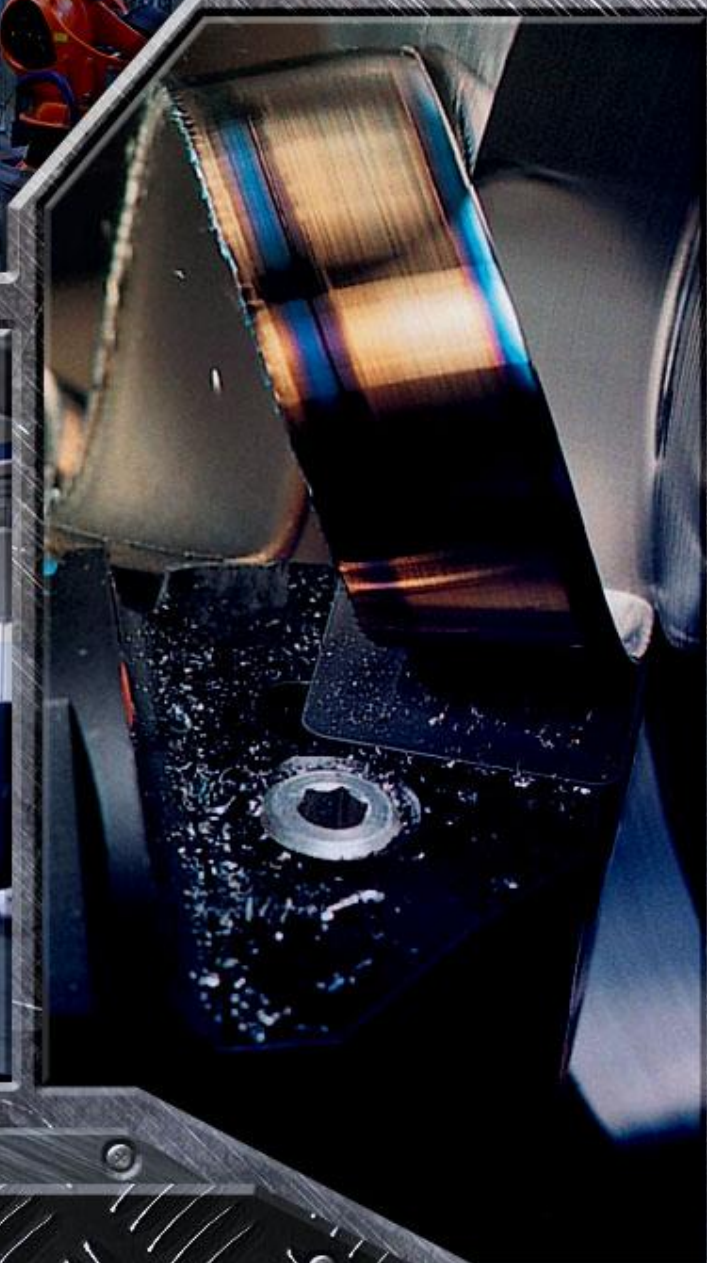


Вісник

машинобудування та
транспорт

№ 1(15)
2022



У «Віснику машинобудування та транспорту» публікуються наукові статті за такими науковими напрямками:

- Транспорт та транспортні технології
- Сучасні технології в машинобудуванні, зварювання та споріднені процеси і технології, нанотехнології
- Механотроніка. Гідравлічні та пневматичні приводи різного технологічного призначення, вібраційні та віброударні машини та технології
- Надійність і довговічність механізмів і машин, деталі та міцність утримуючих металокопункцій підйомних транспортних машин
- Безпека експлуатації машин та механізмів
- Розвиток та сучасні вимоги до зразків озброєння та військової техніки
- Сучасне обладнання і прогресивні технології виробництва озброєння та військової техніки
- Експлуатація, технічне обслуговування та поточний ремонт озброєння та військової техніки
- Актуальні питання психологічної підтримки військовослужбовців

Журнал «Вісник машинобудування та транспорту» є виданням, яке входить до Переліку наукових фахових видань України у галузі технічних наук (категорія Б) за спеціальностями: 073, 113, 131, 132, 133, 142, 274, 275.

Журнал «Вісник машинобудування та транспорту» входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus

За достовірність фактів, цифр, точність імен та прізвищ несуть відповідальність автори статей

До журналу увійшли статті співробітників, аспірантів та докторантів Вінницького національного технічного університету та інших навчальних та наукових закладів

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу

Адреса сайту журналу: vmt.vntu.edu.ua

DOI журналу: <https://doi.org/10.31649/2415-3486>

Редакційна колегія:

Головний редактор

Поляков А.П., д.т.н., професор

Заступник головного редактора

Біліченко В.В., д.т.н., професор

Члени редколегії:

