

МЕХАНИКА

УДК 621.735.043

DOI 10.17223/19988621/72/3

А.Ю. Албагачиев, А.М. Моисеенко, Е.В. Зернов, А.В. Лутьянов**ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛЫВА ПРИ ВНЕДРЕНИИ
ПАРАБОЛОИДНОГО ИНДЕНТОРА В ПОЛУПРОСТРАНСТВО**

Разработан метод приближенного аналитического определения геометрических параметров высоты и длины наплыва в зависимости от глубины внедрения параболоида в упругопластическое полупространство. Проведены опыты по индентированию образцов технического пластилина индентором, имеющим форму параболоида вращения с измерением параметров наплыва и давления. Теоретически полученные данные показали удовлетворительное соответствие экспериментальным.

Ключевые слова: *индентор, высота и длина наплыва, упругопластическое внедрение, пластическое течение, напряжения и деформации при индентировании.*

Вопросам индентирования материалов в машиностроении, металлургии, строительстве, механике грунтов и т.д. уделено много внимания. С помощью индентирования определяют твердость материалов, конструкций, исследуют состояние и определяют степень упрочнения поверхностного слоя после механической обработки. Установлено, что процесс внедрения индентора в полупространство можно разделить на три стадии [1–3]: упругого контакта, стесненного упруго-пластического состояния, когда исследуемый материал в области, примыкающей к вершине конического или сферического индентора, уже находится в состоянии пластического течения, а в области у свободной поверхности сохраняется упругое состояние и стадии развитой пластической деформации, когда вся область, прилегающая к поверхности индентора, находится в состоянии пластического течения и материал выходит на свободную поверхность, соприкасаясь с индентором, образуя наплыв.

Для изучения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя важно определить глубину и диаметр отпечатка в зависимости от глубины внедрения индентора и геометрические параметры наплыва на различных стадиях внедрения. Первые две стадии достаточно подробно изучены и приведены во многих работах, из которых наиболее часто цитируемы [1, 5]. Однако в них не приводится достаточно сведений о количественных прочностных характеристиках материала на этих стадиях (напряжения, деформации) для различных материалов. Меньше изучена стадия развития пластического течения [6, 7]. Недостаточно данных о прочностных и геометрических параметрах слоя, в то время как они являются определяющими при оценке степени наклепа. В предлагаемой статье изложен метод приближенного определения геометрических параметров на-

плыва от высоты Δh и длины l (рис. 1) в зависимости от глубины внедрения и проведены опыты по индентированию образцов технического пластилина индентором, имеющим форму параболоида вращения с замером Δh и l и усилия давления. Проверялась согласованность теоретически полученных данных с экспериментальными.

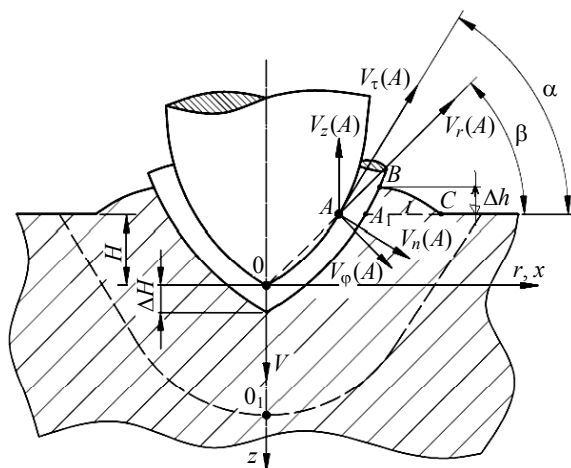


Рис. 1. Схема при внедрении параболоида в полупространство

Fig. 1. Scheme of the paraboloid embedded into a half-space

Пусть индентор в форме параболоида вращения первоначально заглублен в плиту на глубину H и движется вертикально с постоянной скоростью V . На стадии упругого контакта материал увлекается (прогибается) индентором в направлении скорости его перемещения, образуя лунку, диаметр которой приблизительно в 1.5 раза больше (для пластилина) диаметра окружности в сечении индентора свободной поверхностью. На второй стадии по мере углубления движения материала вниз замедляется и он приходит в соприкосновение с поверхностью индентора на всей глубине его внедрения H . В этот момент начинается выход материала на поверхность, т.е. образование наплыва. Таким образом, образование наплыва начинается на стадии развитого пластического течения.

