

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СЕРДЮК ОЛЬГА ВАЛЕНТИНІВНА**

УДК 621.735.34

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОБКОЧУВАННЯ  
РОЛИКОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ  
ДЕФОРМОВНОСТІ**

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ О.В.Сердюк

Науковий керівник

**І.О. Сивак,**

доктор технічних наук,  
професор

Вінниця – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Сердюк О.В.* Удосконалення технології обкочування роликом із застосуванням методів теорії деформовності – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018

Останнім часом в Україні та в інших країнах особлива увага приділяється якості і технологічній спадковості готових виробів, які отримують обробкою металів тиском. Однією із важливих задач при виготовленні деталей є забезпечення високої якості робочих поверхонь і покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару їх матеріалу. Одним із найбільш економічних та ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД), яке дозволяє повніше реалізувати потенційні властивості конструкційних матеріалів в реальних деталях складної будови та в деталях з концентраторами напружень.

В даний час при поверхневій пластичній деформації граничні значення параметрів процесу визначають експериментально, в основному, шляхом вимірювання твердості. Основний недолік такого підходу полягає в тому, що при вимірюванні твердості залишається невідомою величина використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі металу. Однак відомо, що якісні експлуатаційні характеристики деталі можна гарантувати при значеннях використаного ресурсу менших 0,4...0,6.

При використанні методів теорії деформовності величина використаного ресурсу та її залежність від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації визначається на стадії проектування. При цьому необхідно мати інформацію про напружено-деформований стан в осередку деформації та закони його зміни в залежності від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації. Крім того потрібно провести експериментальні дослідження та установити залежність

пластичності металу від схеми напруженого стану. Такий підхід дозволяє отримати кількісну оцінку впливу параметрів процесу на пластичність металу в поверхневому пластично деформованому шарі заготовки.

На даний час такий підхід для визначення ефективності процесів ППД практично не застосовується. Тому в даній роботі розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану в осередку деформації методом ліній ковзання та методом скінченних елементів (МСЕ), а також методику оцінки використаного ресурсу пластичності.

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача удосконалення процесу обкочування деталей на основі використання нової конструкції інструменту і технології обробки.

Основною ідеєю при розв'язанні поставленої задачі є забезпечення якості поверхневого шару (механічних характеристик, використаного ресурсу пластичності) шляхом застосування процесу обкочування у прямому і зворотньому напрямі роликком із гвинтовою робочою поверхнею.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Вперше* розроблений метод поверхневого пластичного деформування заготовки з використанням гвинтового ролика;
2. *Вперше* досліджено вплив залишкового ресурсу пластичності при обкочуванні деталі роликком на підвищення витривалості виробів;
3. *Отримало подальший розвиток* імітаційне моделювання процесу поверхневого обкочування заготовки з визначенням напружено-деформованого стану і використаного ресурсу пластичності;
4. *Отримала подальший розвиток* оцінка впливу немонотонного деформування на величину використаного ресурсу пластичності при використанні ролика із гвинтовою робочою поверхнею.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Запропоновано конструкцію ролика із гвинтовою робочою поверхнею, що дозволило значно підвищити якість поверхневого шару металу і ступінь зміцнення за рахунок використання немонотонного поверхневого пластичного деформування;

2. Розроблено рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів ролика в залежності від механічних характеристик матеріалу обкочуваних деталей, для забезпечення необхідного рівня зміцнення при мінімальному значенні використаного ресурсу пластичності;

3. Запропоновано практичні рекомендації щодо використання методів прикладної теорії деформовності для підвищення ступеня зміцнення при мінімальному накопиченні пошкоджень металу поверхневого шару;

4. Оцінено вплив обкочування на ступінь зміцнення при обкочуванні за напрямком, в якому здійснювалась подача попередньої механічної обробки і в протилежному напрямі;

5. Запропоновано режими ППД, при яких залишкові напруження в поверхневому шарі і шорсткість поверхні сприяють суттєвому підвищенню витривалості і зниженню інтенсивності зношування поверхневого шару деталі;

6. Результати роботи впроваджено на Барському машинобудівному заводі

Найбільш ефективним напрямом удосконалення технології обкочування роликом є вибір раціональних параметрів геометрії інструменту та технології процесу. Враховуючи складний характер пластичної течії металу поставлене завдання розв'язувалось з використанням різних методів: метода ліній ковзання, інженерного метода, метода скінченних елементів.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що існує значна немонотонність деформування, обумовлена тим, що перед роликом виникає хвиля, в якій мають місце напруження розтягу, тоді як під роликом виникає напружений стан всестороннього стиску. Крім того, при зміні напрямку обкочування змінюється знак дотичних напружень, що сприяє частковому заліковуванню мікротріщин і, відповідно, зменшенню величини використаного ресурсу пластичності.

За результатами досліджень було встановлено, що самим оптимальним є режим обробки, при якому використовується інструмент з трьома витками і обкочування виконується одноразово в двох протилежних напрямках. Це дозволяє збільшити твердість вихідної заготовки майже вдвічі і отримати

поверхню з мінімальною шорсткістю. При обкочуванні інструментом тороїдальної форми в два проходи, але в одному напрямі, при досягненні тих же ступеней деформації, на поверхні деталі мало місце руйнування її поверхневого шару. Отримані результати показують перевагу немонотонного деформування, так як в даних випадках, при однаковій ступені деформації поверхневого шару металу, використаний ресурс пластичності в першому випадкові значно менший.

У дисертаційній роботі отримано новий розв'язок актуальної науково-технічної задачі: удосконалення технології обкочування роликом на основі розвитку методів розрахунку напружено-деформованого стану і ресурсу пластичності матеріалу при немонотонній деформації та розробки рекомендацій по удосконаленню технології процесу.

Основні наукові положення та практичні результати, отримані в роботі, такі:

1. Розширено та уточнено методики розрахунку напружено-деформованого стану при обкочуванні. Отримані результати можуть бути використані для попереднього вибору діапазону значень геометричних параметрів інструмента.

2. Виконано чисельне моделювання процесу деформування поверхневого шару матеріалу деталей при обкочуванні з використанням МСЕ, в результаті якого встановлено напружено-деформований стан матеріалу в залежності від параметрів обкочування.

