывались на 128 точек. Для каждого окна рассчитывалась условная энергия сигнала как сумма квадратов амплитуд. По изменению этой условной энергии во всех окнах можно определить, в каком из них регистрируется приход квазипродольной волны: при переходе из окна, содержащего только шум, в окно, содержащее полезный сигнал, условная энергия существенно возрастает [29].

После установления того, в какое окно приходит квазипродольная волна, определяется точное время ее прихода. Для этого в данном окне строится новая серия перемещающихся подокон длительностью 100 точек каждое. Эти подокна перемещаются по одной точке. В каждом подокне рассчитываются статистические моменты: первый статистический момент S_1 — среднее значение, второй — стандартное отклонение S_2 , третий — асимметрия S_3 , четвертый — эксцесс S_4 и т.д. Перед точкой прихода самой быстрой волны (т.е. квазипродольной) на волновой форме наблюдается только шум, распределение значений амплитуд сигналов близко к нормальному, а значения

их статистических моментов — к значениям, соответствующим нормальному распределению. Как только точка прихода квазипродольной волны попадает в подокно, нормальное распределение искажается, и статистические моменты резко меняются. Таким образом, по изменениям статистических моментов, особенно моментов высокого порядка, можно определить время прихода квазипродольной волны.

Метод анализа отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах (LTA/STA). Для каждой зарегистрированной волновой формы в эксперименте с образцом GRA4 рассчитаны зависимости от времени средних значений входящих амплитуд сигнала в длинном (LTA) и в коротком временных окнах (STA), а также их отношение (LTA/STA) [28]. Длительность длинного временного окна составляет 100 точек отсчета (5 мкс), короткого — 10 точек (0.5 мкс). Значение LTA характеризует медленную тенденцию изменения энергии сигнала, а значение STA чувствительно к резкому изменению энергии сигнала. На основе зависимости от времени отношения LTA/STA время прихода квазипродольной волны определяется точкой, где значение LTA/STA резко увеличивается.

РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Зарегистрированные акустические сигналы позволили определить времена прихода квазипродольных волн. Расстояние между излучателем и приемником определялось размерами образцов.

Результаты акустических экспериментов на полусферическом GRA3 и сферическом GRA4 графитовых образцах. Зная время и расстояние пробега сигнала, рассчитали значения скоростей распространения квазипродольных упругих волн в исследуемых графитовых образцах GRA3 и GRA4.

На рис. 6 представлены стереографические проекции экспериментальных значений скоростей распространения ультразвука с несущей частотой 1 МГц (рис. 6а) и 5 МГц (рис. 6б) у образца GRA3. На рис. 7а показана стереографическая проекция скоростей ультразвука с частотой 1 МГц у образца GRA4. Для сравнения на этих рисунках приведены “неполные” теоретические стереографические проекции скоростей квазипродольных волн (размеры соответствуют экспериментальным) у образцов GRA3 (рис. 6в) и GRA4 (рис. 7б). Из рисунков видно, что квазипродольная волна распространяется с максимальной скоростью в направлении, близком к оси экструзии (ось Y), а с минимальной скоростью лежит в плоскости XZ,