Определим сначала скорости V_r , V_ϕ движения частиц материала в сферической системе координат (ϕ, ϑ, r) с началом в точке 0, где ϕ и ϑ соответственно полярный и аксиальный углы (рис. 1), а затем геометрические параметры наплыва – длину $l = AC$ и высоту Δh при погружении индентора на глубину ΔH . Одновременно удобно пользоваться декартовой системой координат $xoyz$ с тем же началом в точке 0 (рис. 1). Зададим тангенциальную скорость частицы материала из соотношений выполнения граничных условий:

$$V_\phi = V \left(\frac{C_1 r^2}{H^2} + \frac{C_2 r}{H} + C_3 \right) \sin \phi. \quad (1)$$

Радиальную скорость получим из условия несжимаемости:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{2V_r}{r} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + V_\phi \cotg \phi \right).$$

Решая это уравнение, получим

$$V_r = -2V \left(\frac{C_1 r^2}{4H^2} + \frac{C_2 r}{3H} + \frac{C_3}{2} \right) \cos \varphi + F(\varphi). \quad (2)$$

При $F(\varphi) = 0$ выполняется граничное условие в точке 0: $V_r(\varphi = r = 0) = V$ при $C_3 = -1$. Определяем остальные коэффициенты C_1, C_2 из следующих граничных условий:

$$1) \frac{\partial V_r(0)}{\partial r} = 0 \text{ — условие, указывающее, что радиальная скорость материала в}$$

точке 0, максимальна, т.е. выполняется равенство $-2V \left(\frac{C_1 r}{2H^2} + \frac{C_2}{3H} \right) = 0$. Откуда $C_2 = 0$.

2) $V_r(0_1) = 0$, где точка 0_1 принадлежит линии, ограничивающей очаг пластической деформации (рис. 1). Из этого условия получим $r_{0_1} = \frac{2H^2}{C_1}$.

3) Условия $V_r(0) = V$ и $V_\varphi(0) = 0$ выполняются тождественно. Итак, после использования граничных условий формулы для компонент скоростей материала имеют вид

$$V_\varphi = V \left(\frac{C_1 r^2}{H^2} - 1 \right) \sin \varphi, \quad V_r = V \left(1 - \frac{C_1 r^2}{2H^2} \right) \cos \varphi.$$

4) В точке A пересечения параболы $Z = -\kappa x^2$ со свободной поверхностью $Z = -H_0$ имеем

$$V_\tau(A) = V_n(A) \sin(\alpha - \beta) + V_r(A) \cos(\alpha - \beta); \quad (3)$$

$$V_\varphi(A) = V_n(A) \cos(\alpha - \beta) - V_\tau(A) \sin(\alpha - \beta), \quad (4)$$

где $V_n(A), V_r(A)$ — нормальная и касательная компоненты скорости материала в точке A , $V_n(A) = V \cos \beta$, где $\operatorname{tg} \beta = \sqrt{H\kappa}$, $\operatorname{tg} \alpha = 2\sqrt{H\kappa}$. Подставим в левые части выражений (3) и (4) $V_\varphi(A)$ и $V_r(A)$ и, исключив $V_\tau(A)$, получим

$$C_1 = \frac{\cos \beta + \sin \beta \sin(\alpha - \beta) - \cos \beta \cos(\alpha - \beta)}{\sin \beta 0.5 \sin \beta \sin(\alpha - \beta) + \cos \beta \cos(\alpha - \beta)}.$$

Высоту наплыва Δh определяем из отношения: $\frac{\Delta h}{\Delta H} = \frac{V_z(A)}{V}$, полученное из условия: $\Delta h = V_z t$, $\Delta H = Vt$, где t — время заглубления на Δh , $V_z(A)$ — вертикаль-

ная скорость частицы в точке A $\left(\varphi_A = 90 + \beta, r_A = \sqrt{H^2 + \frac{H}{\kappa}} \right)$, где $\kappa \left[\frac{1}{\text{м}} \right]$ — па-

раметр параболы $z = \kappa x^2$. Длину наплыва $l = A_1 C$ определим из условия: $V_1 = V_2$, где V_1 — объем лунки, образовавшейся при погружении индентора на глубину ΔH :

$$V_1 = \frac{\pi(H + \Delta H)^2}{2\kappa} - \frac{\pi H^2}{2\kappa} = \frac{\pi}{2\kappa}(2H \cdot \Delta H + \Delta H^2),$$

