

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О ВДАВЛИВАНИИ КОНУСА В ПОВЕРХНОСТЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЛА И ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В НАПЛЫВЕ

Третьяков А. А.,

аспирант, ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия»

tod.06@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача о вдавливании жесткого конуса в поверхность упругопластического тела и влияние начальных напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка. Приведены расчетная схема, конечно-элементная модель. Подобран способ задания начальных напряжений. Проведены расчеты для различных остаточных напряжений и получено уравнение, описывающее влияние остаточных напряжений на относительное изменение нормальных перемещений в наплыве. Построены линии уровней вертикальных перемещений вокруг контакта конуса и упругопластического тела. Анализ результатов расчетов показал, что остаточные напряжения оказывают значительное влияние на распределение нормальных перемещений вокруг отпечатка.

Ключевые слова. Контактная задача, конический индентор, остаточные напряжения, упругопластическое тело, конечно-элементная модель.

SIMULATION OF THE PROBLEM OF CONE INDENTATION IN THE SURFACE OF ELASTIC-PLASTIC BODY AND THE EFFECT OF RESIDUAL STRESSES ON THE DISTRIBUTION OF THE NORMAL DISPLACEMENTS IN THE INFLUX

Tretyakov A.,

Chelyabinsk State Agroengineering Academy

Abstract. This paper considers the problem of pressing hard cone surface elastic-plastic body and the effect of initial stress on the distribution of normal movement in the influx of the imprint. Shows the block diagram, the finite element model. Chosen method of specifying initial stress. Calculations are performed for different residual stresses and derive an equation that describes the effect of residual stresses on the relative change in the normal displacements in the influx. Line levels built around the vertical displacement of the cone and the contact of elastic-plastic body. Analysis of the results of the calculations showed that the residual stresses have a significant impact on the distribution of normal movement around the print.

Keywords: Contact problem, conical indenter, residual stress, elastic-plastic body, finite element model.

Основные практические направления исследований в области механики контактного взаимодействия относятся к проблемам трения, износа, разрушения контактирующих элементов, измерения твердости, механических свойств материалов и др. В связи с этим интенсивно выявляются и изучаются закономерности деформирования в различных видах контактных задач.

Неупругое контактное взаимодействие тел является существенно менее исследованной областью механики по сравнению с упругой задачей. Достаточно развиты решения для контакта идеально-упругопластических и идеально-жесткопластических тел [1]. Для упругопластического упрочняющегося материала решение задачи связано со значительными трудностями, связанными, в частности, с отсутствием информации о форме и размерах упругоплас-

тической границы. Поэтому основные результаты в данной задаче получены численными методами [2]. При этом основное внимание уделяется зарождению пластического течения, контактными напряжениями и усилиям, распределениям напряжений в контактирующих телах, геометрическим параметрам контакта. Количественные данные о деформированном состоянии поверхности в области контакта недостаточны. Это, в первую очередь, относится к геометрическим параметрам напыла, формирующегося вокруг отпечатка. Признавая наличие напыла, его подвергают анализу исключительно с точки зрения влияния на измеряемый диаметр отпечатка.

В связи с этим для описания механизма формирования напыла вокруг отпечатка, для выявления влияния различных факторов на его параметры, для качественного и количественного описания начального напряженного состояния необходимо проведение дополнительных исследований.

В настоящей работе представлены результаты моделирования задачи о вдавливании жесткого конуса в упругопластическое тело с использованием метода конечных элементов. Целью моделирования вдавливания конуса в упруго-пластичное тело является исследование основных геометрических характеристик перемещений и исследование влияния усилия вдавливания индентора и механических свойств материала.

Задача о вдавливании конуса в плоскую поверхность упругопластического тела рассматривается в цилиндрической системе координат (рис. 1).

