

Библиографический список

1. *Аэро Э.Л., Кувшинский Е.В.* Основные уравнения теории упругости сред с вращательным взаимодействием частиц // Физика твердого тела. 1960. Т.2. N 7. С. 399-1409.
2. *Mindlin R. D. and Tiersten H. F.* Effects of couple-stress in linear elasticity // Arch. Rat. Mech.Anal., 11:415-448, 1962.
3. *Mindlin R.D.* Micro-structure in linear elasticity // Arch. Rat. Mech. Anal. 1964. 16, 51-58.
4. *Toupin R.A.* Theories of elasticity with couple-stress // Arch. Ration. Mech. Analysis. 1964. 17(2), 85-112.
5. *Koiter W.T.* Couple-stresses in the theory of elasticity I & II. Proc. Roy. Netherlands Acad. Sci. (B), 67:17-29 (I), 30-44 (II). 1964.
6. *Пальмов В.А.* Основные уравнения теории несимметричной упругости // ПММ. 1964. Т. 28. Вып. 3. С. 401-408.
7. *Mindlin. R.D.* Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity // Int. J. Solid Struct., 1:417-438, 1965.
8. *Aifantis E.C.* On the role of gradient in the localization of deformation and fracture // Int. J. Engng. Sci. 30,1279-1299. 1992.
9. *Maugin G.A.* Material Inhomogeneities in Elasticity. Chapman & Hall/CRC, 1993.
10. *Maugin G.A.* Material forces: concepts and applications. Appl. Mech. Rev. 48, 213-245. 1995.

11. *Aifantis E.C.* Gradient effects at the macro, micro and nano scales // *J. Mech. Behav. Mater.* 5, 335-353. 1994.
12. *Aifantis E.C.* 1999a. Strain gradient interpretation on size effects // *Int. J. Fract.* 95, 299-314.
13. *Aifantis E.C.* 1999b. Gradient deformation models of nano, micro and macro scales // *J. Eng. Mat. Techno.* 121, 189-202.
14. *Eringen A.C.* *Microcontinuum Field Theories, I: Foundations and Solids.* Springer Verlag, New York, 1999.
15. *Aifantis E.C.* Update on a class of gradient theories // *Mech. Mat.* 35, 2569-280. 2003.
16. *Aifantis K.E., Willis J.R.* The role of interfaces in enhancing the yield strength of composites and polycrystals // *J. Mech. Phys. Solids.* 53, 1047-1070. 2005.
17. *Aifantis K.E., Askes H.* Gradient elasticity with interfaces as surfaces of discontinuity for the strain gradient // *J. Mech. Behav. Mater.* 18, 283-306. 2007.
18. *Aifantis E.C.* Exploring the applicability of gradient elasticity to certain micro/nano reliability problems, *Microsystems Technol.* 15, 109-115. 2009.
19. *Gutkin M.Yu.* Nanoscopics of dislocations and disclinations in gradient elasticity. *Reviews on Advanced Materials Science*, 1(1), 27-60. 2000.
20. *Кулеш М.А., Матвеев В.П., Шардаков И.Н.* Построение аналитических решений некоторых двумерных задач моментной теории упругости // *Изв. РАН. МТТ.* 2002. N4. С. 100-113.
21. *Gilabert F. A., Krivtsov A. M., Castellanos A.* Molecular dynamics model for single adhesive contact. *Kluwer Academic Publishers, Meccanica*, (2006) 41: 341-349 (312 Kb).
22. *Ivanova E.A., Krivtsov A.M., Zhilin P.A.* Description of rotational molecular spectra by means of an approach based on rational mechanics. *ZAMM // Z. Angew. Math. Mech.* , 87, No 2. P. 139-149 (2007). (132Kb).

