

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РИБАК ІЛЛЯ ПЕТРОВИЧ

УДК 621.9

ДИСЕРТАЦІЯ

ПОЛІПШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ НАНЕСЕННЯМ РЕГУЛЯРНИХ РЕЛЬЄФІВ

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Галузь знань – 13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ І.П. Рибак

Науковий керівник

Посвятенко Едуард Карпович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Рибак І.П. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту нанесенням регулярних рельєфів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» – Національний транспортний університет, Київ, 2023 р.

Дисертацію присвячено дослідженню основних напрямків поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту за рахунок мікро– та макрорельєфів, що наносяться на поверхню деталей.

Важливу роль у поліпшенні показників надійності та експлуатаційних властивостей деталей машин відіграють спеціально створені регулярні рельєфи поверхонь останніх. Для реалізації холодного пластичного деформування у цьому випадку використовується серійне обладнання: верстати, преси, волочильні стани тощо. На відміну від інших способів модифікування, цей процес може бути формоутворювальним, тобто заготовка отримує нові потрібні розміри, які поєднуються з регулярними рельєфами поверхневого шару деталі.

Проблемі функцій рельєфів та технологій отримання останніх присвячено ряд робіт Шнейдера Ю.Г., Киричка П.О., Нахайчука О.В., Посвятенка Е.К., Паладійчука Ю.Б. та ін. науковців. Проте ці дослідження слід вважати фрагментарними, оскільки вони стосуються, головним чином, поділу припуску перед обробкою різанням, або виготовлення трубчастих деталей з нанесенням рельєфу на поверхню отвору. Експлуатаційні властивості деталей машин частково розглянуті у роботах Черновола М.І., Гавриша А.П., Ткачука М.А., однак, ці праці не є системними стосовно проблеми рельєфів.

Виходячи із сказаного була сформульована мета дослідження – поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту

нанесенням регулярних мікро- і макрорельєфів технологічного і експлуатаційного призначення заглибленням лінійних інденторів.

Теоретичні засади дослідження дозволили висунути положення, що при індентуванні матеріалів заглибленням лінійного індентора факторами сильного впливу на глибину канавки рельєфу є нормальна сила, що прикладається до інструменту, та фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів. Нормальна сила (сила заглиблення індентора) діє на глибину канавки як безпосередньо, так і через ряд проміжних факторів, таких як геометричні параметри інструменту (кут при вершині індентора та радіус округлення вершини) і технологічні параметри (вид моторно охолоджувальна рідина та швидкість процесу). Серед великої кількості фізико-механічних властивостей досліджуваних матеріалів найбільш вагомими є їх твердість та відносне видовження. Ці фактори діють на глибину канавки рельєфу також безпосередньо і через проміжні фактори.

Теоретичні засади дослідження лягли в основу математичної моделі процесу заглиблення лінійних інденторів у оброблюваний матеріал, що визначає вплив найбільш вагомих факторів: сили індентування, твердості і пластичності зразка на параметри канавки регулярного рельєфу: глибину, радіус основи та кут у плані.

Уперше створено класифікацію регулярних рельєфів за методами отримання холодною пластичною деформацією та обробкою різанням і за призначенням : для попереднього поділу припуску при обробці різанням; для підготовки поверхонь деталей під нанесення покриттів у тому числі плівочних антифрикційних; для створення лабіринтів на поверхні деталей для мастил; для попереднього поділу осколочних корпусів боєприпасів; для створення зміцнених нових несучих поверхонь, зокрема дискретних при відновленні зношених деталей; для отримання складних профілів на поверхнях отворів деталей: шпонкових, шліцьових, внутрішніх зубців зубчастого зачеплення; естетичного призначення.

Розроблено розрахунок дії сили заглиблення і геометричних параметрів лінійного індентора на форму та розміри канавки рельєфу: глибину в межах 0,02–5 мм; радіус основи в діапазоні 0,005–0,5 мм і кути у поперечному перерізі 60°; 70°; 80°; 90°; при цьому на силу заглиблення впливатиме тертя, знижуючи цю силу на 23% для кута індентра 60° і на 14% для кута 90°.

Вибрано пресове гідрофіковане обладнання для експериментів зусиллям 0,02 МН та 0,2 МН; створено лінійні індентори із загартованої сталі Р18 з кутом при вершині 60°–90°; визначено марки досліджуваних матеріалів: по 2 марки легованих сталей (сталь 38ХН3МА і сталь 12Х18Н10Т), сірих чавунів (чавун сірий феритно-перлітний СЧ20 і чавун сірий феритний ковкий КЧ 33–8), сплавів на основі міді (бронза ливарна олов'яниста Бр ОЦС 5–5–5 і латунь деформівна Л62), дуралюміну Д16 (2117) і титанового сплаву ВТ6. Окремо досліджувався алюмінієвий сплав Д16 після зварювання неплавким електродом за схемою М.М. Бенардоса, оскільки зварювання плавленням є основою процесів отримання покриттів плавленням. Розроблено процеси мікроструктурного аналізу та дослідження мікротвердості; вибрано методи та пристрої для вивчення нанесеного рельєфу.

Підтверджено експериментально теоретичні положення про дію сили заглиблення, твердість та пластичність на глибину канавки рельєфу. При цьому ці фактори проявляють як безпосередню дію на параметр оптимізації, так і через проміжні фактори: радіус округлення та кут при вершині індентора і склад моторно охолоджувальної рідини та швидкість заглиблення. Перші два проміжних фактори сильно впливають на глибину канавки, а два останніх виявляють слабку дію. Побудовано взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентуванням і отримано експериментальну залежність глибини канавки від факторів процесу.

