

УДК 620.178.152.2:666.18

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ОБРАЗЦОВ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

©Ольга Алексеевна Батанова, Юрий Григорьевич Матвиенко¹⁾
Георгий Антонович Гогоци²⁾

¹⁾Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А.Благодирова Российской академии наук, Москва, Россия
matvienko7@yahoo.com

²⁾Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, Киев, Украина
gogotsi@ipp.kiev.ua

Аннотация: Излагаются результаты численного моделирования экспериментов по определению сопротивления разрушению хрупких материалов, проводимых на мезомасштабном размерном уровне, методом скалывания кромок образцов. Решена статическая пространственная нелинейная контактная задача о внедрении индентора Роквелла в деформируемое твёрдое тело. Задачу решали методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. На основании анализа трансформации полей напряжений, деформаций и перемещений установлено, что корректные результаты возможно получать в зоне влияния краевого эффекта. Определены размеры зоны, в которых испытания являются представительными.

Ключевые слова: скалывание кромки образца, индентирование, сопротивление разрушению, стекло, конструкционная керамика, численное моделирование, контактная задача, напряжённо-деформированное состояние

В связи с разработкой методов исследования материалов на различных масштабных структурных уровнях следует отметить перспективность подходов, основанных на комбинации экспериментальных методов измерения механических характеристик и методах численного моделирования. В настоящей работе такой комбинированный подход продемонстрирован применительно к испытаниям хрупких материалов на сопротивление разрушению методом скалывания кромок образцов [1], с целью анализа и оптимизации экспериментов. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния в зоне скалывания индентором кромок образцов из хрупких материалов (в данном случае обычного стекла и конструкционной керамики) проводится методом конечных элементов.

Метод испытаний на скалывание кромок образца заключается в следующем [2-4]. На универсальной испытательной машине устанавливается автономный блок Ceram Test, который служит нагружающим устройством. Скорость перемещения траверсы постоянна и равна 0.5 мм/мин. В этом автономном блоке монтируется двух координатный столик, на котором крепятся фотографические стёкла с приклеенными образцами. В перемещающемся штоке располагается стандартный конический алмазный индентор Роквелла (Gilmore Diamond Tools, Inc., США) (рис. 1). Образцы имеют вид прямоугольных балок сечением 3x4 мм, с радиусом закругления кромок 10 – 15 мкм. Усилие при испытаниях прилагается в направлении, перпендикулярном поверхности образцов шириной 3 мм. Индентором скалывается прямоугольная кромка образца, а разрушающее усилие P_f регистрируется компьютером. Затем с помощью измерительного бинокулярного микроскопа BX51M Olympus определяется расстояние L от кромки образца до крайней точки скола на его поверхности (рис. 2). Сопротивление материала разрушению F_R оценивается как отношение

разрушающего усилия P_f к расстоянию L . На основании этой экспериментальной информации строятся кривые сопротивления разрушению в виде зависимостей $F_R - L$, которые именуется R-линии [2].

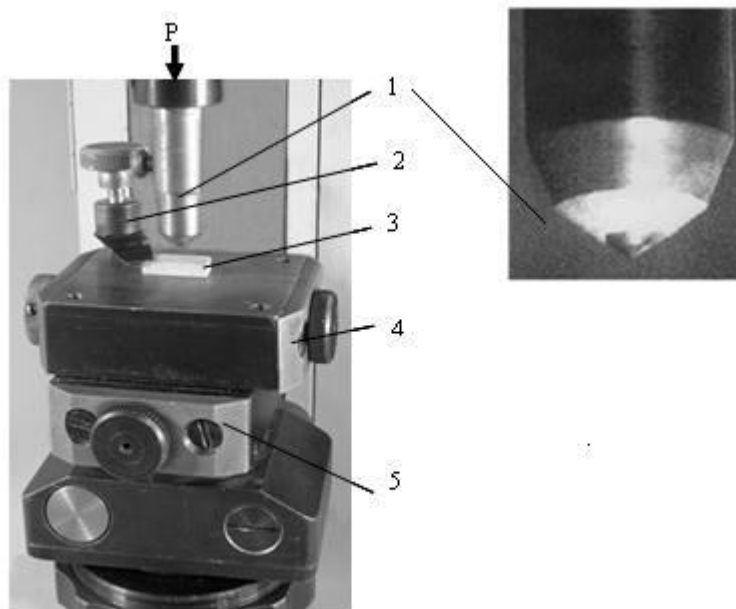


Рис.1. Двух координатный столик и перемещающийся шток, индентор-1, прижим образца-2, образец-3, верхняя подвижная плита-4, двух координатный столик-5

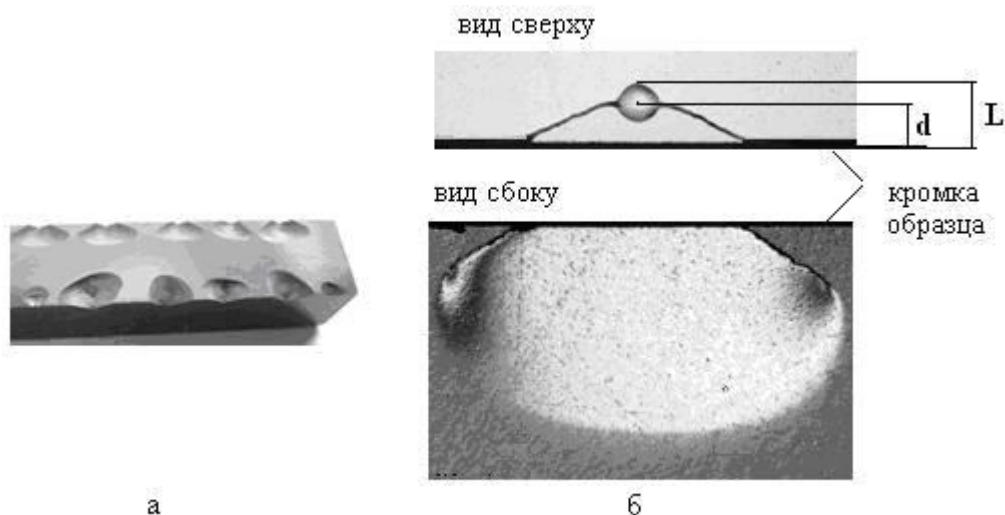


Рис.2. Испытанный образец керамики на основе нитрида кремния – а, зона разрушения при скалывании кромки образца керамики на основе нитрида кремния –б.