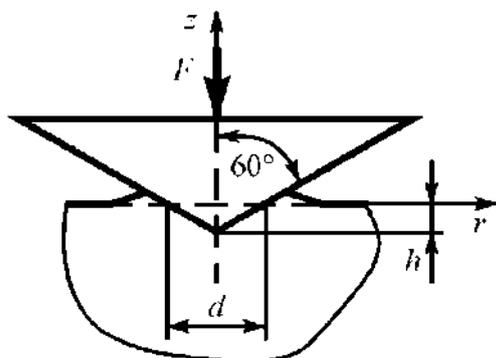


Рис. 1. Система координат в задаче о вдавливании конуса:
 h – глубина отпечатка,
 d – диаметр отпечатка

Характеристики контртела:

- форма поверхности – плоская;
- материал – упругопластический, упрочняющийся;
- модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;
- диаграмма деформирования материала – билинейная, описываемая пределом текучести σ_T , модулем упругости E и модулем упрочнения E_T (МПа).
- предел текучести материала $\sigma_T = 400$ МПа;
- модуль упрочнения материала $E_T = 8000$ МПа;

Характеристики индентора:

- тип – конус;
- угол при вершине 120° ;
- материал идеально упругий;
- модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Характеристики цикла нагружения модели: в начальный момент времени ($t_0 = 0$) конус контактирует с поверхностью по площадке радиусом $r_c \rightarrow 0$, нагрузка $F = 0$. В течение промежутка времени (t_0, t_1) нагрузка равномерно возрастает до значения F_{max} . Затем следует выдержка до момента времени t_2 и равномерная разгрузка.

Для данной задачи сила, действующая на индентор $F = 250$ Н.

Изменяемые параметры:

- предварительные напряжения – $-0,95\sigma_T; -0,475\sigma_T; +0,475\sigma_T; +0,95\sigma_T$;

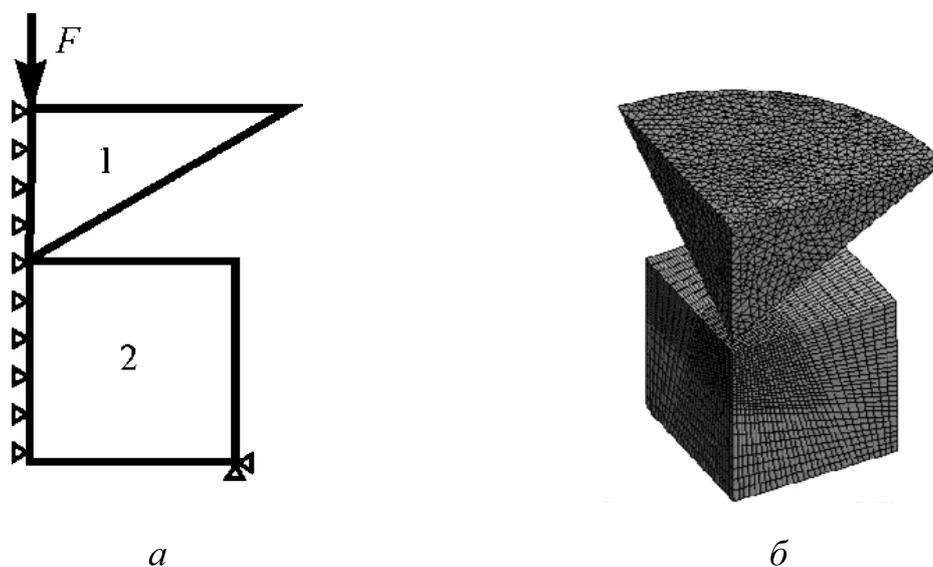


Рис. 2. Расчетная схема (а) и конечно-элементная сетка (б)

Задача смоделирована в трехмерной постановке. Расчетная схема и конечно-элементная разбивка представлены на рис. 2.

В модели использованы элементы нескольких типов: структурные (двумерные 4-х узловые) и контактные. Материал зоны 1 изотропный, упругий. В зоне 2, где происходит упругопластическое течение, материал упругопластический с билинейной диаграммой деформирования.