Розроблено метод відновлення зношених деталей заглибленням лінійного індентора. Встановлено, що висота приросту розміру деталі дорівнює половині заглиблення. Кути профілю індентора для заглиблення

повинні бути порядку 60° з позиції міцності і стійкості інструмента, а радіус при його вершині повинен знаходитись в межах 0,1 – 0,2 мм.

Створено принцип отримання дискретних поверхонь деталей машин, які чергуються з канавками мікро- і макропрофілю, в межах дискретності 5 – 50 %. Для реалізації цього принципу запропоновано використовувати проміжну технологічну пружну деталь між оброблюваною поверхнею та інструментом, завдяки чому ліквідується для дотичних навантажень і підвищується межа текучості оброблюваного матеріалу на 40–70%. Завдяки цьому підвищуються контактні навантаження опорних поверхонь деталі за критерієм виникнення місточків схоплювання.

На основі механіки заглиблення трапецевидного індентора у жорстко–пластичний напівпростір розроблено метод отримання прямозубих зубчастих коліс евольвентного внутрішнього зачеплення модулем $m = 0,25\text{--}2,5$ мм. Процес здійснюється на жорсткій багатозубій оправці копіюванням за схемою редукування. Розглянуто задачу розрахунку напруженого стану, у результаті чого визначено силу заглиблення трапецевидного індентора, як суму сил заглиблення гострого клина та плоскої його ділянки. Подано типовий технологічний процес методу отримання коліс внутрішнього зачеплення, що включає підготовку отвору трубчастої заготовки, власне метод ХПД, і фінішні операції термо- та абразивної обробки і, при необхідності, безводневого азотування.

Розроблено дослідний зразок інструменту для реалізації результатів дослідження, що є багатозубою оправкою зі стальним корпусом (сталь 30ХГСА) та твердосплавними вставками (сплав ВК8). Профіль вставок відповідає профілю потрібних канавок макрорельєфу поверхні отвору деталі. Випробувано зразок інструменту на деталях із дуралюміну Д16 (2117), що показало перспективність використання отриманих результатів у виробництві та у навчальному процесі спеціальності «Прикладна механіка» і «Матеріалознавство».

Ключові слова:

Деформовано-напружений стан; дискретні поверхні; зубчасті колеса; шарування; динамічний процес; коефіцієнт тертя; чисельний метод; контактна поверхня; зміцнення; поверхня; зносостійкість; холодне пластичне деформування; канавка рельєфу; лінійний індентор; сила заглиблення; мікротвердість; відносне видовження.

Список публікацій здобувача

Видання, які входять до проіндексованих баз даних Scopus:

1. Posviatenko, E., Posviatenko, N., Budyak, R., Shvets, L., Paladiichuk, Y., Aksom, P., Rybak, I., Sabadash, B., & Hryhoryshen, V. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 5/12 (95). pp. 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142924>.

URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/142924>

Здобувачем розроблено план проведення дослідження і загальну методику проведення експериментів.

Фахові видання:

2. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин рельєфами поверхні. *Вісник Національного транспортного університету. Серія: Технічні науки*. 2021, Вип. 1(48). С. 270–282. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-270-282>.

URL: <http://visnik.ntu.edu.ua/pages/issue-48-en/articles/27.html>

Здобувачем розроблена модель заглиблення лінійного індентора у зразок, конкретизована методика досліджень, описані експериментальні результати дослідження.

3. Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин холодним пластичним деформуванням. *Вісник Національно Транспортного університету. Серія: Технічні науки*. 2022, Вип. 1(51). С. 314–322. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-314-322>

URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/51/314_322.pdf

Здобувачем розроблена класифікація рельєфів за призначенням, механіка заглиблення лінійного індентора у зразок, випробувано зразок багатозубого інструменту.

4. I.V. Shepelenko, E.K. Posviatenko, Y.B. Nemyrovskiy, V.V. Cherkun, I.P. Rubak. Creation of new technobological methods for surface engineering based on broaching. *Problems of Tribology*. V.27. №2/104–2022. pp. 6–12. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-6-12>

URL: <http://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/841/1307>

Здобувачем запропоновано і визначено експериментально властивості дискретних поверхонь

Монографії:

5. Посвятенко Е.К., Рибак І.П., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В. Протяжки для утворення регулярного рельєфу. Протягування та протяжний інструмент: Монографія. Кропивницький, 2020. С. 246–273. ISBN 978–617–7813–08–7.

URL: <https://www.amazon.com/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D1%82%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B6%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D1%96%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82-Ukrainian/dp/6202521139?asin=6202521139&revisionId=&format=4&depth=1>

Здобувачем здійснено аналіз відомих методів отримання рельєфів. Визначено недоліки цих методів.

6. Посвятенко Е.К., Шепеленко І.В., Рибак І.П. Утворення регулярного рельєфу протягуванням. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: Монографія. Кропивницький, 2021. С. 362–397. ISBN 978–617–7813–32–2.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=JwU_B&S21ALL=%28%3C

%3EI%3D%21NBUV\$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EI%3D%21NBUV\$%3C.
 .%3E%29%2A%28%3C.%3EI%3D%21NBUV\$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3
 EU%3D%D0%9A636-1%3C.%3E%29&Z21ID=&S21SRW=GOD&S21SRD=DO
 WN&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20.

Здобувачем розроблено класифікацію регулярних рельєфів за призначенням. Запропоновано новий спосіб отримання дискретних поверхонь.

Публікації в іноземному фаховому виданні:

7. Posviatenko Eduard, Posviatenko Nataliia, Rybak Illia. Structural Metal Materials of Machine Parts with Regular Surface Reliefs. *Bezpiecznstwo i Materiały Eksploatacyjne / wybrane zagadnienia: monografia*, № 20. Rzeszow, 2020. P. 81–84.

Здобувачем визначено типові чорні та кольорові метали деталей для отримання регулярних рельєфів лінійним індентором.