Для проведения численного моделирования и расчётного анализа экспериментов по скалыванию кромок образцов хрупких материалов решали статическую пространственную нелинейную контактную задачу о внедрении индентора Роквелла в деформируемое твёрдое тело. Радиус скругления активной части индентора 200 мкм. Задачу решали методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. В процессе

расчётов варьировали расстояние d от центра индентора до кромки образца, которое несколько отличается от L , являющегося расстоянием от кромки образца до крайней точки скола на его поверхности (рис. 2). Модель строили для активной части индентора и выделенного из образца фрагмента. Конечно-элементная модель, принятая для расчёта, представлена на рис. 3 (соответствует $d=125$ мкм). По условиям симметрии относительно плоскости YZ анализировали половину модели. Индентор рассматривали как жёсткий с наличием пилотного узла к которому прикладывается нагрузка. Деформируемое тело (образец) разбивали на конечные элементы типа SOLID 45. Скалярные параметры, задаваемые при решении задачи, варьировали таким образом, чтобы при расчёте различных вариантов создавать сгущение конечно-элементной сетки вблизи области контакта. Индентор и прямоугольная область на поверхности деформируемого образца со сгущением сетки, расположенная под ним, покрываются специальными контактными элементами, выбираемыми программой. По нижнему торцу деформируемого тела принято условие жёсткого закрепления. Для анализируемых материалов принята модель упруго деформирующегося тела, что соответствует их реальным свойствам.

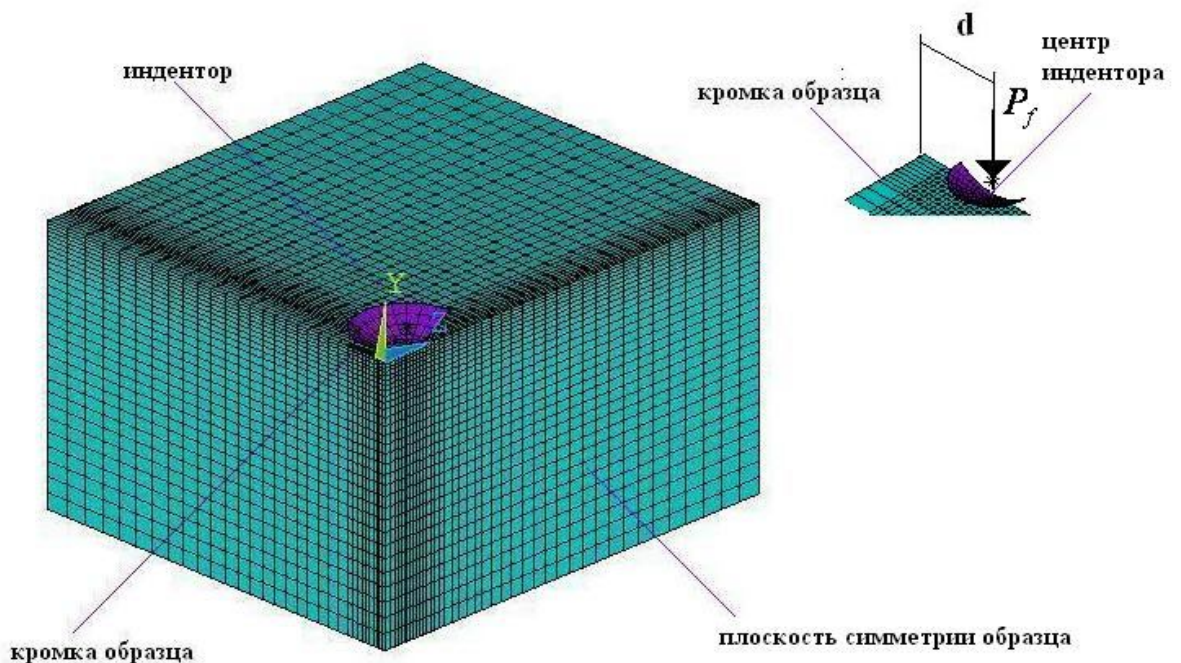


Рис. 3. Конечно-элементная модель задачи о вдавливании жёсткого индентора в деформируемый образец

В работе [5] приведены результаты численного моделирования и расчёта полей напряжений, деформаций и перемещений для экспериментов по скалыванию кромки образца из стекла. Происходящие изменения указанных полей сопоставлены с принадлежностью анализируемых экспериментальных точек к различным участкам R- линии стекла (рис. 4), на которой можно выделить три участка. Первый участок является линейно - возрастающим при L менее 300 мкм, второй участок нелинейный возрастающий, а третий – ниспадающий, на последнем участке с увеличением расстояния L на поверхностях сколов стёкол появляются дополнительные радиальные трещины.

В табл. 1 приведены значения d и соответствующие ему значения разрушающих нагрузок P_f для проанализированных экспериментальных точек и, соответственно,

вариантов расчёта для образцов из стекла. В ней также приведён модуль упругости и коэффициент Пуассона для стекла.

