МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ

Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики

Международная молодежная научная конференция

17–19 ноября 2014 г., Томск

Издательство Томского университета
2015

Литература

1. *Filkov A.I., Kuznetsov V.T., Guk V.O. et al.* Ignition of Wood Under Dynamic Conditions of Supply of Radiant Energy Flow // Proceedings of the 4th Fire Behavior and Fuels Conference (Saint-Petersburg, Russia, July 1–4, 2013). USA. IAWF. 2013. P. 57.
2. *Розенбанд Р.Ш., Барзыкин В.В., Мержанов А.Г.* // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, вып. 2. С. 171–175.
3. *Еналеев Р.Ш., Матеосов В.А., Синаев К.Н. и др.* // Физика горения и методы ее исследования. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1973. С. 80–86.
4. *Кузнецов В.Т., Фильков А.И.* // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, вып. 1. С. 74–79.
5. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. 262 с.
6. *Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Бартак М.* // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, вып. 1. С. 10–13.
7. *Еналеев Р.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С. и др.* // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, вып. 10. С. 99–106.

ПОВЕДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТИПА МАТРИЦА – ВКЛЮЧЕНИЕ

О.С. Зиновьева, В.С. Шахиджанов

Обсуждается влияние внутренней структуры на рельеф поверхности деформируемого материала на примере модельной системы «матрица – включение». Установлены зависимости формы и амплитуды поверхностного деформационного рельефа от ориентации и расположения единичного включения относительно свободной поверхности, а также от соотношения упругих свойств включения и матрицы.

SURFACE DEFORMATION BEHAVIOR OF A SINGLE INCLUSION MODEL

O.S. Zinovieva, V.S. Shakhijanov

In this contribution, the influence of internal structure on surface roughening is discussed, using a model of a single inclusion embedded in a matrix as an example. The surface roughness shape and amplitude are established to be dependent on the inclusion orientation and location relative to the free surface and inclusion-to-matrix elastic modulus ratio.

Цель работы – изучить влияние внутренней структуры на формирование поверхностного деформационного рельефа на примере модельной системы «матрица – включение».

Стоит отметить, что задача «матрица – включение» в различных вариациях решалась много раз (см., например, [1]), но при этом смещения и деформацию на свободной поверхности в исследованиях игнорировали. В цикле работ авторов по тематике «Исследование деформационного рельефа» (см., например, [2, 3]), а также во многих других работах (см., например, [4]) численные исследования проводились с помощью достаточно сложных моделей. Для полного понимания процессов и механизмов возникновения рельефных образований, связанных с внутренней неоднородностью, было решено провести исследования на простых модельных системах, позволяющих исключить влияние множества параметров, присутствующих в сложных моделях.

Задача об одноосном растяжении двумерных (2D) и трехмерных (3D) образцов, содержащих единичные включения квадратной / кубической и сферической формы (рис. 1), решалась методами конечных разностей и конечных элементов соответственно. Математическая постановка плоской задачи в деформациях приведена в [5].

Трехмерная задача решалась в квазистатической постановке с использованием программного комплекса ABAQUS. Рассматривалась область упругого нагружения. Ориентация включения по отношению к оси растяжения и расстояние включения от свободной поверхности в расчетах варьировались. Модельный материал матрицы по механическим свойствам соответствовал алюминиевому сплаву. Модуль сдвига матрицы принимался равным $\mu = 27{,}7$ ГПа, модуль сдвига включений варьировался от 7 до 50 ГПа. На границе раздела матрицы и включения приняты условия идеального контакта.

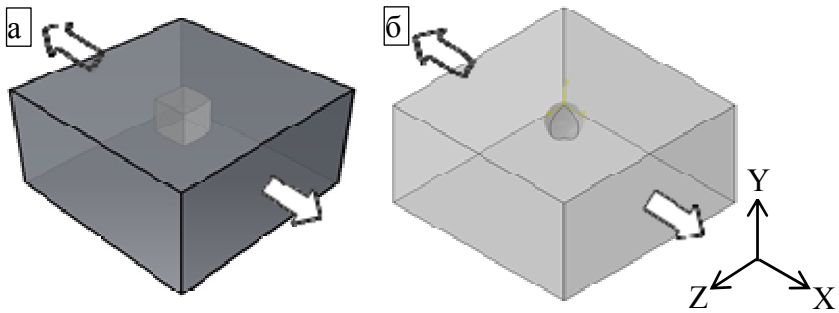

Рис. 1. Модели образцов с кубическим (*а*) и сферическим (*б*) включениями и схема нагружения

Граничные условия имитировали квазистатическое одноосное растяжение вдоль оси *X*, верхняя поверхность считалась свободной от воздействия внешних сил, на нижней поверхности выполнялись условия симметрии. На боковых поверхностях 3D-образца формулировались условия отсутствия внешних сил.