3. Визначено напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика з довільною кривизною робочої поверхні в поверхню довільної кривизни. Установлено, що в загальному випадку, коли контур вм'ятини має еліптичну форму, розподіл тиску по поверхні контактної площадки трансформується від еліптичного на пружній стадії деформації до близького рівномірному при розвинутій пластичній деформації в зоні контакту.

4. Вперше запропоновано методику оцінки впливу неоднорідності розподілу пластичних деформацій на пластичність металу з урахуванням комплексного впливу схеми напруженого стану, що дозволило більш точно оцінити вплив параметрів процесу на пластичність металу поверхневого шару при ППД, для

осередку деформації якого характерна значна неоднорідність напружено-деформованого стану.

5. Установлено вплив фізико-механічних характеристик матеріалу деталі та геометричних характеристик поверхонь деталі і інструменту на величину використаного ресурсу пластичності і ступінь зміцнення. Отримані залежності можна використати для призначення параметрів процесу зміцнення циліндричних та плоских поверхонь деталей.

6. Показано, що великих пластичних деформацій можна досягти при певних умовах немонотонної поверхневої пластичної деформації. При цьому сильно деформований поверхневий шар металу набуває якісно нових властивостей, більшість із яких мають практичне значення. Завдяки немонотонності пластичної деформації, метал поверхневого шару набуває високої пластичності в поєднанні з великою міцністю. Установлено, що при немонотонній пластичній деформації величина накопиченого ресурсу пластичності, в порівнянні з монотонним деформуванням, зменшується на 35%, при інших рівних умовах.

7. Отримані в роботі результати у вигляді програмних продуктів, конструкції інструмента та технологічних рекомендацій побудови процесу обкочування прийняті до впровадження Барським машинобудівними заводом.

**Ключові слова:** напруження, деформації, пластичність, обкочування роликком, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

## ABSTRACT

*Serdyuk O.V.* Improving the technology of rolled up a roller using methods of the theory of deformity - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.03.05 - "Processes and machines of pressure treatment". - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018

Recently, in Ukraine and in other countries, special attention is paid to the quality and technological heredity of finished products, which receive metal treatment by pressure. One of the important tasks in the production of parts is to ensure the high quality of the working surfaces and improve the physical and mechanical characteristics of the surface layer of their material. One of the most economical and effective ways of solving this problem is to strengthen details by surface plastic deformation (PPE), which allows to more fully realize the potential properties of structural materials in real details of complex structure and in details with stress concentrators.

At present, with surface plastic deformation, the limiting values of process parameters are determined experimentally, mainly by measuring hardness. The main disadvantage of this approach is that when measuring the hardness the unknown value of the used plasticity resource in the surface layer of the metal remains. However, it is known that the qualitative performance of the part can be guaranteed with values of the used resource of less than 0.4 ... 0.6.

Using the methods of deformability theory, the value of the resource used and its dependence on the parameters of the process of surface plastic deformation is determined at the design stage. It is necessary to have information about the stress-strain state in the deformation cell and the laws of its change, depending on the parameters of the process of surface plastic deformation. In addition, it is necessary to conduct experimental studies and to establish the dependence of metal ductility on the stress-state scheme. This approach allows us to obtain a quantitative estimate of the influence of process parameters on the plasticity of the metal in the surface plastically deformed layer of the workpiece.

At present, such an approach to determining the effectiveness of PPD processes is practically not applicable. Therefore, in this paper a method for calculating the stress-strain state in the deformation cell by the method of slip lines and the method of finite elements (ITU) is developed, as well as the method of evaluation of the used plasticity resource.

The dissertation solves the actual scientific and technical problem of improving the process of scaling parts based on the use of new design tools and processing technology.

The main idea when solved the problem is to provide the quality of the surface layer (mechanical characteristics, used plasticity resource) by applying the process of squeezing in a direct and reverse direction with a roller with a screw working surface.

Scientific novelty of the obtained results.

1. For the first time the method of surface plastic deformation of a workpiece using a screw roller was developed;
2. For the first time the effect of the residual plasticity property on the rolling of the roller part on the increase of endurance of products was investigated;
3. Further development of simulation modeling of the process of surface mooring of the workpiece with the definition of the stress-strain state and the used plasticity resource was obtained;
4. A further development of the estimation of the influence of nonmonotonic deformation on the value of the used plasticity resource was obtained when using a roller with a screw working surface.

The practical value of the results obtained.

1. The construction of the roller with a screw working surface has been proposed, which allowed to significantly improve the quality of the surface layer of the metal and the degree of strengthening due to the use of nonmonotonic surface plastic deformation;
2. Recommendations on the choice of structural parameters of the roller, depending on the mechanical characteristics of the material of the rolled parts, have been developed, to provide the necessary level of strength at the minimum value of the used plasticity resource;
3. Practical recommendations for using the methods of applied theory of



deformability for increasing the degree of strengthening with minimal accumulation of metal damage to the surface layer are proposed;

4. Estimation of the effect of rendering on the degree of hardening during rigging in the direction in which the filing of the previous machining was carried out and in the opposite direction;

5. The PPP modes are proposed, in which residual stresses in the surface layer and surface roughness contribute to a significant increase in endurance and reduce the intensity of wear of the surface layer of the part;

6. The results of the work have been implemented at the Barsk Machine-Building Plant

The most effective direction for improving the technology of roughing roller is the choice of rational parameters of the geometry of the tool and process technology. Given the complex nature of the plastic flow of the metal, the task was solved using various methods: the method of slip lines, the engineering method, the method of finite elements.

Analyzing the obtained results it can be concluded that there is a significant nonmonotonic deformation due to the fact that there is a wave in front of the roller in which there is a stress tension, while under the roller there is a stressful state of comprehensive compression. In addition, when changing the direction of obstruction, the sign of tangential stresses, which contributes to the partial recovery of microcracks and, consequently, to reduce the value of the used resource of plasticity.

According to the results of researches, it was established that the optimal mode is treatment, in which a tool with three turns is used and the routing is performed once in two opposite directions. This allows you to increase the hardness of the original workpiece almost twice and get a surface with a minimum roughness. When the tool is toroidal in two passes, but in one direction, when the same degrees of deformation have been reached, the surface of the part took place the destruction of its surface layer. The obtained results show the advantage of nonmonotonic deformation,

as in these cases, with the same degree of deformation of the surface layer of the metal, the resource of plasticity in the first case is much smaller.

