

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ НАПЛЫВА ПРИ ВДАВЛИВАНИИ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЛА

Третьяков А.А.

ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», Челябинск, Россия (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 75), e-mail: tod.06@mail.ru

В работе рассматривается задача о вдавливании жесткого конуса в поверхность упругопластического тела. Обозначена актуальность исследования. Приведены расчетная схема, конечно-элементная модель. Проведена проверка контактного алгоритма. Качественное и количественное совпадение численного и теоретического решений позволили заключить об адекватности используемого контактного алгоритма и применимости его для решения задачи. Проведены расчеты для различных комбинаций свойств материалов. Приведены некоторые графики геометрии профиля напыла, который остается на поверхности упругопластического тела после снятия нагрузки с конического индентора. Проведена аппроксимация полученных данных и получена четырехпараметрическая функция, описывающая профиль напыла.

Ключевые слова: конический индентор, упругопластическое тело, контактная задача.

RESEARCH OF THE PROFILE OF FLOW AT CONIC INDENTATION IN FLAT SURFACE OF THE ELASTIC-PLASTIC BODY

Tretyakov A.A.

Chelyabinsk State Agroengineering Academy, Chelyabinsk, Russia (454080, Chelyabinsk, Lenina Ave, 112), e-mail: tod.06@mail.ru

This paper considers the problem of cone indentation in the surface of elastic-plastic body. The paper presents the relevance of the research. Are shown design scheme and finite-element model. Made verification of the contact algorithm. Qualitative and quantitative agreement between the numerical and theoretical solutions have allowed to conclude on the adequacy of the used contact algorithm and its applicability to solve the problem. Calculations were made for various combinations of material properties. Are some of the graphics profile geometry beading, which remains on the surface of the elastic-plastic body after removal of the load with a conical indenter. Conducted approximation of the data obtained and the four-parameter function describing the profile of the beading.

Keywords: conical indenter, elastic-plastic body, contact problem.

Введение

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 упругопластической границы. Поэтому основные результаты в данной задаче получены численными методами [4]. При этом основное внимание уделяется зарождению

пластического течения, контактными напряжениями и усилиями, распределениям напряжений в контактирующих телах, геометрическим параметрам контакта. Количественные данные о деформированном состоянии поверхности в области контакта весьма недостаточны. Это, в первую очередь, относится к геометрическим параметрам наплыва, формирующегося вокруг отпечатка. Признавая наличие наплыва, его подвергают анализу исключительно с точки зрения влияния на измеряемый диаметр отпечатка [2].

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

Описание задачи и математическое моделирование

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

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).

Характеристики индентора:

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

Входные варьируемые параметры:

- усилие вдавливания F , приложенное к индентору;
- механические свойства материала контртела в соответствии с принятой билинейной диаграммой деформирования – предел текучести σ_T , модуль упрочнения E_T .

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 следуют выдержка до момента времени t_2 и равномерная разгрузка.

Моделирование внедрения конуса в упругопластический материал выполнено в упрощенной осесимметричной постановке [5; 7]. Расчетная схема и конечно-элементная разбивка представлены на рис. 1.

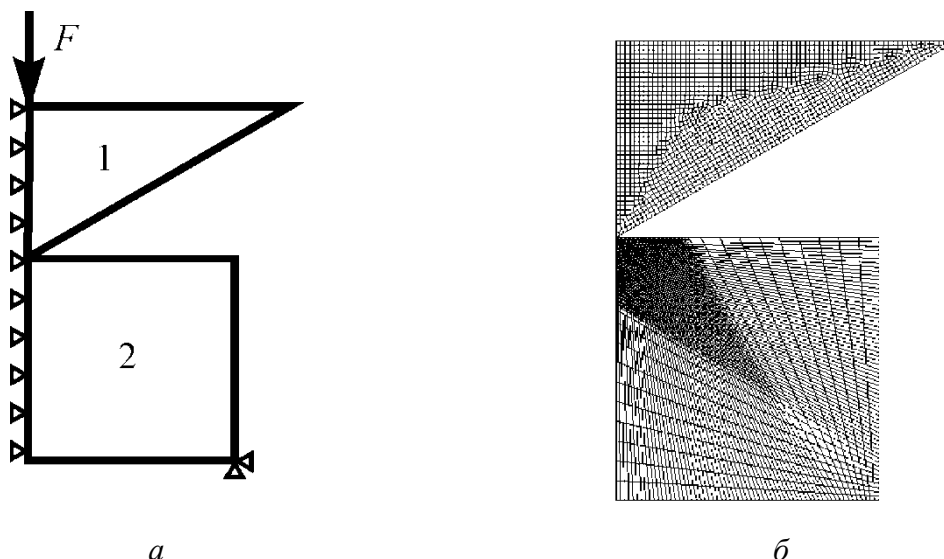


Рис. 1. Расчетная схема (*a*) и конечно-элементная сетка (*б*)

В модели использованы элементы нескольких типов: структурные (двумерные 4-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; 4].