V_2 – объем наплыва вокруг индентора, образовавшийся при внедрении индентора на глубину ΔH . Сечение наплыва осевой плоскостью представлено в виде треугольника ABC (рис. 1).

$$V_2 = \frac{2}{3} \pi S (x_{A_1} + x_B + x_C),$$

где $S = \frac{1}{2} l \cdot \Delta h$, $x_{A_1} \cong x_B = \sqrt{\frac{H + \Delta H}{\kappa}}$; $x_C = x_{A_1} + l$, где l – длина наплыва (рис. 1),

тогда из условия $V_1 = V_2$ получим

$$l = \frac{1}{2} \left[-3 \sqrt{\frac{H + \Delta H}{\kappa}} + \sqrt{\left(3 \sqrt{\frac{H + \Delta H}{\kappa}} \right)^2 + \frac{6(2H \cdot \Delta H + \Delta H^2)}{\kappa \cdot \Delta h}} \right].$$

Перейдем к определению напряжений. Для рассматриваемой жесткопластической модели их определяют по формулам Леви – Мизеса:

$$\sigma_r = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_r,$$

где σ – среднее напряжение;

$$\sigma_\varphi = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_\varphi,$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

$$\sigma_\theta = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_\theta,$$

где ξ_i – интенсивность скоростей деформаций и деформаций сдвигов;

$$\tau_{\varphi r} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_{\varphi r}, \quad \xi_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\xi_r - \xi_\varphi)^2 + (\xi_r - \xi_\theta)^2 + (\xi_\varphi - \xi_\theta)^2} + \frac{3}{2} \xi_{\varphi r}^2.$$

Применяем условие пластичности

$$\sigma_i = \sigma_T, \text{ где } \sigma_T - \text{предел текучести}$$

и ввиду сложности выражения для ξ_i , принимаем её постоянной и равной

$$\xi_i = \xi_i(r_1, \varphi_1), \text{ где } r_1 = r_{0_1}, \varphi_1 = \varphi_A/2.$$

Используя выражения (1) и (2) для скоростей, получим

$$\xi_r = \frac{\theta V_2}{\partial r} = -2V \left(\frac{C_1 r}{2H^2} \right) \cos \varphi, \quad \xi_\varphi \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} + V_r \right) = V \left(\frac{C_1 r}{2H^2} \right) \cos \varphi,$$

$$\xi_\theta = \frac{1}{r} (V_\varphi \operatorname{ctg} \varphi + V_r) = V \left(\frac{C_1 r}{2H^2} \right) \cos \varphi,$$

$$\xi_{\varphi 2} = \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} = V \left(\frac{3}{2} \frac{C_1 r}{H^2} \right) \sin \varphi.$$

Итак $\xi_\varphi = \xi_\theta$, т.е. $\sigma_\varphi = \sigma_\theta$, а значит, уравнение (3), например, можно исключить. Тогда, учитывая выражения для ξ_r и ξ_φ , получим

$$\sigma_r = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} \left[-2V \left(\frac{C_1 r}{2H^2} \right) \cos \varphi \right],$$

$$\sigma_\varphi = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} \left[V \left(\frac{C_1 r}{2H^2} \right) \cos \varphi \right].$$

Вычитая из второго выражения первое, получим

$$\sigma_\varphi - \sigma_r = \frac{2}{3} \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} V \cos \varphi \left(\frac{3}{2} \frac{C_1 r}{H^2} \right).$$

Второе условие для определения σ_φ, σ_r получим из уравнения равновесия, которое при условии $\sigma_\varphi = \sigma_\theta$ имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} = - \left(r \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r} + 3 \tau_{\varphi r} \right), \text{ где } \tau_{\varphi r} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} V \sin \varphi \left(\frac{3}{2} \frac{C_1 r}{H^2} \right).$$

После интегрирования получим

$$\sigma_\varphi = 2 \frac{\sigma_r}{\xi_i} V \cos \varphi \left(\frac{C_1 r}{H^2} + \frac{C_2}{3H} \right) + F_1(r).$$

При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ $\sigma_\varphi = F_1(r)$. Тогда, учитывая, что σ_φ убывает при увеличении r , представим $F_1(r)$ так:

$$F_1(r) = \frac{V \sigma_\tau}{\xi_i} \left(\frac{\kappa_1 r}{H^2} + \frac{\kappa_2}{H} \right),$$

где κ_1, κ_2 – коэффициенты, подлежащие определению. Тогда выражения для σ_r и σ_φ имеют вид