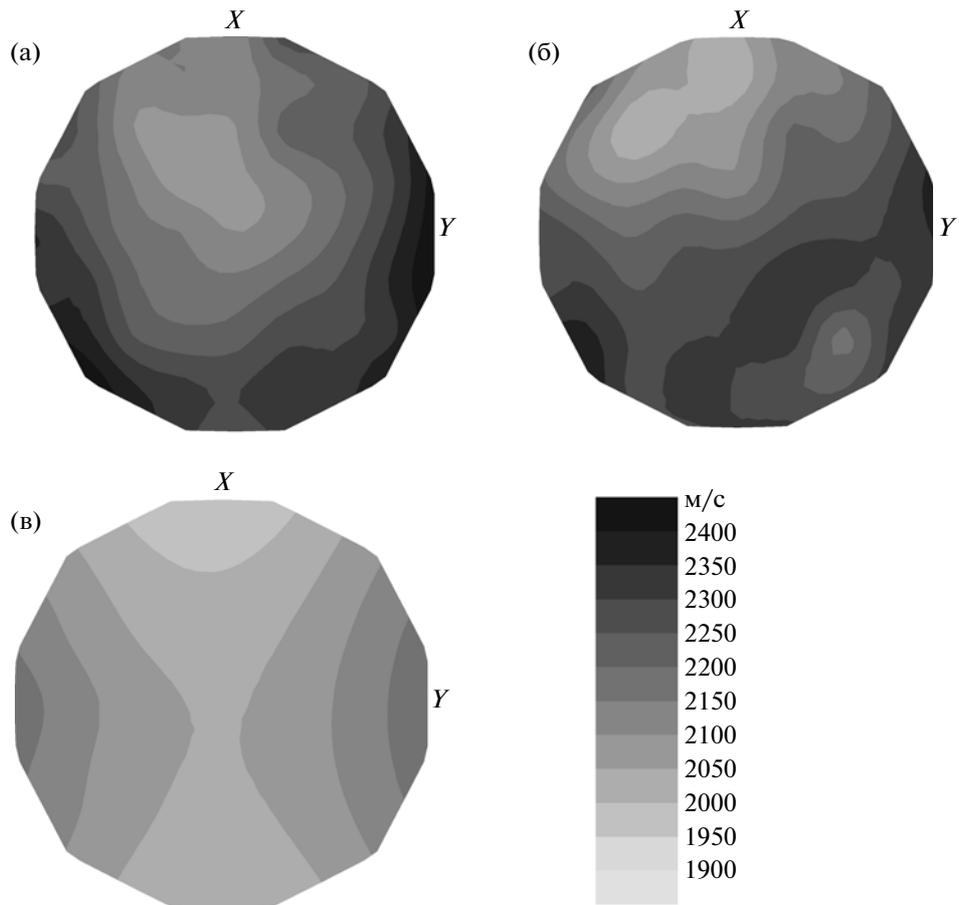


Рис. 6. Неполные экспериментальные (а, б) и теоретическая (в) стереографические проекции скоростей квазипродольных упругих волн в графитовом образце GRA3. Плоскость проекции совпадает с плоскостью XY лабораторной системы координат; излучатель – P1, приемник – D1x (а), излучатель и приемник – S5 (б).

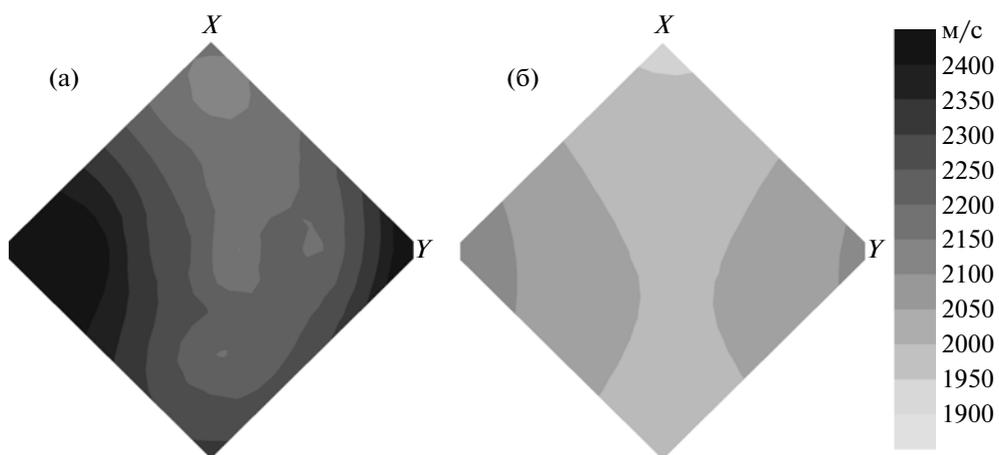


Рис. 7. Неполные экспериментальная (а) и теоретическая (б) стереографические проекции скоростей квазипродольных упругих волн в графитовом образце GRA4. Плоскость проекции совпадает с плоскостью XY лабораторной системы координат.