23. *Корепанов В.В., Матвеев В.П., Шардаков И.Н.* Численное исследование двумерных задач несимметричной теории упругости // Изв. РАН. МТТ. 2008. №2. С. 63-70.
24. *Индейцев Д.А., Кривцов А.М., Ткачев П.В.* Исследование методом динамики частиц взаимосвязи между откольной прочностью и скоростью деформирования твердых тел // ДАН. 2006. Т. 407. N 3. С. 1-3.
25. *Индейцев Д.А., Иванова Е.А., Морозов Н.Ф.* К вопросу об определении параметров жесткости нанообъектов // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 10. С.74-80.
26. *Гольдштейн Р.В., Ченцов А.В.* Дискретно-континуальная модель нанотрубки // Изв. РАН. МТТ. 2005. № 4. С. 57-74.
27. *Гольдштейн Р.В., Морозов Н.Ф.* Механика деформирования и разрушения наноматериалов и нанотехнологии // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 5. С. 17-30.
28. *Гуткин М.Ю., Овидько И.А.* Физическая механика деформируемых наноструктур. Т. II. Нанослойные структуры. — СПб.: Янус, 2005.
29. *Корепанов В.В., Матвеев В.П., Шардаков И.Н.* Численное исследование двумерных задач несимметричной теории упругости // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 2. С. 63-70.
30. *Норман Г.Э., Стегайлов В.В.* // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2010. V. 3. N. 2.
31. *Седов Л.И.* Математические методы построения новых моделей сплошных сред // Успехи математических наук. 1965. Т. XX. Вып.5 (125). С. 121-180.
32. *Лурье С.А., Белов П.А., Орлов А.П.* Модели сплошных сред с обобщенной кинематикой. Свойства и некоторые обобщения // Механика композиционных материалов и конструкций. 1996. Т.2. № 2. С.84-104.

33. *Образцов И.Ф., Лурье С.А., Белов П.А.* Об обобщенных разложениях в прикладной теории упругости и их приложения к конструкциям из композитов // *Механика композиционных материалов и конструкций.* 1997. Т.3. № 3. С. 62-79.
34. *Лурье С.А., Белов П.А.* Математические модели механики сплошной среды и физических полей. — М.: Изд-во ВЦ РАН, 2000.
35. *Белов П.А., Лурье С.А.* Модели деформирования твердых тел и их аналоги в теории поля // *МТТ. Изв. РАН.* 1998. № 3. С. 157-166.
36. *Образцов И.Ф., Лурье, С.А., Яновский Ю.Г., Белов П.А.* О некоторых классах моделей тонких структур // *Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки (к 80-летию академика И.И. Воровича).* — Ростов-на-Дону. 2000. № 3. С.110-118.
37. *Lurie S., Belov P., Volkov-Bogorodsky D.* Multiscale Modeling in the Mechanics of Materials: Cohesion, Interfacial Interactions, Inclusions and Defects // *In book Analysis and Simulation of Multifield Problems,* Springer. 2003. V.12. P. 101-110.
38. *Lurie S., Belov P., Volkov-Bogorodsky D., Tuchkova N.* Nanomechanical Modeling of the Nanostructures and Dispersed Composites // *Int. J. Comp. Mater. Scs.* 2003. 28(3-4). P.529-539.
39. *Cosserat E., Cosserat F.* Theore des corps deformables. — Paris. Hermann, 1909.
40. *Mindlin R.D., Tiersten H.F.* Effects of the couple-stress in linear elasticity // *Arch. Ration. Mech. And Analysis.* 1962. V. 11. P. 415-448.
41. *Mindlin R.D.* Micro-structure in linear elasticity // *Arch. Ration. Mech. And Analysis.* 1964. V. 1. P. 51-78.
42. *Toupin R.A.* Theories of elasticity with couple-stress // *Arch. Ration. Mech. And Analysis.* 1964. V. 2. P. 85-112.
43. *Аэро Э.Л., Кувшинский Е.В.* Основные уравнения теории упругости сред с вращательным взаимодействием частиц // *Физика твердого тела.* 1960. Т. 2. С. 1399-1409.