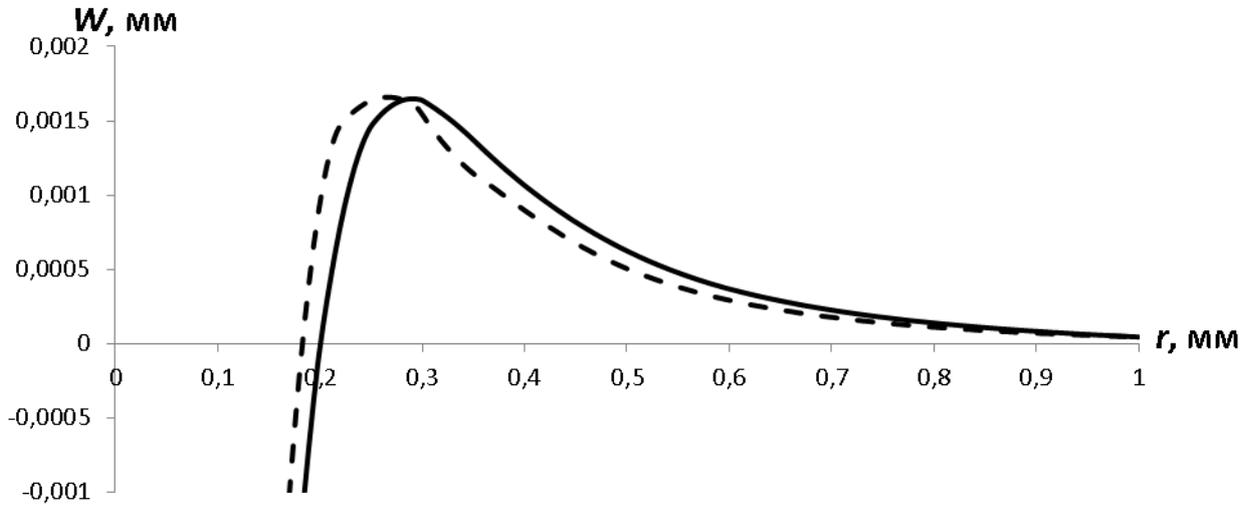
Важным параметром, влияющим на достоверность расчета, подробность получаемых полей напряжений и перемещений, устойчивость численного счета является размер конечного элемента. Для определения необходимой и достаточной густоты разбивки в зоне пластического течения исследовано влияние величины элемента и его формулировки на форму профиля перемещений вокруг отпечатка. Критерием необходимости и достаточности является сходимость формы профиля при измельчении разбивки. Для конструкционных сталей с билинейной диаграммой деформирования доступны две модели пластичности – с изотропным и кинематическим упрочнением. В контактной задаче возможно пластическое течение обратного знака в процессе разгрузки, поэтому использована модель пластичности

с кинематическим упрочнением. Достоинством изотропной модели упрочнения является более высокая скорость счета. Для контактной задачи, в которой возможно пластическое течение обратного знака в процессе разгрузки, необходим учет Баушингера, поэтому рекомендуется использовать модель пластичности с кинематическим упрочнением [2, 3].