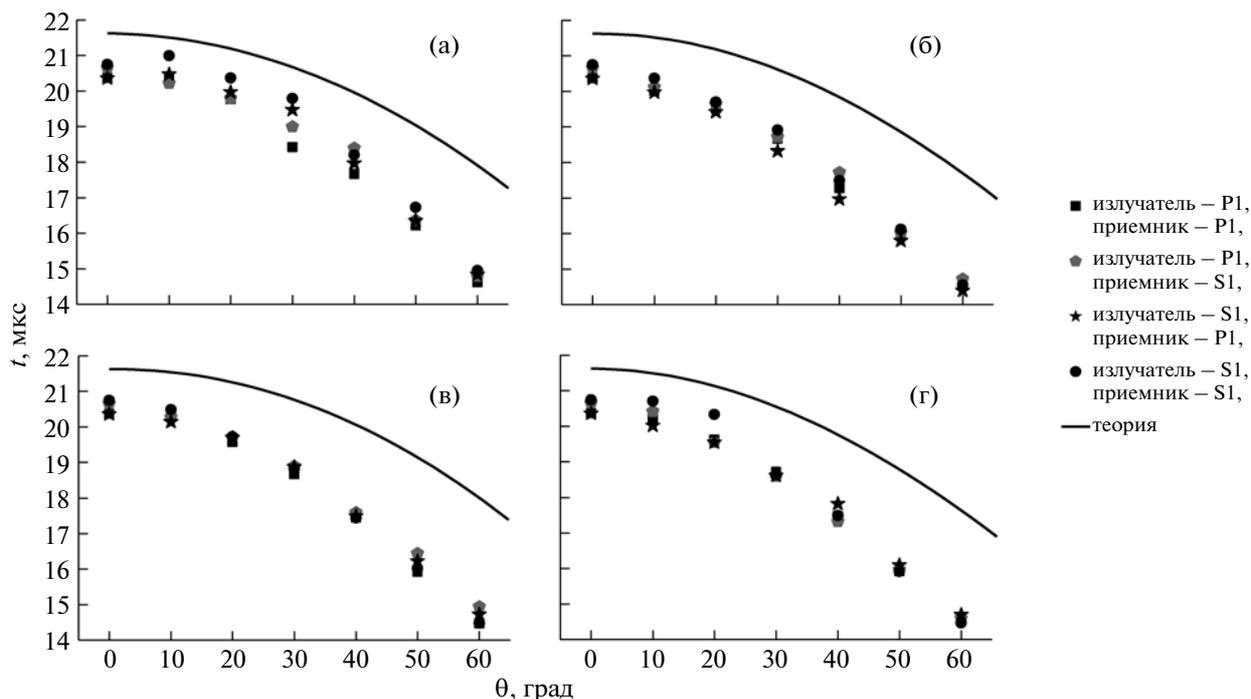


Рис. 8. Сравнение экспериментальных значений времени прихода t квазипродольной волны на поверхность графита двухслойного образца оргстекло–графит OGRA с теоретическим расчетом. Приемник перемещался по дугам сферической поверхности графита, соответствующим азимутальным углам $\varphi = 0^\circ$ (а), 90° (б), 180° (в), 270° (г).

