

УДК 539.378

ВЛИЯНИЕ УСИЛИЯ ВДАВЛИВАНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАПЛЫВА ПРИ ВДАВЛИВАНИИ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА

Третьяков А.А.

*ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия»,
Челябинск, e-mail: tod.06@mail.ru*

В работе рассмотрена задача о вдавливании конического индентора в плоскую поверхность упруго-пластического тела. Исследовано влияние усилия вдавливания и свойств материала контртела на геометрические параметры напыла вокруг остаточного отпечатка. Обозначена актуальность исследования. Представлена программа исследований. Приведены результаты расчетов для различных комбинаций свойств материала. Представлены основные графики зависимостей диаметра и максимальных перемещений в напыле от усилия вдавливания конуса и максимального перемещения от диаметра отпечатка. Получены выражения, описывающие закономерности образования диаметра и формирования напыла остаточного отпечатка. В результате проведенных исследований разработана математическая модель, описывающая закономерности формирования напыла вокруг отпечатка конического индентора с учетом параметров нагружения и механических свойств материала детали.

Ключевые слова: конический индентор, упругопластическое тело, контактная задача

INFLUENCE OF FORCE OF DENTING AND PROPERTIES OF THE MATERIAL ON GEOMETRICAL PARAMETERS OF FLOW AT PENETRATION OF THE CONE INDENTER

Tretyakov A.A.

Chelyabinsk State Agroengineering Academy, Chelyabinsk, e-mail: tod.06@mail.ru

This paper considers the problem of cone indentation in the surface of elastic-plastic body and influence of force of denting and properties of the material on geometrical parameters of flow. The paper presents the relevance of the research. The program of researches is presented. Calculations were made for various combinations of material properties. The basic schedules of dependences of diameter and the maximum displacement in a flow from force of denting of a cone and the maximum displacement from diameter of an imprint are presented. The basic expressions presenting regularity of formation of diameter and formation of a flow of the residual imprint are presented. As a result of the spent researches the mathematical model presenting regularity of formation of a flow around an imprint of the conical indenter taking into account parameters of a loading and mechanical properties of a material of a detail is gained.

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

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-упруго-пластических 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 тече-

ния, контактными напряжениями и усилиями, распределением 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 [2].

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.

Задача о вдавливании индентора в плоскую поверхность упругопластического тела рассматривается в цилиндрической системе координат (рис. 1). Оси r и θ лежат в плоскости, совпадающей с поверхностью

контртела, ось z направлена перпендикулярно плоскости контртела. Начало координат находится в точке начального контакта до приложения контактной нагрузки [7].

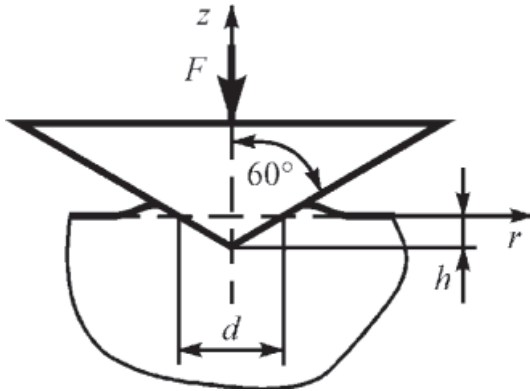


Рис. 1. Система координат в задаче о вдавливании конического индентора

Моделирование задачи о вдавливании жесткого конуса в упругопластическое тело с использованием метода конечных элементов и проверка контактного алгоритма представлены в работе [5]. Целью моделирования вдавливания конуса в упругопластическое тело является исследование влияния усилия вдавливания индентора и свойств материала детали (предел текучести σ_T и модуль упрочнения E_T) на основные геометрические характеристики остаточного отпечатка (диаметр d и максимальные нормальные перемещения в наплыве W).

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

Для каждого из материалов проведена серия расчетов с различными величинами усилия вдавливания. Фиксировали: диаметр остаточного отпечатка d , величину максимального нормального перемещения в наплыве W_{\max} , координату точки с максимальным нормальным перемещением r_{\max} . На основании этих данных для каждой комбинации механических свойств материала с использованием регрессионного анализа определяли зависимости $d(F)$, $W_{\max}(d)$, $W_{\max}(F)$. Из полученных зависимостей выведены зависимости $d(F, \sigma_T, E_T)$, $W_{\max}(d, \sigma_T, E_T)$, $W_{\max}(F, \sigma_T, E_T)$, которые впоследствии были представлены в относительном виде $d_2/d_1 = f(\sigma_{T1}, \sigma_{T2}, E_{T1}, E_{T2})$, $W_{\max2}/W_{\max1} = f(\sigma_{T1}, \sigma_{T2}, E_{T1}, E_{T2})$. Т.е. были получены выражения, с помощью которых можно определить изменение геометрических параметров d и W_{\max} для материала с индексом 2 по отношению к некоему материалу с индексом 1. Такой подход можно считать оправданным, поскольку данные для базового материала получаются экспериментальным путем. Зависимости в относительном виде и получение данных для какого-либо материала в сравнении с базовым позволит получить более точный результат, нежели прямое определение параметров по приближенным зависимостям.

