

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВОГО ЦИЛИНДРА С КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Б.Н. Семенов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251,
Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504, Россия
e-mail: semenov@bs1892.spb.edu

Аннотация. В работе проведен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния титанового цилиндра с керамическим покрытием на основе диоксида циркония при осевом сжатии. Выявлены зоны растягивающих напряжений и получена оценка их концентрации в зависимости от приложенной нагрузки.

1. Введение

В настоящее время тонкостенные керамические покрытия широко используются для повышения прочностных, жесткостных и защитных свойств элементов конструкций. Однако из-за различия физико-механических свойств материала основы и покрытия при деформировании этих элементов на границе основа-покрытие могут возникать большие растягивающие напряжения, приводящие к нарушению целостности покрытия и его последующему отслоению. Использование керамических покрытий ограничивается также низкой прочностью керамики при растяжении. Например, для керамики на основе Al_2O_3 прочность на растяжение на порядок меньше прочности на сжатие [1-3]. Особое место среди конструкционных керамики благодаря своим высоким прочностным показателям и трещиностойкости при сохранении устойчивости к коррозии и износу занимают керамики на основе диоксида циркония. Как известно, диоксид циркония является соединением с преимущественно ионной связью, существующим в кубической, тетрагональной и моноклинной кристаллических модификациях [1, 2]. Уникальность его прочностных свойств и трещиностойкости обусловлена трансформационным переходом метастабильной тетрагональной модификации в стабильную моноклинную. Кроме того, коэффициент теплового расширения диоксида циркония имеет значения, близкие коэффициентам теплового расширения металлов, что благоприятствует его использованию в качестве керамического покрытия металлических конструкций.

Благодаря высокой биосовместимости с живыми тканями начиная с 60-годов прошлого века диоксид циркония начал применяться в качестве керамического биоматериала при протезировании. Высокие прочностные свойства и белый цвет диоксида циркония открывают широкие возможности его применения в стоматологии [3, 4]. В связи с этим представляется интересным исследование напряженно-деформированного состояния титанового имплантата с керамическим покрытием на

основе диоксида циркония при силовом нагружении.

В качестве исследуемой модели рассматривается деформирование титанового стержня с керамическим покрытием на основе диоксида циркония при осевом сжатии. Целью данной работы является определение эффективной жесткости такой конструкции и выявление зон растяжения и уровня напряжений в них для оценки возможного разрушения покрытия.

2. Исследование: модель и результаты

Для моделирования деформирования титанового стержня с керамическим покрытием использовался конечно-элементный пакет ANSYS [5]. В качестве расчетной модели взят титановый стержень, диаметр которого равен 4 мм, а высота 25 мм. Толщина керамического покрытия равна 0.2 мм.

При расчете предполагалось, что титан деформируется по идеальному упруго-пластическому закону с модулем Юнга, равным 112 ГПа, коэффициентом Пуассона, равным 0.32, и пределом текучести 300 МПа. Модуль Юнга керамики на основе диоксида циркония равен 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.2, предел прочности на изгиб 900 МПа.

Были рассмотрены 2 случая:

1. Цилиндр с прямым углом между основаниями и боковой поверхностью (Рис. 1а)
2. Скругленный переход от образующей к основанию (Рис. 1б)

Основания цилиндра сжимались жесткими штампами.

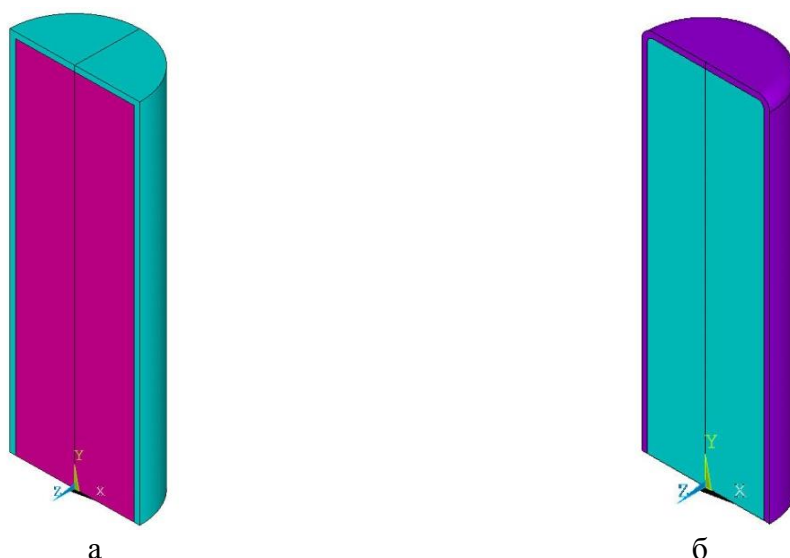


Рис. 1. Титановый стержень с покрытием
а - с прямым углом между основанием и образующей,
б - со скругленным переходом от основания к образующей.