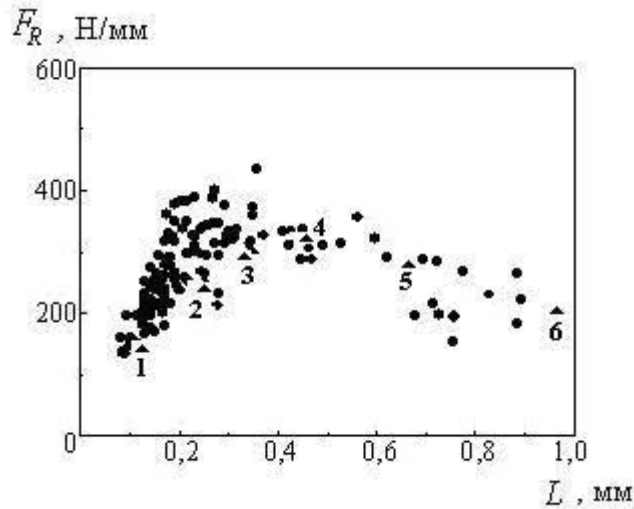


Рис. 4. R-линии обычного стекла

Стекло		
E=7*10 ¹⁰ Па		mu=0.25
№ Варианта расчёта	d, м	P _f , Н
1	1*10 ⁻⁴	19.5
2	2*10 ⁻⁴	63.5
3	3*10 ⁻⁴	99
4	4*10 ⁻⁴	143
5	6*10 ⁻⁴	193
6	9*10 ⁻⁴	207

Таблица 1. Расстояние от центра индентора до кромки образца d , м и разрушающие нагрузки P_f , Н для вариантов расчёта, соответствующих экспериментальным точкам 1-6 (рис. 4), стекло.

В проведённом исследовании наибольший интерес представлял анализ трансформации картин полей главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, главных деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и компонент U_x, U_y, U_z вектора перемещения U в зависимости от изменения положения индентора на поверхности образца в процессе эксперимента и соответствующих ему изменений параметров d (расстояния от центра индентора до кромки образца) и P_f . Анализ этой трансформации по результатам испытаний образцов из стекла и сопоставление происходящих изменений с принадлежностью экспериментальных точек к различным

участкам R-линии стекла показал, что эффекты трансформации наиболее наглядно проявляются в картинах распределения полей перемещений и, особенно, в распределении компоненты U_z вектора перемещения, направленной перпендикулярно к кромке образца. На рис. 5 представлено распределение перемещения U_z для значений параметра d равных 100, 300, 400, и 900 мкм и шкалы с диапазоном значений перемещений в м, соответствующим цвету изолиний.

Как показали результаты сравнения расчётов для значений d равных 100, 200 и 300 мкм (экспериментальные точки, принадлежащие линейному восходящему участку R-линии стекла), при возрастании параметра d в зоне контакта наблюдаются количественные и качественные изменения картины распределения полей напряжений, деформаций и перемещений. Эти поля несимметричны в плоскости YZ, причём, чем ближе индентор к кромке образца, тем более отчётливо проявляется асимметрия. На основании результатов расчётов можно констатировать, что на этом участке R-линии стекла процесс деформирования происходит в зоне наличия краевого эффекта. Чем меньше расстояние d , тем значительнее влияние краевого эффекта и меньше значение разрушающих нагрузок. По мере возрастания расстояния d разрушающая нагрузка и соответствующие ей напряжения увеличиваются, а картина распределения напряжений и перемещений становится более симметричной. Среди рассчитанных вариантов экспериментальной точке 4 (рис. 4), $d = 400$ мкм, соответствует на R-линии локальный максимум, где происходит переход от восходящего участка R-линии к нисходящему. Поля напряжений и перемещений становятся более симметричными, но полной симметрии ещё не достигают. Особенно наглядно это демонстрирует перемещение U_z , поле которого распространяется до кромки образца. Вариант расчёта для $d = 400$ мкм является переходным от воздействия индентора в зоне краевого эффекта к воздействию его в зоне, в которой влияние краевого эффекта затухает. В случае вариантов расчёта для $d = 600$ мкм и $d = 900$ мкм (нисходящий участок R-линии стекла) картины распределения полей напряжений и перемещений становятся симметричными в плоскости YZ. Сами поля уже не достигают кромки образца, что позволяет сделать вывод о выходе из зоны влияния краевого эффекта. Сравнение результатов расчёта для этих вариантов демонстрирует постепенную стабилизацию напряжённого состояния. Разрушающие нагрузки и соответствующие им напряжения при росте расстояния d отличаются между собой незначительно, и, как следствие, происходит падение R-линии.

На основании проведённых расчётов в [5] сделано заключение о том, что восходящие R-линии в случае испытания стеклянных образцов методом скалывания кромок возможно получать в зоне влияния краевого эффекта. По выходу из зоны краевого эффекта наблюдается стабилизация напряжённо-деформированного состояния, результаты испытаний становятся некорректными, поскольку вместе с изменением напряжённо-деформированного состояния изменяется характер и кинетика разрушения. По-видимому, для стекла здесь имеет место смешанный механизм разрушения, сочетающий эффекты скалывания (рис. 6,а) и появления трещин в результате классического индентирования (рис. 6,б).