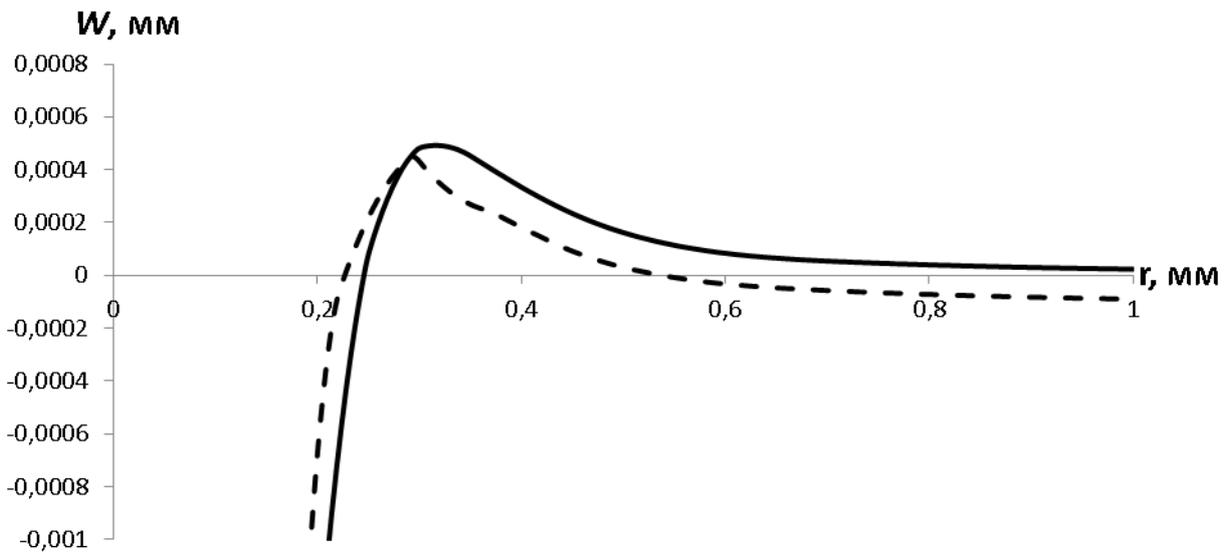
Начальные напряжения можно задавать различными способами, с целью подобрать наиболее подходящий проведена серия расчетов, в которых начальные напряжения задавались при помощи давления и температуры. Результаты некоторых показаны на рисунке 3.

Сравнение полученных данных показывает, что результаты отличаются не значительно в пределах 5-7%, а время расчета при задании начальных напряжений с помощью температуры в три раза превышает время расчета при задании начальных напряжений с помощью давления, что очень существенно. Дальнейшие расчеты проводились с помощью давления.

Остаточные напряжения в детали оказывают существенное влияние на распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка индентора (рис. 4). Сжимающие остаточные напряжения вызы-



a



б

Рис. 3 – *a* – Начальные напряжения $-0,95\sigma_t$;
б – Начальные напряжения $+0,475\sigma_t$ – давление, --- температура

вают увеличение максимального перемещения W_{\max} в наплыве, причем с ростом сжимающих напряжений это перемещение возрастает. Расстояние от центра отпечатка до точки с максимальным перемещением r_{\max} (радиус наплыва) при этом практически не изменяется. Растягивающие остаточные напряжения, наоборот, вызывают уменьшение максимального пе-

ремещения W_{\max} . С ростом растягивающих остаточных напряжений увеличивается радиус наплыва r_{\max} , профиль нормальных перемещений приобретает более пологую форму, а при приближении остаточных напряжений к пределу текучести материала перемещения в наплыве становятся отрицательными, радиус r_{\max} теряет физический смысл.