Учитывая осевую симметрию рассматриваемой задачи, расчет производился для сечения цилиндра ($0 < x < 2.2$ мм, $0 < y < 12.7$ мм) в пакете ANSYS с использованием 8-узловых элементов PLANE183. Для обеспечения необходимой точности вся область разбита на 10000 элементов.

На рисунке 2 а,б приведено разбиение расчетных областей на элементы. В качестве нагрузки в рассматриваемой задаче задавалось сжатие цилиндра вдоль образующей двумя параллельными жесткими штампами. Максимальное перемещение штампов 0.05 мм, что соответствует максимальной деформации стержня с покрытием $\varepsilon = 0.00397$. Перемещение штампов осуществлялось пошагово с шагом 0.0001 мм.

При малых перемещениях штампа титановый стержень и покрытие деформировались упругим образом, начиная с перемещения равного $0.2925 \cdot 10^{-4}$, наблюдается пластическое деформирование титанового стержня, что приводит к нелинейности эффективной жесткости (Рис. 3а). Зона пластических деформаций начинает развиваться на оси цилиндра на глубине 2.5 мм от торцов (Рис. 3б).

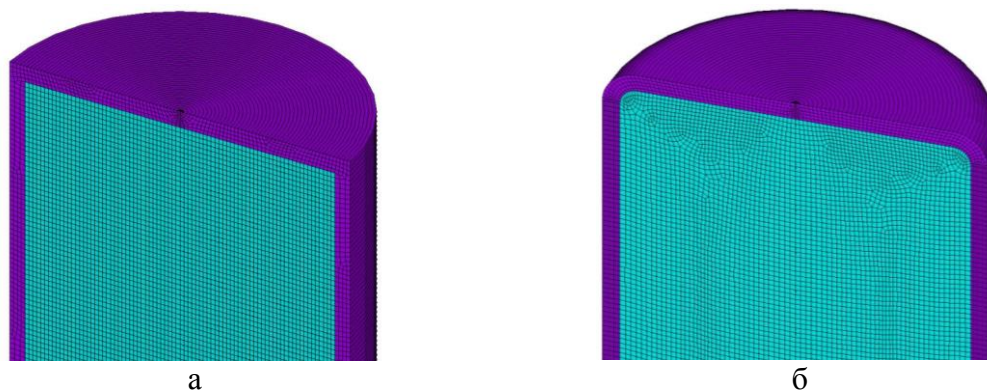


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение а - титанового цилиндра с керамическим покрытием, б - со скругленным переходом от основания к образующей.