что согласуется с результатами предыдущих измерений и теоретических исследований [12]. Коэффициент упругой анизотропии AV_p , рассчитанный по экспериментальным данным, для образца GRA3 составляет 16.54% для первого случая (рис. 6а) и 16.94% для второго (рис. 6б). Для образца GRA4 AV_p составляет 18.32% (рис. 7а). Заметим, что полученные экспериментальные стереографические проекции не являются “полными”, так как в экспериментах были измерены не все возможные направления распространения волны. Схемы расположения излучателя и приемника двух разных образцов приведены на рис. 4а, 4б, где граница “полной” стереографической проекции показана пунктирным кругом. Максимальный угол между направлением распространения волны и осью Z составляет 40° для образца GRA3, а для образца GRA4 он равен $\sim 30^\circ$ (рис. 4). Для сравнения площадь “неполной” экспериментальной стереографической проекции составляет $\sim 14\%$ относительно площади “полной” проекции для полусферического образца GRA3, и $\sim 5\%$ для сферического GRA4. Экспериментально измеренные значения скоростей квазипродольной волны в GRA3 меньше, чем в GRA4 в тех же направлениях. Небольшие (~ 50 м/с) различия между значениями скоростей квазипродольных упругих волн, зарегистрированных в GRA3 и GRA4, а также в их пространствен-

ном распределении, могут быть объяснены несколькими фактами. Во-первых, GRA3 и GRA4 вырезаны из одного графитового блока, но из разных его частей, т.е. они могут обладать несколько различными преимущественными ориентировками зерен, иметь различия в текстуре формы и объемной концентрации микротрещин, существенным образом влияющих на упругие свойства графита. Во-вторых, макроскопические системы координат образцов могут быть повернуты друг относительно друга (постановка эксперимента позволяла контролировать углы с точностью $\sim 5^\circ$).

Результаты акустических экспериментов на двухслойном образце оргстекло–графит. Результаты измерений времен пробега квазипродольных упругих волн через двухслойный образец оргстекло–графит OGRA показаны на рис. 8 в виде зависимостей времен прохождения квазипродольной волны от полярного угла θ для случаев, когда приемник перемещался по дугам, соответствующим азимутальным углам $\varphi = 0^\circ$ (рис. 8а), $\varphi = 90^\circ$ (рис. 8б), $\varphi = 180^\circ$ (рис. 8в), $\varphi = 270^\circ$ (рис. 8г).

Из рис. 8 видно, что времена прохождения квазипродольной волны через двухслойный образец оргстекло–графит OGRA убывают с увеличением полярного угла θ . Расхождение измеренных времен прихода при использовании датчиков различных типов невелико, оно составляет в

Экспериментальные и теоретические значения минимальной, средней и максимальной скоростей (м/с) квазипродольных упругих волн и их направления распространения в графитовых образцах GRA3 и GRA4

	Экспериментальные						Теоретические		
	Излучатель 1МГц			Излучатель 5МГц			V_p	φ	$\theta/2$
	V_p	φ	$\theta/2$	V_p	φ	$\theta/2$			
GRA3									
Мин.	2076	315°	15°	2009	315°	29°	1963	0°	38°
Макс.	2448	104°	40°	2386	225°	40°	2188	270°	38°
Средн.	2245			2226			2069		
GRA4									
Мин.	2136	180°	25°				1988	0°	30°
Макс.	2552	270°	30°				2142	90°	30°
Средн.	2273						2054		

среднем 5%. Эксперимент также показывает, что времена прихода квазипродольной волны в точках с одинаковым полярным углом θ , но разными азимутальными углами φ различаются.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим подробнее рассчитанные теоретически и полученные экспериментально значения скоростей квазипродольных волн, распространяющихся в образцах GRA3 и GRA4. На рис. 1 изображена “полная” теоретическая стереографическая проекция скоростей квазипродольных волн, рассчитанная с использованием упругих модулей, приведенных в [25], а на рис. 6 и 7 показаны “неполные” экспериментальные проекции скоростей квазипродольных упругих волн в GRA3 и GRA4. Отклонение теоретических значений скоростей от экспериментальных для данных проекций рассчитывалось по формуле $(V_{\text{эксп}} - V_{\text{теор}})/V_{\text{теор}}$, где $V_{\text{эксп}}$ – экспериментально измеренная скорость распространения квазипродольных волн, $V_{\text{теор}}$ – рассчитанная теоретически. Полученное среднее отклонение у образца GRA3 равно 8.47% при использовании излучателя P1 и приемника D1x; при использовании излучателя и приемника S5 равно 7.58%. Для образца GRA4 (оба датчика S1) оно составляет 10.6%. Экспериментальные и теоретические значения минимальной, средней, максимальной скоростей V_p (и соответствующие направления) распространения квазипродольных волн через образцы GRA3 и GRA4 представлены в таблице, где угол φ означает азимутальный угол, т.е. угол между проекцией направления распространения упругой волны на плоскость XY и осью X, и $\theta/2$ – угол между направлением распространения волны и осью Z. Были рассчитаны также углы отклонения экспериментально зарегистрированных направлений распространения