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	•	•	•	•

Влияние усилия вдавливания индентора на геометрические характеристики наплыва представлено на рис. 2. Увеличение усилия вдавливания индентора F вызывает рост диаметра отпечатка d (рис. 2, а) при неизменных свойствах материала (значения предела текучести σ_T и модуля упрочнения E_T), а также увеличение максимального нормального перемещения в наплыве W_{\max} (рис. 2, б). Соответственно, увеличение диаметра отпечатка приводит к возрастанию перемещения W_{\max} (рис. 2, в).

Общие закономерности изменения диаметра отпечатка для всех исследованных комбинаций свойств материалов следующие [3, 6]:

1) связь между усилием вдавливания F и диаметром отпечатка d с погрешностью, не превышающей 1,5% по отношению к данным расчетов, описывается регрессионной зависимостью

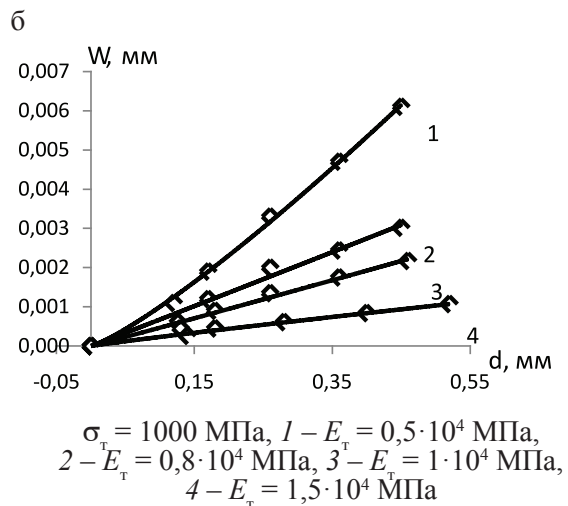
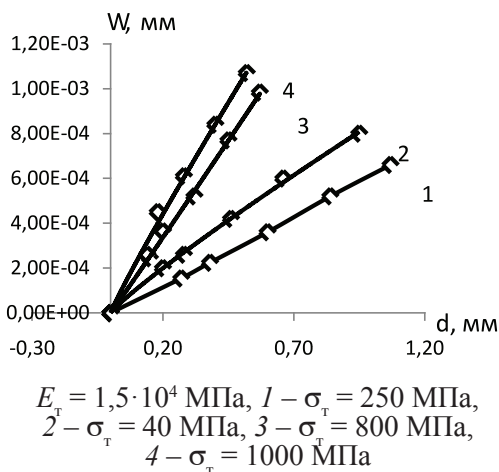
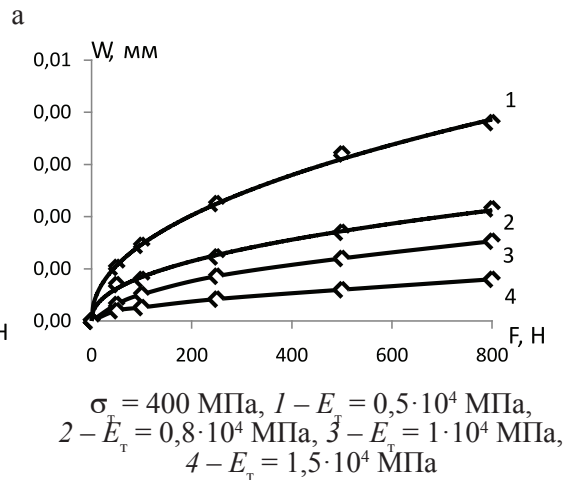
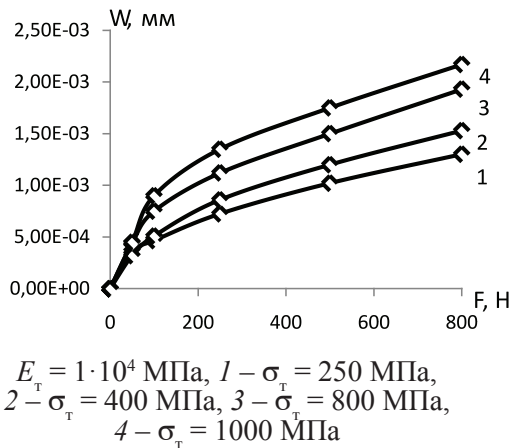
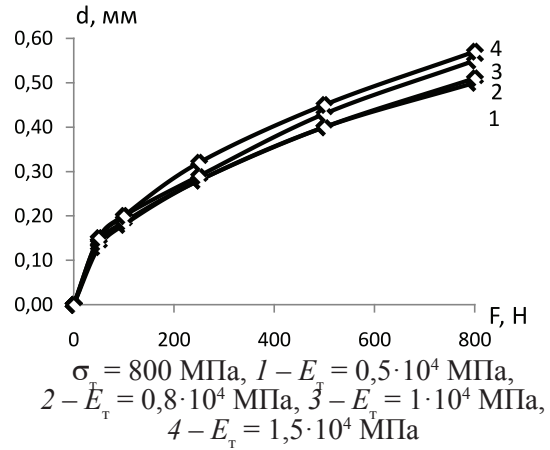
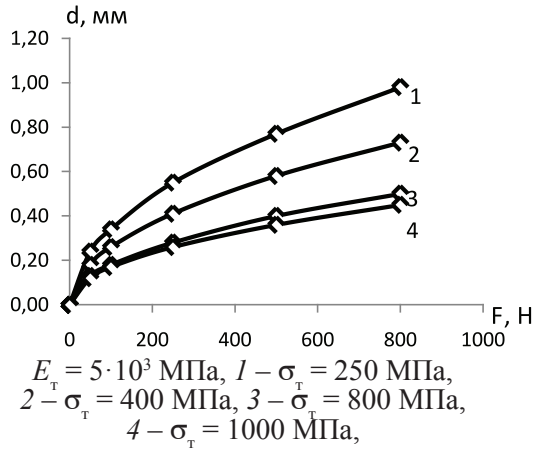
$$d(F) = d_{0F} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{n_d}, \quad (1)$$

