

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ « РО С Т Е Х Н О Л О Г И И »

ОАО «Научно-производственный концерн
«Композиционные материалы и технологии»

ОАО «Московский машиностроительный экспериментальный завод –
Композиционные технологии»

Масштабные эффекты в мелкодисперсных композитах

Белов П.А.

Доклад на 3 международной конференции
«Компьютерные технологии в проектировании и производстве конструкций из
композиционных материалов», Санкт-Петербург.

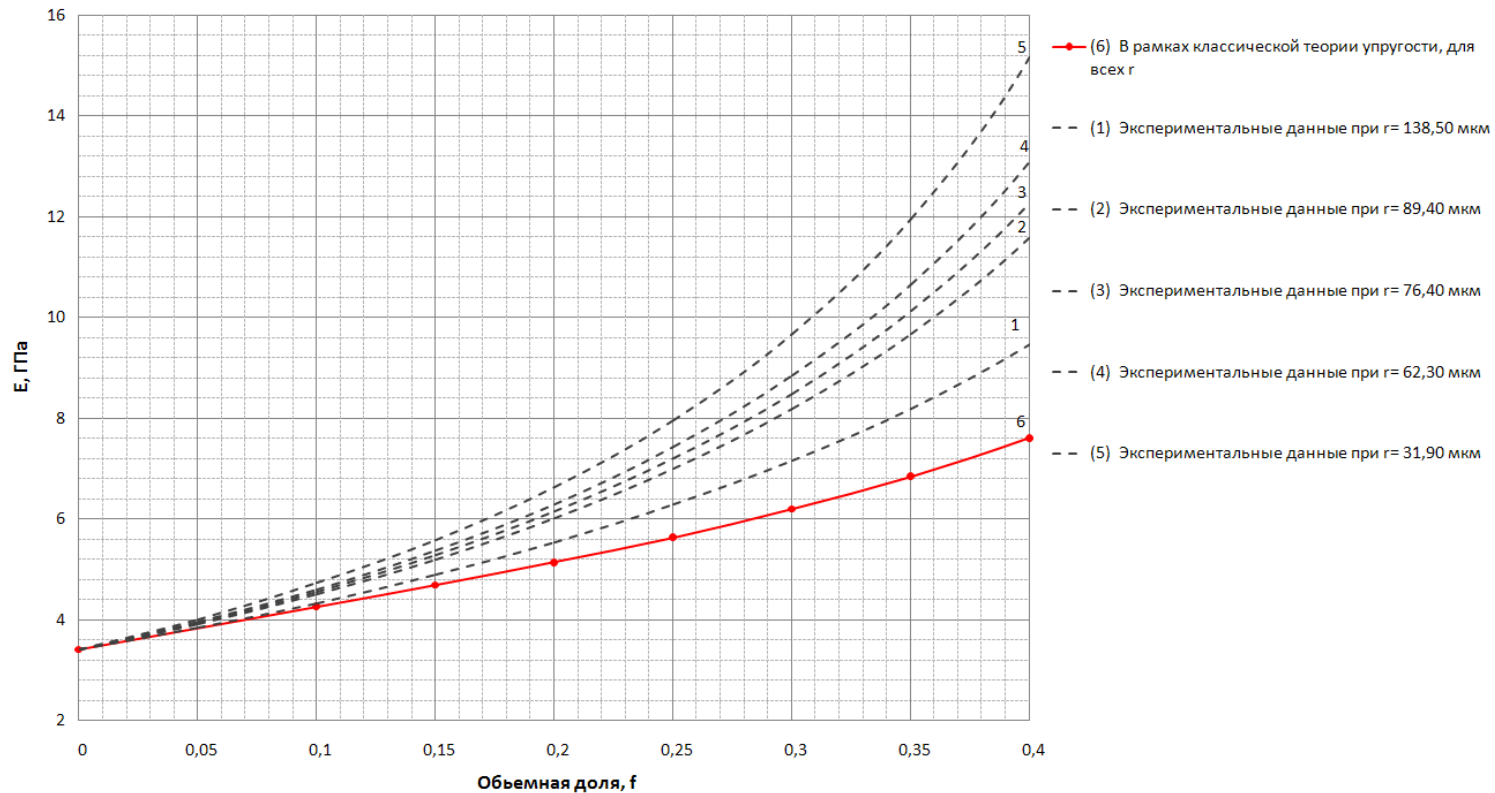


Ростехнологии

Эффект влияния абсолютного размера включений на эффективные свойства матрицы

高分子論文集 (Kobunshi Ronbunshu), Vol. 35, No. 2, pp. 125—129 (Feb., 1978)