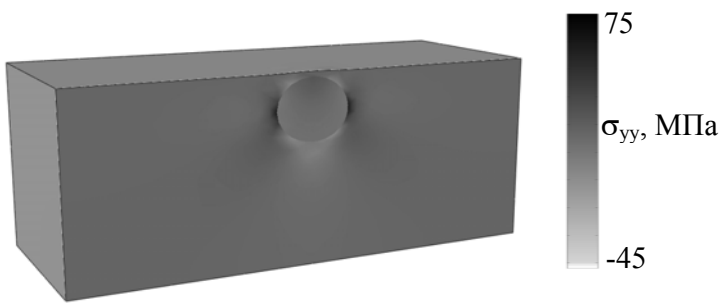

Рис. 2. Распределения компонент тензора напряжений σ_{yy} в среднем сечении образца со сферическим включением ($\mu_в > \mu_м$)

Результаты расчетов приведены на рис. 2–6. Рисунок 2 демонстрирует напряжения σ_{yy}, действующие по нормали к свободной поверхности (нормальные напряжения) в 3D-образце с жестким сферическим включением ($\mu_в > \mu_м$). Концентрация напряжений наблюдается вблизи границы раздела «матрица – включение». В случае более жесткого включения ($\mu_в > \mu_м$) на поверхности образца наблюдается область экструзии, в случае более мягкого ($\mu_в < \mu_м$) – интрузии (см. рис. 3). В однородном образце нормальные напряжения будут равняться нулю, поскольку рассматриваемая верхняя поверхность образца свободна от воздействия внешних сил, соответственно она останется плоской в процессе нагружения. Иная ситуация возникает в материалах с границами раздела, где неоднородность внутренней структуры приводит к

сложному напряженно-деформированному состоянию, которое, в свою очередь, результируется в виде деформационных складок на свободной поверхности образца (см. рис. 3).

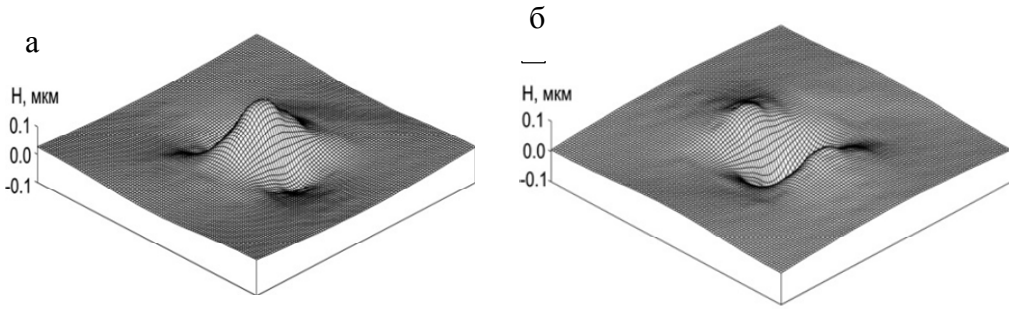

Рис. 3. Рельефные образования на поверхности в условиях одноосного растяжения для $\mu_в > \mu_м$ (*а*) и $\mu_в < \mu_м$ (*б*)

Проанализируем влияние ориентации включения относительно направления нагружения на форму и высоту рельефных образований. На расстоянии от поверхности, равном линейному размеру включения, его ориентация практически не оказывает влияния на рельефные образования. Если включение расположено на свободной поверхности (см. рис. 4, *б*), наблюдаются следующие изменения в форме и амплитуде рельефа: когда соответствующие грани включения параллельны свободной поверхности – рельефная складка более широкая; при повороте включения на 45° – характеризуется острым пиком и наибольшей высотой; при повороте включения на 22° – отклоняется от центра.