Публікації апробаційного характеру:

8. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Утворення і призначення регулярних рельєфів на поверхнях деталей машин. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материал 18-го международного научно-технического семинара*. г. Брно, 10–16 февраля 2018 г. С. 204–208.

Здобувачем зроблено класифікацію рельєфів за призначенням.

9. Рибак І.П., Посвятенко Е.К. Дискретне модифікування поверхні деталей транспортних засобів комбінованою механічною обробкою. *Тези доповідей LXXV Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів*. м. Київ, 15–16 травня 2019 р., Київ, 2019. С. 9.

URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>

Здобувачем описано дискретне модифікування поверхні деталей рельєфами.

10. Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Створення рельєфів поверхні деталей засобів транспорту лінійним індентуванням. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: Матеріали міжнародна. науково–технічна. конференція. м. Київ, 6–9 жовтня 2020 р., Київ, 2020. С. 182–185.

URL: <http://conf.mmi.kpi.ua/2020>

Здобувачем проаналізовано методи створення рельєфів.

11. Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Роль технологічних регулярних мікро– та макрорельєфів поверхні деталей машин. *Тези доповідей LXXVI Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів.* м. Київ, 20–21 травня 2020 р., Київ 2020. С. 12–13.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWIV/view>

Здобувачем описано роль рельєфів у підвищенні експлуатаційних властивостей деталей.

12. Рибак І.П., Бобро А.М., Посвятенко Е.К. Отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення редукування. *Тези доповідей LXXVII Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів.* м. Київ, 5 жовтня 2021 р., Київ, 2021. С. 9.

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view

Здобувачем проведено експериментальну частину отримання зубчастих коліс.

13. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Механіка заглиблення лінійного індентора у поверхню деталі. *Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 22-ї Міжнародної науково–технічної конференції.* м. Київ, 15–16 червня 2022 р., 2022. С. 101–106.

Здобувачем розроблено принципи механіки заглиблення індентора з урахуванням тертя.

14. Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Метод формування канавок для поділу трубчастих деталей на частини. *Тези доповідей LXXVIII Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів.* м. Київ, 2–3 листопада 2022 р., Київ, 2022. С. 10. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78

URL:<https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view>

Здобувачем визначено параметри лінійних інденторів, що необхідні для максимального вичерпування пластичних властивостей оброблюваного матеріалу.

ANNOTATION

Rybak I. P. Improving the operational properties of vehicle parts by applying regular reliefs. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of philosophy in specialty 131 «Applied Mechanics» – National transport university, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the study of the main directions for improving the operational properties of vehicle parts due to micro - and macro-reliefs applied to the surface of parts.

Specially created regular Surface reliefs of the latter play an important role in improving the reliability and operational properties of machine parts. In this case, serial equipment is used to implement: machine tools, presses, drawing mills, etc. Unlike other modification methods, this process can be form-forming, that is, the workpiece gets new desired dimensions, which are combined with regular reliefs of the surface layer of the part.

A number of works by Schneider Y. G., Kirichko P. A., Nakhaychuk O. V., Posvyatenko E. K., Paladiychuk Y. B., and other scientists are devoted to the problem of functions of reliefs and technologies for obtaining the latter. However, these studies should be considered fragmentary, since they mainly concern the separation of the allowance before cutting, or the manufacture of tubular parts with relief applied to the surface of the hole. The operational properties of machine parts are partially considered in the works of Chernovol M. I., Gavrish A. P., Tkachuk M. A., however, these works are not systematic in relation to the problem of reliefs.

Based on the above, the aim of the study was formulated – to improve the operational properties of vehicle parts by applying regular micro - and macro-reliefs for technological and operational purposes by deepening linear indenters.

The theoretical foundations of the study allowed us to put forward the position that when indenting materials by deepening a linear indenter, the factors

of strong influence on the depth of the relief groove are the normal force applied to the tool and the physical and mechanical properties of the studied materials. The normal force (indenter depth force) acts on the groove depth both directly and through a number of intermediate factors, such as the geometric parameters of the tool (angle at the indenter top and rounding radius of the top) and process parameters (depending on and process speed). Among the large number of physical and mechanical properties of the studied materials, their hardness and relative elongation are the most significant. These factors also affect the depth of the relief groove directly and through intermediate factors.

The theoretical foundations of the study formed the basis of the mathematical model of the process of deepening linear indenters into the processed material, which determines the influence of the most weight factors: indentation force, hardness and plasticity of the sample on the parameters of the regular relief groove: depth, base radius and angle in the plan.

For the first time, a classification of regular reliefs was created according to the methods of obtaining cold plastic deformation and cutting processing and for their intended purpose: for preliminary separation of the allowance during cutting processing; for preparing the surfaces of parts for applying coatings, including film antifriction; for creating mazes on the surface of parts for lubricants; for preliminary separation of fragmentation shells of ammunition; for creating reinforced new load-bearing surfaces, in particular discrete ones when restoring worn parts; for obtaining complex profiles on the surfaces of holes of parts: keyway, spline, internal teeth of gear engagement; aesthetic purpose.

The calculation of the effect of the depth force and geometric parameters of a linear indenter on the shape and dimensions of the relief groove is developed: a depth of 0,02-5 mm; base radius in the range of 0,005-0,5 mm and cross-sectional angles 60°; 70°; 80°; 90°; in this case, the depth force will be affected by friction, reducing this force by 23% for the indenter angle of 60° and by 14% for the 90° angle.