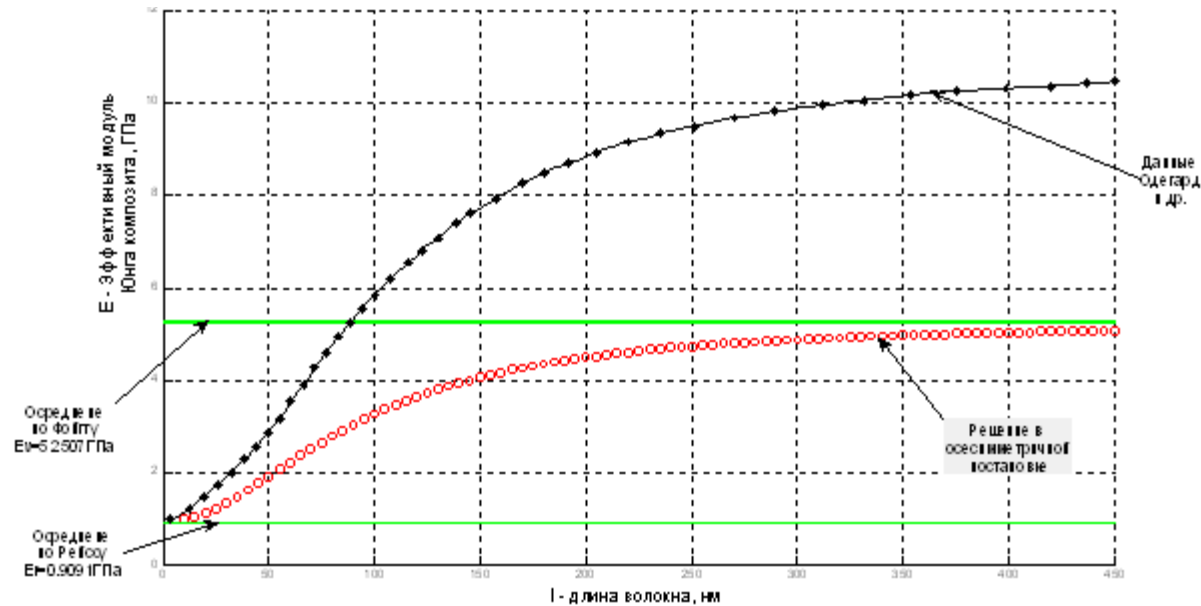
Зависимость модуля упругости E_c (ГПа) композиционного материала от объемной доли включений f .
Матрица из эпоксидной смолы $E_m = 3.41$ ГПа. Включение из стекла $E_d = 87.5$ ГПа.



Аномальное усиление матрицы, армированной длинными нанотрубками.

AIAA JOURNAL
Vol. 43, No. 8, August 2005

Effect of Nanotube Functionalization on the Elastic Properties of Polyethylene Nanotube Composites

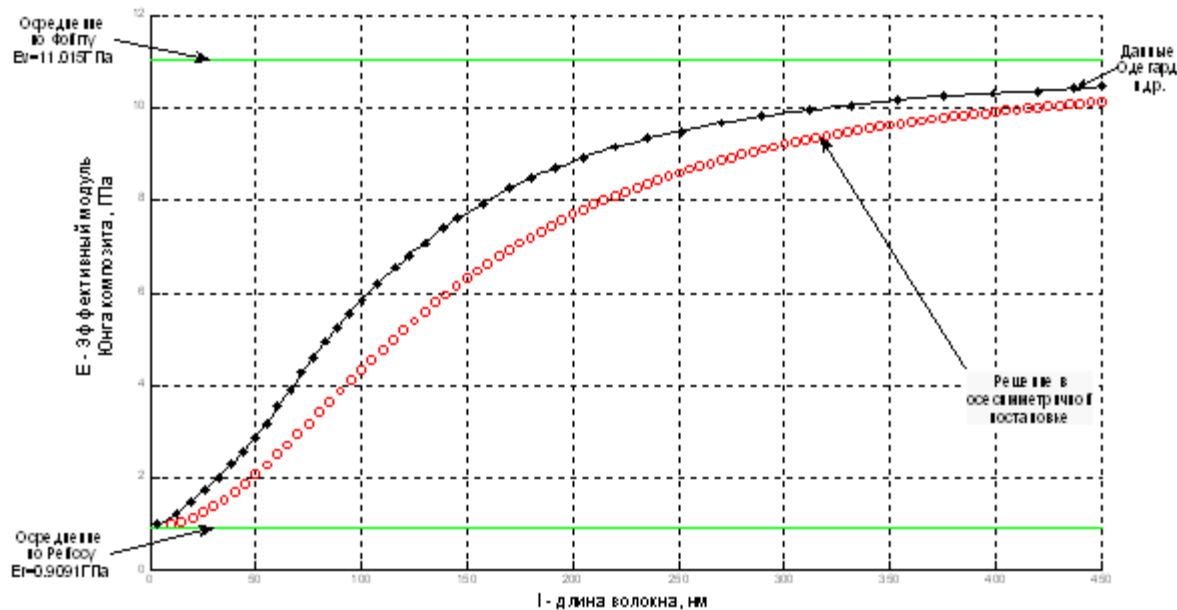


Зависимость эффективного модуля Юнга композиционного материала от
длины волокна

Аномальное усиление матрицы, армированной короткими нанотрубками.