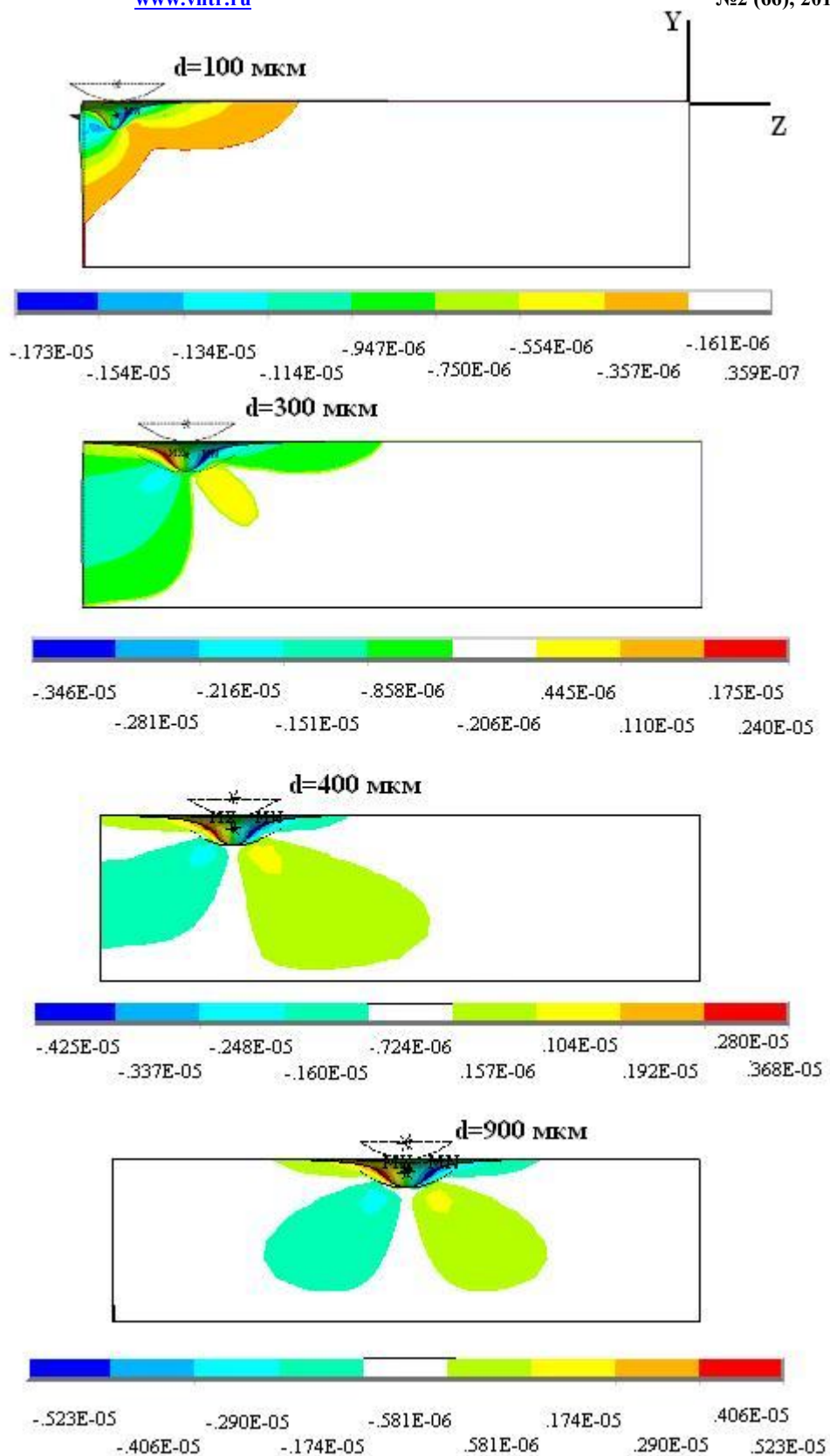


Рис. 5. Картины изменения перемещений U_z (м) в образце из стекла в плоскости симметрии (YZ) для значений $d = 100, 300, 400$ и 900 мкм.

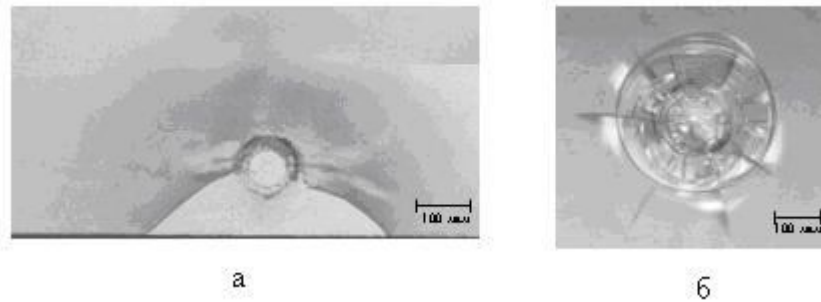


Рис. 6. Зона разрушения при скалывании кромки образца стекла –а, типичный отпечаток при внедрении в поверхность стекла индентора Роквелла вдалеке от кромки - б

Численное моделирование экспериментов по скалыванию кромки образца проведено также для конструкционной керамики на основе нитрида кремния (Y_2O_3 , Al_2O_3)-SN. На рис.7 приведен график экспериментальной зависимости разрушающей нагрузки P_f от расстояния разрушения L и, построенная на его основе линия сопротивления разрушению $F_R - L$ для этого материала. В таблице 2 приведены данные по выбранным для расчёта экспериментальным точкам, номера которых соответствуют вариантам расчёта.

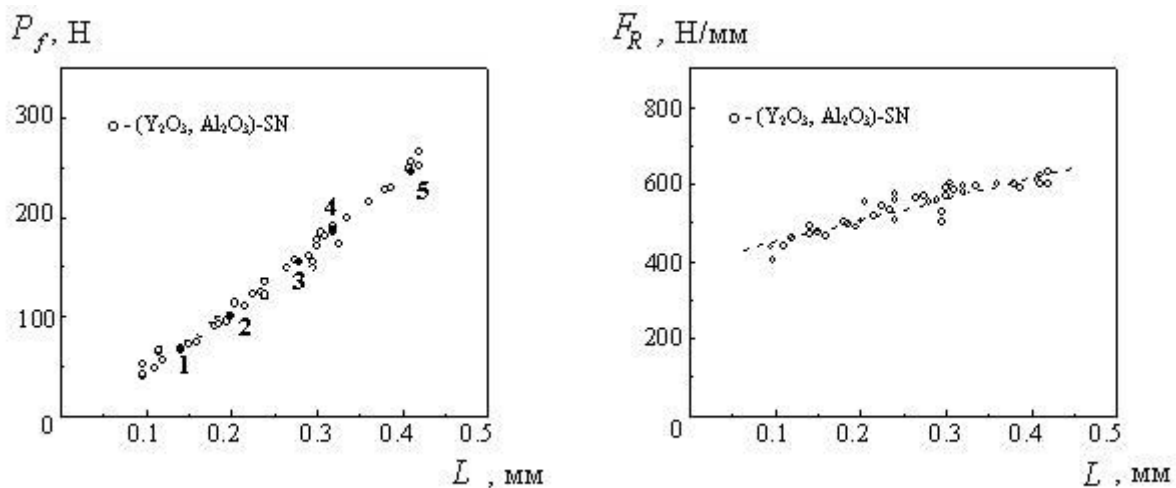


Рис. 7. Зависимость разрушающей нагрузки от расстояния разрушения –а, и R линия -б для конструкционной керамики на основе нитрида кремния.