квазипродольной волны с минимальной и максимальной скоростями от их расчетных значений. У образца GRA3 при использовании излучателя P1 и приемника D1x они равны 29° и 77° (для направлений с минимальной скоростью и максимальной соответственно). При использовании излучателя и приемника S5 они равны 26° и 28°. У образца GRA4 эти отклонения составляют 55° и 60°.

Из таблицы видно, что все экспериментально обнаруженные значения больше рассчитанных. Теоретически рассчитанный коэффициент упругой анизотропии у образца полушара GRA3 (рис. 6в) составляет 10.87%, что примерно в 1.5 раза меньше, чем рассчитанный из экспериментальных данных, а у сферического образца GRA4 (рис. 7б) он равен 7.47%, что в 2.4 раза меньше, чем его экспериментальное значение.

Из проведенного эксперимента на двухслойном образце оргстекло–графит OGRA значения скоростей распространения преломленных квазипродольных волн нельзя вычислить корректно, так как расстояние, которое проходит квазипродольная упругая волна в двухслойном образце, не может быть точно измерено. Поэтому для сравнения экспериментальных данных с расчетом были проведены вычисления предполагаемого времени прохождения упругой волны через двухслойную систему. Из простых геометрических соображений получена формула вычисления теоретического времени прихода квазипродольной волны на поверхность графита

$$\frac{R}{|\sin \alpha_0| V_0} + \frac{R}{|\sin \alpha_0|} \left[\sqrt{\cos^2 \alpha_0 \cos^2 \alpha_{qL} - \cos 2\alpha_0} - |\cos \alpha_0 \cos \alpha_{qL}| \right] \frac{1}{V_{qL}}, \quad (4)$$

где α_{qL} и V_{qL} – угол скольжения и скорость преломленной квазипродольной волны, V_0 – скорость падающей продольной волны, R – радиус полусферы образца.

Отметим, что в случае, когда приемник перемещался по дуге, соответствующей азимутальным углам $\varphi = 0^\circ$ и 180° , плоскостью падения упругих волн является плоскость XZ ; а для углов $\varphi = 90^\circ$ и 270° , плоскостью падения становится плоскость YZ (рис. 5).

Зависимости рассчитанных времен прохождения квазипродольных упругих волн через образец оргстекло–графит OGRA от позиции приемника на поверхности графита представлены на рис. 8 (сплошные линии). Времена прихода квазипродольной волны в точках с одинаковым полярным углом θ , но разным азимутальным углом φ (0° , 90° , 180° , 270°) также различаются, однако это различие невелико и составляет $\sim 0.5\%$. Оно возникает из-за анизотропии поликристаллического графита.

На рис. 8 наблюдается расхождение между измеренными временами прихода квазипродольной волны и рассчитанными, причем все рассчитанные времена пробега превышают измеренные экспериментально. Наибольшее различие составляет 17% .

На несоответствие результатов, наблюдаемых у двухслойного образца оргстекло–графит OGRA, заметно влияет расхождение экспериментальных и теоретических результатов в образцах GRA3 и GRA4 (таблица). Причины расхождения экспериментальных и теоретических результатов в образцах графита могут быть объяснены, например, не учетом в модели нелинейных (ангармонических) эффектов [17]. Кроме того, известно, что результатом цикла нагрузки–разгрузки поликристаллического графита под действием упругих волн может быть небольшое изменение его объема вследствие закрытия или образования микротрещин [30]. Поскольку даже сотые доли объемного содержания микротрещин в материале существенно влияют на упругие свойства графита, то значения скоростей упругих волн в графите после цикла нагрузки–разгрузки могут заметно измениться.