Проверка контактного алгоритма

С целью верификации контактного алгоритма использовано теоретическое решение задачи о сосредоточенной силе, действующей на плоскость, ограничивающую пространство [8].

На рис. 2 представлено сравнение результатов теоретического и численного решений – распределения напряжений $\sigma_r(r)$ и $\sigma_\theta(r)$ на поверхности полупространства (при $z = 0$) и $\sigma_z(z)$ на оси действия силы (при $r = 0$). Качественное и количественное совпадение численного и теоретического решений позволили сделать заключение об адекватности используемого контактного алгоритма и применимости его для решения задачи. Адекватность самой расчетной модели проверена и подтверждена при качественном сравнении получаемых расчетных данных (распределений напряжений) с данными работ [4; 6; 9; 10].

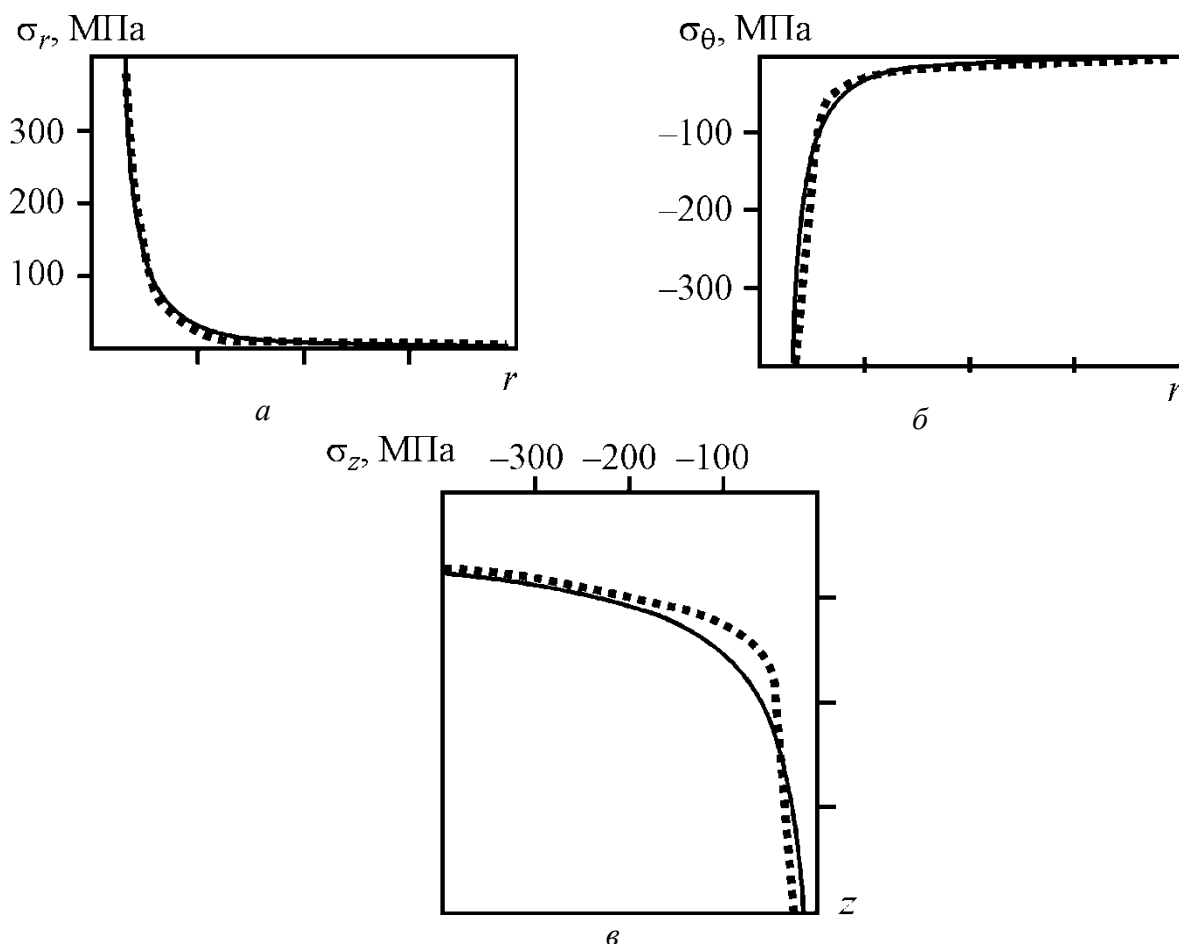


Рис. 2. Верификация контактного алгоритма: *a* – напряжения σ_r ; *б* – напряжения σ_θ ; *в* – напряжения σ_z ; сплошная линия – теоретическое решение; прерывистая линия – решение МКЭ