AIAA JOURNAL
Vol. 43, No. 8, August 2005

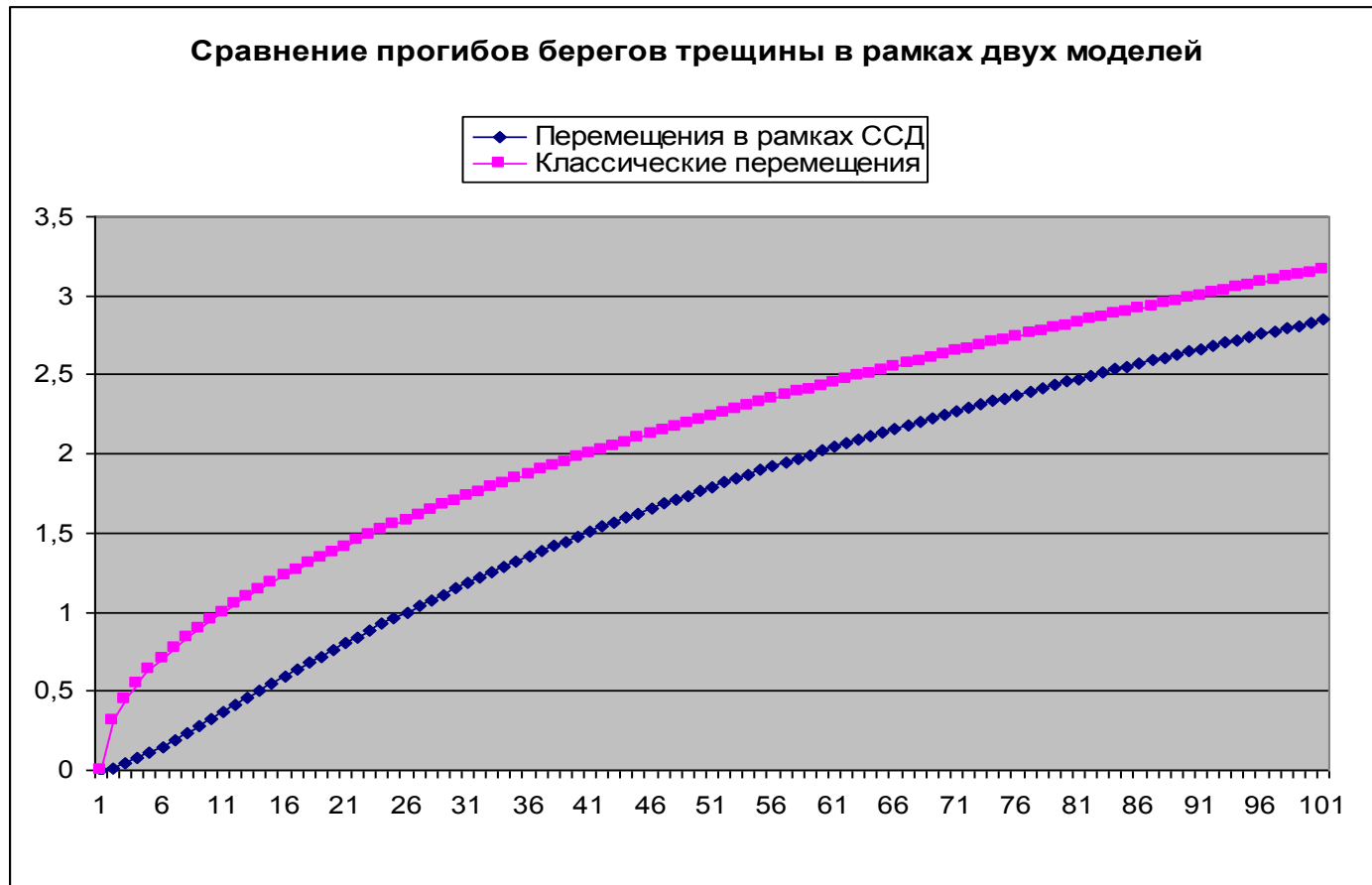
Effect of Nanotube Functionalization on the Elastic Properties of Polyethylene Nanotube Composites



Зависимость эффективного модуля Юнга композиционного материала от длины волокна с применением эквивалентного модуля включения $E_d^* = 1012,4 \text{ ГПа}$

Несингулярная трещина Баренблатта.

Barenblatt GI (1961/1962) Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. J Appl Mech Tech Phys (4):3-56 (1961) (in Russian); Adv Appl Mech VII:55-129 (1962) (in English)



Закритические области в вершине трещины.