Из таблицы можно видеть, что рассчитанные скорости распространения упругих волн в чистых графитовых образцах меньше измеренных экспериментально, следовательно, рассчитанные времена пробега в графитовом слое больше экспериментальных. Поэтому в двухслойном образце теоретические времена пробега также должны быть больше экспериментальных.

В проведенном эксперименте на двухслойном образце не удалось корректно определить времена прихода преломленных квазипоперечных волн. Оценить их можно, например, методом [31,

32], используя факт ортогональной поляризации упругих волн. Однако применение данного метода в настоящей работе не дало достоверных (согласованных) результатов. Возможной причиной является то, что использованный излучатель излучает упругую волну в большом телесном угле, и ее нельзя представить одним лучом. В результате зарегистрированные приемником волновые картины являются суперпозицией волн, преломленных в разных точках границы раздела. То, что используемые датчики не являются точечными, еще более отдаляет картину от идеальной. Кроме того, расчет не учитывает конечных размеров использованного образца (например, падающая волна в реальности не является плоской волной).

Неоднозначность сравнения рассчитанных и экспериментальных данных заключается в том, что в эксперименте наблюдаются конечные пучки упругих волн, направления распространения которых определяются лучевыми скоростями, а расчет основан на определении фазовых скоростей. Направления лучей в анизотропных средах значительно отличаются от направления соответствующих волновых векторов. Лучевые скорости падающей, отраженной и преломленной волн лежат в одной плоскости лишь в исключительных случаях, когда, например, плоскость падения является плоскостью симметрии для обеих анизотропных сред. В общем случае отраженные и преломленные лучи занимают разнообразные положения как друг относительно друга, так и по отношению к падающему лучу и нормали к границе раздела. В частности, отраженный луч может лежать в плоскости падения по ту же сторону от нормали к границе раздела, что и падающий луч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При теоретическом анализе для определения углов отражения и преломления квазипродольных волн на границе раздела двух сред использован графический метод, предполагающий, что концы волновых векторов падающей, отраженных и преломленных волн лежат на перпендикуляре, проведенном к границе раздела через конец волнового вектора падающей волны. Количество отраженных и преломленных волн определяется тем, со сколькими плоскостями пересекается этот перпендикуляр.

При расчете величин скоростей квазипродольных волн текстурированный поликристаллический графит рассмотрен как анизотропное тело с эффективными модулями упругости, рассчитанными с учетом наличия неравноосных пор и микротрещин. Анализ показал, что при падении продольной волны на границу раздела оргстекло–графит всегда происходит расщепление падающей волны на пять волн. Преобразование пре-

ломленных волн существенно зависит от угла скольжения падающей продольной волны. Значения скоростей и углов скольжения преломленных волн также различаются при разных ориентировках кристаллографических осей поликристаллического графита относительно границы раздела оргстекло—графит.

Значения скоростей квазипродольных упругих волн, экспериментально зарегистрированные у образцов поликристаллического пористого графита, удовлетворительно согласуются с теоретическими значениями. Определенные экспериментально времена пробега квазипродольных упругих волн в двухслойном образце в общем удовлетворительно согласуются с полученными теоретически. Наблюдающиеся расхождения могут быть объяснены, с одной стороны, тем, что при математическом моделировании волновых процессов учитываются далеко не все особенности свойств материалов. С другой стороны, погрешность при измерениях физических величин может превышать оценочные 5%.