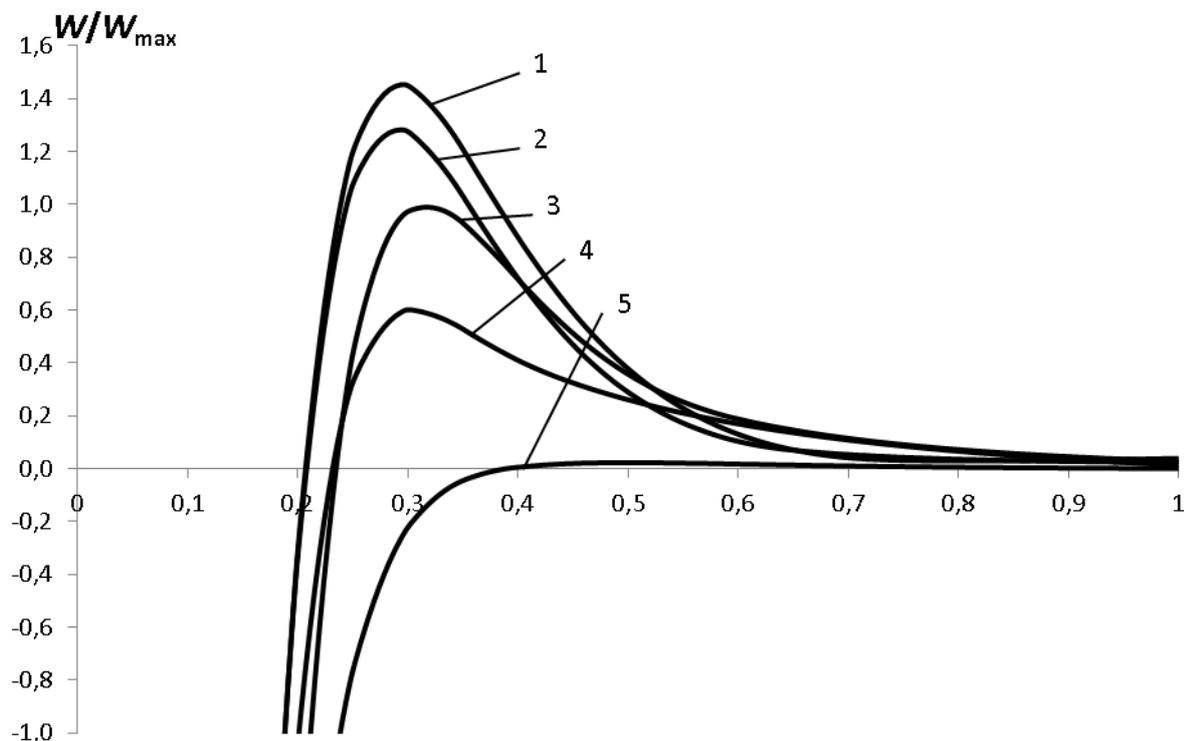


Рис. 4 – Влияние остаточных напряжений в контртеле на распределение нормальных перемещений в наплыве: 1 – $\sigma_{ост} = -0,95\sigma_T$; 2 – $\sigma_{ост} = -0,475\sigma_T$; 3 – $\sigma_{ост} = 0$; 4 – $\sigma_{ост} = +0,475\sigma_T$; 5 – $\sigma_{ост} = +0,95\sigma_T$

Следует отметить, что при изменении остаточных напряжений от $-\sigma_T$ до $+\sigma_T$ материала детали существенно изменяется глубина отпечатка, а диаметр отпечатка изменяется незначительно, в пределах 3...5% от его величины, полученной для ненапряженного материала.

Для количественного описания зависимости перемещения W от величины остаточных напряжений целесообразно использовать не абсолютное его значение или отношение W/W_{max} , а относительное изменение $\Delta W/W_{max} = (W - W_{max})/W_{max}$, которое показывает связь между изменениями перемещений и остаточными напряжениями в независимом от свойств материала детали виде (рис. 5). Уравнение, описывающее влияние остаточных напряжений на это относительное изменение перемещения имеет вид

$$\frac{\Delta W}{W_{max}} = 1 - e^{\frac{7\sigma_{ост}}{5\sigma_T}} \quad (1)$$

Уравнение (1) показывает, что относительное изменение перемещения в наплыве в точках на фиксированном расстоянии $r = 1,33 r_{отт}$ от центра отпечатка зависит только от остаточных напряжений. Для данного материала оно учитывает все возможные варианты – изменение диаметра отпечатка (через величину перемещения W_{max}), величину и знак остаточных напряжений. Погрешность описания расчетных данных уравнением (1) не превышает по абсолютному значению 9,7%.