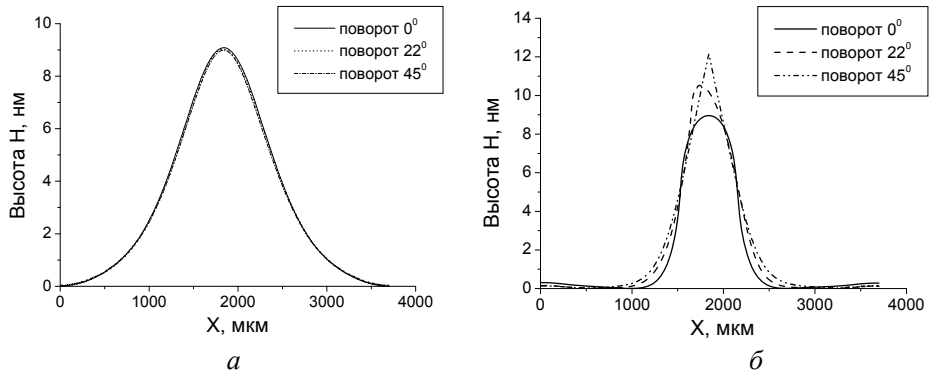

Рис. 4. Профили поверхности для образцов с жесткими включениями, ориентированными под различными углами к оси растяжения. Расстояние от поверхности 610 (*а*), 0 мкм (*б*)

Рисунок 5, *а* иллюстрирует совокупное влияние расположения включения и его ориентации. Для включения, ориентированного под углом 45° к оси растяжения, наблюдается линейная зависимость амплитуды рельефной складки от расположения включения, в то время как для двух других случаев зависимость не линейна. Проанализируем причину нелинейности с точки зрения механики, используя 2D-расчеты в качестве примера (ср. рис. 5, *а* и 6). Максимальная высота рельефных складок наблюдается при расположении включения на расстоянии от свободной поверхности, составляющем около 0,4 линейного размера включения. Это происходит из-за концентрации напряжений σ_{yy} в области А (см. рис. 6). При удалении включения

от свободной поверхности область растягивающих напряжений σ_{yy} уменьшается, и на определенном расстоянии от поверхности в области А наблюдаются только сжимающие напряжения σ_{yy}. Наименьшая область растягивающих напряжений σ_{yy} наблюдается при расположении включения на расстоянии от свободной поверхности, составляющем около 0,4 линейного размера включения. По мере уменьшения концентрации растягивающих напряжений σ_{yy} в области А высота рельефной складки растет.

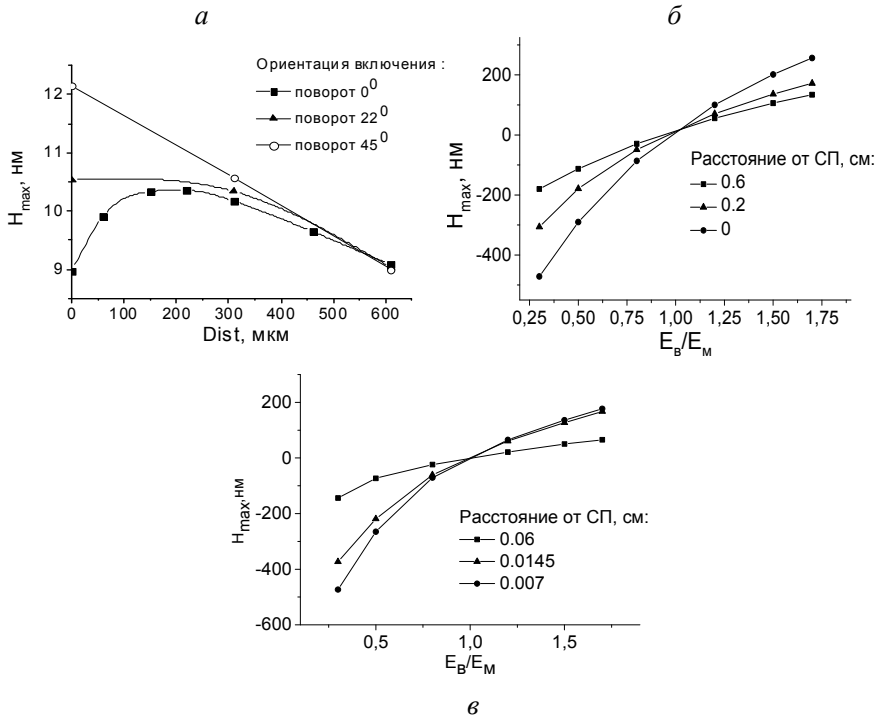

Рис. 5. Зависимость амплитуды рельефной складки от ориентации включения, расстояния от свободной поверхности (СП) и соотношения упругих свойств включения и матрицы: 2D-расчеты, ε=0,01 (*а*) и 3D-расчеты, ε=0,5% (*б, в*)