In the dissertation the new solution of the actual scientific and technical problem is received: improvement of the technology of rolled up roller on the basis of the development of methods for calculating the stress-strain state and the resource of material plasticity during nonmonotonic deformation and the development of recommendations for the improvement of process technology.

The main scientific findings and practical results obtained in the work are:

1. Expanded and refined methods of calculating the stress-strain state during apportioning. The results obtained can be used to pre-select the range of values of geometric parameters of the tool.

2. Numerical simulation of the deformation process of the surface layer of the material of parts during routing with the use of ITU was performed, which resulted in the stressed-deformed state of the material, depending on the parameters of lining.

3. The stressed-deformed state in the deformation cell is determined when the toroidal roller is squeezed with arbitrary curvature of the working surface into the surface of arbitrary curvature. It has been established that in the general case, when the denture contour has an elliptical shape, the pressure distribution across the surface of the contact pad is transformed from the elliptic to the elastic deformation stage to close uniform with the developed plastic deformation in the contact area.

4. The method for estimating the influence of the heterogeneity of the distribution of plastic deformations on the plasticity of the metal has been proposed for the first time, taking into account the complex influence of the stress-strain diagram, which made it possible to more accurately assess the influence of the process parameters on the plasticity of the metal of the surface layer at the PPP, for which deformation cell is characterized by significant heterogeneity of the stress-strain state.

5. The influence of the physical and mechanical characteristics of the material of the part and the geometric characteristics of the surfaces of the part and the tool on the value of the used resource of plasticity and degree of strengthening are established. The obtained dependencies can be used to assign parameters of the process of strengthening the cylindrical and flat surfaces of parts.

6. It is shown that large plastic deformations can be achieved under certain conditions of nonmonotonic surface plastic deformation. At the same time, the highly deformed surface of the metal acquires qualitatively new properties, most of which have practical value. Due to the nonmonotonicity of plastic deformation, the metal of the surface layer acquires high plasticity in combination with high strength. It was established that when nonmonotonic plastic deformation the value of the accumulated resource of plasticity, in comparison with monotonic deformation, is reduced by 35%, under other equal conditions.

7. The results obtained in the form of software products, the design of the tool and the technological recommendations for the construction of the peeling process adopted for implementation by the Barsk Machine-Building Plant

**Keywords:** stress, deformations, plasticity, deformation of roller, the stress-strain state, the finite element method.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] О. В. Сердюк, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков, та Р. І. Сивак, «Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 54, с. 277-281, 2016.

[2] О. В. Сердюк, І. О. Сивак і М. А. Карватко, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 40, с. 251-256, 2013.

[3] О. В. Сердюк «Моделирование процесса деформирования поверхностного слоя при обкатке цилиндрическим роликом», *Обработка материалов давлением*, №3 (32), с. 15-18, 2012.

[4] Р. И. Сивак, О. В. Сердюк, и И. О. Сивак, «Влияние немонотонности пластической деформации на напряжённое состояние», *Обработка материалов давлением*, №2 (23), с. 3-7, 2010.

[5] О. В. Дерібо, О. В. Сердюк, і І. О. Сивак, «Електрогідравлічний стежний привод пристрою для обробки поверхневим пластичним деформуванням», *Вісник ВПІ*, №6, с. 76-79, 2010.

[6] R. I. Sivak, O. V. Serdiuk, and S. Z. Yablonska, "Evaluation of the metal surface layer plasticity in the process of surface plastic deformation", *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia: Stiinta si ingineria materialelor*, Tomul LV (LIX), Fasc. 3, p. 201-204, 2009.

[7] О. В. Карватко, О. В. Дерібо и В. Т. Ивацко, «Экспериментально-расчетное определение использованного ресурса пластичности в порверхностном слое при обкатке цилиндрическими роликами», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1 (19), с. 211-214, 2008.

[8] Р. И. Сивак, и О. В. Карватко, «Особенности оценки пластичности металлов при поверхностной пластической деформации», *Удосконалення процесів і*

обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, с. 93-95, 2007.

[9] Р. И. Сивак, О. В. Карватко, и В. Т. Ивацко, «Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, №1 (3), с. 18-20, 2006.

[10] О. В. Сердюк та Т. В. Ярошенко «Ролик для обкочування металевих деталей», Пат. 76462 Україна, МПК В 24 В 39/00 № u 2012 05857, Бюл. №1, заявл. 14.05.2012, опубл. 10.01.2013.

[11] О. В. Карватко, И. О. Сивак и И. Г. Савчинский, «Пластичность пористых материалов при поверхностной пластической деформации», на *49-ой МНТК. Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров*, Москва, МГТУ «МАМИ», 23–24 марта 2005, с. 42-44.

[12] О. В. Сердюк та Л. Г. Козлов, «Система керування пневмоприводом обкочувальної головки», на *XVIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика»*, Вінниця, ВНТУ, 3-6 жовтня 2017, с. 97-98.

[13] І. О. Сивак, О. В. Сердюк та В. Г. Шевчук, «Дослідження напружено-деформованого стану при поверхневій пластичній деформації», на *II Міжнародній науково-технічній конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування»*, Вінниця, ВНТУ, 15 - 16 листопада 2016, с. 218-220

[14] О. В. Сердюк, І. О. Сивак та В. В. Савуляк, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при втисканні тороїдального ролика», на *4-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій»*, Львів, НУ «Львівська політехніка», 30-31 жовтня 2014, с. 48-49.

[15] О. В. Сердюк, «Поверхностное пластическое деформирование инструментом с рабочей поверхностью наклоненной к оси вращения инструмента», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз»*, Вінниця, ВНТУ, 30 травня - 2 червня 2011, с. 214-215.

[16] О. В. Карватко, «Експериментальне дослідження процесу обкатки роликком», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах»*, Вінниця, ВНТУ, 29 травня-1 червня 2006, с. 126-128.