Алієв І.С., д.т.н., професор

Баглюк Г.А., д.т.н., професор

Волков В.П., д.т.н., професор

Горбай О.З., д.т.н., професор

Грушко О.В., д.т.н., професор

Гутаревич Ю.Ф., д.т.н., професор

Івашко В.С., д.т.н., професор

Каішканов А.А., д.т.н., професор

Козлов Л.Г., д.т.н., професор

Кравченко О.П., д.т.н., професор

Крайник Л.В., д.т.н., професор

Макаров В.А., д.т.н., професор

Михалевич В.М., д.т.н., професор

Подригало М.А., д.т.н., професор

Поліщук Л.К., д.т.н., професор

Русу Іоанні, доктор інженерії, професор

Сахно В.П., д.т.н., професор

Тітов В.А., д.т.н., професор

Чигарьов В.В., д.т.н., професор

Відповідальний секретар

Каішканов В.А., к.т.н., доцент

Вісник машинобудування та транспорту

Науковий журнал

Засновник і видавець: Вінницький національний технічний університет

Виходить 2 рази на рік Заснований у січні 2015 року

№1(15) 2022

DOI випуску: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1>

ЗМІСТ

<i>Біліченко В. В., Цимбал С. В., Цимбал О. В.</i> Визначення пристосованості автобусів до роботи на міських маршрутах пасажирських перевезень	3
<i>Буряк М. В., Розум Р. І., Захарчук О. П., Прогній П. В., Попович П. В., Шевчук О. С., Галушак Д. О.</i> Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів	11
<i>Буряк М. В., Розум Р. І., Фалович Н. М., Прогній П. В., Попович П. В., Шевчук О. С., Антонюк О. П.</i> Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів	17
<i>Волков В. П., Грицик І. В., Кужель В. П., Волкова Т. В., Плехова Г. А.</i> Стан і втілення іноваційних технологій в технічну експлуатацію транспортних засобів	23
<i>Волков В. П., Грицик І. В., Кужель В. П., Волкова Т. В., Плехова Г. А., Семенов Є. О.</i> Оцінка впливу стабільності характеристик гальмівних механізмів на процес гальмування транспортних засобів	34
<i>Голуб Д. В., Аулін В. В., Біліченко В. В., Замуренко А. С.</i> Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем	44
<i>Грицик І. В., Волков В. П., Український Є. О., Володарець М. В., Макарова Т. В., Рижова В. Ю.</i> Особливості забезпечення нормування показників і керування паливною економічністю транспортного засобу в умовах експлуатації	52
<i>Гуцько І. В., Паладій М. С.</i> Оцінка пластичності поверхневого шару металу при обкочуванні деталей циліндричної форми кулькою	58
<i>Зінько Р. В., Скварок Ю. Ю., Мартин В. Є., Поляков А. П.</i> Моделі роботи різнотипних технічних систем на основі подібності графів їх конструкцій	67
<i>Зінько Р. В., Черевко Ю. М., Поляков А. П., Бойко О. Д.</i> Конструкторське проектування технічних систем	80
<i>Каішканова А. А.</i> Застосування нечіткої нейронної мережі для визначення інформативності факторів впливу на реалізацію зчпної здатності дороги і шини	88
<i>Макаров В. А., Мастепан М. А., Виноградов М. С., Беляєв Д. С.</i> Експериментальне дослідження впливу зернистості абразиву силікатної пасти на якість поверхонь тертя	100
<i>Мармут І. А., Каішканов А. А., Каішканов В. А., Себко Д. П.</i> Оптимізація інерційної маси гальмівного роликового стенда	106
<i>Назаров О. І., Галушак О. О., Галушак А. В., Тертичний Д. І.</i> Забезпечення керованості легкових автомобілів у разі комбінованого гальмування на криволінійній ділянці дороги	116
<i>Обертюх Р. Р., Слабкий А. В., Поліщук О. В., Ганпанцурова О. С.</i> Гідроімпульсні малогабаритні вібратори на базі прорізних пружин	124
<i>Павленко В. М., Кужель В. П., Мануйлов В. М., Корнєв О. В.</i> Особливості аеродинаміки автомобіля при бічному ковзанні	131
<i>Солтус А. П., Клімов Е. С., Тарандушка Л. А.</i> Особливості руху коліс візка автомобіля по криволінійній траєкторії	141

CONTENT

V. Bilichenko, S. Tsymbal, O. Tsymbal. Determining the suitability of buses to work on urban passenger routes	3
M. Buriak, R. Rozum, O. Zakharchuk, P. Prohniï, P. Popovych, O. Shevchuk, D. Galuschak. Assessment of durability of metal structures of motor vehicles	11
M. Buriak, R. Rozum, N. Falovych, P. Prohniï, P. Popovych, O. Shevchuk, O. Antonyuk. Evaluation of strength and reliability of vehicles	17
V. Volkov, I. Gritsuk, V. Kuzhel, T. Volkova, G. Pliekhova. State and implementation of innovative technologies in technical operation of vehicles	23
V. Volkov, I. Gritsuk, V. Kuzhel, T. Volkova, G. Pliekhova, E. Semenov. Evaluation of the influence of brake mechanisms characteristics stability on the braking vehicles process	34
D. Golub, V. Aulin, V. Bilichenko, A. Zamurenko. Implementation of system approach in determining the efficiency of functioning of complex regional transport systems	44
I. Gritsuk, V. Volkov, Ye. Ukrainskyi, M. Volodarets, T. Makarova, V. Ryzhova. Features of ensuring standardization of indicators and management of fuel economy of the vehicle in conditions of operation	52
I. Gunko, M. Paladiy. Evaluation of the plasticity of the surface layer of metal during rolling of cylindrical parts with a ball	58
R. Zinko, Yu. Skvarok, V. Martin, A. Polyakov. Models of work of different technical systems on the basis of the similarity of graphs of their constructions	67
R. Zinko, Yu. Cherevko, A. Polyakov, O. Bojko. Design design of technical systems	80
A. Kashkanova. The use of a fuzzy neural network to determine the information content of factors affecting the implementation of the grip properties of a road with a tire	88
V. Makarov, M. Mastepan, M. Vynogradov, D. Bieliaiev. Experimental investigation of the influence of grain abrasion of silicate paste on the quality of the friction surface	100
I. Marmut, A. Kashkanov, V. Kashkanov, D. Sebko. Optimization of the inertial mass of the brake roller stand	106
O. Nazarov, O. Galushchak, A. Galushchak, D. Tertichnyi. Ensuring handling of passenger cars in the event of combined braking on a curve road section	116
R. Obertyuh, A. Slabkyi, O. Polishchuk, O. Hanpanturova. Hydropulse small-sized vibrators based on slotted springs	124
V. Pavlenko, V. Kuzhel, V. Manuilov, O. Korniev. Peculiarities of aerodynamics of the car in side slip	131
A. Soltus, E. Klimov, L. Tarandushka. Features of the vehicle axle group wheels' movement on a trajectory circular	141

ОЦІНКА ПЛАСТИЧНОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛУ ПРИ ОБКОЧУВАННІ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ КУЛЬКОЮ

Вінницький національний аграрний університет

В статті виконано дослідження особливостей процесу пластичної деформації поверхневого шару деталей циліндричної форми при обкочуванні кулькою. Визначено напружено-деформований стан та закономірності його зміни в залежності від параметрів процесу в поверхневому шарі деталі методом ліній ковзання та методом скінченних елементів.