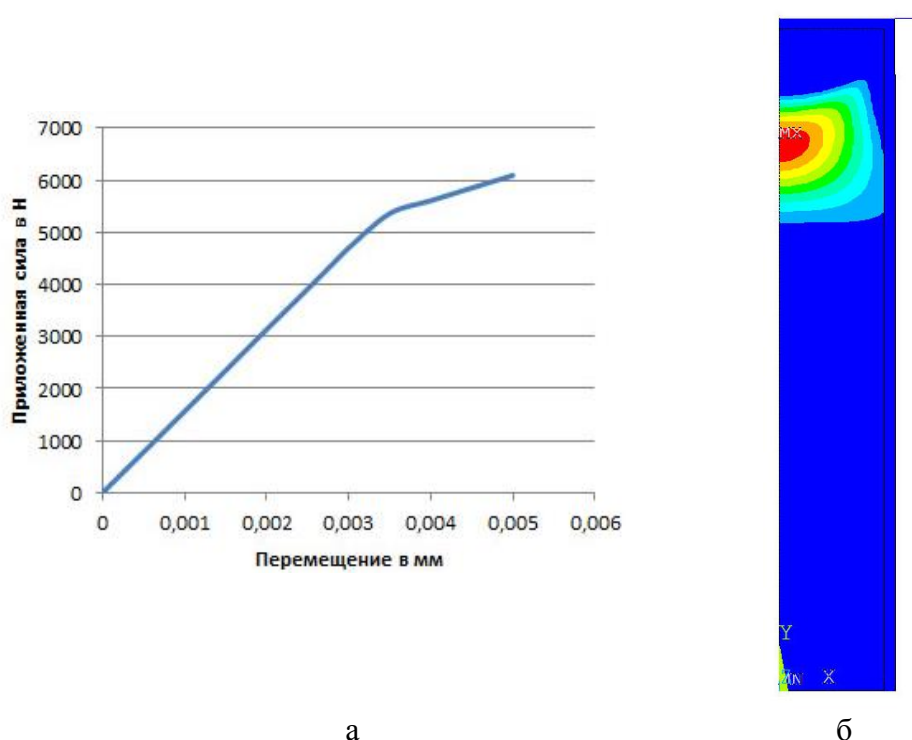


Рис. 3. а - Зависимость приложенной сила (в Н) от перемещения (в мм), б – Начальная зона пластических деформаций для титанового цилиндра с керамическим покрытием.

На рисунке 4 представлена зависимость приложенной к штампу силы от перемещения штампа для титанового цилиндра со скругленным переходом оснований к образующей. Из-за скругленного перехода эффективная жесткость становится меньше, чем у прямого цилиндра. Кроме этого, значительно раньше начинает развиваться пластическая зона в титановом цилиндре, и в отличие от прямого цилиндра зона пластичности зарождается на границе керамическое покрытие - основание титанового цилиндра в окрестности скругления (Рис. 4б).

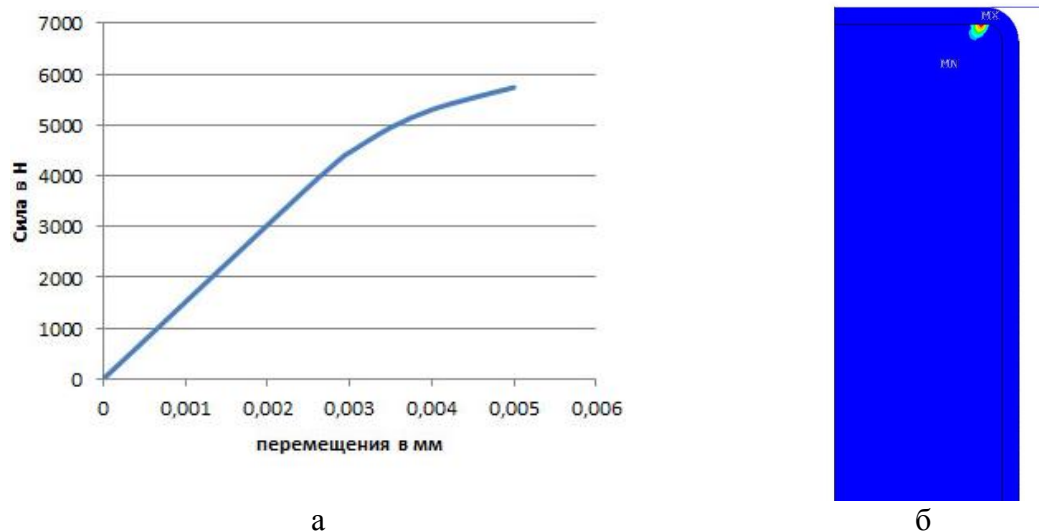


Рис. 4. а - Зависимость приложенной сила (в Н) от перемещения (в мм),
б – Начальная зона пластических деформаций для цилиндра со скругленными краями.

По мере увеличения перемещения штампа наблюдается увеличение концентрации растягивающих радиальных напряжений на внутренней поверхности покрытия вблизи перехода основания – образующая цилиндра, а также окружных напряжений в покрытии. На рисунке 5 приведена зависимость максимальных радиальных и окружных напряжений от перемещения штампа.