[17] В. Т. Ивацко, О. В. Карватко, Р. С. Драганюк та В. А. Пересунько, «Определение накопленной деформации поверхностного слоя при поверхностном пластическом деформировании», на *Міжн. науково-технічній конференції «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах»*, Вінниця, ВНТУ, 29 травня-1 червня 2006, с. 104-106.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ I СТАН ПИТАННЯ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	25
1.1 Сучасні методи ППД. Залежність механічних властивостей пластично деформованого поверхневого шару від параметрів процесу.....	25
1.2 Експериментально-розрахункові та інженерні методи визначення напружено-деформованого стану поверхневого шару.....	32
1.3 Порівняльний аналіз визначення глибини зміцнення при поверхневій пластичній деформації за різними методиками.....	34
1.4 Оцінка пластичності металу в поверхневому шарі.....	36
1.5. Вплив параметрів процесу ППД на технологічну спадковість.....	38
1.6 Висновки до розділу та постановка задач дослідження.....	46
РОЗДІЛ II НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБКОЧУВАННІ РОЛИКОМ.....	48
2.1 Розрахунок НДС в осередку деформації при втискуванні тороїдального ролика.....	48
2.1.1 Визначення піввісей контура залишкової вм'ятини.....	48
2.1.2 Напружено-деформований стан в осередку деформації. Глибина пластично деформованого шару.....	51
2.1.3 Деформований стан в осередку деформації.....	53
2.2 Знаходження НДС поверхневого шару методом ліній ковзання.....	60
2.3 Дослідження напружено –деформованого стану методом скінченних елементів.....	69
2.4 Висновки до розділу.....	72
РОЗДІЛ III ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ.....	73
3.1 Визначення механічних характеристик матеріалу заготовки.....	73

3.2 Побудова поверхні граничних деформацій. Тарувальний графік матеріалу деталі.....	78
3.3. Дослідження напруженого стану в поверхневому шарі методом вимірювання твердості.....	85
3.4 Висновки до розділу.....	92
<b>РОЗДІЛ IV АНАЛІЗ ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ТА ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЗАГОТОВКИ ПРИ ППД.....</b>	
4.1 Напружено-деформований стан в осередку деформації. Глибина пластично деформованого шару.....	93
4.2 Визначення накопичених деформацій поверхневого шару при обкатці циліндричними роликками.....	99
4.3 Моделювання процесу обкочування заготовки роликком.....	106
4.4 Оцінка використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі металу.....	112
4.5 Оцінка впливу параметрів процесу поверхневого пластичного деформування на зміцнення та величину використаного ресурсу пластичності.....	122
4.6 Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні.....	127
4.7 Висновки до розділу .....	135
<b>Розділ V ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ППД НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ДЕФОРМОВАНOSTІ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	
5.1 Обладнання для поверхневої пластичної деформації.....	136
5.2 Дослідження зміцнення поверхневого шару при немонотонному навантаженні.....	138
5.3 Вплив геометричних параметрів інструменту на величину	



використаного ресурсу пластичності	140
.....	
5.4 Аналіз впливу параметрів процесу на інтенсивність зміцнення та накопичення пошкоджень.....	145
5.5 Висновки до розділу.....	149
ВИСНОВКИ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	164
...	
Додаток А Акт впровадження.....	165
Додаток Б Моделювання методом скінченних елементів .....	166
Додаток Б1 Програмний модуль по автоматизованому розрахунку параметрів напружено-деформованого стану .....	166
Додаток Б2 Результати моделювання.....	174
Додаток В Список публікацій за темою дисертації.....	181

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Останнім часом в Україні та в інших країнах особлива увага приділяється якості і технологічній спадковості готових виробів, які отримують обробкою металів тиском. Однією із важливих задач при виготовленні деталей є забезпечення високої якості робочих поверхонь і покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару їх матеріалу. Одним із найбільш економічних та ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД), яке дозволяє повніше реалізувати потенційні властивості конструкційних матеріалів в реальних деталях складної будови та в деталях з концентраторами напружень.

В даний час при поверхневій пластичній деформації граничні значення параметрів процесу визначають експериментально, в основному, шляхом вимірювання твердості. Основний недолік такого підходу полягає в тому, що при вимірюванні твердості залишається невідомою величина використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі металу. Однак відомо, що якісні експлуатаційні характеристики деталі можна гарантувати при значеннях використаного ресурсу менших 0,4...0,6.

При використанні методів теорії деформовності величина використаного ресурсу та її залежність від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації визначається на стадії проектування. При цьому необхідно мати інформацію про напружено-деформований стан в осередку деформації та закони його зміни в залежності від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації. Крім того потрібно провести експериментальні дослідження та установити залежність пластичності металу від схеми напруженого стану. Такий підхід дозволяє отримати кількісну оцінку впливу параметрів процесу на пластичність металу в поверхневому пластично деформованому шарі заготовки.

На даний час такий підхід для визначення ефективності процесів ППД практично не застосовується. Тому в даній роботі розроблено методику розрахунку

напружено-деформованого стану в осередку деформації методом ліній ковзання та методом скінченних елементів (МСЕ), а також методику оцінки використаного ресурсу пластичності.

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача удосконалення процесу обкочування деталей на основі використання нової конструкції інструменту і технології обробки.

Основною ідеєю при розв'язанні поставленої задачі є забезпечення якості поверхневого шару (механічних характеристик, використаного ресурсу пластичності) шляхом застосування процесу обкочування у прямому і зворотньому напрямі роликком із гвинтовою робочою поверхнею.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження виконані у відповідності з науковим напрямом однієї з провідних наукових шкіл Вінницького національного технічного університету "Розвиток феноменологічної теорії руйнування матеріалів при великих пластичних деформаціях та розробка на цій основі нових та удосконалення існуючих технологій обробки металів тиском". Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачених планами Міністерством освіти і науки України (номер державної реєстрації тем 0111U003458, 0112U001366, 0110U002171), автор брав участь у виконанні тем як виконавець.

### **Мета і завдання дослідження.**

Підвищення якості та технологічної спадковості поверхневого шару металу заготовки пластично зміцненого обкочуванням роликком на основі розвитку методів розрахунку напружено-деформованого стану і ресурсу пластичності матеріалу при немонотонній деформації та розробки рекомендацій по удосконаленню технології процесу.

