УДК 531.728:678.019.24:620.182.2

ВНЕДРЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО ШТАМПА В ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЙ СЛОЙ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ МОДУЛЕМ ЮНГА И КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА

С.М. Айзикович [1], Л.И. Кренев [1], Т.А. Кузнецова [2], С.А. Чижик [2]

[1] *Донской государственный технический университет, а/я 4845, Ростов-на-Дону, Россия*
E-mail: aiz@rsu.ru

[2] *Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, ул. П. Бровки 15, Минск, Беларусь*

Изменение механических свойств по глубине в приповерхностном слое присуще многим материалам и конструкциям. Это вызвано как технологией их создания, так и условиями эксплуатации. В случае, когда зона контакта сопоставима с толщиной неоднородного слоя, а различие упругих свойств подложки и покрытия достаточно велико, пренебрежение эффектом неоднородности может приводить к серьезным ошибкам в моделировании процесса деформирования основания и в определении упругих свойств неоднородного слоя.

В работе рассматривается задача о внедрении в функционально-градиентное упругое полупространство осесимметричного штампа. Предполагается, что штамп является телом вращения, его подошва имеет параболическую форму, а контакт между штампом и неоднородным слоем гладкий.

При решении контактной задачи используется двусторонний асимптотический метод, разработанный С.М. Айзиковичем [1, 2]. В основе метода лежит численное построение трансформанты ядра парного интегрального уравнения, к которому сводится задача о внедрении параболического штампа в неоднородный по глубине слой. Затем трансформанта ядра интегрального уравнения аппроксимируется дробно-рациональным выражением. Решение интегрального уравнения с аппроксимированным ядром строится аналитически. Таким образом, удается получить решение в виде, удобном для аналитического исследования различных эффектов, связанных с неоднородностью.

В численном эксперименте анализируется взаимовлияние непрерывно изменяющихся по глубине модуля Юнга и коэффициента Пуассона на напряженно-деформированное состояние покрытия и подложки при внедрении сферического индентора. Рассмотрен простейший случай непрерывного изменения свойств по глубине – равномерное убывание или возрастание. Предполагалось, что значение модуля Юнга и коэффициента Пуассона может изменяться в два раза по сравнению с подложкой и изменение модуля Юнга обратно пропорционально изменению коэффициента Пуассона. На рис. 1 представлены шесть различных случаев изменения упругих параметров.

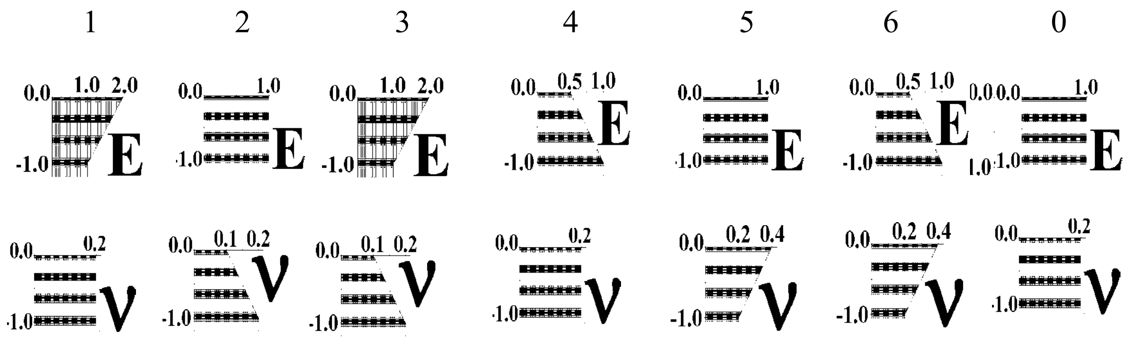

Рис. 1

Для материалов с покрытием при индентировании можно определить модуль упругости, актуальный для некоторой зоны контакта и в силу этого являющийся некоторой средней величиной между модулем упругости поверхностного и глубинных слоев материала. Эту характеристику будем называть эффективным модулем или функцией жесткости неоднородного основания (иногда ее называют функцией Снеддона). При внедрении параболического штампа функция жесткости имеет вид

$$E_c(a)=\frac{3}{4}\frac{P}{a\delta}\frac{1}{1-\nu_0^2},$$

где a – радиус зоны контакта, δ – перемещение индентора, ν_0 – коэффициент Пуассона на поверхности слоя. Для неоднородного материала функция жесткости, или эффективный модуль, является функцией безразмерного геометрического параметра (a/H).