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} V \left[\cos \varphi \left(\frac{2C_1 r}{H^2} \right) + \frac{\kappa_1 r}{H^2} + \frac{\kappa_2}{H} \right],$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} V \left[\cos \varphi \frac{C_1 r}{H^2} + \frac{\kappa_1 r}{H^2} + \frac{\kappa_2}{H} \right],$$

Так как в точке 0 материал находится в состоянии пластического течения, то в ней можно принять

$$\sigma_r = \sigma_n = \sigma_\tau = \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} V \frac{\kappa_2}{H}, \text{ откуда } \kappa_2 = \frac{\xi_i H}{V}.$$

В точке A $\left(\varphi_A = 90 + \beta, r_A = \sqrt{H^2 + \frac{H}{\kappa}} \right)$, $\beta = \arctg \sqrt{H\kappa}$, касательное напряжение сдвига

$$\tau_{\varphi r} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_\tau}{\xi_i} \sin \varphi_A V \left(\frac{3}{2} \frac{C_1 r_A}{H^2} \right). \quad (5)$$

По закону Кулона $\tau_{\varphi r} = \sigma_n f$, где f – коэффициент внешнего трения,

$$\sigma_n(A) = \sigma_\varphi(A) \cos(\alpha - \beta) - \sigma_r(A) \sin(\alpha - \beta).$$

Подставляя выражения для $\tau_{\varphi r}$ и σ_n в (5), получим выражение для отыскания коэффициента

$$\kappa_1 = \frac{A - B}{C}, \text{ где } A = \frac{1}{2} \frac{C_1 r_A \sin \varphi_A}{f H^2},$$

$$B = \cos \varphi_A \left[\sin(\alpha - \beta) \left(\frac{C_1 r_A}{H^2} + \frac{\kappa_2}{H} \right) - \cos(\alpha - \beta) \left(\frac{2C_1 r_A}{H^2} + \frac{\kappa_2}{H} \right) \right],$$

$$C = \frac{r_A}{H^2} [\sin(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta)] \cos \varphi_A.$$

Для проверки точности формул для скоростей V_r, V_φ , определяющих параметров наплыва Δh и l , проводились опыты с идентифицированием образцов из технического пластилина $\left(\sigma_t = 2 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}, E = 30 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right)$, представляющих собой плиты размерами $130 \times 105 \times 35$ мм с различными по форме параболоидными инденторами, с учетом рекомендаций ГОСТ 56232-2014. После каждого опыта образец разрезался осевой плоскостью и замерялись параметры Δh и l для каждой глубины H погружения индентора.

Опыт для каждой глубины повторялся 3 раза при температуре $21\text{--}22^\circ\text{C}$. Контактные поверхности смазывались тальком. Опытные результаты по замеру параметров наплыва для каждой глубины погружения H (мм) индентора с уравнением поверхности параболоида: $Z = \kappa \cdot r^2$, где $\kappa = 0.067 \frac{1}{\text{мм}}$, приведены в таблице.

Экспериментальные данные по замеру параметров наплыва

Глубина внедрения, H	Высота наплыва, Δh	Длина наплыва, l
7	1.5	11.2
13	2.6	13.0
18	3.5	14.5

Для примера рассмотрим определение параметров наплыва при погружении инденторас параметром $\kappa = 0.067$ по нижеприведенным зависимостям, со следующими входными данными $V = 1$ мм/с, $H_0 = 1$ мм, $\Delta H = 0,1$ мм. Осуществляя пошаговые вычисления Δh и l при достижении глубины внедрения $H = 7$ мм, получили $\Delta h = 1.9$ мм, $l = 9.4$ мм. Результаты удовлетворительно согласуются с опытными данными таблицы.

В работах некоторых исследователей [1, 3] отмечается, что при идентифицировании стальных образцов между материалом и индентором образуется жесткая зона. Для изучения этой особенности при идентифицировании образцов из пластилина брали двуслойный образец из слоев разного цвета. Верхний – телесного цвета, толщиной 5 мм, нижний – черного цвета толщиной 35 мм.

На рис. 2 показан разрез плиты осевой плоскостью в результате погружения индентора на 18 мм. Контактный слой телесного слоя имеет толщину 1.2–1.5 мм, остальной материал верхнего слоя переместился в напыл. Отсюда можно сделать вывод, что в случае индентирования образцов из пластилина жесткая зона имеет незначительную толщину или отсутствует.