где d_{0F} – условный диаметр отпечатка (мм), возникающий при единичном усилии вдавливания F_0 , равном 1 Н;

2) влияние механических свойств на величину показателя степени n_d в уравне-

нии (1) незначительно, вполне допустимо принять его постоянным;

3) влияние механических свойств материала на диаметр отпечатка проявляется в изменении условного диаметра d_{0F} (табл. 2).



В

Рис. 2. Влияние усилия вдавливания индентора:

а – влияние усилия вдавливания индентора на диаметр отпечатка; б – влияние усилия вдавливания индентора на максимальное перемещение в наплыве; в – влияние диаметра отпечатка на максимальное перемещение в наплыве

Таблица 2

Коэффициенты уравнений регрессии, описывающих зависимость диаметра отпечатка от усилия вдавливания при разных механических свойствах материала контртела

Предел текучести σ_r , МПа	$d(F)$, мм							
	Модуль упругости E_r , МПа							
	$0,5 \cdot 10^4$		$0,8 \cdot 10^4$		$1,0 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$	
	d_{0F}	n_d	d_{0F}	n_d	d_{0F}	n_d	d_{0F}	n_d
250	$4,69 \cdot 10^{-2}$	0,45	$4,90 \cdot 10^{-2}$	0,45	$4,98 \cdot 10^{-2}$	0,45	$5,14 \cdot 10^{-2}$	0,45
400	$3,52 \cdot 10^{-2}$	0,45	$3,74 \cdot 10^{-2}$	0,45	$3,80 \cdot 10^{-2}$	0,45	$4,24 \cdot 10^{-2}$	0,45
800	$2,42 \cdot 10^{-2}$	0,45	$2,45 \cdot 10^{-2}$	0,45	$2,62 \cdot 10^{-2}$	0,45	$2,74 \cdot 10^{-2}$	0,45
1000	$2,20 \cdot 10^{-2}$	0,45	$2,20 \cdot 10^{-2}$	0,45	$2,23 \cdot 10^{-2}$	0,45	$2,47 \cdot 10^{-2}$	0,45

Относительное изменение условного диаметра отпечатка d_{0F} в зависимости от соотношений механических свойств материалов имеет вид

$$\frac{d_{0F2}}{d_{0F1}} = \left(\frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{r2}} \right)^{\frac{5}{9}} \cdot \left(\frac{E_{r1}}{E_{r2}} \right)^{\frac{1}{8}}, \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 имеют отношение к материалам со свойствами (σ_{r1}, E_{r1}) и (σ_{r2}, E_{r2}) .