Численный расчёт, проведённый для конструкционной керамики на основе нитрида кремния, продемонстрировал аналогичную, той, что была выявлена для стекла трансформацию полей, напряжений, деформаций и перемещений, возникающую по мере удаления индентора от кромки образца в процессе эксперимента. Но, поскольку, у керамики модуль упругости значительно выше, чем у стекла, здесь наблюдается больший градиент изменения напряжений. Поля главных напряжений локализованы в небольшом объёме пространства образца вблизи площадки контакта. Поэтому, даже в большей степени, чем у стекла, показательными в исследовании процесса трансформации выше перечисленных полей являются изменения поля вектора перемещений U и его компонент, в первую очередь перемещения U_z , направленного перпендикулярно к кромке образца.

Нитрид кремния (Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃)-SN			
E = 2.5*10 ¹¹ Па		mu = 0.24	
№ Варианта расчёта	Расстояние от центра индентора до кромки образца d, м	Расстояние от кромки образца до крайней точки скола L, м	P _f , Н
1	0.7*10 ⁻⁴	1.4*10 ⁻⁴	66
2	1.25*10 ⁻⁴	2.0*10 ⁻⁴	101
3	1.9*10 ⁻⁴	2.8*10 ⁻⁴	155
4	2.25 *10 ⁻⁴	3.2*10 ⁻⁴	186
5	3.1*10 ⁻⁴	4.1*10 ⁻⁴	246

Таблица 2. Расстояние от центра индентора до кромки образца d , м и разрушающие нагрузки P_f , Н для вариантов расчёта, соответствующих экспериментальным точкам 1-5 (рис. 7), нитрид кремния.

Важной особенностью испытаний на скалывание кромки образца является то, что они включают три этапа процесса разрушения материала. Формирование начальной трещины близкой по форме к полукольцу, её развитие (образование новых поверхностей), в данном случае в виде двух вторичных трещин (рис. 2,б) и затем распространение трещин вглубь образца, то есть образование скола. Первый этап связан с возникающими в образце под воздействием индентора напряжениями. При достижении этими напряжениями предельных значений возникает первичная трещина. На втором этапе, по-видимому, в действие вступают законы поверхностных явлений [6]. Оставаясь в рамках феноменологического подхода и основываясь на результатах проведённых расчётов можно констатировать наличие чёткой корреляции между картинками, полученных полей главных напряжений и первичной полукруглой трещиной, и между картинками полей перемещений и поверхностью скола образца, соответственно. Корреляция наблюдается, как по их конфигурации, так и по геометрическим параметрам локализации полей в объёме образца. В качестве подтверждения такой корреляции на рис. 8 представлены изолинии главного напряжения σ_1 (справа), и симметричного ему фрагмента фотографии скола вид сверху (слева). На рис. 9 продемонстрировано, для того же расчётного варианта, распределение поля вектора перемещений U в образце из нитрида кремния в изометрической проекции для половины модели, по условиям симметрии относительно плоскости YZ . Следует отметить, что получаемые в расчётах количественные результаты несколько завышены относительно реальных, так как в данном исследовании нагрузка фиксируется в момент образования скола. Однако при численном моделировании анализируемых испытаний нас интересуют не количественные значения, а качественная картина трансформаций полей напряжений, деформаций и перемещений в процессе экспериментов.

Проведённое численное моделирование испытаний конструкционной керамики на основе нитрида кремния также показало, что влияние краевого эффекта тем больше, чем меньше расстояние d . Оценить размеры зоны активного влияния краевого эффекта можно с помощью расчётов. Для такой оценки предлагается численный анализ поля вектора перемещений U и его компонент U_x, U_y, U_z . Для обозначения границы зоны краевого

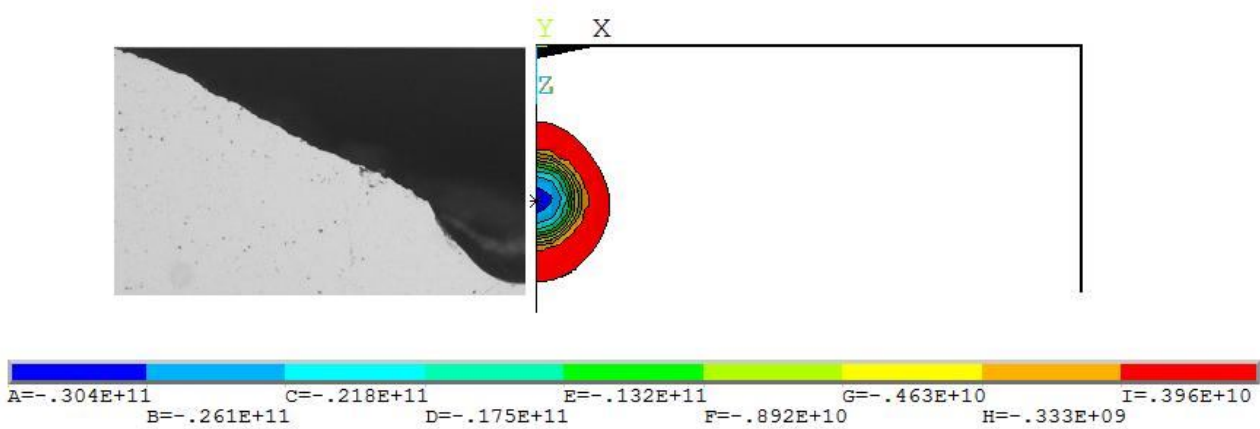


Рис. 8. Изолинии главного напряжения σ_1 (Па) в образце из нитрида кремния, (справа), $d = 170$ мкм, и фрагмент фотографии скола (слева) для того же расчётного варианта, вид сверху.