Для досягнення вказаної мети в роботі були поставлені і вирішені наступні завдання:

1. На основі аналізу сучасного стану і перспектив розвитку процесів обкочування деталей сформулювати їх недоліки та визначити основні задачі дослідження, які забезпечать високі параметри якості поверхневого шару деталей

та підвищення технологічної спадковості виробів;

2. Виконати чисельне моделювання процесу деформування поверхневого шару матеріалу деталей при обкочуванні з використанням МСЕ;

3. Розробити математичну модель контактної взаємодії деталі та інструмента при обкочуванні роликком та визначити вплив технологічних факторів на використаний ресурс пластичності;

4. Розробити методику теоретичного та експериментального дослідження впливу використаного ресурсу пластичності на службові характеристики виробів;

5. Запропонувати та реалізувати нові технічні рішення, що забезпечують підвищення ефективності обкочування;

6. Експериментально визначити показники якості поверхневого шару заготовки при обкочуванні та оцінити вплив на них технологічних параметрів процесу обкочування;

7. Виконати узагальнення технічних рішень та розробити рекомендації щодо їх впровадження. Впровадити технологічні процеси на підприємствах машинобудівної галузі.

**Об'єкт дослідження** – процес поверхневого пластичного деформування при обкочуванні роликком

**Предмет дослідження** – закономірності пластичного деформування та зміни величини використаного ресурсу пластичності матеріалу деталей при обкочуванні роликком, та їх вплив на технологічну спадковість виробів.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження пластичності металів базуються на законах і методах механіки суцільного середовища, математичної та прикладної теорії пластичності, прикладної теорії деформовності. Для дослідження процесів пластичної деформації використані числові та експериментально-розрахункові методи із застосуванням ЕОМ.

Експериментальні дослідження виконувались як в лабораторних, так і у виробничних умовах з використанням лабораторного і заводського обладнання. Обробка експериментальних даних проводилась методами математичної статистики.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше розроблений метод поверхневого пластичного деформування заготовки з використанням гвинтового ролика;
2. Вперше досліджено вплив залишкового ресурсу пластичності при обкочуванні деталі роликом на підвищення витривалості виробів;
3. Отримало подальший розвиток імітаційне моделювання процесу поверхневого обкочування заготовки з визначенням напружено-деформованого стану і використаного ресурсу пластичності;
4. Отримала подальший розвиток оцінка впливу немоного деформування на величину використаного ресурсу пластичності при використанні ролика із гвинтовою робочою поверхнею.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Запропоновано конструкцію ролика із гвинтовою робочою поверхнею, що дозволило значно підвищити якість поверхневого шару металу і ступінь зміцнення за рахунок використання немоного поверхневого пластичного деформування;
2. Розроблено рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів ролика в залежності від механічних характеристик матеріалу обкочуваних деталей, для забезпечення необхідного рівня зміцнення при мінімальному значенні використаного ресурсу пластичності;
3. Запропоновано практичні рекомендації щодо використання методів прикладної теорії деформовності для підвищення ступеня зміцнення при мінімальному накопиченні пошкоджень металу поверхневого шару;
4. Оцінено вплив обкочування на ступінь зміцнення при обкочуванні за напрямком, в якому здійснювалась подача попередньої механічної обробки і в протилежному напрямі;
5. Запропоновано режими ППД, при яких залишкові напруження в поверхневому шарі і шорсткість поверхні сприяють суттєвому підвищенню витривалості і зниженню інтенсивності зношування поверхневого шару деталі;
6. Результати роботи впроваджено на Барському машинобудівному заводі

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати досліджень отримані автором самостійно.

В роботах, що опубліковані у співавторстві, автору належать: моделювання процесу і побудова траєкторій навантаження при обкочуванні [2]; розрахунок НДС та математичне моделювання процесу за допомогою МСЕ [3]; розрахунок НДС з врахуванням немонотонності і ефекту Баушингера [4]; розробка конструктивної схеми електрогідравлічного стежного приводу обкатника [5]; отримання розв'язку кінетичного рівняння, що описує процес накопичення пошкоджень при поверхневій пластичній деформації, розробка методу оцінки ймовірності появи макротріщини в поверхневому шарі при немонотонній пластичній деформації [6,8,9]; теоретичне обґрунтування нового пристрою для обкочування металевих деталей [10].

### **Апробація матеріалів дисертації.**

Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях, серед них: 4-та Міжнародна науково-технічна конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2014 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (м. Вінниця, 2011 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах (м. Вінниця, 2006 р.); 49-я Міжнародна науково-технічна конференція ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» (м. Москва, 2005 р.); III Міжнародна науково-технічна конференція «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (м. Вінниця, 2016 р.); XVIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Вінниця, 2017 р.)

### **Публікації.**

Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 17 наукових роботах, з них 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях згідно

переліку МОН України, 1 публікація у закордонному виданні, 7 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій. За результатами досліджень отримано патент України.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, який нараховує 113 найменувань, 3 додатки на 20 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 183 сторінки (з них 133 сторінки основної частини, 46 рисунків, 3 таблиці).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] О. В. Сердюк, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков, та Р. І. Сивак, «Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 54, с. 277-281, 2016.

[2] О. В. Сердюк, І. О. Сивак і М. А. Карватко, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 40, с. 251-256, 2013.

[3] О. В. Сердюк «Моделирование процесса деформирования поверхностного слоя при обкатке цилиндрическим роликом», *Обработка материалов давлением*, №3 (32), с. 15-18, 2012.

[4] Р. І. Сивак, О. В. Сердюк, и И. О. Сивак, «Влияние немонотонности пластической деформации на напряжённое состояние», *Обработка материалов давлением*, №2 (23), с. 3-7, 2010.

[5] О. В. Дерібо, О. В. Сердюк, і І. О. Сивак, «Електрогідравлічний стежний привод пристрою для обробки поверхневим пластичним деформуванням», *Вісник ВПІ*, №6, с. 76-79, 2010.

[6] R. I. Sivak, O. V. Serdiuk, and S. Z. Yablonska, "Evaluation of the metal surface layer plasticity in the process of surface plastic deformation", *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia: Stiinta si ingineria materialelor*, Tomul LV (LIX), Fasc. 3, p.