Если в качестве материала 1 использовать условный материал с пределом текучести $\sigma_r = 1$ МПа и модулем упругости $E_r = 1$ МПа, для которого при аппроксимации расчетных данных получено значение условного диаметра отпечатка $d_{0Fy} = 0,31$ мм при усилии вдавливания индентора $F_y = 1$ Н, то диаметр отпечатка для искомого материала определится как

$$d = d_{0Fy} \cdot \left(\frac{\sigma_{ry}}{\sigma_r} \right)^{\frac{5}{9}} \cdot \left(\frac{E_{ry}}{E_r} \right)^{\frac{1}{8}} \cdot \left(\frac{F}{F_y} \right)^{\frac{4}{9}}. \quad (3)$$

Преобразуя выражения (2) и (3), получим:

1) отношение диаметров отпечатков и пределов текучести позволяет определить отношение модулей упругости:

$$\left(\frac{E_{r1}}{E_{r2}} \right) = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^8 \cdot \left(\frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{r1}} \right)^{4,4}; \quad (4)$$

2) по измеренному диаметру отпечатка, известной нагрузке вдавливания и известному пределу текучести можно определить модуль упругости материала с погрешностью 10%:

$$E_r = E_{ry} \cdot \left(\frac{d_{0Fy}}{d} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{r1}} \right)^{4,4} \cdot \left(\frac{F}{F_y} \right)^{1,45}. \quad (5)$$

При анализе влияния механических свойств материала детали на нормальные перемещения W в наплыве имеет смысл рассматривать зависимость нормальных перемещений в наплыве в первую очередь от диаметра отпечатка. Исключение из разрешающих уравнений силового фактора целесообразно с практической точки зрения.

Для всех исследованных материалов связь между максимальным перемещением в наплыве W_{\max} и диаметром отпечатка с погрешностью, не превышающей 3%, описывается регрессионной зависимостью

$$W_{\max}(d) = W_{0d} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_w}, \quad (6)$$

где W_{0d} – условное максимальное перемещение (мм), возникающее при диаметре отпечатка $d_0 = 1$ мм. Влияние механических свойств материала (σ_r и E_r) на высоту наплыва проявляется через изменение условного максимального перемещения W_{0d} и показателя степени n_w (табл. 3).

Изменение условного перемещения W_{0d} и показателя степени n_w в зависимости от предела текучести и модуля упругости показано на рис. 3.

Данные, приведенные в табл. 3 и на рис. 3, показывают, что при анализе влияния механических свойств на максимальные нормальные перемещения в наплыве необходимо учитывать как изменение условного перемещения W_{0d} так и изменение показателя степени n_w . Общую тенденцию относительного изменения условного перемещения W_{0d} и показателя степени n_w в зависимости от соотношения механических свойств материалов описывают приближенные выражения

$$\frac{W_{0d2}}{W_{0d1r2}} = \left(\frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{r2}} \right)^{13} \cdot \left(\frac{E_{r1}}{E_{r2}} \right)^{\frac{7}{4}}; \quad (7)$$

$$\frac{n_{0w2}}{n_{0w1r2}} = \left(\frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{r2}} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left(\frac{E_{r1}}{E_{r2}} \right)^{\frac{2}{13}}, \quad (8)$$

где индексы 1 и 2 имеют отношение к материалам со свойствами (σ_{r1}, E_{r1}) и (σ_{r2}, E_{r2}) .

Анализ результатов расчетов показал, что преобразование выражений (7) и (8) при дальнейшем регрессионном анализе позволяют определить изменение отношений условных перемещений, зависимость абсолютной величины условного перемещения W_{0d} от механи-

ческих свойств материала, изменение отношения показателей степени n_{w2}/n_{w1} , зависимость

абсолютного значения показателя степени n_w от механических свойств материала.

Таблица 3

Коэффициенты уравнений регрессии в виде (6), описывающих зависимость максимального перемещения от диаметра отпечатка при разных механических свойствах материала контртела

Предел текучести σ_T , МПа	$W_{max}(d)$, мм							
	Модуль упругости E_T , МПа							
	$0,5 \cdot 10^4$		$0,8 \cdot 10^4$		$1,0 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$	
	W_{0d}	n_w	W_{0d}	n_w	W_{0d}	n_w	W_{0d}	n_w
250	$3,54 \cdot 10^{-3}$	1,03	$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,96	$1,23 \cdot 10^{-3}$	0,91	$5,83 \cdot 10^{-4}$	0,79
400	$5,59 \cdot 10^{-3}$	1,07	$2,82 \cdot 10^{-3}$	1,01	$1,89 \cdot 10^{-3}$	0,97	$8,38 \cdot 10^{-4}$	0,87
800	$1,31 \cdot 10^{-2}$	1,16	$6,01 \cdot 10^{-3}$	1,12	$3,84 \cdot 10^{-3}$	1,10	$1,75 \cdot 10^{-3}$	1,03
1000	$1,61 \cdot 10^{-2}$	1,21	$8,21 \cdot 10^{-3}$	1,18	$5,64 \cdot 10^{-3}$	1,16	$2,31 \cdot 10^{-3}$	1,10