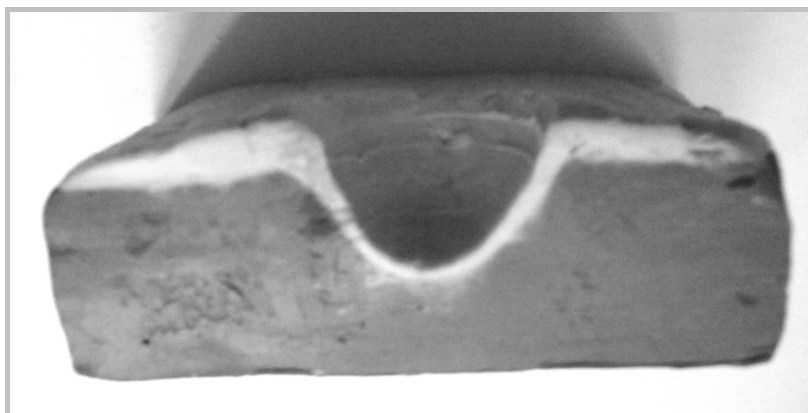


Рис. 2. Образование напыла после внедрения параболоида на 18 мм

Fig. 2. Sag formation following the paraboloid embedding by 18 mm

Заключение

Разработанный метод приближенного аналитического определения геометрических параметров высоты и длины напыла в зависимости от глубины внедрения параболоида в упругопластическое полупространство показал удовлетворительное соответствие экспериментальным результатам. Полученные аналитические зависимости для расчета скоростей $V_r = V_\phi$ позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние материала в поверхностном слое полупространства и при других похожих процессах механической обработки, например, дробеударной обработки поверхностного слоя и резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев И.В. Основы выбора режима, упрочняющего поверхностный наклеп. М.: Машиностроение, 1965. 108 с.
2. Саверин М.М. Дробеструйный наклеп. М.: Машгиз, 1955. 316 с.
3. Петросов В.В. Дробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 173 с.
4. Булычев С.И. О корреляции диаграмм вдавливания и растяжения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. № 11. С. 33–41.
5. Огар П.М., Тарасов В.Л., Дайнеко А.Л. К вопросу упругопластического внедрения сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 17–19.
6. Максименко А.А., Котенева Н.В., Перфильева А.Д. Исследование нормальных напряжений при упругопластическом контактом взаимодействии // Ползуновский вестник. 2009. № 1–2. С. 264–267.
7. Сапожников С.Б., Игнатова А.В. Исследование механических свойств технического пластилина при квазистатическом и динамическом деформировании // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 2. С. 210–219.

8. Воронцов А.Л., Стротьев В.К., Ступников В.П. О пробе Бринелля и внедрении Пуансона в тело больших поперечных размеров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 2. С. 12–21.
9. Албагачиев А.Ю., Моисеенко А.М., Яковлевская И.М., Зернов Е.В. Напряжённо-деформированное состояние тонкой квадратной заготовки при её осадке шероховатыми плитами // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 49. С. 75–80.
10. Lida K. Dent and affected layer produced by shot peening // The second international conference on shot peening (ICSP2). Paris, 1984. P. 283–292.
11. Prevey P.S., Cammett J.T. The effect of shot peening coverage on residual stress, cold work and fatigue in Ni-Cr-Mo low alloy steel // The eighth international conference on shot peening (ICSP8). Leipzig, 2002. P. 1–7.
12. Beidokhti H.N. et al. A comparison between dynamic implicit and explicit finite element simulations of the native knee joint // Med. Eng. Phys. 2016. V. 38. P. 1123–1130.

Статья поступила 05.09.2020

Albagachiev A.Yu., Moiseenko A.M., Zernov E.V., Lut'yanov A.V. (2021) APPROXIMATE DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE SAG FOLLOWING THE EMBEDDING OF A PARABOLOID INDENTER INTO A HALF-SPACE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 72. pp. 39–47

DOI 10.17223/19988621/72/3

Keywords: indenter, sag height and length, elastic-plastic embedding, plastic flow, stresses and strains during indentation.