Press hydrofected equipment for experiments with a force of 0,02 MN and 0,2 MN was selected; linear indenters made of hardened steel P18 with an angle at the top of 60° - 90° were created; the grades of the studied materials were determined: 2 grades of alloy steels (steel 38XH3MA and steel 12X18H10T), gray cast iron (iron gray ferritic-perlite CЧ20 and cast iron gray ferritic malleable KЧ 33-8), copper-based alloys (bronze foundry tin Бр ОЛЦ 5-5-5 and brass deformable L62), duralumin D16 (2117) and titanium alloy VT6. Aluminum alloy D16 was studied separately after welding with a non-melting electrode according to the scheme of M. M. Benardos, since melting welding is the basis for the processes of obtaining coatings by melting. Processes of microstructural analysis and microhardness research are developed; methods and devices for studying the applied relief are selected.

The theoretical provisions on the effect of the deepening force, hardness and plasticity on the depth of the relief groove are confirmed experimentally. In this case, these factors are manifested both as a direct effect on the optimization parameter, and through intermediate factors: the rounding radius and angle at the top of the indenter, as well as the composition of ICF and the depth rate. The first two interval factors strongly affect the depth of the groove, and the last two have a weak effect. The relationship of phenomena in relief formation by indentation is constructed and an experimental dependence of the groove depth on the process factors is obtained.

A method for restoring worn parts by deepening a linear indenter has been developed. It is established that the height of the part size increment is equal to half the depth. The angles of the indenter profile for deepening should be about 60° from the position of strength and stability of the tool, and the radius at its top should be within 01,– 02, mm.

The principle of obtaining discrete surfaces of machine parts, alternating with grooves of micro and macro profiles, within the discreteness range of 5-50%, is developed. To implement this principle, it is proposed to use an intermediate

technological elastic part between the treated surface and the tool, which eliminates tangential loads and increases the yield strength of the processed material by 40-70%. This increases the contact loads of the support surfaces of the part according to the criterion of the occurrence of setting bridges.

Based on the mechanics of deepening a trapezoidal indenter into a rigid plastic half-space, a method for obtaining spur gears of involute internal engagement with the module $m=0,25-2,5$ mm has been developed. The process is carried out on a rigid multi-tooth mandrel by copying according to the reduction scheme. The problem of calculating the stress state is considered, as a result of which the deepening force of a trapezoidal indenter is determined as the sum of the deepening forces of a sharp wedge and its flat section. A typical technological process of the method for obtaining internal gearing wheels is presented, including the preparation of the hole of the tubular billet, the CPD method itself, and the finishing operation of thermal and abrasive processing and, if necessary, anhydrous nitriding.

A prototype of the tool for implementing the results of the study was developed, which is a multi-toothed mandrel with a steel body (30XГСА steel) and Carbide inserts (VK8 alloy). The profile of the inserts corresponds to the profile of the desired grooves of the macro-relief of the surface of the part opening. A sample of the tool was tested on parts made of duralumin D16 (2117), which showed the prospects of using the results obtained in the production and educational process of the specialty “ Applied Mechanics ” and “ Materials Science ” (Appendix B).

Keywords:

Деформовано-напружений стан; дискретні поверхні; зубчасті колеса; шарування; динамічний процес; коефіцієнт тертя; чисельний метод; контактна поверхня; зміцнення; поверхня; зносостійкість; холодне пластичне деформування; канавка рельєфу; лінійний індентор; сила заглиблення; мікротвердість; відносне видовження.

List of publications of the acquirer

1. Posviatenko, E., Posviatenko, N., Budyak, R., Shvets, L., Paladiichuk, Y., Aksom, P., Rybak, I., Sabadash, B., & Hryhoryshen, V. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 5/12 (95). pp. 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142924>.

URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/142924>

2. Posvyatenko E.K., Posvyatenko N.I., Rybak I.P. Pidvichena ekclytauhiux vlactuvostei detaley mashun relefamu poverxni (Increasing the operational properties of machine parts with surface reliefs). *Bulletin of the National Transport University. Series: Technical sciences*. 2021, Issue 1(48). P. 270–282. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-270-282>.

URL: <http://visnik.ntu.edu.ua/pages/issue-48-en/articles/27.html>

3. Posvyatenko N.I., Rybak I.P. Polipshena eksplyatainix vlactuvoctei detalei mashin holodhum plastunum deformatyvnam (Improvement of operational properties of machine parts by cold plastic deformation). *Bulletin of the National Transport University. Series: Technical sciences*. 2022, Issue 1(51). P. 314–322. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-314-322>

URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/51/314_322.pdf

4. I.V. Shepelenko, E.K. Posviatenko, Y.B. Nemyrovskiy, V.V. Cherkun, I.P. Rubak. Creation of new technobogical methods for surface engineering based on broaching. *Problems of Tribologi*. V.27. №2/104–2022. pp. 6–12. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-6-12>

URL: <http://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/841/1307>

5. Posvyatenko E.K., Rybak I.P., Nemyrovskiy Y.B., Shepelenko I.V. Protashku dla ytvorena regylarnogo relify (Brushes to form a regular relief). Drawing and drawing tool: Monograph. Kropyvnytskyi.

URL: <https://www.amazon.com/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D1>

%82%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B6%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D1%96%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82-Ukrainian/dp/6202521139?asin=6202521139&revisionId=&format=4&depth=1

6. Posvyatenko E.K., Shepelenko I.V., Rybak I.P. Ytvorena regylarnogo relify protagyvanam (Formation of regular relief by drawing). *Engineering of drawn parts*: Monograph. Kropyvnytskyi, 2021. C. 362–397. ISBN 978–617–7813–32–2.

URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=JwU_B&S21ALL=%28%3C.%3EI%3D%21NBUV\\$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EI%3D%21NBUV\\$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EI%3D%21NBUV\\$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EU%3D%D0%9A636-1%3C.%3E%29&Z21ID=&S21SRW=GOD&S21SRD=DOWN&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=JwU_B&S21ALL=%28%3C.%3EI%3D%21NBUV$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EI%3D%21NBUV$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EI%3D%21NBUV$%3C.%3E%29%2A%28%3C.%3EU%3D%D0%9A636-1%3C.%3E%29&Z21ID=&S21SRW=GOD&S21SRD=DOWN&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20)

7. Posviatenko Eduard, Posviatenko Nataliia, Rybak Illia. Structural Metal Materials of Machine Parts with Regular Surface Reliefs. *Bezpiecznstwo i Materiały Eksploatacyjne / wybrane zagadnienia: monografia*, № 20. Rzeszow, 2020. P. 81–84.

8. Posvyatenko E.K., Posvyatenko N.I., Rybak I.P. Ytvorena i pruxnahena regylalguh relfiv na poverhnah detalry mahun (Formation and designation of regular reliefs on the surfaces of machine parts). *Contemporary issues of production and repair in industry and transport: Material of the 18th inter-conference scientific and technical seminar*. Brno, February 10–16 2018 r. C. 204–208.

9. Rybak I.P., Posvyatenko E.K. Duckretne modufikyvana poverhni detaley trancporthux zacobiv kombinovanoy mehanishnoy obrobkoy (Discrete modification of the surface of vehicle parts by combined mechanical processing). *Abstracts of reports of the LXXV Scientific Conference of professors and teaching*

staff, graduate students, students and employees of separate structural units. М. Kyiv, May 15–16, 2019, Kyiv, 2019. С. 9.

URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>

10. Posvyatenko N.I., Posvyatenko E.K., Rybak I.P. Ctvorena reliefiv poverxni detaley zacobiv transport liniynim indenty (Creation of surface reliefs of vehicle parts by linear indentation). Progressive technique, technology and engineering education: International materials. scientific and technical. conference. Kyiv, October 6–9, 2020, Kyiv, 2020. С. 182–185.

URL: <http://conf.mmi.kpi.ua/2020>

11. Posvyatenko E.K., Rybak I.P. Rol texnishnyx regylarhx mikpo ta makroreliefiv poverxni detaley maxun (The role of technological regular micro- and macroreliefs on the surface of machine parts). *Abstracts of reports of the LXXVI Scientific Conference of professors and teaching staff, graduate students, students and employees of separate structural units.* Kyiv, May 20–21, 2020, Kyiv 2020. С. 12–13.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWlv/view>

12. Rybak I.P., Bobro A.M., Posvyatenko E.K. Otrumana zybshatux kolic vnytriynogo zasheplena redykyvanam (Obtaining gear wheels of the internal reduction gear). *Abstracts of reports of the LXXVII Scientific Conference of professors and teaching staff, graduate students, students and employees of separate structural units.* Kyiv, October 5, 2021, Kyiv, 2021. С. 9.

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view

13. Posvyatenko E.K., Posvyatenko N.I., Rybak I.P. Mehanika zaglyblennia liniinoho indentora u poverhniy detail (Mechanics of sinking the linear indenter into the surface of the part). *Surface engineering and product renovation. Materials of the 22nd International Scientific and Technical Conference.* Kyiv, June 15–16, 2022, Kyiv, 2022. P. 101–106.

14. Posvyatenko E.K., Rybak I.P. Metod formykhana kanavok dla podily trybshactux detaley na shactunu (The method of forming grooves for dividing tubular parts into parts). *Abstracts of reports of the LXXVIII Scientific Conference of professors and teaching staff, graduate students, students and employees of separate structural units*. Kyiv, November 2–3, 2022, Kyiv, 2022. C. 10. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО–ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	3
ПИТАНЬ РЕЛЬСФОУТВОРЕННЯ.....	28
1.1. Дискретне протягування.....	28
1.2. Поділ поверхні деталі у поздовжньому напрямку.....	34
1.3. Отримання гвинтових канавок.....	43
1.4. Фрагментація поверхні.....	44
1.5. Висновки до розділу.....	55
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДИКА	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	57
2.1. Ієрархія головних факторів, що впливають на характеристики регулярних рельєфів.....	57
2.2. Модель дослідження і план експериментів.....	59
2.3. Обладнання, експериментальні інструменти та досліджувані матеріали.....	63
2.4. Методи досліджень фізико–механічних властивостей досліджуваних матеріалів та прилади для проведення експериментів.....	67
2.5. Висновки до розділу.....	72
Розділ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІКИ ЗАГЛИБЛЕННЯ ЛІНІЙНОГО	
ІНДЕНТОРА У ПОВЕРХНЮ ДЕТАЛІ.....	73
3.1. Класифікація регулярних рельєфів за методом отримання та призначенням.....	73
3.2. Розрахунок дії сили заглиблення та геометричних параметрів інструменту на форму та розміри канавки рельєфу.....	79
3.3. Експериментальне дослідження процесу заглиблення лінійного індентора.....	87

	20
3.4. Взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні інденування.....	96
3.5. Висновки до розділу.....	98
Розділ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЬЄФОУТВОРЕННЯ.....	99
4.1. Відновлення зношених деталей засобів транспорту заглибленням лінійних інденторів.....	99
4.2. Отримання дискретних поверхонь деталей машин.....	100
4.3. Метод отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення.....	107
4.4. Дослідний зразок інструменту та практичні випробування результатів дослідження.....	111
4.5. Висновки до розділу.....	115
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120
ДОДАТОК А – Опис корисної моделі: Спосіб отримання деталі з дискретною поверхнею.....	136
ДОДАТОК Б – Акт про впровадження результатів дослідження у навчальний процес.....	140
ДОДАТОК В – Список опублікованих праць за темою дисертації.....	141

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ХПД – холодне пластичне деформування;

ДП – деформуюче протягування;

МОР – мастильно-охолоджувальна рідина;

