

## Исследование неоднородности напряжений в конечно-элементной модели поликристалла при неравномерном одноосном растяжении

*Е.Е. Евдокимов, Л.М. Арзамаскова, В.И. Клименко, О.В. Коновалов*

*Волгоградский государственный технический университет*

**Аннотация:** В статье рассматриваются результаты изучения неоднородности нормальных напряжений в макрообъемах поликристаллов, возникающей вследствие взаимодействия различно ориентированных кристаллических зерен, в условиях неравномерного простого растяжения. Построены эпюры нормальных напряжений для конечно-элементной модели элементарной ячейки поликристалла различных металлов. Установлено возможное значительное превышение значений напряжений в сравнении со значениями, вычисленными для изотропного решения. Показана зависимость уровня неоднородности напряжений от степени анизотропии упругих свойств металлов.

**Ключевые слова:** микрообъем, макрообъем, неравномерное растяжение, уровень неоднородности напряжений.

Практически все материалы, применяемые при изготовлении строительных конструкций и их элементов, являются структурно-неоднородными, а наиболее типичные из них – поликристаллические металлы. Результаты исследований, полученные авторами и представленные в работах [1 – 3], показывают возможный значительный рост концентрации напряжений и деформаций в конструктивных элементах, изготовленных из поликристаллических металлов с кубической и гексагональной кристаллическими решетками. Это подтверждает необходимость учета микроструктурных факторов концентрации напряжений и деформаций при выполнении инженерных расчетов строительных конструкций и их элементов [4 – 7].

Для изучения уровня неоднородности напряжений в микрообъемах поликристаллов, которая обосновывается сложным процессом взаимодействия различно ориентированных в пространстве кристаллических зерен, был выполнен расчет элементарного объема поликристалла в условиях одноосного неравномерного растяжения (рис. 1) с применением

разработанного авторами метода расчета структурно-неоднородного тела (поликристалла) [8 – 10].

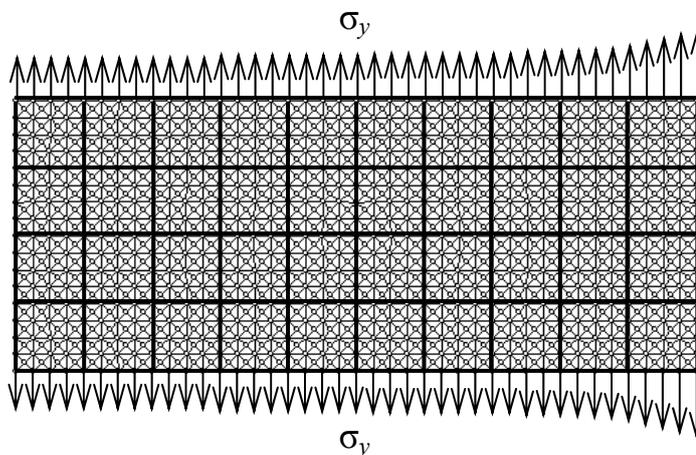


Рис. 1. Конечно-элементная модель элементарного объема поликристалла в условиях одноосного неравномерного растяжения.

Конечно-элементная модель поликристалла (рис. 1) имеет размеры 10x4 мм и состоит из 40-ка зерен – этого количества, как было установлено ранее [11], вполне достаточно для формирования минимального объема тела, который можно наделить осредненными свойствами макрообъема. Каждое из 40-ка зерен содержит 64 плоских треугольных конечных элемента, а функция растягивающих напряжений  $\sigma_y$  формируется по градиенту произвольным образом со значениями в интервале от 67 до 98 МПа. Вычисления выполнялись для различных металлов с кубической и гексагональной кристаллическими решетками.