44. Белов П.А., Лурье С.А. К общей геометрической теории дефектных сред // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 6. С. 49-61.
45. Бодунов А.М., Белов П.А., Лурье С.А., Образцов И.Ф., Яновский Ю.Г. О моделировании масштабных эффектов в тонких структурах // Механика композитных материалов и конструкций. 2002. Т. 8. №4. С.585-598.
46. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963.
47. Белов П.А., Лурье С.А. Континуальная модель микрогетерогенных сред // ПММ. 2009. 73 (5). С. 833-848.
48. Лурье С.А., Белов П.А. Теория сред с сохраняющимися дислокациями. Частные случаи: среды Коссера и Аэро-Кувшинского, пористые среды, среды с «двойникованием» // Современные проблемы механики гетерогенных сред. Ин-т прикладной механики РАН. 2006. Вып. 1. С 235-267.
49. Лурье С.А., Белов П.А. Вариационная формулировка математических моделей сред с микроструктурами // Математическое моделирование систем и процессов. 2006. №14. С. 114-132.
50. Lurie S., Belov P., Tuchkova N. The Application of the multiscale models for description of the dispersed composites// Int. J. Comp. Mater. Scs. A. 2005. V. 36(2). P.145-152.
51. Lurie S., Belov P., Volkov-Bogorodsky D., Tuchkova N. Interphase layer theory and application in the mechanics of composite materials. Journal of Materials Science. Springer, October 2006, 41:20, p. 6693-6707. ISSN 0022-2461.
52. Белов П., Лурье С. Теория идеальных адгезионных взаимодействий // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. 13 (4). С. 545-561.

53. *Lurie S., Belov P.* Cohesion field: Barenblatts hypothesis as formal corollary of theory of continuous media with conserved dislocations // International Journal of Fracture. V. 150. Numbers 1-2. 181-194.

54. *Лурье С.А., Белов П.А., Соляев Ю.О.* Адгезионные взаимодействия в механике сплошных сред // Математическое моделирование систем и процессов: Сб. научных трудов. — Пермь, 2008. № 16. С. 75-85.

55. *Лурье С.А., Тучкова Н.П.* Континуальная модель адгезии для деформируемых твердых тел и сред с наноструктурами // Композиты и наноструктуры. 2009. 2(25). С. 25-43.

56. *Lurie S., Belov P., Tuchkova N.* Chapter 23: Gradient Theory of Media with Conserved Dislocations: Application to Microstructured Materials. Mechanics of Generalized Continua. One Hundred Years After the Cosserats. Series: Advances in Mechanics and Mathematics. Vol. 21. P. 223-232 Springer, XIX, 2010.

57. *Lurie S.A., Volkov-Bogorodsky D.B., Zubov V.I., Tuchkova N.P.* (2009). Advanced theoretical and numerical multiscale modeling of cohesion/adhesion interactions in continuum mechanics and its applications for filled nanocomposites. Int. J. Comp. Mater. Scs. 45(3), 390 709-714. 2009.

58. *Белов П.А., Лурье С.А.* Континуальная теория адгезионных взаимодействий поврежденных сред // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. 15 (4). С. 311-330.

59. *Chaim R., Hefetz M.* Effect of grain size on elastic modulus and hardness of nanocrystalline ZrO_{2-3} wt% Y_2O_3 ceramic // Journal of materials science. 2004. 39. P. 3057—3061.

60. *Mei Q.S.* et al. Grain size dependence of the elastic modulus in nanostructured NiTi. Scripta Materialia. 2010. 63(10). 977-980.

61. *Odegard G.M., Gates T.S., Nicholson L.M., Wise K.E.* Equivalent-continuum modeling of nano-structured materials// Composites Science and Technology. 2002. V.62. P. 1869-1880.