Переважає більшість деталей вузлів механізмів і машин працюють у контакті з відповідними деталями, а саме: різні пари тертя, вали, ролики, шестерні або інструменти, корпуси виробів, бойки тощо. Специфічні вимоги до цих деталей обумовлені особливостями експлуатації останніх. Крім того, поверхня деталей за певних умов повинна мати високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя (антифрикційні деталі) або високий коефіцієнт тертя (деталі фрикціонів), або самозмінюваний у процесі наклепки поверхневий шар, а інколи вся поверхня повинна мати певну пористість і «літніти» у процесі експлуатації.

Метод ліній ковзання можна віднести до традиційних методів розв'язання задач теорії пластичності. Цим методом розв'язуються задачі, в яких рівняння рівноваги і пластичності створюють замкнену систему диференціальних рівнянь гіперболічного типу. Тому цей метод можна використовувати при розв'язанні плоских задач, і тільки в окремих випадках для розв'язання осесиметричних задач. Розв'язки які можуть бути отримані безпосередньо із знання будь-якої області ліній ковзання, називаються прямими. Коли інформації про форму початкових ліній ковзання недостатньо, то використовують обернені та напівобернені методи.

Здійснено чисельне дослідження закономірностей накопичення пошкоджень, проведено розрахунки накопиченої деформації, показника напруженого стану, розподілів використаного ресурсу пластичності по об'єму пластичної зони при обкочуванні кулькою в середовищі спеціалізованого програмного комплексу.

На основі проведених в статті досліджень можуть бути розроблені рекомендації з вибору режимів обробки, що забезпечать найбільш раціональні параметри стану поверхневого шару деталей типу тіл обертання.

Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування, умова нестисливості, тензор швидкостей деформацій, осесиметрична задача, напружено-деформований стан, накопичення пошкоджень, використаний ресурс пластичності.

Вступ

Зміцнення деталей пластичним деформуванням поверхні застосовують в основному для підвищення їхньої втомної міцності, контактної витривалості і зносостійкості. Поверхнєве пластичне деформування здійснюється інструментом, що взаємодіє з оброблюваною поверхнею за схемами кочення, ковзання або вдавлювання [1, 2]. Поверхнєва пластична деформація: підвищує щільність дислокацій в зміцненому шарі; подрібнює вихідну структуру; підвищує величину твердості поверхні; зменшує величину шорсткості; підвищує зносостійкість деталей; збільшує границю витривалості. З аналізу технологій поверхнєвого пластичного деформування, наведених в роботах [1–4], впливає, що при поверхнєвому пластичному деформуванні основна увага приділяється процесам зміцнення поверхнєвого шару металу та формуванню його рельєфу. Однак надійність роботи поверхнєвого шару значно залежить також від величини густини пошкоджень, які зароджуються і накопичуються при пластичній деформації. В даній статті ступінь пошкодження металу будемо визначати величиною використаного ресурсу пластичності.

При пластичній деформації металів одночасно з процесами зміцнення відбуваються процеси накопичення пошкоджень, інтенсивність яких зростає з ростом пластичної деформації. Дослідження процесів накопичення пошкоджень при пластичній деформації знайшли своє віддзеркалення в широкій серії наукових праць [5–8].

У загальному випадку для правильного розуміння кінетики і опису процесу руйнування необхідний сумісний розгляд явищ, що одночасно відбуваються на різних масштабних рівнях. Загальним недоліком існуючих математичних моделей на основі фізичних уявлень про механізми руйнування є те, що вони не знаходять широкого застосування в практиці інженерних розрахунків. Прості варіанти

моделей не дають тут необхідної точності, а складні є громіздкими і містять багато параметрів підгонки. Тому фізичні уявлення про механізми руйнування використовуються в даний час для уточнення феноменологічних моделей.

При описі процесу накопичення пошкоджень, що обумовлює вичерпання міцності матеріалів в часі, широкий розвиток отримали феноменологічні моделі, в яких процеси, що визначають руйнування, розглядаються на рівні застосовності механіки суцільних середовищ. Найбільш широко відомий принцип підсумовування пошкоджень і його детерміновані і статистичні інтерпретації. У таких підходах накопичення пошкоджень або ототожнюється з яким-небудь одним явищем, що відповідає за поступове руйнування матеріалу, або описується параметром, що інтегрально характеризує всі чинники пошкодження без урахування впливу окремих з них на процес вичерпності пластичності в часі [5, 6].

Феноменологічна теорія руйнування не знайшла широкого застосування в розрахунках промислових технологічних процесів поверхневого пластичного деформування, оскільки застосування ускладнюється необхідністю проведення громіздких і численних експериментів та недостатнім об'ємом робіт, в яких розглядається адекватність феноменологічних моделей при складному навантаженні. Тому, не дивлячись на те, що завдання прогнозування руйнування і якості металопродукції вирішуються на основі існуючих моделей [5, 6], сучасний рівень феноменологічної теорії руйнування металів в процесах великої пластичної деформації у низці випадків не дозволяє робити адекватні прогнози про ймовірність макроруйнування.

Метою роботи є здійснення чисельного моделювання закономірностей накопичення пошкоджень та перевірка адекватності моделі при порівнянні з наявними експериментальними даними.

Результат дослідження

Рішення осесиметричної задачі пластичності має велике значення для розв'язання прикладних задач. В статті розглянута задача вдавлювання кульки в ідеально пластичне середовище для випадку осевої симетрії на прикладі вдавлювання кульки в ідеальне пластичне середовище з плоскою границею.

Невеликим викривленням поверхні довкола кульки, яке відбувається при пластичній деформації знехтуємо і вважатимемо границю пластичного середовища поза контактом з кулькою плоскою. Будемо вважати, що сила тиску на середовище не більша граничного значення. Прийнемо, що досягши цього граничного значення всі елементи середовища поблизу кульки будуть в пластичному стані.

Помістимо початок циліндричної системи координат r, φ, z в площину, що містить вільну границю середовища, а вісь z направимо по осі симетрії всередину середовища (рис. 1а). Позначимо через u_r, u_φ і u_z малі переміщення її часток при незначному збільшенні сили тиску кульки на середовище за досягнуте значення. В даній задачі переміщення u_φ дорівнює нулю.