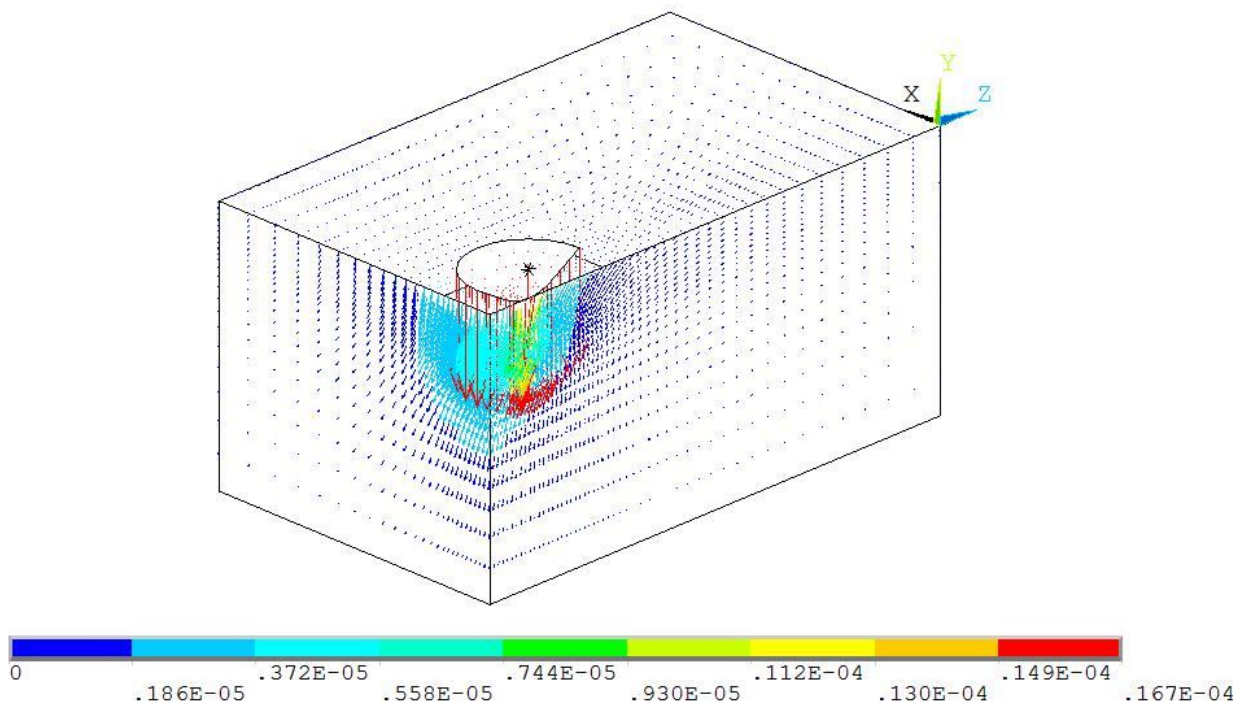


Рис. 9. Распределение поля вектора перемещений U в образце из нитрида кремния, (изометрия), $d = 170$ мкм.

эффекта предлагается такое значение параметра d и соответствующего ему параметра L , при котором поле вектора перемещений U и его компонент U_x, U_y, U_z дистанцируются от кромки образца, поле вектора перемещений U и его компонент U_y и U_z становятся симметричными в плоскости YZ образца. При приближении параметра d к его расчётному значению, определяющему границу зоны краевого эффекта, обозначим его d_l , наблюдается большой разброс экспериментальных точек, чем внутри этой зоны. Если для

стекла, вследствие низких значений механических свойств, при выходе из зоны краевого эффекта ещё удаётся получить сколы, то для образцов из керамики при дальнейшем возрастании параметра d , то есть при удалении его от зоны краевого эффекта, сколы не образуются. Поэтому, можно рекомендовать в качестве базы R- линии значения параметра L соответствующие значениям параметра $d = d_a$ меньшим, чем d_l . Параметр d_a ограничивает зону активного влияния краевого эффекта.

На основании проведённого численного моделирования и расчётного анализа экспериментов по скалыванию кромки образца конструкционной керамики на основе нитрида кремния (Y_2O_3, Al_2O_3)-SN индентором Роквелла с радиусом скругления 200 мкм диапазон значений параметра d_a , ограничивающий зону активного влияния краевого эффекта, установлен, находящимся в пределах $d_a \leq 310$ мкм и $L \leq 410$ мкм соответственно. База параметра L экспериментальной R-линии (рис. 7,б) согласуется с результатами расчёта.

В качестве примера на рис. 10 представлена трансформация поля вектора перемещений U в плоскости симметрии образца YZ в зависимости от изменения параметра d . Как демонстрирует этот рисунок поле вектора перемещений U несимметрично в плоскости образца YZ и локализовано вблизи кромки образца. По мере изменения параметра d от 70 мкм (рис. 10, а), до 125 мкм (рис. 10, б) и до 310 мкм (рис. 10, в) ассиметрия поля вектора перемещений U в плоскости YZ уменьшается, а само поле постепенно смещается в направлении от кромки образца. Точка $d=310$ мкм (рис. 10, в), согласно проведённому анализу, принята ограничивающей зону активного влияния краевого эффекта.

Был также проведён расчёт при значении параметра $d=600$ мкм, $P_f=300$ н (рис. 11). Данная расчётная точка находится уже вне зоны влияния краевого эффекта и вне графиков, представленных на рис. 7. Скол при этих параметрах не образуется. Согласно расчёту в данном случае поля вектора перемещений U и его компонент U_x, U_y, U_z дистанционированы от кромки образца, поле вектора перемещений U и его компонент U_y и U_z симметричны в плоскости YZ.

С целью исследования влияния на исследуемые процессы механических свойств материала было выполнено численное моделирование испытаний на скалывание кромок образцов из оксида алюминия (Al_2O_3) А-999. В условиях действия краевого эффекта, следует отметить превалирующее влияние параметра d на характер распределения полей перемещений в объёме образца и их конфигурацию. Тогда как численные значения зависят также от механических свойств материала. На рис. 12 представлено сопоставление распределения полей компоненты U_z вектора перемещения для образцов из нитрида кремния и оксида алюминия при близких значениях параметра d . В условиях действия краевого эффекта наблюдается подобие в распределении полей, тогда как численные значения отличаются.