Для наглядности влияния остаточных напряжений восстановлена поверхность наплыва (рис. 6)

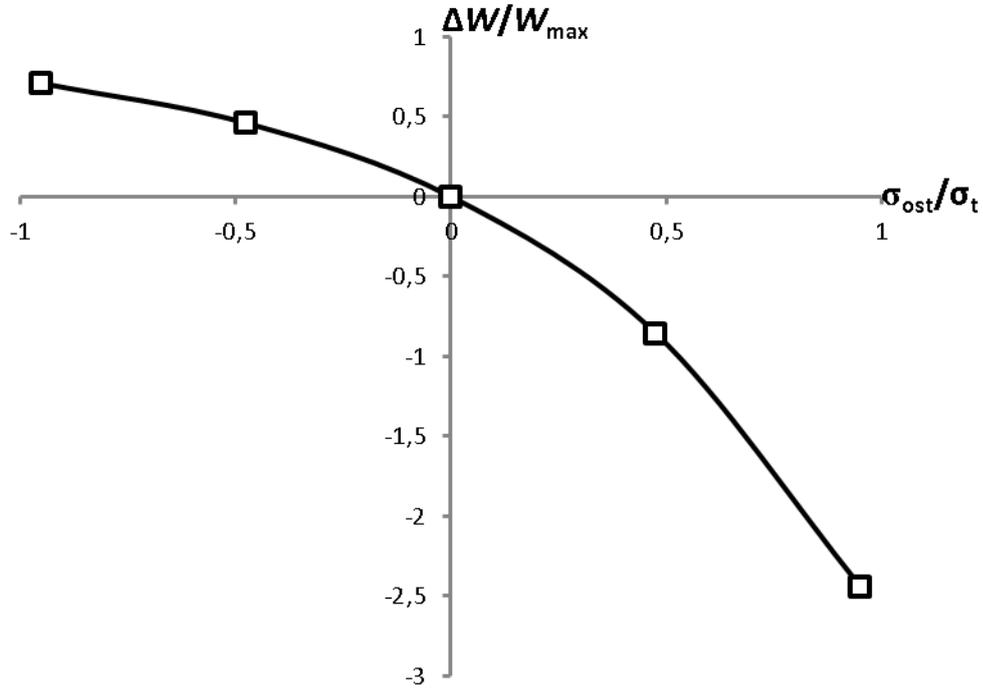
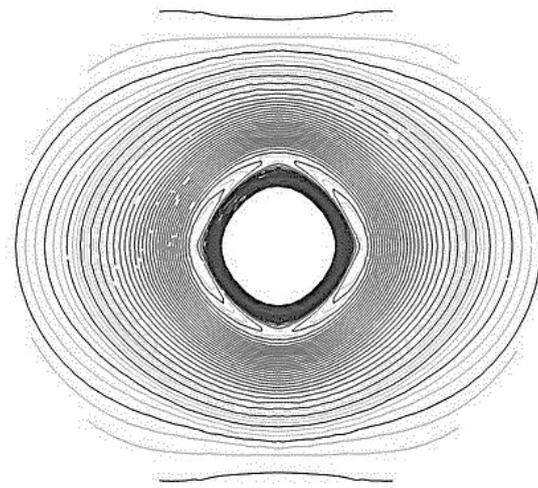


Рис. 5 – Зависимость разности перемещений ΔW от остаточных напряжений в детали

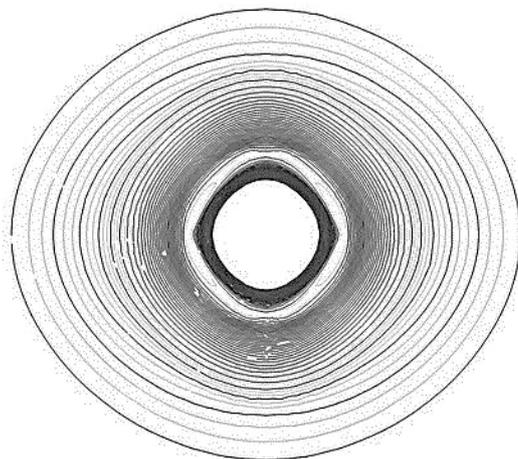


Рис. 6 – Образование «седла» в наплыве отпечатка при действии сжимающих или растягивающих остаточных напряжений