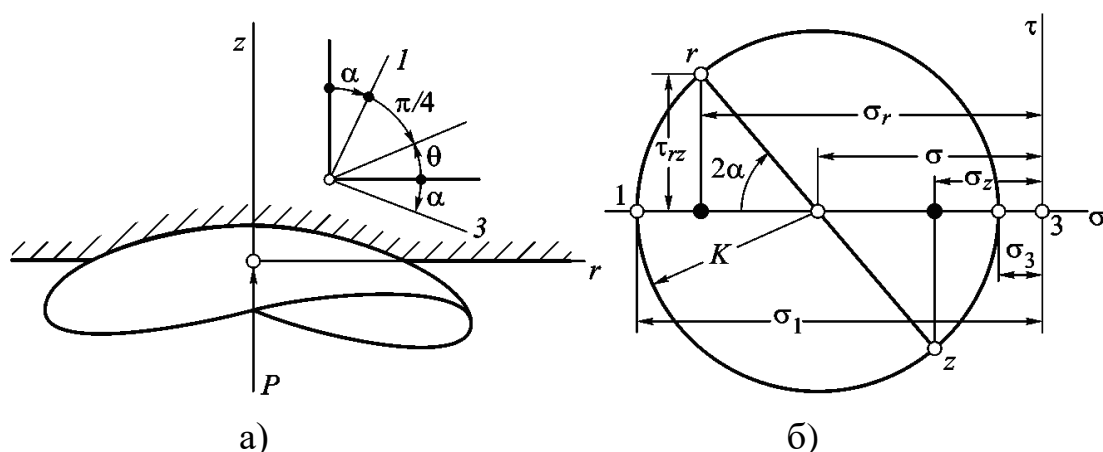


Рис. 1. Розрахункова схема (а), круг Мора (б)

Для точок середовища, розташованих поблизу осі z , величини переміщень u_r і u_z представимо у вигляді:

$$u_r = a_0 + a_1 r + a_2 + \dots, u_z = b_0 + b_1 r + b_2 + \dots, \quad (1)$$

де a_0, a_1, a_2, \dots і b_0, b_1, b_2, \dots – функції координати z . На осі z переміщення u_r дорівнює нулю, отже, $a_0 = 0$.

Вважаючи середовище нестисливим, маємо

$$\frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial(ru_z)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

звідки випливає, що $2a_1 + db_0 / dz = 0$.

Очевидно, що на осі z справедлива нерівність $\varepsilon_z = \partial u_z / \partial u < 0$, тобто лінійні елементи, що мають орієнтацію осі z , коротшають. Таким чином,

$$2a_1 = -\frac{db_0}{dz} = -\left(\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)_{r=0} > 0, \quad (3)$$

і, отже, поблизу осі z компоненти деформації додатні

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = a_1 + 2a_2 r + \dots, \varepsilon_\phi = \frac{u_r}{r} = a_1 + a_2 r + \dots, \quad (4)$$

Осі r і z через симетрію є головними напрямками деформації середовища в точках осі z і близькі до головних напрямів в точках, розташованих біля цієї осі. Напрямок ϕ також є всюди головним.

Позначимо через $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ головні напруження в точках середовища і прийемо, що $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Як виявляється, другий головний напрям напруженого стану збігається в даному випадку з напрямом ϕ , а перший і третій відповідно наближаються до напрямів z і r при наближенні до осі z .

Поблизу осі z відповідні головні компоненти деформації середовища $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ задовольняють нерівності $\varepsilon_3 < 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_1 > 0$.

Тому, слідуючи гіпотезі пластичності Хаара–Кармана, покладемо

$$\sigma_3 = \sigma_2 - 2K, \quad \sigma_2 = \sigma_1, \quad (5)$$

де K – пластична стала середовища.

Позначимо через α (див. рис. 1а) кут між першим головним напрямом і віссю z , тоді, як неважко побачити на відповідному крузі Мора (див. рис. 1б), будуть справедливі співвідношення

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) \cos 2\alpha; \\ \sigma_z &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) \cos 2\alpha; \\ \sigma_{rz} &= -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Для точок осі z кут α дорівнює нулю і $\sigma_z = \sigma_3$, а $\sigma_r = \sigma_1$. У свою чергу, для точок вільної границі середовища $\sigma_z = 0$, а $\sigma_r < 0$. Оскільки напрями r і z є для точок вільної границі головними і $\sigma_3 < \sigma_1$, то для цих точок $\sigma_z = \sigma_3 = 0, \sigma_r = \sigma_1, \alpha = \pi/2$. Таким чином, можна вважати, що при послідовному переході від точок осі z до точок вільної поверхні середовища кут α збільшується від 0 до $\pi/2$ (див. рис. 1а).

Будемо вважати відсутнім тертя між поверхнею середовища і поверхнею кульки. У такому випадку нормаль до поверхні контакту середовища і кульки виявляється першим головним напрямом для тих елементів середовища, які примикають до цієї поверхні. Для елементів середовища, розташованих по колу розподілу вільної границі середовища і поверхні контакту, перший головний напрям невизначений і залежить від шляху, по якому здійснюється наближення до точок розділу. Якщо, наприклад, підходити до цих точок, переміщуючись по вільній границі, то першим головним напрямом залишатиметься напрям r ; якщо ж переміщатися по поверхні контакту, то, як було тільки що вказано, – напрям нормалі до цієї поверхні. Напружений стан в точках розділу є, таким чином, особливим.