The problem of the indenter embedding into a half-space is formulated and solved. A concept of the elastic contact is used, which implies the uniformity of the stress-strain state in a surface layer. The process of the surface layer formation after mechanical treatment is studied. Based on the general theory of indenter penetration into a half-space, numerical and analytical solutions, determining the length and depth of penetration of a paraboloid into elastoplastic space, are obtained. According to the theory of indentation, the problem is reduced to the use of the method of approximate determination of geometric parameters of a bead, when a paraboloid is being embedded into elastoplastic space. An exact solution to the formulated problem allows one to obtain analytical dependences for calculating the velocities and to study the stress-strain state of the material in the half-space surface layer during the processing. The reliability of the obtained analytical solution is confirmed by numerical calculations without introducing additional hypotheses.

Based on the analytical solution, the geometric parameters of the influx from the penetration depth are determined. Calculations can be performed at any embedding depth. Sag formation during the indenter embedding by 18 mm into plasticine specimens is considered as an example. It is shown that the rigid zone is insignificant or absent.

Ali Yu. ALBAGACHIEV (Doctor of Technical Sciences, Professor, IMASH RAS, Moscow, Russian Federation). E-mail: albagachiev@yandex.ru

Anatoliy M. MOISEENKO (Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel Branch of VEPI, Orel, Russian Federation). E-mail: puare54@yandex.ru

Evgeniy V. ZERNOV (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, RTU-MIREA, Moscow, Russian Federation). E-mail: zernov1935@mail.ru

Aleksandr V. LUT'YANOV (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, RTU-MIREA, Moscow, Russian Federation). E-mail: alou99@mail.ru

REFERENCES

1. Kudryavtsev I.V. (1965) *Osnovy vybora rezhima uprochnyayushchego poverkhnostnyy naklep* [Basis for a choice of the mode of hardening surface cold working]. Moscow: Mashgiz.
2. Saverin M.M. (1955) *Drobestruyny naklep* [Peen hardening]. Moscow: Mashgiz.
3. Petrosov V.V. (1977) *Drobestruynoe uprochnenie detaley i instrumenta* [Peen hardening of component parts and tools]. Moscow: Mashgiz.
4. Bulychev S.I. (2001) O korrelyatsii diagramm vдавlivaniya i rastyazheniya [On the correlation of indentation and tension diagrams]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 11. pp. 33–41.
5. Ogar P.M., Tarasov V.L., Dayneko A.L. (2009) K voprosu uprugoplasticheskogo vnedreniya sfericheskogo indentora [On the issue of the elastic-plastic penetration of a spherical indenter]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*. 4. pp. 17–19.
6. Maksimenko A.A., Koteneva N.V., Perfil'eva A.D. (2009) Issledovanie normal'nykh napryazheniy pri uprugoplasticheskom kontaktnom vzaimodeystvii [Study of normal stresses during elastoplastic contact interaction]. *Polzunovskiy vestnik*. 1–2. pp. 264–267.
7. Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. (2014) Issledovanie mekhanicheskikh svoystv tekhnicheskogo plastilina pri kvazistaticheskom i dinamicheskom deformirovanii [Mechanical properties of technical plasticine under static and dynamic loadings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika – PNRPU Mechanics Bulletin*. 2. pp. 210–219.
8. Vorontsov A. L., Strot'ev V.K., Stupnikov V.P. (2012) O probe Brinellya i vnedrenii Puan-sona v telo bol'shikh poperechnykh razmerov [On Brinell test and the Punch indentation into a body with large cross section]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroyeniye» – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2. pp. 12–21.
9. Albagachiev A.Yu., Moiseenko A.M., Yakobovskaya I.M., Zernov E.V. (2017) Napryazhenno-defomirovannoe sostoyanie tonkoy kvadratnoy zagotovki pri ee osadke sherokhovatyimi plitami [A stress-strain state of the thin square workpiece during upsetting by the rough plates]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 49. pp. 75–80. DOI: 10.17223/19988621/49/7.
10. Lida K. (1984) Dent and affected layer produced by shot peening. *Proceedings of the 2nd International Conference on Shot Peening (ICSP2)*. pp. 283–292.
11. Prevey P. S. (2002) The effect of shot peening coverage on residual stress, cold work and fatigue in Ni-Cr-Mo low alloy steel. *Proceedings of the 8th International Conference on Shot Peening (ICSP8), Leipzig*. pp. 1–7.
12. Beidokhti H.N., Janssen D., Khoshgoftar M., Sprengers A., Perdahcioglu E.S., Van den Boogaard T., Verdonschot N. (2016) A comparison between dynamic implicit and explicit finite element simulations of the native knee joint. *Medical Engineering & Physics*. 38(10). pp. 1123–1130. DOI: 10.1016/j.medengphy.2016.06.001.

Received: September 5, 2020