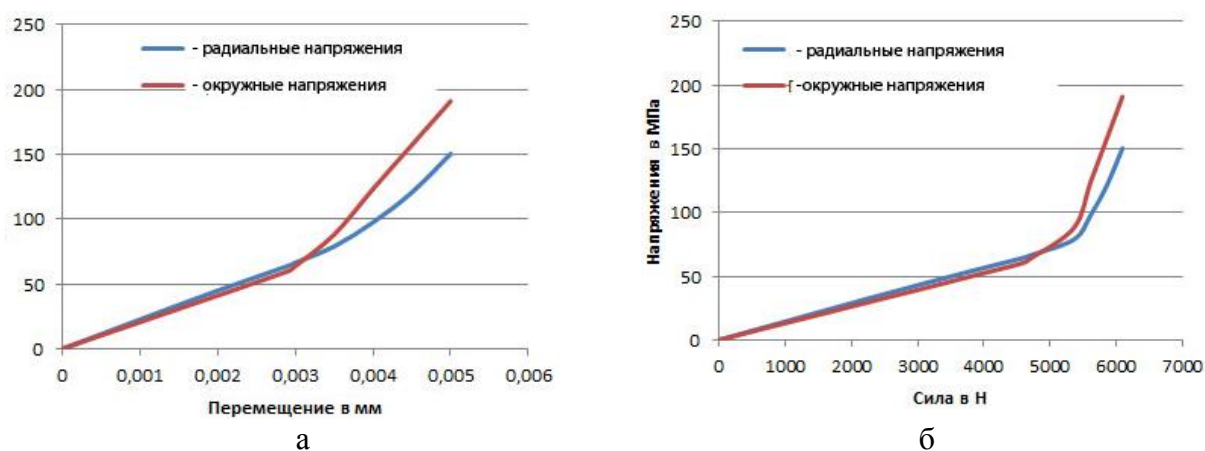


Рис. 5. Зависимость максимальных радиальных и окружных напряжений
(а) от перемещения штампа, (б) от приложенной к штампу силы в титановом цилиндре с керамическим покрытием.

Появление больших растягивающих напряжений на внутренней поверхности керамического покрытия вблизи основания обусловлено, прежде всего, несоответствием упругих модулей титана и циркониевой керамики и в силу эффекта Пуассона при сжатии составного цилиндра помимо растягивающих радиальных напряжений в покрытии в окрестности перехода основания в образующую возникает значительный изгибающий момент, приводящий к высокой концентрации этих напряжений на внутренней поверхности керамического покрытия основания титанового цилиндра. Распределение радиальных и окружных напряжений приведены на Рис. 6а,б для смещения штампа, равного 0,05 мм.

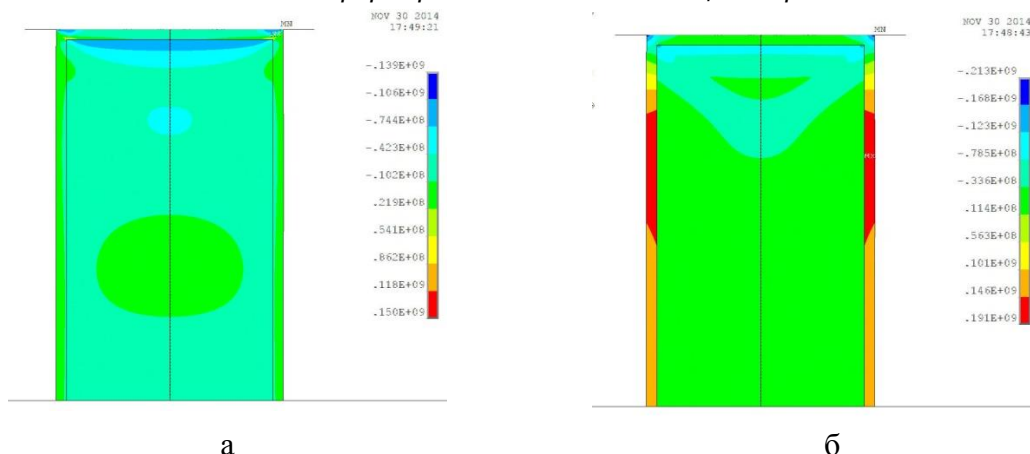


Рис. 6. Распределение радиальных (а) и окружных напряжений (б) по сечению титанового цилиндра с керамическим покрытием при перемещении, равном 0.05 мм.

Концентрация напряжений в покрытии наблюдается как в цилиндре с прямым углом между основанием и образующей, так и скругленным переходом. Однако в случае скругленного перехода концентрация радиальных напряжений растет намного быстрее и достигает при одинаковой силе, приложенной к штампу, больших значений, чем в случае прямого цилиндра (Рис. 7а).