Позначимо через θ кут між напрямом r і бісектрисою прямого кута, утвореного першим і третім головними напрямом. Згадана бісектриса збігається з напрямом одного з найбільш дотичних

напружень для даної точки середовища. Очевидно (див. рис. 1а), що

$$\theta = \pi/4 - \alpha. \quad (7)$$

Враховуючи в подальшому, що $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = K$, отримаємо, відповідно кругу Мора (див. рис. 1б), що

$$\sigma_r = \sigma + K \sin 2\theta, \sigma_z = \sigma - K \sin 2\theta, \tau_{rz} = -K \cos 2\theta, \quad (8)$$

де $\sigma_r = (\sigma_r + \sigma_z)/2$. Далі матимемо

$$\sigma_1 = (\sigma_3 + \sigma_1)/2 + (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \sigma + K. \quad (9)$$

Підставляючи вирази для напружень $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_{rz}, \sigma_\phi$ в рівняння рівноваги середовища

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0, \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (10)$$

переходимо до двох диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial r} + 2K \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial r} + 2K \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{1}{r}(K - K \sin 2\theta) &= 0; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial z} + 2K \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial r} - 2K \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{1}{r}K \cos 2\theta &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

для двох невідомих функцій σ і θ змінних r і z .

Ці рівняння відносяться до класу гіперболічних рівнянь математичної фізики. Їхні характеристики ортогональні між собою, і дотичні до них утворюють з напрямом r кути θ і $\pi/2 + \theta$ в кожній точці середовища, крім відмічених вище особливих точок. Дійсно, якщо помножити перше рівняння на $\cos \theta$, друге на $\sin \theta$, окремо додаючи їхні праві та ліві частини, отримаємо

$$\cos \theta \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} + 2K \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \sin \theta \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} + 2K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{K}{r} (\cos \theta - \sin \theta). \quad (12)$$

Помножуючи, в свою чергу, перше рівняння на $-\sin \theta$, друге – на $\cos \theta$ і, знову додаючи, маємо

$$-\sin \theta \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} - 2K \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \cos \theta \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} - 2K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{K}{r} (\cos \theta - \sin \theta). \quad (13)$$

Ввівши нові змінні, переходимо до системи двох рівнянь:

$$\begin{aligned} \cos \theta \frac{\partial \xi}{\partial r} + \sin \theta \frac{\partial \xi}{\partial z} &= \frac{1}{r} (\cos \theta - \sin \theta); \\ -\sin \theta \frac{\partial \eta}{\partial r} + \cos \theta \frac{\partial \eta}{\partial z} &= \frac{1}{r} (\cos \theta - \sin \theta), \end{aligned} \quad (14)$$

які можна також представити у вигляді: $\xi = (\sigma + 2K\theta)/K$, $\eta = (\sigma - 2K\theta)/K$

$$\frac{\partial \xi}{\partial s} = \frac{1}{r} (\cos \theta - \sin \theta), \frac{\partial \eta}{\partial s'} = \frac{1}{r} (\cos \theta - \sin \theta), \theta = \frac{1}{4} (\xi - \eta), \quad (15)$$

де $\partial/\partial s$ і $\partial/\partial s'$ – похідні по напрямках, що утворюють кути θ і $\pi/2 + \theta$ з віссю r , тобто по площадках найбільших дотичних напружень в даній точці середовища (див. рис. 1).

Знаючи функції ξ і η на границі середовища АВ (рис. 2), можна, розв'язуючи задачу Коші, побудувати лінії ковзання обох сімейств ξ і η в трикутній області АВС, що примикає до вільної границі.

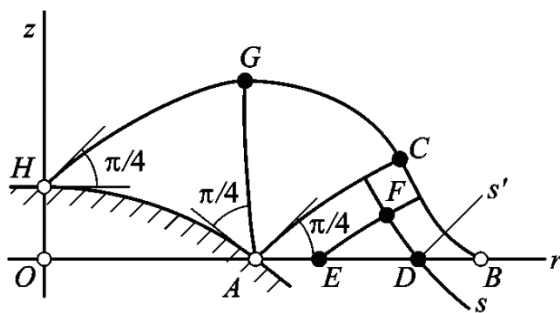


Рис. 2. Розв'язок задачі Коші

Отримані значення можна порівняти із експериментальними і таким чином оцінити достовірність результатів, отриманих за даною методикою. На рис. 3 отримані лінії ковзання показані в зменшеному масштабі.

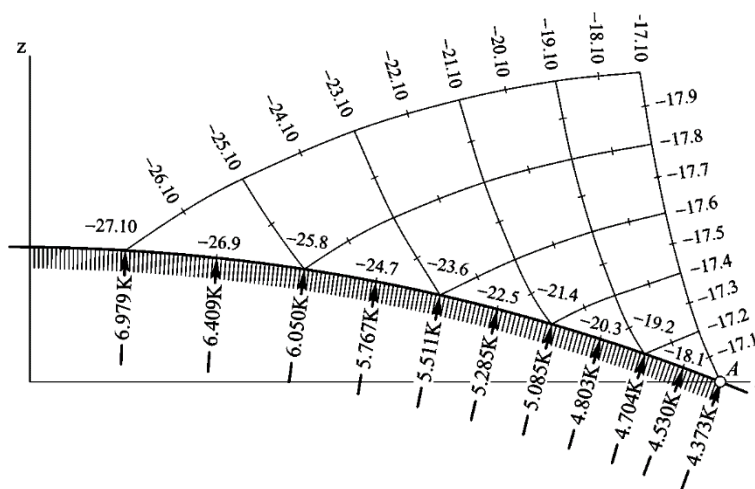


Рис. 3. Лінії ковзання для кульки

Результати обчислень значень функцій ξ і η в криволінійному трикутнику ABC наведені в табл. 1. Порядок цих і подальших обчислень пояснюється схемою, яка представлена на рис. 2, клітинки якої відповідають даним табл. 1.

Таблиця 1

Значення функцій ξ і η

№	Шукана функція	-27	-25	-23	-21	-19	-17
10	ξ	-4,447	-4,176	-3,940	-3,749	-3,582	-3,447
	η	-7,390	-6,205	-5,420	-4,808	-4,269	-3,816
	θ	0,735	0,507	0,370	0,265	0,172	0,092
8	ξ		-3,782	-3,661	-3,529	-3,402	-3,292
	η		-6,318	-5,550	-4,929	-4,379	-3,907
	θ		0,634	0,472	0,350	0,244	0,156
6	ξ			-3,393	-3,307	-3,212	-3,123
	η			-5,629	-5,018	-4,467	-4,001
	θ			0,559	0,428	0,314	0,219
4	ξ				-3,091	-3,022	-2,952
	η				-5,079	-4,536	-4,071
	θ				0,497	0,379	0,280
2	ξ					-2,818	-2,764
	η					-4,590	-4,129
	θ					0,443	0,341
0	ξ						-2,571
	η						-4,173
	θ						0,400

Істотними для подальшої побудови є точки $[0,1]$, $[0,2]$, $[0,3]$, ..., $[0,10]$, які перебувають на лінії ковзання АС (див. рис. 2, 3).