ОМ – оброблюваний матеріал;

РІ – різальний інструмент;

НВ – твердість за Брінеллем, кг/мм^2 ; МПа;

НV – твердість за Віккерсом, кг/мм^2 ; МПа;

НRC – твердість матеріалу за Роквеллом, шкала С.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Матеріал та технології виготовлення виробів визначають у кінцевому результаті надійність і експлуатаційні властивості машин [15], причому рівень цих властивостей на 80% залежить від стану поверхні і поверхневого шару, а на 20% – від основи деталі. Дослідження показали, що серед багатьох методів інженерії деталей машин важливу роль відіграють методи модифікування матеріалу холодним пластичним деформуванням (ХПД). Перевагою цих методів, що включають процеси поверхневого та об'ємного деформування, а також обробку різанням лезовим та абразивним інструментом і різні комбінації цих процесів, слід у цілому вважати відсутність термічної дії на матеріал. Тобто "холодні" технологічні методи не супроводжуються виникненням короблення, сітки мікротріщин, окислення, поля потужних залишкових напружень тощо. Для реалізації методу ХПД не потрібно низькотемпературне відпускання і заключні процеси чорнової або напівчистої механічної обробки [26, 31, 110].

Важливу роль у поліпшенні показників надійності та експлуатаційних властивостей деталей машин відіграють спеціально створені регулярні рельєфи поверхонь останніх. Для реалізації ХПД у цьому випадку використовується серійне обладнання: верстати, преси, волочильні стани тощо. На відміну від інших способів модифікування, цей процес може бути формоутворювальним, тобто заготовка отримує нові потрібні розміри, які поєднуються з регулярними рельєфами поверхневого шару деталі.

Проблемі функцій рельєфів та технологій отримання останніх присвячено ряд робіт Шнейдера Ю.Г., Киричка П.О., Нахайчука О.В., Посвятенка Е.К., Паладійчука Ю.Б. та ін. науковців [38, 39, 44, 50, 71, 102]. Проте ці дослідження слід вважати фрагментарними, оскільки вони стосуються, головним чином, поділу припуску перед обробкою різанням, або виготовлення трубчастих деталей з нанесенням рельєфу на поверхню отвору.

Експлуатаційні властивості деталей машин частково розглянуті у роботах Черновола М.І., Гавриша А.П., Ткачука М.А., однак, ці праці не є системними стосовно проблеми рельєфів [28, 53, 85].

Виходячи із сказаного, проблема дослідження поліпшення експлуатаційних властивостей деталей нанесенням рельєфів є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у Національному транспортному університеті МОН України в напрямку науково-дослідних тем «Поліпшення триботехнічних властивостей пар тертя вузлів і механізмів транспортних засобів», 2017–2021 р.р.; «Удосконалення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту прогресивними технологіями», початок 2022р., розділ 1 «Регулярні рельєфи на поверхні деталей як резерв підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту», № 0123U101360 тривалість 2022 – 2026р. У темах здобувач брав участь як виконавець робіт.

Метою роботи є – поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту нанесенням регулярних мікро- і макрорельєфів технологічного і експлуатаційного призначення заглибленням лінійних інденторів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні **завдання**:

- розробити математичну модель дії характеристик процесу заглиблення лінійних інденторів: сили індентування, твердості і пластичності зразка на параметри канавки регулярного рельєфу;
- створити класифікацію регулярних рельєфів поверхні деталі за призначенням та технологію отримання;
- розробити розрахунок дії сили заглиблення та геометричних параметрів інструменту на форму та розміри канавки рельєфу;
- провести експериментальне дослідження процесу заглиблення лінійного індентора;
- розробити взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентуванням;

- розробити оригінальний метод отримання регулярного рельєфу, що забезпечує утворення дискретності поверхонь деталей;
- побудувати типову технологію та інструмент для виробництва і відновлення деталей засобів транспорту з регулярними рельєфами, що служитиме основою для поліпшення експлуатаційних властивостей таких деталей.

Об'єктом дослідження є процес нанесення регулярних рельєфів на поверхню деталей засобів транспорту лінійним індентором.

Предметом досліджень є явища, що супроводжують заглиблення у поверхню деталей засобів транспорту лінійного індентора з метою підвищення експлуатаційних властивостей деталей за рахунок регулярних макро– та мікрорельєфів.

Методи дослідження. Теоретичні методи дослідження базувались на наукових положеннях обробки металів тиском, теорії різання та математичного моделювання. Експериментальні дослідження проведено з використанням пресового обладнання, лінійного індентування 8-ми марок конструкційних матеріалів, методів оптичної мікроскопії та мікротвердості.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Уперше розроблено класифікацію регулярних рельєфів за методами отримання (холодним пластичним деформуванням та обробкою різанням) і призначенням: поділ припуску, підготовка поверхонь деталей під нанесення покриттів, створення лабіринтів для мастил, відновлення деталей, поділ корпусів боєприпасів, створення поверхонь деталей естетичного призначення.

2. Науково обґрунтовано ієрархію головних факторів, що впливають на глибину, кут розкриття та радіус округлення основи канавки: сили індентування, твердості та відносного видовження матеріалу. Створено та перевірено відповідну математичну модель і план дослідження.

3. Уперше розроблено механіку заглиблення лінійного індентора у напівжорсткий простір з урахуванням найважливішого фактору – ресурсу

пластичності оброблюваного матеріалу. Розглянуті два випадки заглибленням: гострого індентора та індентора зі значним радіусом закруглення при вершині.