Рис.2 Траектория критических напряжений при $q=3,0$

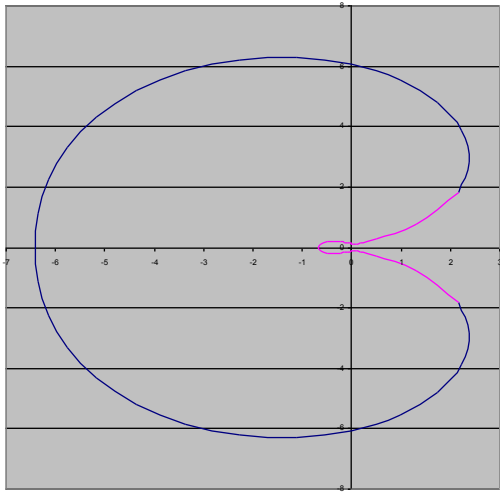


Рис.5 Траектория критических напряжений при $q=2,7$

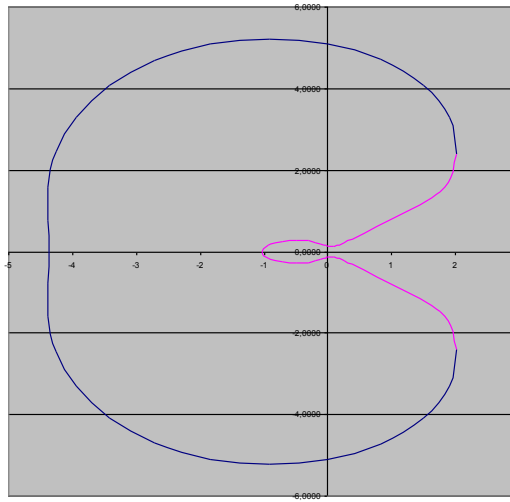


Рис.7 Траектория критических напряжений при $q=2,5$

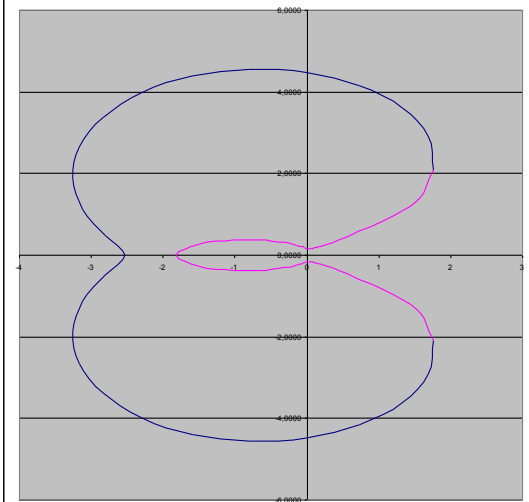


Рис.8 Траектории критических напряжений при $q=2,4$

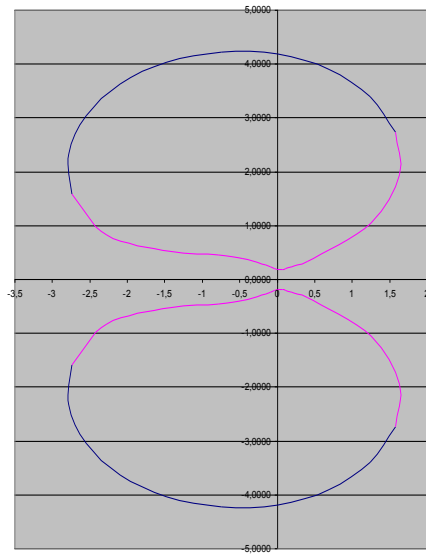