Программа исследования

Матрица исследования деформированного состояния поверхности вокруг отпечатка индентора для ненапряженной однородной детали представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Матрица исследования

Предел текучести σ_T , МПа	Модуль упрочнения E_T , МПа			
	$0,5 \cdot 10^4$	$0,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$
250	•	•	•	•
400	•	•	•	•
800	•	•	•	•
1000	•	•	•	•

Для каждой комбинации предела текучести и модуля упрочнения материала проведена серия расчетов с разными величинами усилия вдавливания индентора. Выпучивание (перемещения с положительным знаком) появляется на завершающем этапе цикла. При полном снятии нагрузки профиль перемещений включает отпечаток и область выпучивания. Перемещение поверхности упругопластического тела вокруг отпечатка и образование наплыва для предела текучести $\sigma_T = 250$ и модуля упрочнения $E_T = 5000$ Мпа представлено на рис. 3.

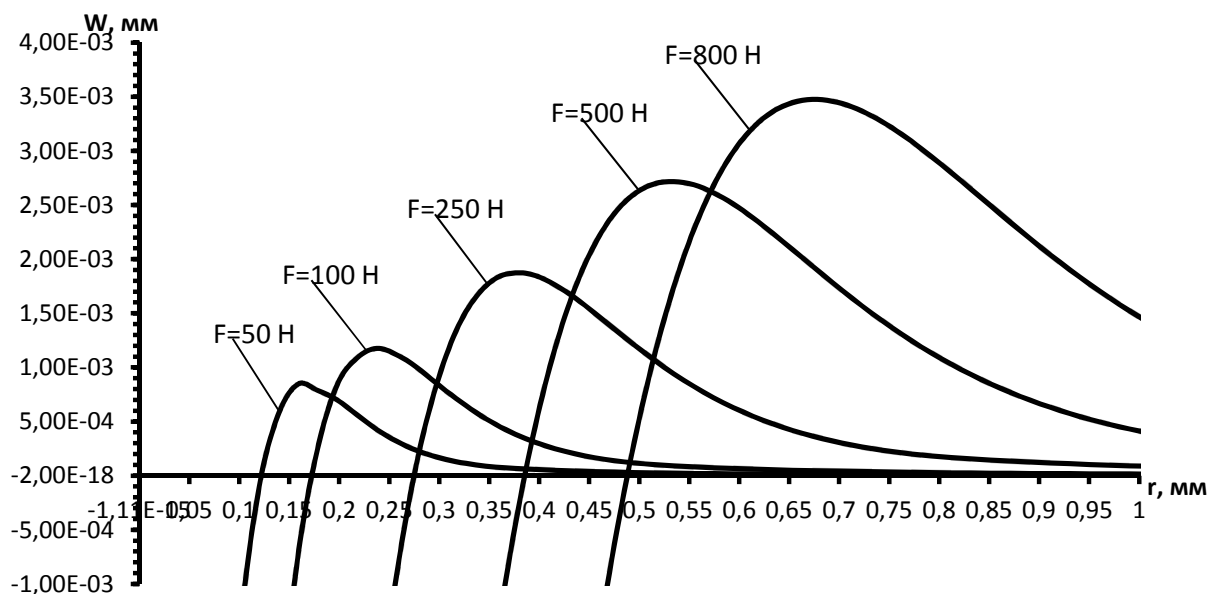


Рис. 3. Распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора при различных величинах усилия вдавливания

При полном снятии нагрузки максимальное нормальное перемещение W_{max} в наплыве находится на расстоянии r_{max} от оси z . В дальнейшем для обозначения этого характерного расстояния будем использовать термин «радиус наплыва».