На рис. 2 представлены эпюры нормальных напряжений, построенные для двух металлов, которые имеют разную степень анизотропии упругих свойств – алюминий и железо. Можно отметить значительное различие уровней неоднородности напряжений для этих металлов. Для слабо анизотропного алюминия разброс значений  $\sigma_y$  незначителен, в интервале от

64 до 97 МПа, наибольшее расхождение с изотропным решением составило 6 МПа, или 5,4%, и в целом, значения напряжений приближены к значениям, вычисленным для мелкозернистого квазиизотропного материала (рис. 2, *а*). Для сильно анизотропного железа этот разброс больше – в интервале от 52 до 112 МПа. Наибольшее расхождение составило 20 МПа, или 30% (рис. 2, *б*). Для остальных металлов были построены аналогичные эпюры нормальных напряжений.

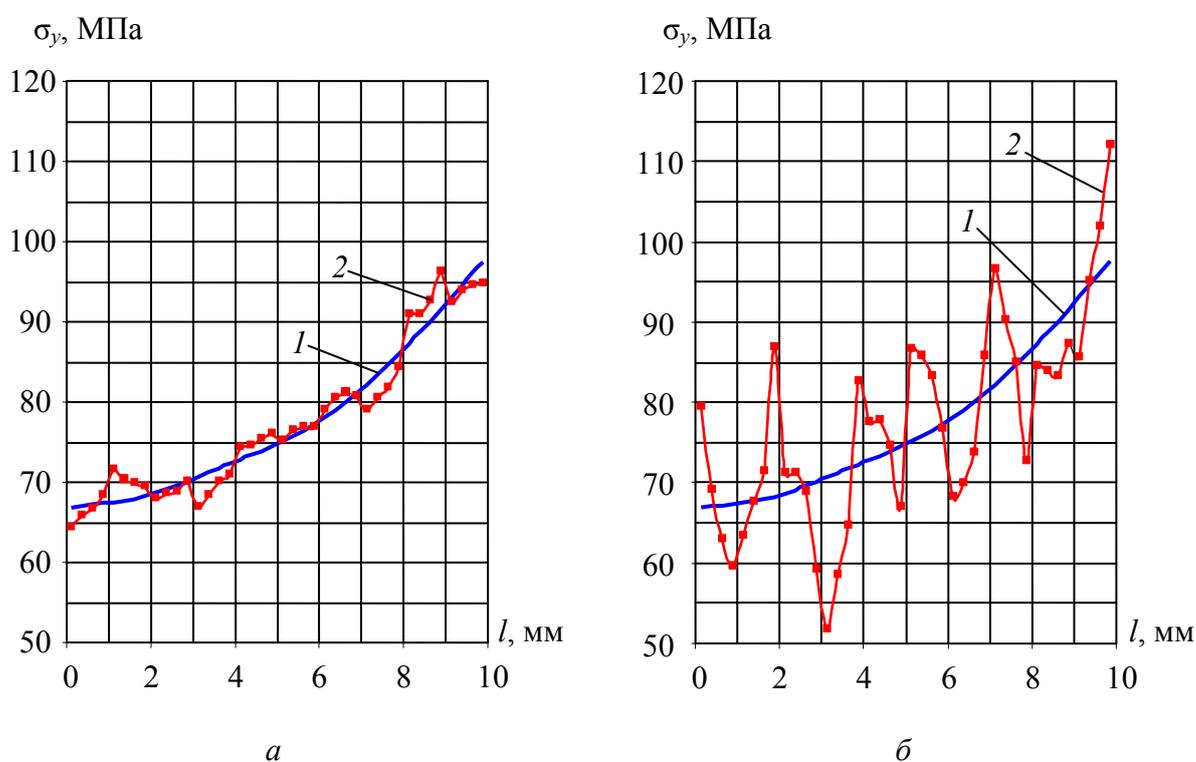


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений в элементарном объеме поликристалла алюминия (*а*) и железа (*б*): 1 – квазиизотропный мелкозернистый металл; 2 – поликристаллический металл.