201-204, 2009

[7] О. В. Карватко, О. В. Дерибо и В. Т. Ивацко, «Экспериментально-расчетное определение использованного ресурса пластичности в поверхностном слое при обкатке цилиндрическими роликами», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1 (19), с. 211-214, 2008.

[8] Р. И. Сивак, и О. В. Карватко, «Особенности оценки пластичности металлов при поверхностной пластической деформации», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 93-95, 2007.

[9] Р. И. Сивак, О. В. Карватко, и В. Т. Ивацко, «Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, №1 (3), с. 18-20, 2006.

[10] О. В. Сердюк та Т. В. Ярошенко «Ролик для обкочування металевих деталей», Пат. 76462 Україна, МПК В 24 В 39/00 № и 2012 05857, Бюл. №1, заявл. 14.05.2012, опубл. 10.01.2013.

[11] О. В. Карватко, И. О. Сивак и И. Г. Савчинский, «Пластичность пористых материалов при поверхностной пластической деформации», на *49-ой МНТК. Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров*, М., МГТУ «МАМИ», 23–24 марта 2005, с. 42-44.

[12] О. В. Сердюк та Л. Г. Козлов, «Система керування пневмоприводом обкочувальної головки», на *XVIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика»*, Вінниця, ВНТУ, 3-6 жовтня 2017, с. 97-98.

[13] І. О. Сивак, О. В. Сердюк та В. Г. Шевчук, «Дослідження напружено-деформованого стану при поверхневій пластичній деформації», на *II Міжнародній науково-технічній конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування»*, Вінниця, ВНТУ, 15-16 листопада 2016, с. 218-220

[14] О. В. Сердюк, І. О. Сивак та В. В. Савуляк, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при втисканні тороїдального ролика», на *4-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій»*, Львів, НУ «Львівська



політехніка», 30-31 жовтня 2014, с. 48-49.

[15] О. В. Сердюк, «Поверхностное пластическое деформирование инструментом с рабочей поверхностью наклоненной к оси вращения інструмента», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз»*, Вінниця, ВНТУ, 30 травня-2 червня 2011, с. 214-215.

[16] О. В. Карватко, «Експериментальне дослідження процесу обкатки роликком», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах»*, Вінниця, ВНТУ, 29 травня-1 червня 2006, с. 126-128.

[17] В. Т. Ивацко, О. В. Карватко, Р. С. Драганюк та В. А. Пересунько, «Определение накопленной деформации поверхностного слоя при поверхностном пластическом деформировании», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах»*, Вінниця, ВНТУ, 29 травня-1 червня 2006, с. 104-106.

[18] В. А. Матвійчук, та В. М. Михалевич, «Розвиток процесів локального деформування» у *Теорія та практика обробки металів тиском*, В.О.Богуслаєва, ред. Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2016.–с. 339-360.

[19] В. А. Огородников, та А. В. Грушко, «Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тем. зб. наук. пр.*, с. 5-10, 2000.

[20] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та Ю. О. Добранюк, «Розробка процесів холодного торцевого розкочування із врахуванням впливу технологічних параметрів на напряму плин металу», *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково технічний журнал*, Вип. 2 (78), с. 92-96, 2015.

[21] В. А. Титов, В. А. Никитенко, А. В. Титов, А. А. Пливак, та А. Д. Лавриненков, «Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на інструмент», *Обработка материалов давлением*, №56, с. 140-147, 2009.

[22] А. В. Титов «Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування*, с. 121-125, 2010.

[23] І. С. Афтаназів, А. П. Гавриш, та П. О. Китичок *Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: Навчальний посібник для студентів спеціальностей 7.090202 „Технологія машинобудування”, 7.090203 „Металорізальні верстати та системи”*, Житомир:ЖІТІ, 2001.

[24] В. М. Браславский *Технологія обкатування великих деталей роликками*, Москва: «Машинобудування», 1975.

[25] В. М. Смелянский *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*, Москва: Машиностроение, 2002.

[26] В. А. Матвийчук, та И. С. Алиев, *Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография*, Краматорск: ДГМА, 2009.

[27] В. А. Огородников, Л. И. Алиева, та И. А. Деревенько «Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии», *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: "Машиностроение”*, №6, с. 201-208, 2012.

[28] V. Grushko, S. E. Sheykin, I. Yu. Rostotskiy Contact Pressure in Hip Endoprosthetic Swivel Joints *Journal of Friction and Wear*, Vol. 33, No. 2. pp. 124–129, 2012.

[29] В. А. Титов, В. А. Никитенко, А. В. Титов, А. А. Пливак, та А. Д. Лавриненков, «Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент», *Обработка материалов давлением*, №56, с. 140-147, 2009.

[30] А. В. Титов «Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування*,

Київ: НТУУ «КПІ», с. 121-125, 2010.

[31] И. В. Кудрявцев и Г. Е. Петушков, «Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом», *Вестник машиностроения*, №7, с. 41-43, 1966.

[32] Я. Н. Отений, "Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД ", дис. канд. наук., Курган, 1988.

[33] Я. Н. Отений, Н. Я. Смольников, и Ольштынский Н.В. *Прогрессивные методы обработки глухих отверстий*. Волгоград, 2003.

[34] Б. П. Рыковский, В. А. Смирнов, и Г. М. Щетинин, *Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом*. Москва: Машиностроение, 1985.

[35] Д. Д. Папшев, *Упрочнение деталей обкаткой шариками*. Москва: Машиностроение, 1968.

[36] Л. И. Маркус, «Упрочнение рабочих поверхностей подшипников качения алмазным выглаживанием», *Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием*, №12, с. 70-83, 1970.

[37] И. В. Кудрявцев, *Внутреннее напряжение как резерв прочности в машиностроении*. Москва: Машгиз, 1951.

[38] Б. А. Каледин, П. А. Чёпа, *Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием*. Минск: Наука и техника, 1974.

[39] В. М. Смелянский, В. В. Дубенко, «Повышение надежности и долговечности хромированных деталей гидроагрегатов обработкой ППД», *Алмазы и сверхтвердые материалы*, №9, с. 13-26, 1976.

[40] Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин, В. И. Волков *Технологические методы повышения надежности деталей машин: Справочник*. М: Машиностроение, 1993.