На рис. 2 представлены значения функции жесткости в зависимости от (a/H) для описанных выше сочетаний законов изменения упругих параметров.

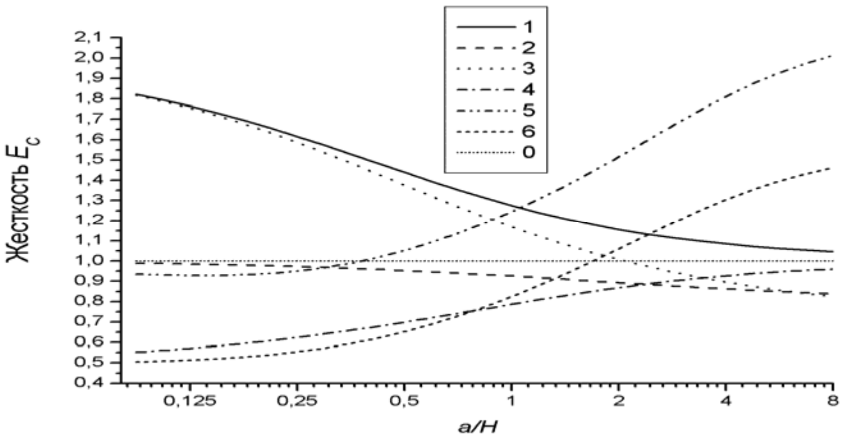

Рис. 2

Анализ поведения приведенных на рис. 2 кривых показывает, что изменение с глубиной коэффициента Пуассона существенно влияет на значение функции жесткости при больших зонах контакта.

На рис. 3 изображены отношения распределения контактных давлений тех же сочетаний законов неоднородности упругих параметров к однородному случаю. Анализируя показанные на рисунке кривые, можно отметить, что контактное давление при постоянном модуле Юнга и коэффициенте Пуассона, линейно возрастающем от значения 0.1 на поверхности до 0.2 на глубине, не влияет на характер распределения, а только снижает его значение (на 0.9).

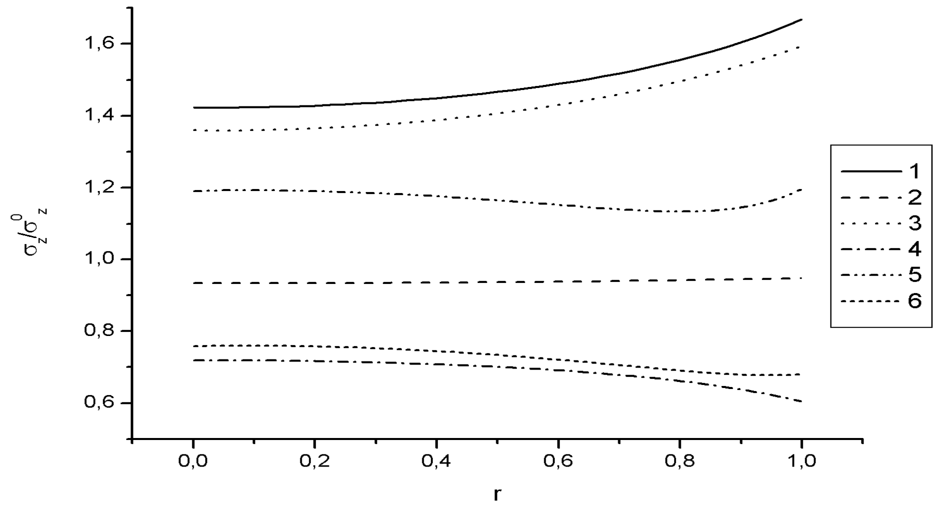

Рис. 3

Литература

1. Айзикович С.М., Кренев Л.И., Трубчик И.С. Асимптотическое решение задачи о внедрении сферического индентора в неоднородное по глубине полупространство // Изв. РАН. МТТ. 2000. № 5. С. 107–117.
2. Айзикович С.М., Александров В.М., Белоконь А.В., Трубчик И.С., Кренев Л.И. Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред. М.: Физматлит, 2006. 240 с.