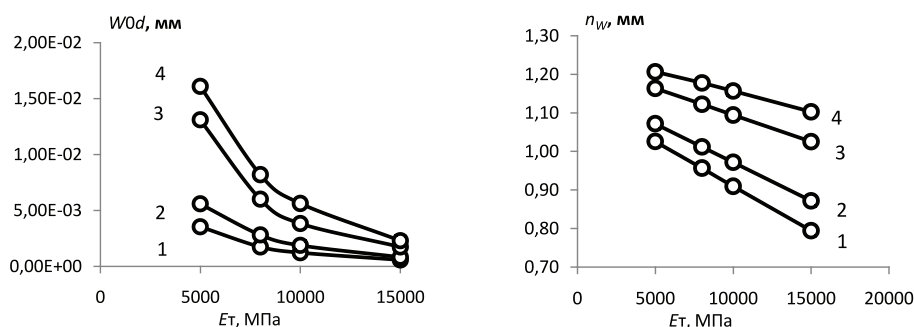


Рис. 3. Зависимость условного перемещения W_{0d} и показателя степени n_w от механических свойств материала:
 1 – $\sigma_m = 250$ МПа; 2 – $\sigma_m = 400$ МПа; 3 – $\sigma_m = 800$ МПа; 4 – $\sigma_m = 1000$ МПа

Закключение

В результате проведенных исследований получена математическая модель, описывающая закономерности формирования напыла вокруг отпечатка конического индентора с учетом параметров нагружения и механических свойств материала детали. Установлены закономерности образования диаметра отпечатка, описываемые выражениями (1), (2), (3), которые позволяют определить величину модуля упругости материала по выражениям (4) и (5) и закономерности формирования напыла вокруг отпечатка, описываемые диаграммой вдавливания « $W_{max} - d$ » в виде (6).

Список литературы

1. А.с. 1158855 СССР, МКИ G 01 B 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. Игнатьев А.Г. Диагностирование поверхностных остаточных напряжений в металлических покрытиях, нанесенных при восстановлении деталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2008. – 40 с.
4. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
5. Третьяков А.А. Исследование профиля напыла при вдавливании конического индентора в плоскую поверхность упругопластического тела // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-10793> (дата обращения: 15.11.2013).
6. Третьяков А.А. Влияние усилия вдавливания конуса в поверхность упругопластического тела и механических свойств материала детали на диаметр отпечатка // Вестник

Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – 2013. – № 1. – 88 с.
 7. Филін А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – М.: Наука, 1975. – Т. 1. – 832 с.

References

1. А.с. 1158855 USSR, ICI G 01 B 5/30. Way of an estimation of residual stresses O.P. Ostash, B.M. Zajdel, V.T. Zhmur-Klimenko, Opening. Inventions, 1985, no. 20.
2. Johnson K.L., Contact mechanics, Mir, 1989, pp. 510.
3. Ignatiev A.G., Diagnosing of superficial residual pressure in the metal coverings put at restoration of details: abstract. diss. ... dokt.tecn. science, Cheliabinsk, 2008, pp. 40.
4. Kachanov L.M., Bases of the theory of plasticity, Nauka, 1969, pp. 420.
5. Tretyakov A.A. Research of the profile of flow at conic indentation in flat surface of the elastic-plastic body, Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013, no. 6; available at: <http://www.science-education.ru/113-10793> (accessed: 15 November 2013).
6. Tretyakov A.A. Influence of effort cone indentation in the surface of elastic-plastic body and mechanical properties of material detail on diameter of cone impression, Vestnik soveta molodyhuchenyh cheljabinskoy oblasti, 2013, no. 1. pp. 88.
7. Filin A.P., The applied mechanics of a firm deformable body, Nauka, 1975, Vol. 1, pp. 832

Рецензенты:

Ерофеев В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология и организация технического сервиса», ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», г. Челябинск;
 Плаксин А.М., д.т.н., профессор, кафедра «Эксплуатация машин транспортного парка», ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», г. Челябинск.

Работа поступила в редакцию 19.12.2013.