Математическое описание профиля отпечатка

Для определения функции профиля отпечатка использована программа для анализа научных и статистических данных. Так как наибольший интерес в исследовании отпечатка представляет область $r > r_{\max}$, в исследовании принято $r > 0,95r_{\max}$. Регрессионный анализ расчетных данных проведен при последовательном переборе всех возможных функций. Наилучшая сходимость и наиболее близкая к расчетным данным аппроксимация получена при использовании четырехпараметрической «Peak: Pseudo-voigt» функции

$$W(r) = a \cdot \left(\frac{c}{\left(1 + \left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2\right)} + (1-c) \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2} \right).$$

Сравнение результатов расчетов и аппроксимации для предела текучести $\sigma_T = 250$ и модуля упругости $E_T = 5000$ МПа представлены на рис. 4.

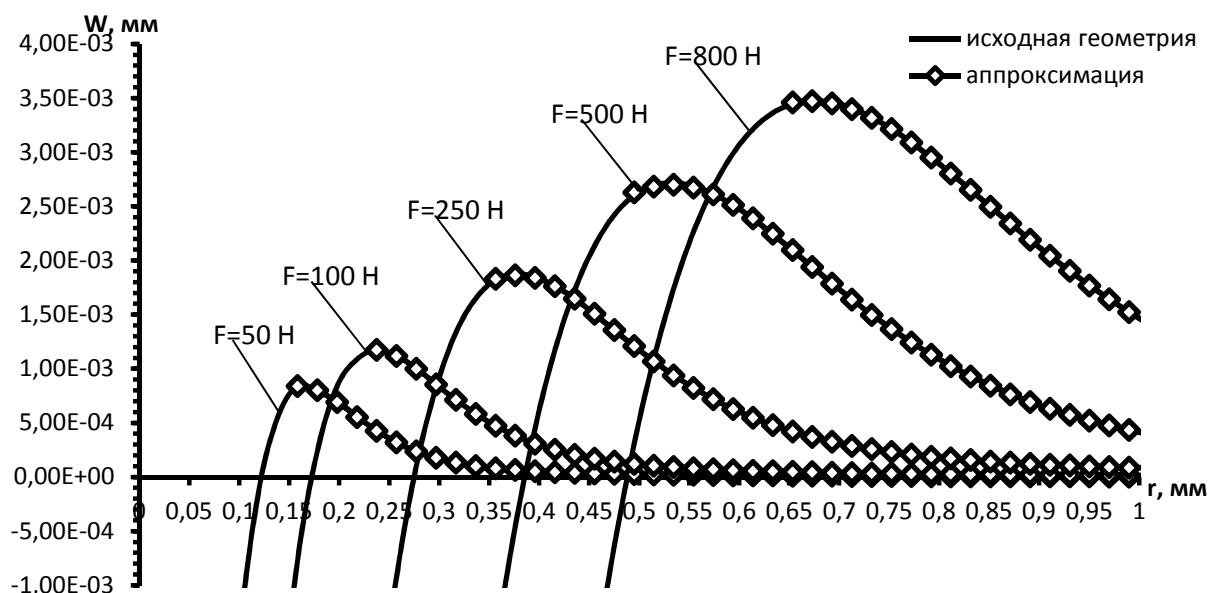


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов и аппроксимации

Результаты аппроксимации рассмотренных наборов свойств материала и усилий вдавливания позволили установить, что параметр a при возрастании σ_T и E_T снижается, параметр b возрастает, параметр x_0 практически не зависит от модуля упругости материала, а параметр c во всех исследованных вариантах близок к 1. На рис. 5 представлены графики изменения перечисленных параметров в зависимости от свойств материала тела.