Далі в згаданих точках плоскої контактної поверхні підраховувались значення функції σ і напруження σ_z за формулами

$$\sigma = K \frac{\xi + \eta}{2} = K \left(\xi - \frac{\pi}{2} \right); \quad \sigma_z = \sigma - K = K \left(\xi - \frac{\pi}{2} - 1 \right). \quad (16)$$

і вимірювались на кресленні відстані (в міліметрах) цих точок від осі z. Інтеграл

$$P = 2\pi \int_{AH} r q dr (q = |\sigma_1| = |\sigma_z|), \quad (17)$$

що є повним зусиллям тиску кульки на пластичне середовище, розраховувався наближено за формулою трапецій.

Головні напруження σ_1 , σ_2 , σ_3 розраховували за формулами

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma - K; \quad \sigma_3 = \sigma + K. \quad (18)$$

Показник напруженого стану η_0 розраховували за формулою

$$\eta_0 = \frac{3\sigma}{\sigma_u} = \frac{3\sigma}{2K} = \frac{3}{4}(\xi + \eta), \quad (19)$$

а параметр Надаї-Лоде за формулою

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (20)$$

Результати розрахунків η , μ_σ для кульок $d_1 = 30$ мм і $d_2 = 40$ мм наведені на рис. 4, 5 для глибин вдавлювання $h_1=0,6$ мм, $h_2=1,0$ мм, $h_3=1,4$ мм.

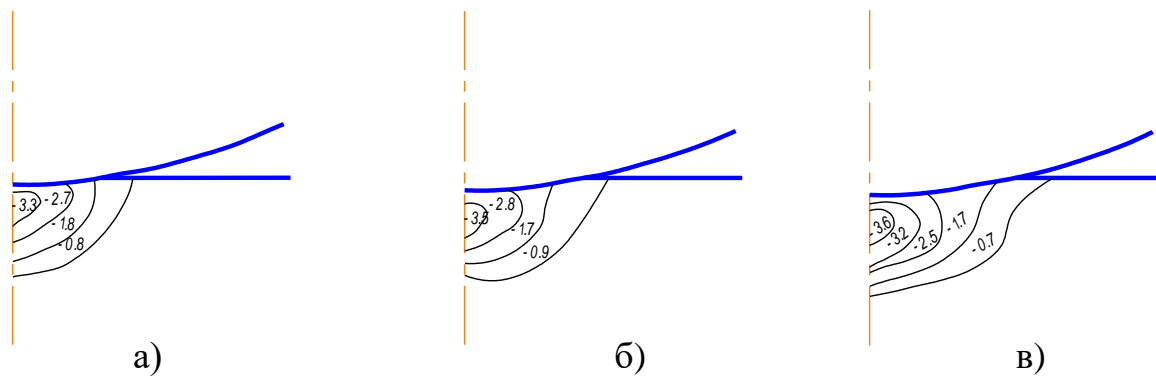


Рис. 4. Розподіл показника напруженого стану η при вдавлюванні кульки $d = 40$ мм на глибину h : а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,0$ мм; в) $h = 1,4$ мм

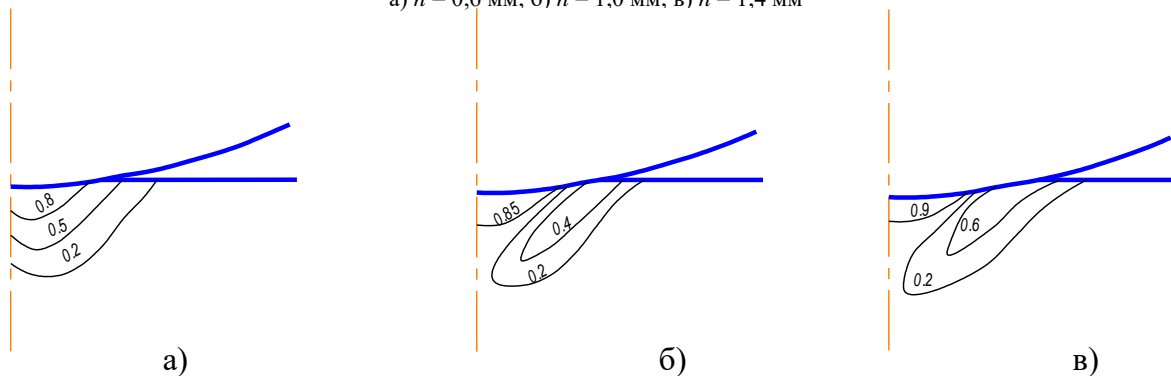


Рис. 5. Розподіл параметра Надаї-Лоде μ_σ при вдавлюванні кульки $d = 40$ мм на глибину h : а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,0$ мм; в) $h = 1,4$ мм

Компоненти тензора деформацій ε_r і ε_ϕ визначили за формулами

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = a_1 + 2a_2 r; \quad \varepsilon_\phi = \frac{u_r}{r} = a_1 + a_2 r. \quad (21)$$

Для визначення констант a_1 і a_2 приймали, що в точках середовища близьких до осі z виконується рівність $\varepsilon_r \approx \varepsilon_\phi$ і компоненти деформації є головними, тобто $\varepsilon_r = \varepsilon_\phi = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, а $\varepsilon_z = \varepsilon_3$. Прийнято припущення, що при малих змінах значень глибини вдавлювання радіальна деформація дорівнює $\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r}$, де r – радіус точки при близьких значеннях глибин вдавлювання.