Эти результаты позволяют сделать вывод о весьма существенном влиянии неоднородности напряжений в микрообъемах, обусловленной взаимодействием различно ориентированных кристаллических зерен, на распределение напряжений в макрообъемах, причем это влияние зависит от степени анизотропии упругих свойств металлов. Авторы считают, что с

целью развития представленных исследований, в дальнейшем возможно усложнение продемонстрированной модели элементарного объема поликристалла путем введения в модель различных включений и дефектов – пор, пустот, микротрещин, рассмотрения комбинаций разных металлов, сплавов, использование более сложных граничных условий, а так же изучение напряжений и деформаций на межзеренных границах.

### Литература

1. Кукса Л.В. Механика структурно-неоднородных материалов на микро- и макроуровнях. Волгоград: ВолгГАСА, 2002. 159 с.
  2. Кукса Л.В. О минимальных размерах элементарной ячейки поликристалла, имеющей осредненные свойства макрообъема // Проблемы прочности. 1987. №9. С. 58 – 61.
  3. Евдокимов Е.Е., Арзамаскова Л.М., Клименко В.И. и др. Исследование концентрации напряжений в элементах конструкций из поликристаллических материалов // Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5349](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5349).
  4. Болотин В.В, Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980. 375 с.
  5. Kuksa, L.V. and E.E. Evdokimov, 2002. On the problem of microstresses and microstrains in polycrystals. Russian metallurgy (Metally), 5: pp. 477-483.
  6. Милешников И.В., Воронкова Г.В., Епифанова Е.В. Восстановление несущей способности и эксплуатационной пригодности строительных конструкций отделения шламбассейнов // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4460](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4460).
  7. Игнатъев В.А., Глухов А.В., Глухова С.Г. и др. Анализ эффективности применения классических методов при расчете изгибаемой пластинки с произвольными граничными условиями // Инженерный вестник Дона, 2018, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5144](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5144).
-

8. Кукса Л.В. Общие закономерности и особенности микронеоднородной деформации в поликристаллах при различных видах напряженного состояния и температурах испытания // Проблемы прочности. 1990. №8. С. 58-64.

9. Kuksa, L.V., L.M. Arzamaskova, E.E. Evdokimov and A.V. Sergeev, 2006. Development of methods for designing structural elements made of structurally heterogeneous materials by developing physicomachanical models. Strength of materials, 4(V.38): pp. 404-408.

10. Kuksa, L.V., 1997. Microdeformation in and mechanical properties of polycrystalline alloys as revealed by static, dynamic, and high-temperature tests. The Physics of Metals and Metallography, 1(V. 84): pp. 68-74.

11. Ломакин В.А., Кукса Л.В., Бахтин Ю.А. Масштабный эффект упругих свойств поликристаллических материалов // Прикладная механика. 1982. Т.18. - №9. С. 10-15.

### References

1. Kuksa L.V. Mekhanika strukturno-neodnorodnykh materialov na mikro- i makrourovnyakh. Volgograd: VolgGASA, 2002. 159 p.

2. Kuksa L.V. Problemy prochnosti. 1987. №9. pp. 58-61.

3. Evdokimov E.E., Arzamaskova L.M., Klimenko V.I. i dr. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5349](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5349).

4. Bolotin V.V, Novichkov YU.N. Mekhanika mnogoslojnyh konstrukcij [Mechanics of multilayer structures]. M.: Mashinostroenie, 1980. 375 p.

5. Kuksa, L.V. and E.E. Evdokimov, 2002. Russian metallurgy (Metally), 5: pp. 477-483.

6. Milesnikov I.V., Voronkova G.V., Epifanova E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4460](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4460).



7. Ignatyev V.A., Gluhov A.V., Gluhova S.G. i dr. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5144](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5144).
8. Kuksa L.V. Problemy prochnosti. 1990. №8. pp. 58-64.
9. Kuksa, L.V., L.M. Arzamaskova, E.E. Evdokimov and A.V. Sergeev, 2006. Strength of materials, 4(V.38): pp. 404-408.
10. Kuksa, L.V., 1997. The Physics of Metals and Metallography, 1(V. 84): pp. 68-74.
11. Lomakin V.A., Kuksa L.V., Bahtin Y.A. Prikladnaya mekhanika. 1982. T.18. pp. 10-15.