4. Проведено експериментальну перевірку отриманих теоретичних положень дослідження на 8-ми досліджуваних матеріалах при заглибленнях канавок рельєфу 0,02–5мм; кутах при вершині індентора 60°; 70°; 80°; 90° і радіусі при вершині 0,005–0,5мм. Розроблено взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентуванням.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено метод відновлення зношених деталей заглибленням лінійного індентора з кутом при вершині 60°–70°, причому висота перевищення виступаючих опорних поверхонь повинна бути у 1,5–2 рази більшою від висоти зносу.

2. Запропоновано метод обробки поверхонь з дискретністю 5–20% і патент на спосіб отримання деталі з дискретною поверхнею обробкою різанням і деформуючим протягуванням.

3. Розроблено метод отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення моделі $m = 0,25\text{--}2,5$ мм у деталях із металевих матеріалів із початковим відносним видовженням $\delta \geq 5\%$ холодним пластичним деформуванням (редукуванням) на профільних багатозубних оправках.

4. Створено принципи проектування багатозубого інструменту (оправку) діаметром 20–120мм для отримання канавок макрорельєфу методом холодного пластичного деформування редукуванням, кожний зуб якого є лінійним індентором, що відповідає канавкам профілю.

5. Розроблено лабораторну роботу «Дослідження міцності покриттів, напилених газотермічними методами на поверхню деталі з регулярними рельєфами» навчальної дисципліни «Газотермічна обробка металів», що викладається у Національному транспортному університеті.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі наведені результати досліджень, які були виконані безпосередньо здобувачем.

Автором розроблено: модель дослідження і план експериментів; класифікацію рельєфів за призначенням; розрахунок та експериментальну перевірку процесу заглиблення лінійного індентора; механіку заглиблення; взаємодію явищ при рельєфоутворенні. Дисертантом виконана перевірка результатів дослідження на процесах: відновлення зношених деталей засобів транспорту; отримання дискретних поверхонь деталей машин; обробки внутрішніх поверхонь заготовок з метою отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення. Розроблено дослідний зразок інструменту та методику проведення лабораторної роботи, яку включено до навчальної дисципліни «Газотермічна обробка металів» Національного транспортного університету.

Постановку завдань дисертаційної роботи, загальну методику дослідження, розробку основ проектування дослідного інструменту та технологічного процесу проведено разом з науковим керівником д.т.н. проф. Посвятенкм Е.К.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях і семінарах: «Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте (м. Брно, Чехія, 10–16 лютого 2018 р.); «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 6–9 жовтня 2020 р.); «Інженерія поверхні та реновація виробів» (м. Київ 15–16 червня 2022 р.); наукових конференціях професорсько-викладацького. складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, Національний транспортний університет: 15–16 травня 2019 р.; 20–21 травня 2020 р.; 16-22 травень 2021 р.; 5-10 жовтень 2022 р.)

Дисертаційна робота у повному обсязі доповідалась на розширеному науковому семінарі кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавства» Національного транспортного університету у 2022 р.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, серед яких: 1 стаття у проіндексованому виданні (Scopus); 2 розділи у 2–х наукових монографіях; 3 статті у фахових виданнях України; 1 стаття у закордонній монографії (Польща, Жешув); у матеріалах 6 науково-технічних конференцій; 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, 117 літературних посилань. Загальний обсяг дисертації складає 145 сторінок, 3 таблиць, 51 рисуноків та 3 додатків на 10 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВО–ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ РЕЛЬЄФОУТВОРЕННЯ

Фрагментація оброблюваної поверхні або дискретність є важливим технологічним і експлуатаційним фактором. Канавки можуть використовуватись для поділу припуску при обробці великих отворів, для створення лабіринтів, у яких розміщуватиметься мастило, а також для поділу трубчастої деталі на окремі елементи (осколки) тощо. Таким чином, канавки і мікро- та макрорельєфи мають дві функції – технологічну та експлуатаційну [10, 26].

Протягування (внутрішнє чи охоплююче) відкриває широкі можливості для створення канавок та мікрорельєфу поверхні деталей. У табл. 1.1 подана запропонованими класифікація відомих методів утворення цих складових поверхонь протяжним інструментом.

1.1 Дискретне протягування

В основу способу отримання кільцевих канавок для поділу стружки покладено наступне контактне явище, що супроводжує деформуюче протягування. Після зупинки деформуючого елемента і наступного відновлення цього процесу на поверхні заготовки утворюється кільцеподібна канавка, яка відтворює його профіль в області верхньої частини [26, 71, 89].

На рис. 1.2, *а* зображена схема протягування комбінованою деформуюче-різальною протяжкою; на рис. 1.2, *б* – фрагмент I із рис. 1.2, *б*.

Комбінованою протяжкою 1, що містить деформуючі елементи 2 і різальні секції 3, які складаються із різальних зубців 4 і стружкових канавок 5, обробляється деталь 6.

Технологічні параметри процесу наступні: швидкість протягування v , натяг на деформуючий елемент a , подача на зуб S_z , діаметр отвору D .

При роботі деформуючого елементу виникає і рухається разом з ним уздовж заготовки осередок 7 деформації. У місці переходу конічної частини деформуючого елементу у циліндричну стрічку утворюється позаконтактна зона 8. Завдяки цьому при русі протяжки матеріал деталі, що знаходиться у пружно-пластичному стані, зі стрічкою не контактує.

При роботі різального зуба 4 у стружковій канавці 5 формується валик 9 стружки. Для створення осередку 7 із позаконтактною зоною 8 метал треба привести до пружно-пластичного стану, тобто здійснити деформацію з таким натягом a , при якому перевищується межа текучості оброблюваного матеріалу.