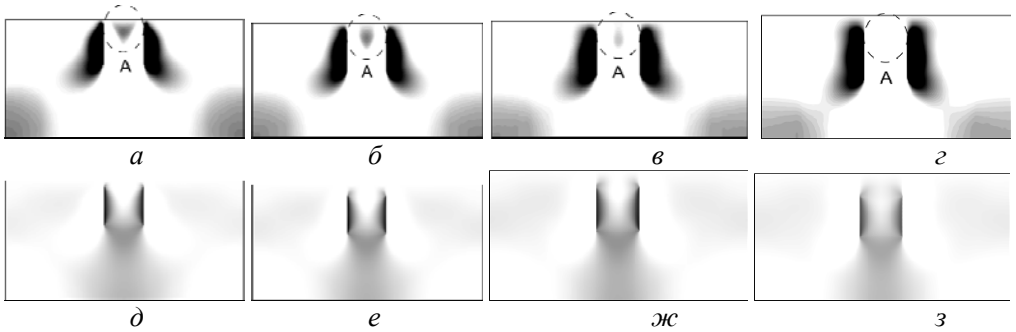

Рис. 6. Растягивающие (*а–г*) и сжимающие напряжения σ_{yy} (*д–з*), $\mu_в > \mu_м$

Совокупное влияние расположения включения и соотношения упругих свойств включения и матрицы на амплитуду рельефной складки для случаев кубического и

сферического включений продемонстрировано на рис. 5, *б, в* соответственно. Очевидно, чем больше различие в упругих свойствах матрицы и включения, тем больше амплитуда складки. Этот эффект становится более ярко выраженным по мере уменьшения расстояния между включением и свободной поверхностью.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. В.А. Романовой за полезные дискуссии и ценные замечания.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (грант № 14-08-00277-а) и государственной программы исследований РАН.

Литература

1. *Eshelby J.D.* The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems // Proc. R. Soc. London. Ser. A. 1957. Vol. 241, I. 1226. P. 376–396.

2. *Панин А.В., Романова В.А., Балохонов Р.Р. и др.* Формирование мезоскопических складчатых структур на поверхности поликристаллов стали ЭК-181 в условиях одноосного растяжения // Физ. мезомех. 2011. Т. 14, № 4. С. 57–69.

3. *Зиновьева О.С., Романова В.А.* Численное исследование влияния размера зерна и условий нагружения на деформационные характеристики поликристаллического алюминиевого сплава // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 126–134.

4. *Guilhem Y., Basseville S., Curtit F. et al.* Numerical investigations of the free surface effect in three-dimensional polycrystalline aggregates // Comp. Mater. Sci. 2013. Vol. 70. P. 150–162.

5. *Wilkins M.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin, 1999.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ 4%-НОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева

Проведено численное исследование горения метановоздушной смеси в узкой трубке с инертной внутренней вставкой в двухмерной осесимметричной постановке задачи. Рассмотрено влияние радиуса трубки на устойчивость горения 4%-ной метановоздушной смеси.

THE NUMERICAL STUDY OF THE STABILITY OF THE 4% METHANE-AIR MIXTURE COMBUSTION IN THE NARROW CHANNEL

A.Yu. Krainov, K.M. Moiseeva

The numerical research of methane-air mixture combustion in a narrow tube with an inert internal body in a 2D axisymmetric approximation is conducted. The influence of a tube radius on stability of 4% methane-air mixture combustion is considered.

Одной из классических задач отечественной школы горения является задача о сжигании газовой смеси в химическом реакторе. Актуальность данной задачи связана с требованиями промышленности, где зачастую необходимо организовать безопасное и устойчивое горение газа в энергетической установке, являющейся аналогом химического реактора. Решение подобной задачи проводилось в работах различных авторов. В частности, задача об устойчивости горения газовой смеси в химическом реакторе решена в классической работе [1]. Согласно [1] устойчивость горения газовой смеси в реакторе определяется совокупным влиянием параметров тепло- и массопереноса в системе. Исследования более поздних авторов были направлены на подтверждение данного факта и на исследование возможности управления процессом через изменение величины теплообмена в реакторе.