Рис.9 Траектории критических напряжений при $q=2,3$

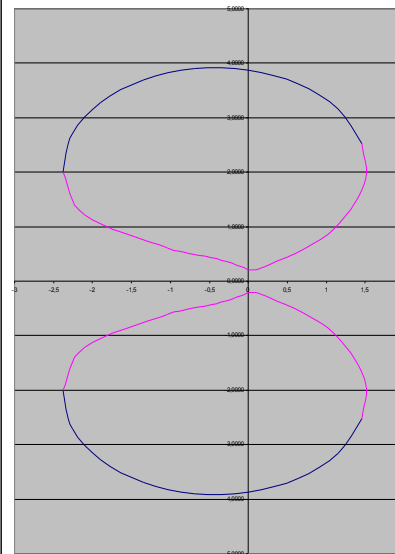
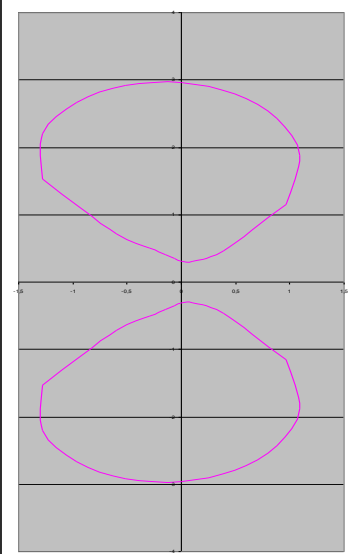
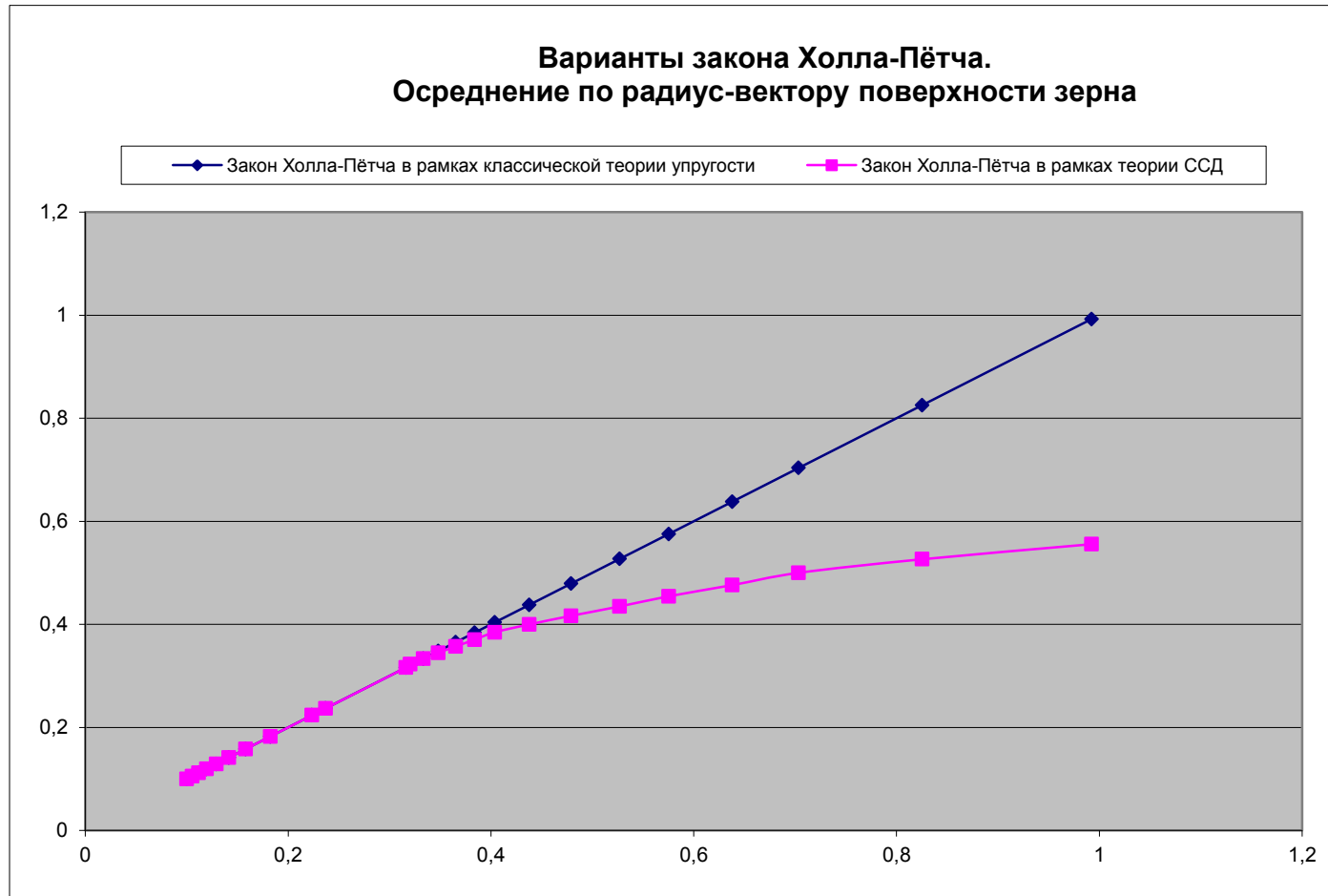


Рис.12 Траектории критических напряжений при $q=2,0$



Закон Пётча-Холла и его систематическое отклонение в экспериментах.



Эффект аномальной дисперсии акустических волн в кристаллах.