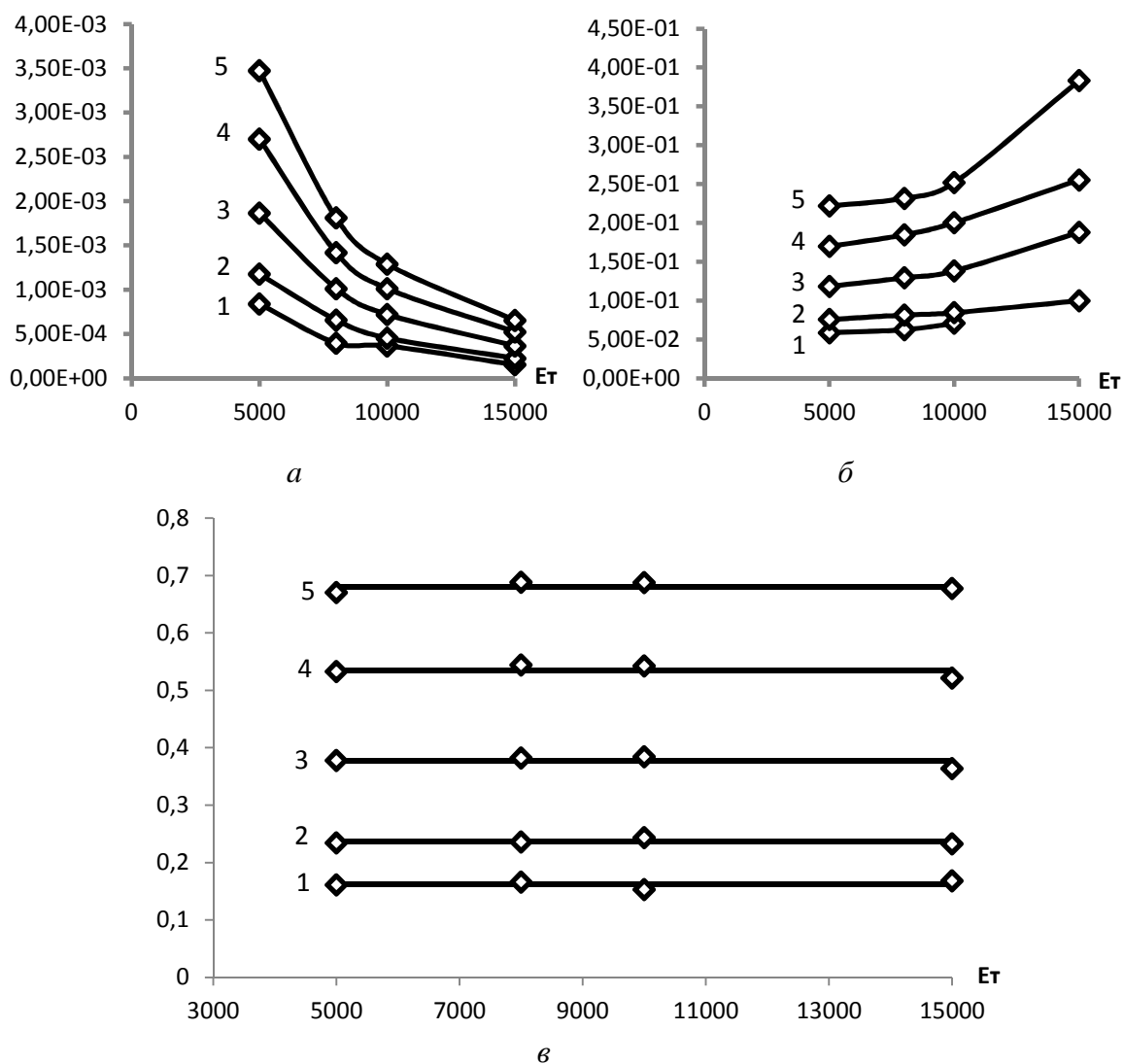


Рис. 5. Характер изменения параметров математического описания профиля наплыва в зависимости от свойств материала тела: a – параметр a ; b – параметр b ; $в$ – параметр x_0 .

1) $F=50$ Н, 2) $F=100$ Н, 3) $F=250$ Н, 4) $F=500$ Н, 5) $F=800$ Н

Заключение. В результате проведенных исследований разработана и верифицирована конечноэлементная модель вдавливания конического индентора в поверхность упругопластического тела. Исследована кинетика изменения распределения нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка в зависимости от набора механических свойств материала тела. Установлено, что профиль наплыва при вдавливании конического индентора в поверхность упругопластического тела можно описать на участке $r > 0,95r_{\max}$ с помощью четырехпараметрической функции, параметры которой зависят от свойств материала. В дальнейшем это обеспечит возможность построения геометрии наплыва по данным о свойствах материала с учетом значения усилия вдавливания индентора.

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. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М. : Мир, 1989. - 510 с.
3. Игнатъев А.Г. Диагностирование поверхностных остаточных напряжений в металлических покрытиях, нанесенных при восстановлении деталей : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Челябинск, 2008. - 40 с.
4. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. - М. : Наука, 1969. - 420 с.
5. Коновалов Д.А. Разработка методики восстановления кривой деформационного упрочнения металлических материалов по диаграммам вдавливания конических инденторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007.
6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие. - М. : Наука, 1988. - 712 с.
7. 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.
8. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. - М. : Наука, 1975. - Т. 1. - 832 с.
9. Hardy C. Elastoplastic indentation of a half-space by a rigid sphere / C. Hardy, C.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.

Рецензенты:

Игнатъев А.Г., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов», ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», г. Челябинск.

Ерофеев В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология и организация технического сервиса», ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», г. Челябинск.