Проведенные исследования, а также результаты, полученные в [10], показали, что прогнозируемый эффект многократного расщепления квазипродольных и квазипоперечных упругих волн на границах раздела различных сред не удалось зафиксировать экспериментально по ряду технических причин, анализ которых, возможно, позволит выработать необходимые требования к выбору наиболее подходящих для этой цели материалов и совершенствованию методики эксперимента.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-00722), грантов полномочного представителя Чешской Республики в ОИЯИ, приказ № 73 от 01.02.2012, пп.17,18, а также Грантового агентства Чешской Республики, проект № P104/12/0915 и исследовательской темы № AVOZ 30130514 Института геологии Академии наук Чешской Республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакирев М.К., Глинский И.А. // Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 52.
2. Babuska V., Cara M. Seismic anisotropy in the Earth. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. 207 p.
3. Осипов И.О. // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. 1961. № 5. С. 649.
4. Александров К.С. // Кристаллография. 1962. Т. 7. Вып. 5. С. 735.
5. Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Буриличев Д.Е. и др. // Физика Земли. 2001. № 1. С. 64.
6. Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Игнатович В.К. // Физика Земли. 2009. № 5. С. 57.
7. Игнатович В.К., Фан Л.Т.Н. // Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества. Сб. тр. науч. шк. Рыбака С.А. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2009. С. 26.
8. Ignatovich V.K., Phan L.T.N. // Am. J. Phys. 2009. V. 77. № 12. P. 1162.
9. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
10. Никитин А.Н., Васин Р.Н., Иванкина Т.И. и др. // Кристаллография. 2012. № 4. С. 611.
11. Балагуров А.М., Васин Р.Н., Локаичек Т. и др. // Изв. ТулГУ. Сер. Физика. 2006. Вып. 6. С. 75.
12. Lokajicek T., Lukas P., Nikitin A.N. et al. // Carbon. 2011. V. 49. № 4. P. 1374.
13. Панюков С.В., Субботин А.В. // Атомная энергия. 2008. Т. 105. Вып. 1. С. 25.
14. Лебедев И.Г., Виргильев Ю.С. // Атомная энергия. 1998. Т. 85. № 5. С. 377.
15. Platonov P.A., Karpukhin V.I., Shtrombakh Ya.I. et al. // Specialists' meeting on the status of graphite development for gas cooled reactors. Tokai, Ibaraki (Japan). 9–12 Sep 1991. International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria) IAEA-TECDOC-690. P. 205.
16. Sutton A.L., Howard V.C. // J. Nucl. Mater. 1962. V. 7. № 1. P. 58.
17. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: ФизМатЛит, 2003. 264 с.
19. Voight W. Lehrbuch der kristallphysik. Berlin; Leipzig: Teubner-Verlag, 1928.
20. Reuss A. // J. Appl. Mathem. Mechan. 1929. V. 9. P. 49.
21. Hashin Z., Shtrikman S. // J. Mechan. Phys. Solids. 1962. P. 335.
22. Шермергор Т.Д. Теория упругости микроненормодных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
23. Хорошун Л.П. // Прикл. механика. 1978. Т. 14. № 2. С. 3.
24. Bunge H.J. Texture analysis in materials science. London: Butterworths, 1982.
25. Matthies S. // J. Appl. Cryst. 2012. V. 45. P.1.
26. Под ред. Прохорова А.М. Физическая энциклопедия. Т. 3. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. 672 с.
27. Lokajicek T., Klima K. // Measurement Sci. Technol. 2006. V. 17. № 9. P. 2461.
28. Munro K. // CREWES Research Report. 2004. V. 16. P. 1.
29. Colak O.H., Destici T.C., Ozen S., Arman H., Cerezci O. // Arab. J. Sci. Eng. A. 2008. V. 34. № 1. P. 79.
30. Paterson M.S., Edmond J.M. // Carbon. 1972. V.10. № 1. P. 29.
31. Cichowicz A. // Bull. Seism. Soc. Am. 1993. V. 83. P. 180.
32. Sleeman R., van Eck T. // Methods and applications of signal processing in seismic network operations / Lecture notes in Earth sciences. 2003. V. 98. P. 173.