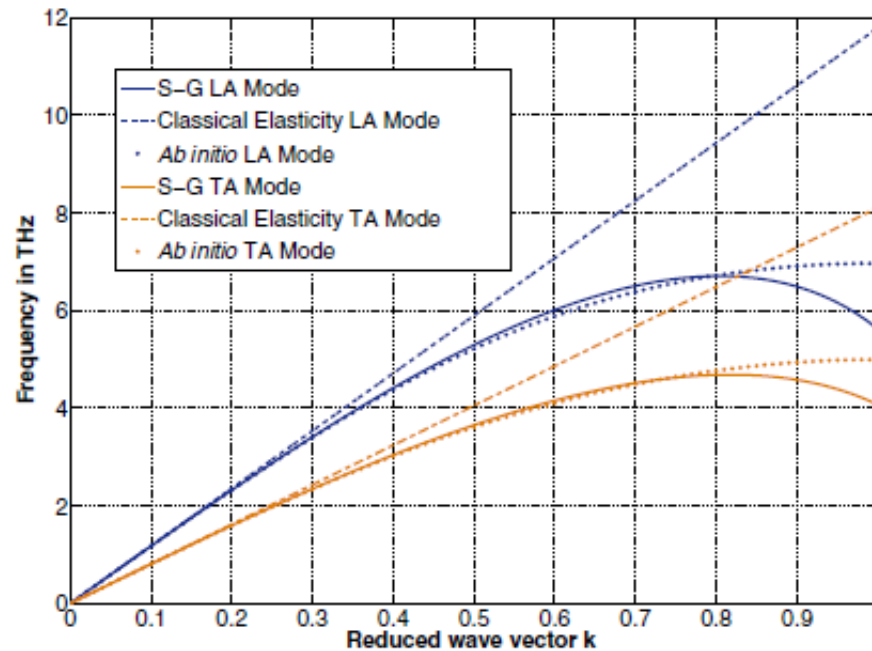
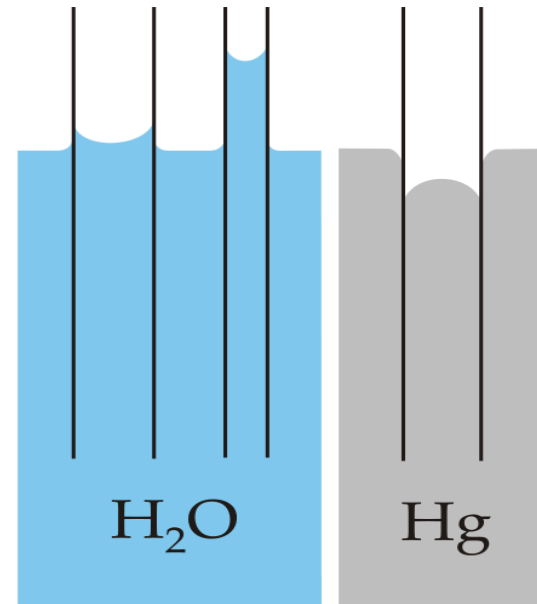
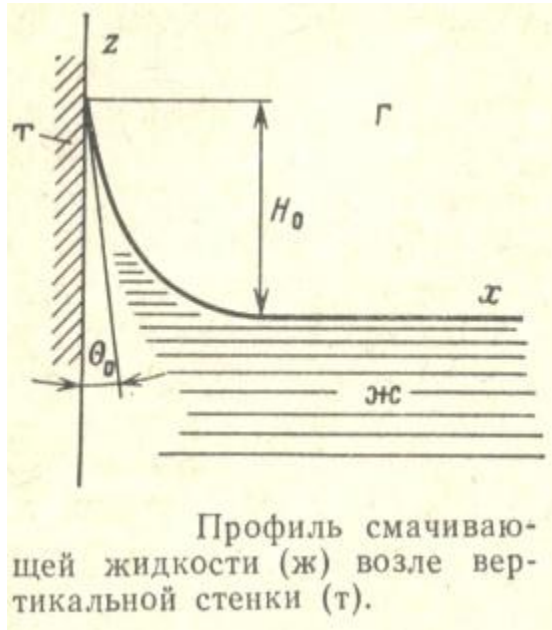
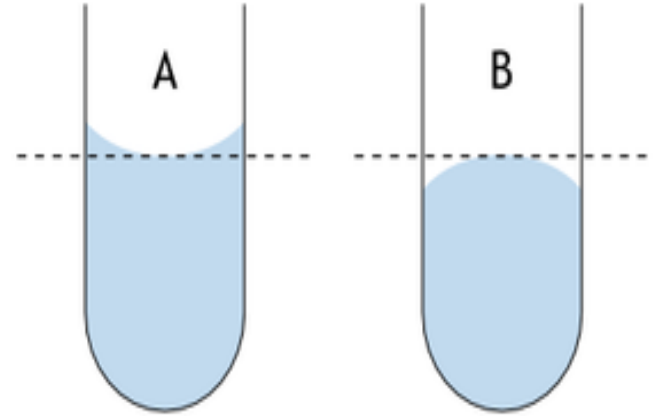
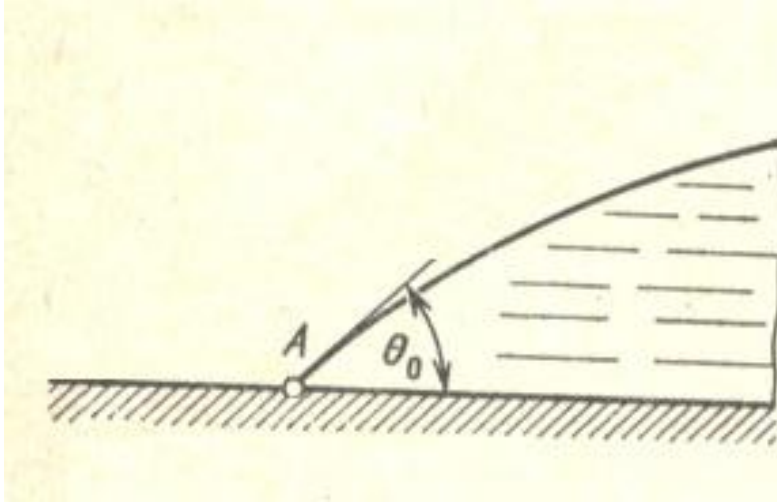


FIG. 1 (color online). Shows the comparison of phonon dispersion curves of copper (Cu) predicted by strain-gradient elasticity (S-G modes) and classical elasticity to those obtained by ab initio calculations for the transverse acoustic (TA) and longitudinal acoustic (LA) modes along $\mathbf{k} = [100]$.