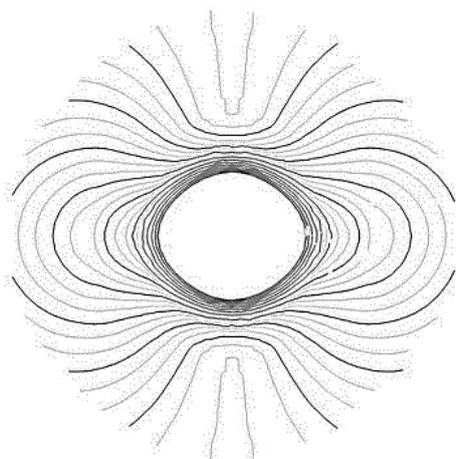
Получены карты уровней для пяти рассмотренных остаточных напряжений (рисунок 7).



$$a - \sigma^{\text{ост}} = -0,95\sigma_T$$



$$b - \sigma^{\text{ост}} = -0,475\sigma_T$$



$$v - \sigma^{\text{ост}} = +0,95\sigma_T$$

Рис. 7. Карты уровней нормальных перемещений вокруг отпечатка для пяти остаточных напряжений.

Анализ результатов расчетов показал, что остаточные напряжения оказывают значительное влияние на распределение нормальных перемещений вокруг отпечатка. С помощью уравнения (1), зная относительные изменения нормальных перемещений и предел текучести материала, можно определить остаточные напряжения.

Список литературы

1. А.с. 1158855 СССР, МКИ G 01 В 5/30. Способ оценки остаточных напряжений / О.П. Осташ, Б.М. Зайдель, В.Т. Жмур-Клименко // Открытия. Изобретения.– 1985.– №20.
2. Качанов Л.М., Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
3. Джонсон К., Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
4. Работнов Ю.Н., Механика деформируемого твердого тела: учеб. пособие. М.: Наука, 1988. 712 с.
5. Филин А.П., Прикладная механика твердого деформируемого тела. М.: Наука, 1975. Т. 1. 832 с.
6. Смирнов С.В., Экземплярова Е.О. Учет различных факторов при моделировании внедрения конического индентора в упругопластический материал / Ресурс и диагностика материалов и конструкций: мат-лы IV рос. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2009.
7. Коновалов Д.А., Разработка методики восстановления кривой деформационного упрочнения металлических материалов по диаграммам вдавливания конических инденторов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2007.
8. Игнатъев А.Г., Расчет остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с плоской поверхностью контртела. Сообщение 1. Разработка конечно-элементной модели и основные закономерности // Современные технологии и бизнес: сб. науч. трудов.– Челябинск: ЧНЦ РАЕН, 2006.– Вып.1.– С. 49-60.
9. Hardy C., Elastoplastic indentation of a half-space by a rigid sphere / С.Hardy, С.N.Baronet, G.V.Tordion // J. Numerical Methods in Engng.– 1971.– №3.– P. 451.
10. Jackson R., A finite element study of the residual stress and deformation in hemispherical contacts / R.Jackson, I.Chusoipin, I.Green // J. of Tribology.– 2005.– v.127, №7.– P. 484-493.
11. Игнатъев, А.Г. Метод измерения остаточных напряжений на основе упругопластического контактного взаимодействия // Вестник ЧГАУ.– 2007.– Вып. 50.– С. 51-59.
12. Игнатъев, А.Г. Расчет остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с плоской поверхностью контртела. Сообщение 2. Влияние механических свойств материала на диаметр остаточного отпечатка / А.Г.Игнатъев // Современные технологии и бизнес: сб. науч. трудов.– Челябинск: ЧНЦ РАЕН, 2006.– Вып. 1.– С. 61-70.