Отримані значення для компоненти деформації ε_r використовували для розрахунку сталих a_1 і a_2 за формулами (17)

$$a_1 = -0,18; \quad a_2 = -0,026,$$

які підставляли в формули (21) для розрахунків ε_r і ε_ϕ . Ступінь деформації e_u визначали за формулою

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\phi^2 + \varepsilon_r \varepsilon_\phi}. \quad (22)$$

За отриманими значеннями e_u , η_0 , μ_σ в кінці кожного етапу вдавлювання розраховували використаний ресурс пластичності по критерію

$$\psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (23)$$

де $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,78 \exp(0,59\mu_\sigma - 0,71\eta)$ – поверхня граничних деформацій для сталі 10 [8].

Отримані розподіли використаного ресурсу пластичності ψ по об'єму пластичної зони для кульок $d = 30$ мм і $d = 40$ мм та глибин вдавлювання $h = 0,6$ мм, $h = 1,0$ мм, $h = 1,4$ мм.

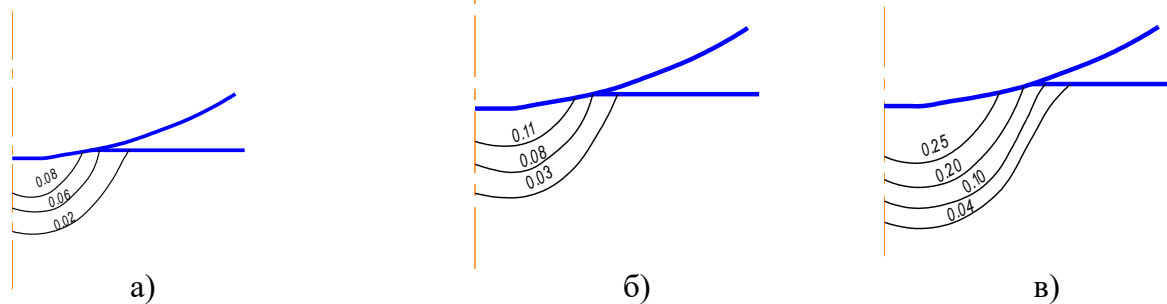


Рис. 6. Розподіл накопиченої деформації e_u при вдавлюванні кульки $d = 30$ мм на глибину h : а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,0$ мм; в) $h = 1,4$ мм

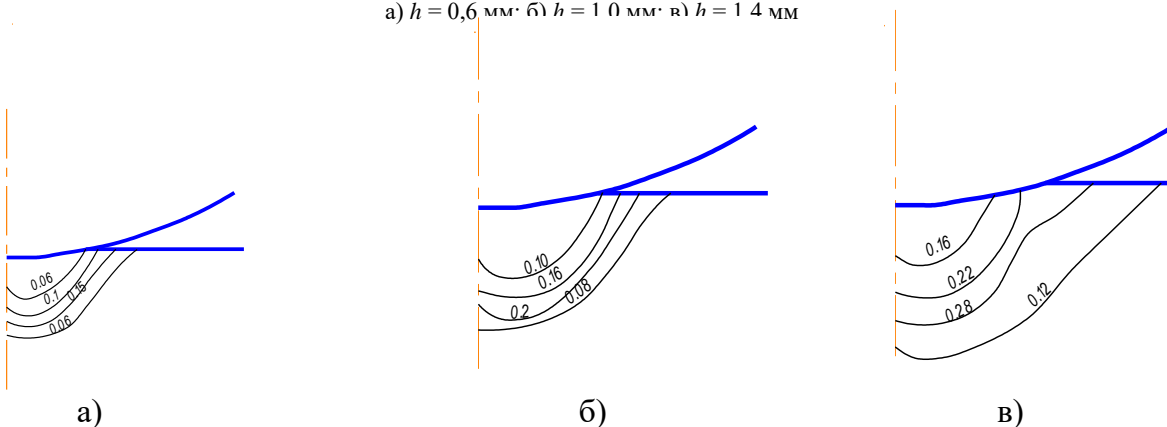


Рис. 7. Розподіл використаного ресурсу пластичності при вдавлюванні кульки $d = 30$ мм на глибину h : а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,0$ мм; в) $h = 1,4$ мм

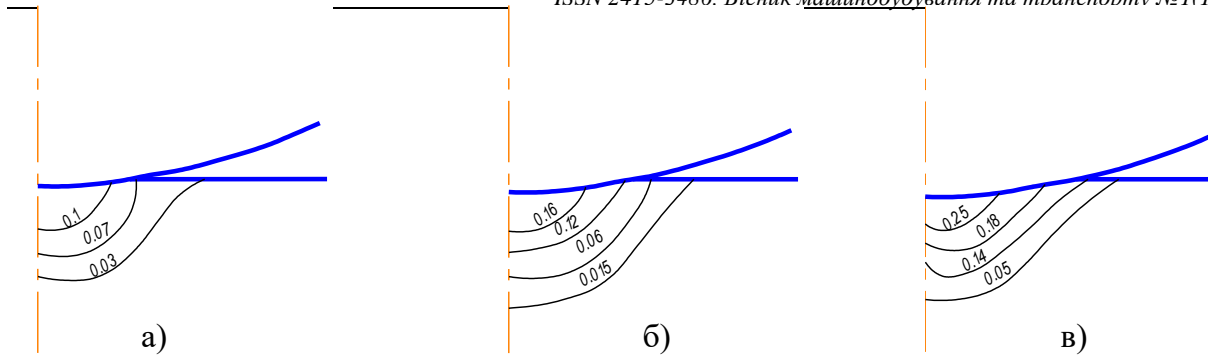


Рис. 8. Розподіл накопиченої деформації ε_a при вдавлюванні кульки $d = 40$ мм на глибину h :
а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,0$ мм; в) $h = 1,4$ мм