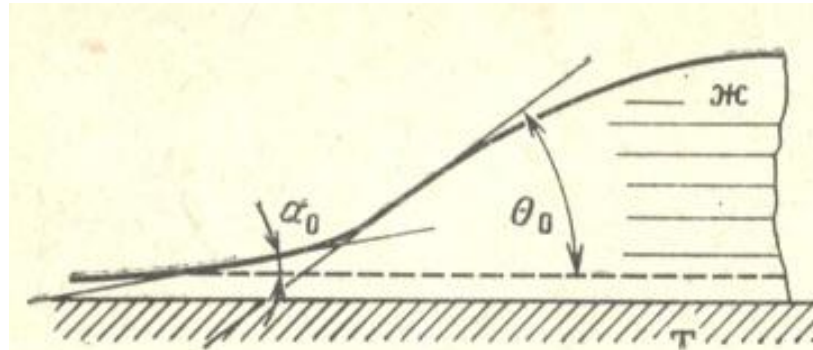
Эффект капиллярности и смачиваемости/несмачиваемости стенок сосуда.



Эффект мениска жидкости у края сосуда.



Эффект двойного мениска жидкости у края сосуда.

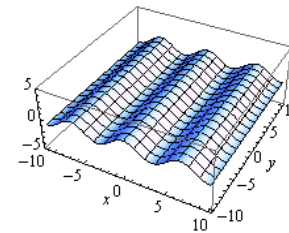
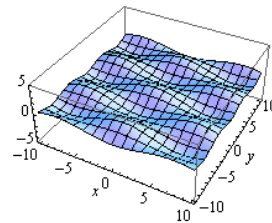
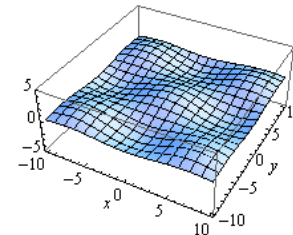
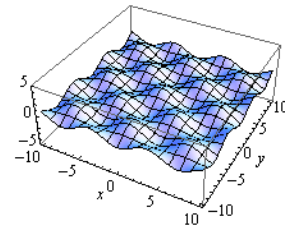


Макроскопический θ_0 и микроскопический α_0 краевые углы при контакте капли смачивающей жидкости (ж) с твердым телом (т).

Эффект капиллярной ряби на поверхности жидкости и аналогичные эффекты на поверхности тел.

Панин, А.В. Мезомеханика поведения тонких плёнок Си на подложке при одноосном растяжении и термическом отжиге. Многоуровневый подход. / Панин А.В., Шугуров А.Р., Оскомов К.В., Сидоренко А.И. // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8. – В.4. – С.27-35.

Панин, В.Е. Эффект «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном твёрдом теле / Панин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д., Елсукова Т.Ф., Кузина О.Ю., Максимов П.В. // Доклады академии наук. – 2006. – Т.409. – В.5. – С.606-610.



Лагранжиан и уравнения теории дефектной среды.

$$L = A - \frac{1}{2} \iiint [C_{ijmn}^{ab} D_{ij}^a D_{mn}^b + C_{ijk mnl}^{ab} D_{ijk}^a D_{mnl}^b] dV -$$
$$- \frac{1}{2} \oint [A_{ijmn}^{ab} D_{ij}^a D_{mn}^b + 2A_{ijmnl}^{ab} D_{ij}^a D_{mnl}^b + A_{ijk mnl}^{ab} D_{ijk}^a D_{mnl}^b] dF$$