[41] А. Г. Суслов. *Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей*. Москва: Машиностроение, 1987.

[42] В. А. Матвійчук, А. А. Штуць та В. В. Явдик, «Розвиток технологічних можливостей штампування обкочуванням», *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, вип.1, с. 27-33, 2015

[43] А. А. Штуць, та В. А. Матвійчук, «Комп'ютерне моделювання процесу

штампування обкочуванням трубних заготовок», *Збірник наукових праць ВНАУ: Серія техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 3 (95), с. 178-184, 2016.

[44] А. В. Титов, С. В. Мозговой, А. Я. Качан, «Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS», *Вестник двигателестроения*, №4, с. 90-97, 2006.

[45] А. А. Штуць, В. А. Матвійчук. «Комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням трубних заготовок», *Збірник наукових праць ВНАУ: Серія техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 3 (95), с. 178-184, 2016.

[46] В. А. Огородніков, М. С. Гречанюк, А. П. Поляков, «Енергетичний критерій зносу сідлово-зчіпного пристрою», *Вісник машинобудування та транспорту*, вип. 1, с. 67-76, 2017

[47] В. А. Огородніков, А. В. Губанов, Л. К. Поліщук, «Енергія зношування поверхонь тертя деталей машин», *Вісник машинобудування та транспорту*, вип. 3, с. 80-83, 2018.

[48] В. А. Огородников, Т. Ф. Архипова, И. А. Деревенько, «Оценка пластичности деформированного металла», *Обработка материалов давлением*, вип.1, с. 109-113, 2016

[49] М. С. Дрозд, М. М. Малтин, Ю. И. Сидякин, *Инженерные расчёты упруго – пластической контактной деформации*. Москва: Машиностроение, 1986.

[50] С. Харди, С. Н. Баронет, Д. В. Тордион, «Вдавливание жёсткой сферы в упруго – пластические полупространства», *Механика. Периодический сборник переводов иностранных статей*, №2 (132), с. 126-136, 1972.

[51] В. А. Смирнов «Аналитические определения остаточных напряжений и деформаций в процессе обработки давлением», *Известие Вузов Машиностроение*, №1, с. 150-155, 1977.

[52] А. Ю. Ишлинский, *Прикладные задачи механики. Книга 1. Механика вязкопластических и не вполне упругих тел*. М.: Наука, 1986.

[53] А. Д. Томлёнов, *Теория пластического деформирования металлов*, М.: Металлургия, 1977.

[54] Р. Хилл *Математическая теория пластичности*. М.: Гостехиздат, 1956.

- [55] В. В. Соколовский, *Теория пластичности*. М.: Высшая школа, 1969.
- [56] С. А. Христианович, С. Г. Михлин, Б. Б. Девисон, *Некоторые новые вопросы сплошных сред*. М.: Издательство АН СССР, 1938.
- [57] У. Джонсон, П. Меллор, *Теория пластичности для инженеров*. М.: Машиностроение, 1979.
- [58] И. П. Ренне *Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки*. Тула: ТПИ, 1970.
- [59] В. Джонсон, *Механика процессов выдавливания*. Москва: Металлургия, 1965.
- [60] В. А. Огородников, И. А. Деревенько, Л. И. Алиева *Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении*. Вінниця: ВНТУ, 2016.
- [61] Л. М. Качанов, *Основы теории пластичности*. Москва: Наука, 1969.
- [62] Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, *Теория пластических деформаций*. – Москва: Машиностроение, 1983.
- [63] В. Д. Ключников, *Математическая теория пластичности*. Москва: МГУ, 1979
- [64] Б. А. Друянов, «О движении цилиндрического индентора по поверхности полупространства», *Теория трения и износа*, с. 96-120, 1965.
- [65] Б. А. Друянов, Н. М. Михин, «Исследование скольжения сферы по пластически деформируемому полупространству», *Склерометрия*, с. 130-168, 1968.
- [66] E. A. Marshall, «Rolling contact with plastic deformation», *J. Mechanic and Physical Solids*, №4 , p. 87-91, 1968.
- [67] I. F. Collis, «Analysis of the rolling of a cylinder an a rigid-perfectly plastic half-space», *J. Mechanic and Physical Solids*, №1, p. 54-66, 1972.
- [68] В. М. Сегал, *Технологические задачи теории пластичности (методы исследования)*. Минск: «Наука и техника», 1977.
- [69] С. И. Сухорков, И. О. Сивак, Е. И. Коцюбовивская, «Влияние параметров разбиения конечно-элементной модели на точность результатов моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки», *Обработка материалов давлением: сборник*

научных трудов, №3 (32), с. 35 – 39, 2012.

[70] Р. Хилл, Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1956.

[71] В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич, *Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы*. Днепропетровск: «Системные технологии», 2005.

[72] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *The finite element method*, Oxford, 2000.

[73] В. А. Огородников, *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении*. – Киев: УМК ВО, 1989.

[74] С. М. Красневский, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. *Разрушение металлов при пластическом деформировании*. Минск: Наука и техника, 1983.

[75] Г. А. Смирнов-Аляев, *Механические основы пластической обработки металлов*. Ленинград: Машиностроение, 1968.

[76] В. Л. Колмогоров, *Напряжения, деформации, разрушение*. Москва: Металлургия, 1970.

[77] Г. Д. Дель, В. А. Огородников, та В. Г. Нахайчук, «Критерий деформируемости металлов при обработке давлением», *Изв. вузов. Машиностроение*, №4, с. 135-140, 1975.

[78] В. А. Евстратов, *Теория обработки металлов давлением*. Харьков: Вища школа, 1981.

[79] И. О. Сивак, Е. И. Коцюбивская, «Пластичность металлов при объёмном напряжённом состоянии», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич.зб. наук. пр.*, с. 73–76, 2007.

[80] Д. В. Хван, *Повышение эффективности в обработке металлов давлением*. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995.