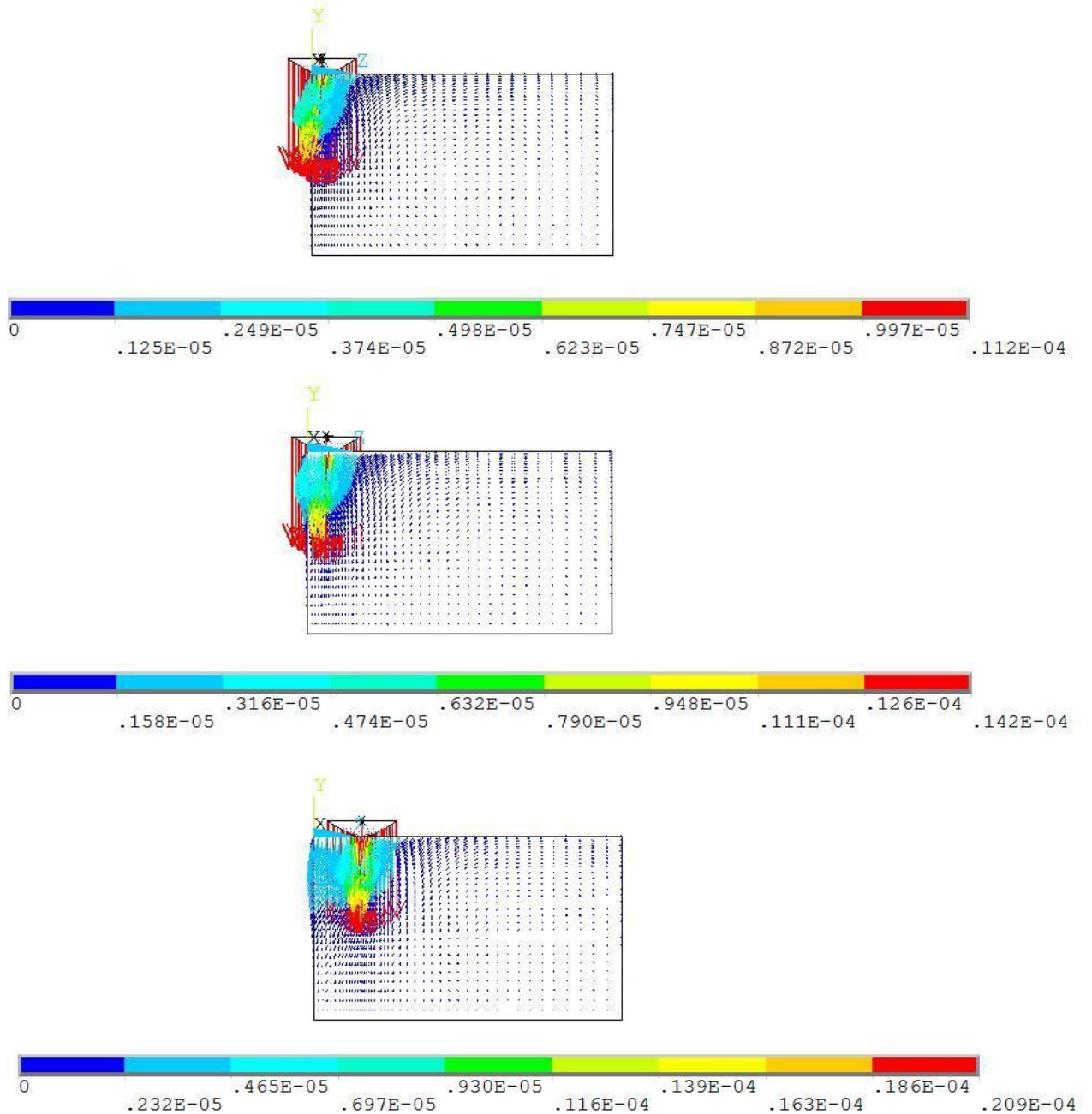


Рис. 10. Трансформация поля вектора перемещений U в плоскости симметрии образца YZ в зависимости от изменения параметра d . $d = 70$ мкм (точка 1, рис. 7) -а, $d = 125$ мкм (точка 2, рис. 7) -б, $d = 310$ мкм (точка 5, рис.7) -в.

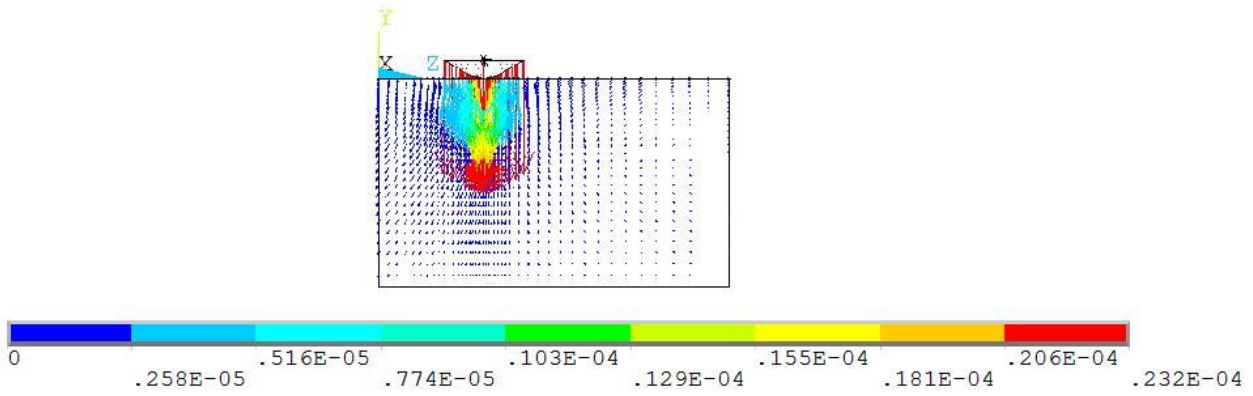


Рис. 11. Поле вектора перемещений U в плоскости симметрии образца YZ при значении параметра $d = 600$ мкм.