62. Odegard G.M., Gates T.S., Wise K.E. Park C., Siochi E.J. Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites // Composites Science and Technology. 2003. V.63. P. 1671-1687.
63. Odegard G.M., Gates T.S., Wise K.E., Park C., Siochi E.J. Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites. National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center. Hampton. 2002. VA 23681-2199.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. ВВЕДЕНИЕ	5
1.1. Общие сведения о масштабных эффектах	5
1.2. Историческая справка	6
1.3. Масштабные эффекты в механике наноструктурированных материалов (нанокомпозиты, керамики и тонкопленочные структуры)	9
1.4. Континуальные модели в механике структурированных материалов и микро- и наноструктур	12
1.5. Дисперсные композиты. Модификация связующих микро- и нановключениями	13
1.6. Некоторые сведения об углеродных нанотрубках ..	14
1.7. Механические свойства углеродных нанотрубок	20
1.8. Способы оценки свойств нанотрубок	25
1.9. О модификации поверхности нановключений (функционализация поверхности)	28

2. ВАРИАЦИОННАЯ ФОРМУЛИРОВКА ГРАДИЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ СРЕД	32
2.1. Общие сведения о моделях сред	32
2.2. Кинематические модели сред [44]	33
2.3. Вариационный метод построения моделей сред	40
2.4. Модель классической теории упругости	41
2.5. Модель простейшей несимметричной теории упругости	44
2.6. Модель среды с сохраняющимися дислокациями — среды Папковича—Коссера [48]	48
2.7. Модель среды с сохраняющимися дислокациями [48]	50
2.8. Некоторые частные модели сред с сохраняющимися дислокациями	56
2.8.1. Классическая среда Коссера [48]	56
2.8.2. Модель среды с доминированием θ -дислокаций [48]	58
2.8.3. Модель сред Аэро—Кувшинского [48]	60
2.8.4. Прикладная модель межфазного слоя	61
2.8.5. Прикладная модель межфазного слоя с двумя характерными длинами масштабных эффектов	65
3. ТЕОРИЯ ПОРИСТЫХ СРЕД	70
3.1. Пористая среда как частный случай среды с сохраняющимися дислокациями	70
3.2. Математическая модель	70
3.3. Идентификация модулей в теории пористых сред	71
3.3.1. Идентификация идеальных «неповрежденных» свойств среды — коэффициентов Ламе	71

3.3.2. Идентификация дислокационного модуля через эффективный модуль поврежденной порами среды	73
3.3.3. Идентификация «перекрестного» модуля	76
3.4. Построение общего решения	79
3.5. Поверхностное натяжение как адгезионный эффект	83
4. ГРАДИЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НЕСВЯЗНОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ	87
4.1. Общие сведения о модели Тупина	87
4.2. Основные соотношения	88
4.3. О градиентных эффектах в тонких покрытиях	92
5. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ	105
5.1. Прикладная теория стержней	105
5.2. Прикладная модель капиллярности	108
5.3. Одномерная задача растяжения (задача о капле)	111
5.4. О прикладных моделях деформирования пористых структур	116
5.4.1. Вариант теории пористых стержней	116
5.4.2. Модели пористых пластин	121
5.5. Пример моделирования свойств керамического зернистого материала	134
5.6. Модель деформирования эпоксидной матрицы, армированной короткими углеродными нанотрубками	137
Библиографический список	147

Научное издание

**Лурье Сергей Альбертович
Белов Петр Анатольевич
Рабинский Лев Наумович
Жаворонок Сергей Игоревич**

**МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МЕХАНИКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД.
МАТЕРИАЛЫ С МИКРО- И НАНОСТРУКТУРОЙ**

Редактор *М.С. Винниченко*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Издательство МАИ
Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Тел. (495) 485-1000, факс (495) 485-1001
e-mail: maipress@mail.ru

МАИ ПРЕДЛАГАЕТ ВАШЕ БУДУЩЕЕ

Издательство МАИ
Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Сдано в набор 29.07.11. Подписано в печать 1.02.12.
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 10,00. Тираж 500 экз.
Зак. 093/001.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