[81] І. С. Алієв, І. Г. Савчинський, Л. І. Алієва, К. І. Сивак, "Спосіб випробування металевих зразків для визначення граничної пластичної деформації", Пат. 63208А України, G01N3/28 №2003021779; Заявл. 28.02.2003; Опубл. 15.01.2004, Бюл. №1

[82] К. І. Коцюбівська, В. І. Клочко, С. І. Сухоруков, А. В. Чубатюк, «Апроксимація експериментальних даних кубічними сплайн-функціями», *Вісник*

*Вінницького політехнічного інституту, №3 (66), с. 21 – 30, 2006.*

[83] Е. П. Унксов, А. Г. Овчинников, *Теория ковки и штамповки: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов.* Москва: Машиностроение, 1992.

[84] А. Е. Попов. *Основы теории листовой штамповки.* Москва: Машиностроение, 1968.

[85] О. А. Розенберг, В. В. Мельниченко, С. Ф. Студенец, «Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования», *Изв. АИН Украины, спец. выпуск отделения "Тяжелого и транспортного машиностроения, с. 96–102, 1998.*

[86] Г. Д. Дель, *Технологическая механика.* Москва: Машиностроение, 1978.

[87] В. М. Михалевич, *Тензорні моделі накопичення пошкоджень.* Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1998.

[88] В. А. Огородников та А. В. Грушко, «Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тем. зб. наук. пр., с. 5–10, 2000.*

[89] Ю. Н. Алексеев, *Вопросы пластического течения металлов.* Харьков, 1968.

[90] В. А. Огородников та А. В. Грушко, «Волнообразование при формировании крутоизогнутых отводов методом одновременной протяжки с изгибом трубы», *Вибрации в технике и технологях, №1(13), с. 55–57, 2003.*

[91] О. В. Грушко, В. В. Кухарь, Т. І. Молодецька, «Визначення силових характеристик процесів обробки тиском методом еквівалентної оцінки», *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Збірник наукових праць, Луганськ, №31, с. 218-226, 2012.*

[92] О. В. Василевский, А. В. Грушко, В. В. Кухарь, «Влияние величины подачи на кинематические и энергосиловые характеристики при протяжке заготовок в комбинированных бойках», *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов, № 4 (34), с. 17-20, 2012.*

[93] В. А. Огородников, А. В. Грушко, И. А. Деревенько, «Моделирование

процессов обработки давлением на основе гипотез о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования», «Обработка материалов давлением : сборник научных трудов», № 4 (34), с. 46-52, 2012.

[94] А. В. Грушко, «Метод эквивалентной оценки энергосиловых параметров процессов пластического формоизменения», *Вісник НТУ «ХПИ» тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*, №47(953), с. 14-23, 2012.

[95] В. Г. Писаренко, П. С. Берник, Р. І. Сивак, *Технологічні методи підвищення надійності деталей машин*. – Вінниця: Едельвейс і К, 2008.

[96] Р. І. Сивак, В. А. Огородников, *Холодне комбіноване видавлювання* Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2011.

[97] В. А. Матвийчук, В. М., Михалевич, Л. І. Алиева, «Оценка деформируемости материала заготовок, полученных отделением методами пластического сдвига», *Обработка материалов давлением*, № 4, с.16-21, 2013.

[98] В. А. Матвійчук, В. І. Драчишин, «Вдосконалення методу поверхневого пластичного деформування на основі аналізу напружено-деформованого стану поверхневого шару виробів», *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, вип.10(2), с. 172-177, 2012

[99] В. А. Огородников, А. В. Грушко, Н. В. Бабак, Р. И. Сивак, «Прогнозирование технологического наследия в современных технологиях обработки давлением», *Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета*, Выпуск 1 (10), с. 370-375, 2001.

[100] R. I. Sivak, «Evaluation of porous material plasticity when direct extruded», *Stiinta si ingineria materialelor: Buletinul institutului politehnic din Iasi*,- Tomul XLVIII (LII), Fasc. 3-4, p. 165-171, 2002.

[101] И. С. Алиев, Р. И. Сивак, «Оценка пластичности при поверхностной пластической деформации», *Известия Тульского государственного университета. Серия «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением»*, Выпуск 2, с. 150-156, 2004.

[102] О. В. Нахайчук, Р. И. Сивак, «Оценка пластичности металлов при объемном



напряженном состоянии», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №5 (96), с. 149-151, 2007.

[103] Р. І. Сивак, О. В. Нахайчук, В. А. Огородніков, «Залежність пластичності металів від історії навантаження при об'ємному напруженому стані», *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, Випуск 2, с. 79-83, 2009.

[104] Р. І. Сивак, І. О. Сивак, «Пластичность металлов при сложном нагружении», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування», №60, с. 129-132, 2010.

[105] Р. І. Сивак, І. Г. Савчинский, І. О. Сивак, «Оценка предельных деформаций при немонотонном нагружении», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування», №62, с. 247-250, 2011.

[106] Р. І. Сивак, О. В. Нахайчук, І. О. Сивак, «Влияние геометрии траектории нагружения на пластичность», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1 (26), с. 22-25, 2011.

[107] Р. І. Сивак, «Влияние неравномерности пластической деформации на использованный ресурс пластичности», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №3 (32), с. 40-43, 2012.

[108] В. А. Огородніков, І. А. Деревенько, Р. І. Сивак, «О влиянии кривизны траекторий деформирования объема материала при обработке давлением на его пластичность в условиях сложного нагружения», *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Том 54, №3, с. 37-42, 2018.

[109] І. О. Сивак, «Поверхность предельной пластичности», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич.зб. наук. пр.*, с. 9 – 15, 1999.

[110] І. О. Сивак, «Пластичность металлов при холодной пластической деформации», *Удосконалення процесів та обладнання обробки металів тиском в машинобудуванні та металургії*, с. 168-171, 2000.

[111] О. В. Грушко, В. А. Огородніков, М. І. Побережний, М. П. Єленич,

«Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6. с. 90-93, 2009.

[112] Н. Н. Богородицкий, К. К. Чубаров «Ролик для обкатки металлических изделий», авт. Св. 969503 СССР, В24 В39/00, Бюл. №4, заявл. 06.04.1981, опубл. 05.11.1982.

[113] А. Г. Любченко, В. К. Лобанов, Г. І. Пашкова «Ролик для обкочування металевих деталей», Пат. 25321 Україна, МПК В 24 В 39/00 № и 200701118, Бюл. №12, заявл. 5.02.2017, опубл. 10.08.2007.