$$a, b = 1 \div 2$$

$$i, j, k, n, m, l = 1 \div 3$$

Структура теории с точки зрения учета полей дефектов

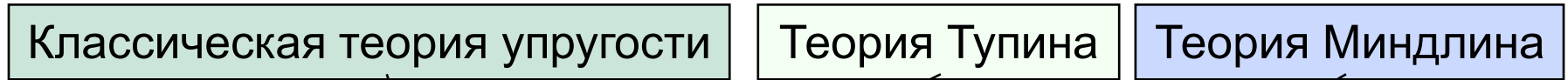
$$\begin{aligned}
 L = A - \frac{1}{2} \iiint & [C_{ijmn}^{11} D_{i,j}^1 D_{mn}^1 + C_{ijknml}^{11} D_{i,jk}^1 D_{m,nl}^1 + \\
 & + 2C_{ijmn}^{12} D_{i,j}^1 D_{mn}^2 + 2C_{ijknml}^{12} D_{i,jk}^1 D_{mn,l}^2] + \\
 & + C_{ijmn}^{22} D_{ij}^2 D_{mn}^2 + C_{ijknml}^{22} D_{ij,k}^2 D_{mn,l}^2] dV - \\
 - \frac{1}{2} \oint & [A_{ijmn}^{11} D_{i,j}^1 D_{mn}^1 + 2A_{ijknml}^{11} D_{i,j}^1 D_{m,nl}^1 + A_{ijknml}^{11} D_{i,jk}^1 D_{m,nl}^1 + \\
 & + 2A_{ijmn}^{12} D_{i,j}^1 D_{mn}^2 + 2A_{ijknml}^{12} D_{i,j}^1 D_{mn,l}^2 + 2A_{ijknml}^{21} D_{ij}^2 D_{m,nl}^1 + 2A_{ijknml}^{12} D_{i,jk}^1 D_{mn,l}^2] + \\
 & + A_{ijmn}^{22} D_{ij}^2 D_{mn}^2 + 2A_{ijknml}^{22} D_{ij}^2 D_{mn,l}^2 + A_{ijknml}^{22} D_{ij,k}^2 D_{mn,l}^2] dF
 \end{aligned}$$

Бездефектная среда

Поля сохраняющихся дислокаций

Взаимодействие бездефектной среды с полями дислокаций

Структура теории с точки зрения известных моделей



$$\begin{aligned}
 L = A - \frac{1}{2} \iiint & \left[C_{ijmn}^{11} D_{i,j}^1 D_{mn}^1 + C_{ijknml}^{11} D_{i,jk}^1 D_{m,nl}^1 + \right. \\
 & + 2C_{ijmn}^{12} D_{i,j}^1 D_{mn}^2 + 2C_{ijknml}^{12} D_{i,jk}^1 D_{mn,l}^2 + \\
 & \left. + C_{ijmn}^{22} D_{ij}^2 D_{mn}^2 + C_{ijknml}^{22} D_{ij,k}^2 D_{mn,l}^2 \right] dV - \\
 - \frac{1}{2} \iint & \left[A_{ijmn}^{11} D_{i,j}^1 D_{mn}^1 + 2A_{ijknml}^{11} D_{i,j}^1 D_{m,nl}^1 + A_{ijknml}^{11} D_{i,jk}^1 D_{m,nl}^1 + \right. \\
 & + 2A_{ijmn}^{12} D_{i,j}^1 D_{mn}^2 + 2A_{ijknml}^{12} D_{i,j}^1 D_{mn,l}^2 + 2A_{ijknml}^{21} D_{ij}^2 D_{m,nl}^1 + 2A_{ijknml}^{12} D_{i,jk}^1 D_{mn,l}^2 + \\
 & \left. + A_{ijmn}^{22} D_{ij}^2 D_{mn}^2 + 2A_{ijknml}^{22} D_{ij}^2 D_{mn,l}^2 + A_{ijknml}^{22} D_{ij,k}^2 D_{mn,l}^2 \right] dF
 \end{aligned}$$

Структура теории с точки зрения учета масштабных эффектов

$$L = A - \frac{1}{2} \iiint \boxed{C_{ijmn}^{ab} D_{ij}^a D_{mn}^b} dV -$$

Классические приближения

$$- \frac{1}{2} l \iint \boxed{\bar{A}_{ijmn}^{ab} D_{ij}^a D_{mn}^b} dF -$$

Адгезионные приближения

$$- \frac{1}{2} l^2 \left[\iiint \boxed{\bar{C}_{ijk mnl}^{ab} D_{ijk}^a D_{mnl}^b} dV + \iint \boxed{2\bar{A}_{ijmnl}^{ab} D_{ij}^a D_{mnl}^b} dF \right] -$$

$$- \frac{1}{2} l^3 \iint \boxed{\bar{A}_{ijk mnl}^{ab} D_{ijk}^a D_{mnl}^b} dF$$

Градиентные приближения

Адгезионно-градиентные приближения

**Сведение уравнений теории дефектной среды к
контактной задаче двух «вложенных» друг в друга сред с
общей поверхностью.**

$$\delta L = 0$$

$$L = L_U - L_u$$

$$L_U = A_U - \frac{1}{2} \iiint E_{ijnm} \frac{\partial U_n}{\partial x_m} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} dV$$

$$L_u = A_u - \frac{1}{2} \iiint (E_{ijnm} \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C^V u_i u_i) dV - \frac{1}{2} \iint C^F u_i u_i dF$$

РУКОВОДСТВО:

- Генеральный директор

**ОАО «Научно - производственный концерн
«Композиционные материалы и технологии»**

ШУБСКИЙ Кирилл Юльевич

**- Зам. Генерального директора ОАО «Научно -
производственный концерн «Композиционные материалы и
технологии»,**

**Генеральный директор Инженерного производственно-
технологического центра ОАО «ММЭЗ – композиционные
технологии»**

ЛИТВИНОВ Валерий Борисович

**«ММЭЗ-КТ» тел./факс: +7(495)673-71-07, 673-72-07
mail@emtc.ru**