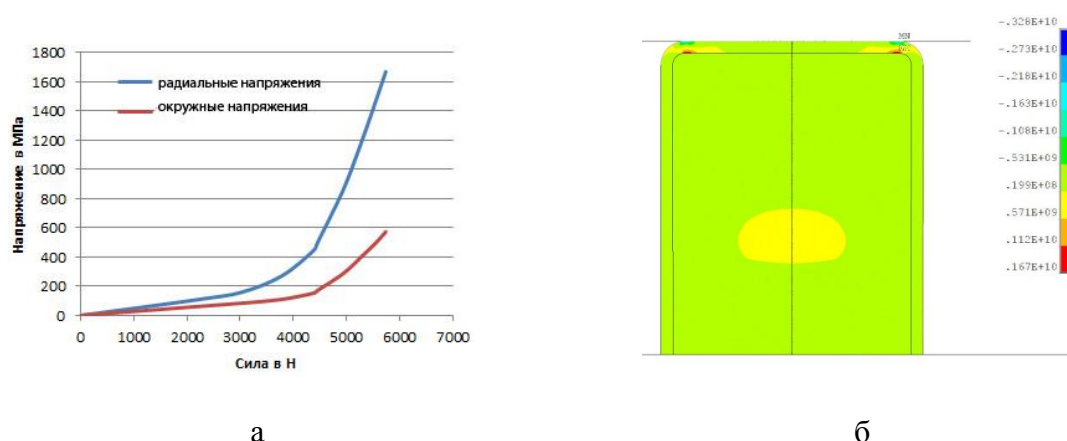


Рис. 7. Зависимость максимальных радиальных и окружных напряжений от приложенной к штампу силы (а), распределение радиальных напряжений (б) по сечению титанового цилиндра со скругленными краями с керамическим покрытием при перемещении, равном 0.05 мм.

Однако и в этом случае разрушающее напряжение на границе основание цилиндра - керамическое покрытие на основе диоксида циркония достигается при силе, приложенной к штампу, более 5000 Н.

3. Заключение

Из результатов расчетов следует, что при осевом нагружении титанового цилиндра с керамическим покрытием на внутренней поверхности покрытия вблизи основания цилиндра возникают растягивающие напряжения. Однако благодаря высокой прочности и трещиностойкости керамик на основе диоксида циркония разрушение этого покрытия в областях концентрации растягивающих напряжений может быть только при значительных нагрузках. Отметим, что при использовании керамических покрытий на основе Al_2O_3 уровень критических нагрузок значительно ниже из-за большей жесткости материала (модуль Юнга достигает 380 ГПа) и меньшего предела

прочности на разрыв. Таким образом, использование в качестве материала покрытия керамики на основе диоксида циркония значительно снижает вероятность разрушения покрытия при силовом нагружении.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00199).

Литература

1. А.Р. Андриевский, В кн.: *Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе*, ред. А.Р. Андриевский, И.И. Спивак (Металлургия, Челябинск, 1989), с. 250.
2. Г.Д. Семченко, *Конструкционная керамика и огнеупоры* (Штрих, Харьков, 2000).
3. И.Ю. Лебеденко, С.В. Анисимова, А.И. Лебеденко, Л.И. Шворнева, В.И. Хван, В.А. Волченкова, Н.А. Михайлина, Л.И. Подзорова, М.Н. Румянцева // *Российский стоматологический журнал* **2** (2010) 4.
4. С.В. Анисимова, Л.И. Подзорова, Л.И. Шворнева, В.И. Хван, А.И. Лебеденко // *Стоматология* **5** (2011) 10.
5. E. Madenci, I. Guven, *The finite element method and applications using ANSYS* (Springer, 2006).

FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF DEFORMATION OF TITANIUM CYLINDER WITH A CERAMIC COATING UNDER AXIAL COMPRESSION

B.N. Semenov^{1,2}

¹St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, 195251, Russia

²Department of Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, 198504, Russia

e-mail: semenov@bs1892.spb.edu

Abstract. In the paper, a finite element analysis of the stress-deformation state of the titanium cylinder with ceramic coating based on zirconium dioxide under axial compression is performed. Zones of tensile stress are identified, and an estimate of their concentration as a function of the applied load is obtained.

Acknowledgement

This work was supported by the Russian Science Foundation (Research Project 14-29-00199).

References

1. A.R. Andrievskii, In: *The strength of refractory compounds and related materials*, ed. by A.R. Andrievskii, I.I. Spivak (Metallurgy, Chelyabinsk, 1989), p. 250.
2. G.D. Semchenko, *Structural ceramics and refractories* (Shtrih, Kharkov, 2000).
3. I.Y. Lebedenco, S.V. Anisimov, A.I. Lebedenco, L.I. Shvorneva, V.I. Hwang, V.A. Volchenkova, N.A. Mikhaylina, L.I. Podzorova, M.N. Rumyantsev // *Russian Journal of Dentistry* **2** (2010) 4.
4. S.V. Anisimov, L.I. Podzorova, L.I. Shvorneva, V.I. Hwang, A.I. Lebedenco // *Dentistry* **5** (2011) 10.
5. E. Madenci, I. Guven, *The finite element method and applications using ANSYS* (Springer, 2006).