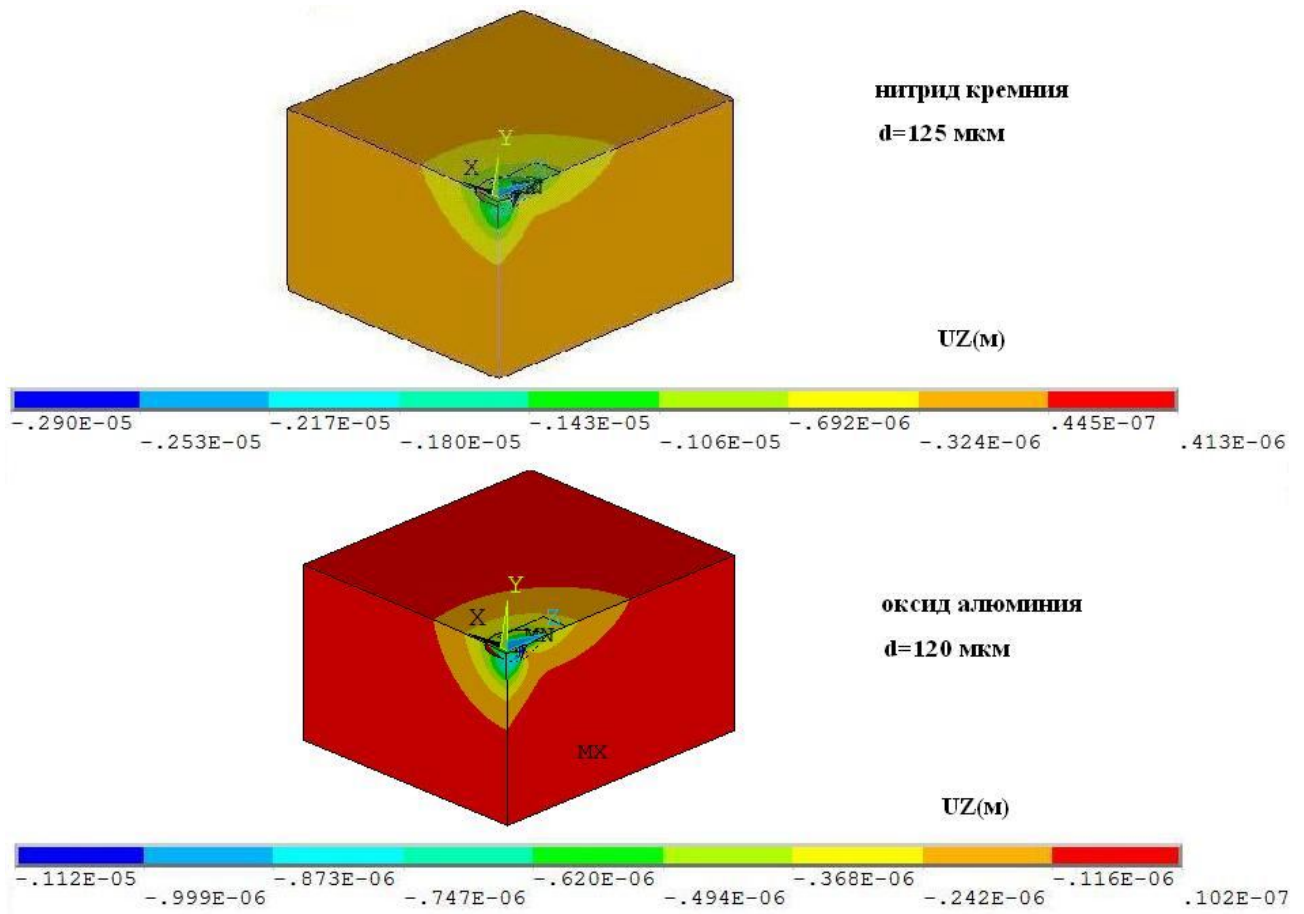


Рис.12. Сопоставление распределения полей перемещения U_z для нитрида кремния и оксида алюминия, в условиях действия краевого эффекта.

На основании проведённого моделирования и расчётов можно сделать вывод о том, что при испытаниях образцов методом скалывания кромок, восходящие R-линии возможно

получать в зоне активного влияния краевого эффекта. При выходе из этой зоны результаты испытаний становятся не корректными. Как демонстрируют, полученные результаты, определить зоны, в которых испытания являются представительными можно с помощью расчётного анализа. Для оптимизации метода скалывания кромок образцов, с целью оценки сопротивления хрупких материалов разрушению, целесообразно привлечение численного моделирования изменения напряжённо-деформированного состояния при контакте индентора с образцом.

Список литературы

1. Almond E., McCormick N. Constant-geometry edge-flaking of brittle materials // Nature. 1986. V. 321. С. 53–55.
2. Gogotsi G. A., Dub S. N., Lomonova E. E., Ozersky B. I. Vickers and Knoop indentation behavior of cubic and partially stabilized zirconia crystals // Journal of the European Ceramic Society. 1995. V. 15. С. 405–413.
3. Гогоци Г. А. Сопротивление керамики разрушению: базовая диаграмма и R-линия // Проблемы прочности. 2006. № 3. С. 60–74.
4. Гогоци Г.А., Галенко В.И., Озерский Б.И. и др. Прямое определение сопротивления керамики разрушению по методу краевого скалывания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 3. С. 49-53.
5. Батанова О.А., Гогоци Г.А., Матвиенко Ю.Г. Численный анализ результатов эксперимента по скалыванию кромок образца // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 7. С. 53-56.
6. Русанов А.И. К термодинамической теории прочности твёрдых тел. 1. Термодинамические характеристики трещины / Коллоидный журнал. 2008. Т. 70. №1. С.93-100.

Поступила: 03.02.13.