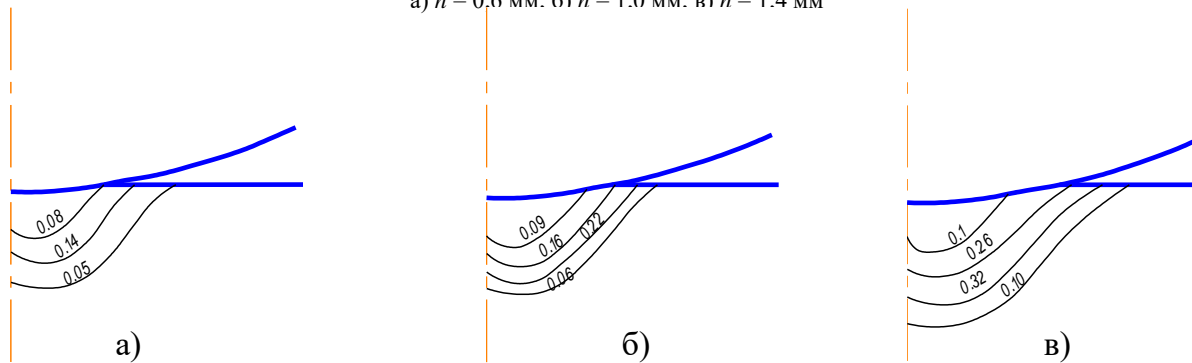


Рис. 9. Розподіл використаного ресурсу пластичності ψ при вдавлюванні кульки $d = 40$ мм на глибину h :
а) $h = 0,6$ мм; б) $h = 1,0$ мм; в) $h = 1,4$ мм

Висновки

Для кількісної оцінки впливу історії навантаження на пластичність поверхневого шару металу отримано розв'язок задачі пластичності методом ліній ковзання. Із аналізу отриманих результатів випливає, що найбільше значення використаний ресурс має на ізолінії, яка виходить на границі контакту кульки із пластичним середовищем, а на осі кульки найбільше значення використаного ресурсу пластичності має на глибині 0,2...0,5 мм. Це обумовлено тим, що в даній області показник напруженого стану η приймає відносно великі значення, параметр Надаї–Лоде близький до одиниці. Така схема навантаження сприяє більш інтенсивному накопиченню пошкоджень, ніж при малих значеннях η та від'ємних значеннях μ_σ . З порівняння значень ψ для кульок з різними діаметрами, можна зробити висновок, що при рівних глибинах вдавлювання використаний ресурс пластичності при вдавлюванні кульки $d = 40$ мм більший від значень ψ для кульки $d = 30$ мм на 10...15%. Крім того, при обкочуванні кулькою $d = 30$ мм менша величина сили деформації, тому обкочування кулькою $d = 30$ мм можна вважати більш доцільним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] О. Л. Гайдамак, В. А. Матвійчук, М. А. Колісник, «Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і газодинамічного напиління», *Вібрації в техніці та технологіях*, № 2 (97), с. 90-100, 2020.
- [2] О. Л. Гайдамак, В. А. Матвійчук, «Підвищення довговічності деталей, що працюють при повторно-змінних навантаженнях», *Вібрації в техніці та технологіях*, № 3 (98), с. 15-24, 2020.
- [3] С. В. Ковалевський, С. Ф. Маланчук, «Дослідження поверхневого пластичного деформування гвинтовим накатником», *Обработка материалов давлением*, № 2 (47), с. 124-127, 2018.
- [4] М. М. Косіюк, С. А. Костюк, «Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, с. 101-106, 2020.
- [5] V. A. Ogorodnikov, I. A. Derevenko, R. I. Sivak, "On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading", *Materials Science*, vol. 54, pp. 326-332, 2018.
- [6] В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, І. А. Бубновська, «Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 2(113), с. 56-64, 2021.
- [7] О. В. Грушко, В. А. Огородніков, Ю. О. Слободянюк, «Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного волочіння», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 103-110, 2019.
- [8] R. Sivak, "Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6/7 (90), pp. 34-41, 2017.

Гулько Ірина Василівна – канд. техн. наук, проректор з науково-педагогічної та навчальної роботи
Паладій Максим Сергійович – аспірант, e-mail: maksympaladii@gmail.com

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

I. Gunko
M. Paladiy

Evaluation of the plasticity of the surface layer of metal during rolling of cylindrical parts with a ball

Vinnitsia national agrarian university

The article deals with the study of the peculiarities of the process of plastic deformation of the surface layer of cylindrical parts during rolling with a ball. The stress-strain state and the regularities of its change, depending on the process parameters in the surface layer of the part, were determined by the slip line method and the finite element method.

The vast majority of parts of mechanisms and machines work in contact with the relevant parts, namely various friction pairs, shafts, rollers, gears or tools, product housings, strikers, and so on. Specific requirements for these parts are due to the peculiarities of the operation of the latter. As a rule, it is impossible to meet all the requirements when making parts from one material. This mainly applies to the requirements of combining the high strength characteristics of the material of the internal volume of the part and the significant hardness of the same material on its surface in contact with the corresponding part. In addition, the surface of the parts under certain conditions must have high wear resistance and low coefficient of friction (antifriction parts) or high coefficient of friction (friction parts), or self-changing surface layer, and sometimes the entire surface must have some porosity and sweat during operation .

The slip line method can be attributed to the traditional methods for solving problems of the theory of plasticity. This method can be used to solve problems in which the equations of equilibrium and plasticity create a closed system of differential equations of hyperbolic type. Therefore, this method can be used for solving plane problems, and only in some cases for solving axisymmetric problems. The solutions that can be obtained if a certain area of slip lines is directly known are called straight lines. When information about the shape of the initial slip lines is insufficient, inverse and semi-inverse methods are used.

A numerical study of the regularities of damage accumulation was carried out, calculations of the accumulated deformation, the stress state index, and the distributions of the used plastic resource over the volume of the plastic zone when rolling with a ball in the environment of a specialized software complex were carried out. The adequacy of the model is checked in comparison with the available experimental data.

On the basis of the research carried out in the article, recommendations can be developed for the choice of processing modes that provide the most rational parameters of the state of the surface layer of parts such as bodies of revolution.

Key words: surface plastic deformation, incompressibility condition, strain rate tensor, axisymmetric problem, stress-strain state, damage accumulation, used plastic resource.

Gunko Irina – Ph. D. (Eng.), vice-rector for scientific, pedagogical and educational work

Paladiy Maksym – graduate student e-mail: maksympaladii@gmail.com