Після проходження деформуючим елементом 2 відрізка шляху від вхідного торцю деталі 6, що дорівнює l , і через кожний наступний відрізок l процес протягування зупиняють. При цьому метал осередку деформації, що перебуває у пружно-пластичному стані, переходить у недеформований стан, тобто осередок деформації зникає. При його зникненні від дії моменту, що утворений силами від тангенціальних напружень, метал починає контактувати зі стрічкою та заднім конусом деформуючого елементу 2. Відбувається заглиблення останнього у деталь 6 з утворенням залишкової кільцевої канавки 10. При проходженні зуба протяжки через цю канавку стружка ділиться у напрямку руху інструменту і завершується формування чергового витка стружки. Ті валики 11, що утворились раніше, просуваються уперед по стружковій канавці 5 і випадають з неї, коли різальний зуб закінчує протягування деталі 6, яка опирається своїм вихідним торцем на опору 12 протяжного верстату.

Час t зупинки протягування повинен бути:

$$t \geq t_1 + t_2 + t_3, \quad (1.1)$$

де t_1 – час подання команди на зупинку процесу і її проходження через систему переривання процесу; t_2 – час зникнення осередку деформації або формування канавки; t_3 – час подавання команди на відновлення процесу і її проходження через систему переривання процесу.

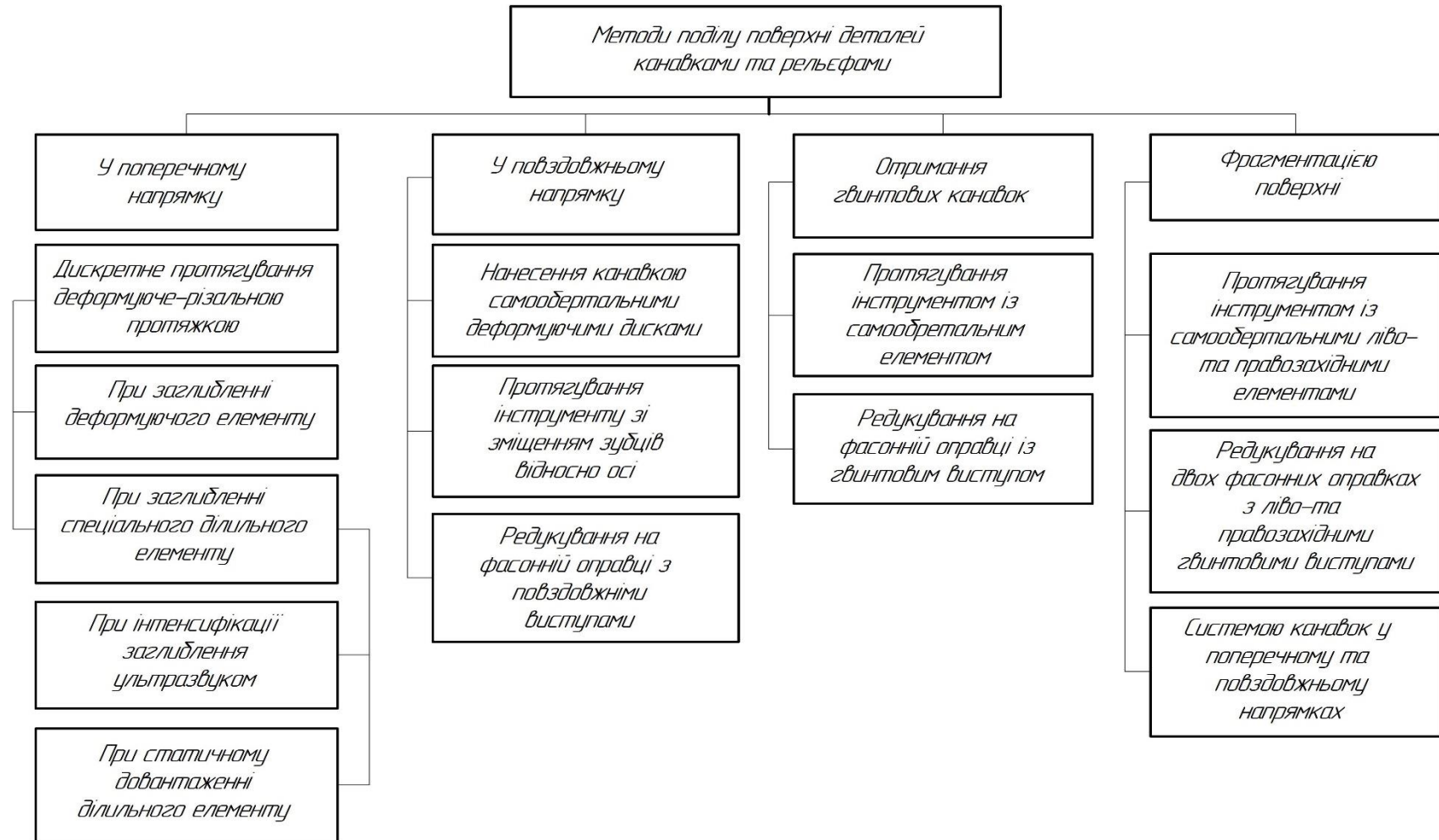


Рисунок 1.1 – Класифікація методів утворення технологічних канавок та регулярних рельєфів протягування

Досліди показали, що $t = 0,2 - 0,4$ с, а при заглибленні деформуючого елементу можна отримати стружкоподільну залишкову кільцеву канавку глибиною до 0,05 мм.

Дискретне протягування є обмеженням по глибині отримуваної канавки, оскільки геометричні параметри деформуючого елементу (ширина циліндричної стрічки 0,5 – 3 мм і кут при вершині 170 – 172°), а також режими обробки (обов'язкова наявність усадки отвору і віддаленість вершини деформуючого елементу від максимуму хвилі позаконтактної деформації) не є оптимальними для заглиблення. Тому такий метод, основною перевагою якого є простота, може бути рекомендований для умов обробки, коли товщина зрізу на зубі комбінованої протяжки не перевищує 0,05 мм.

У зв'язку з цим метод було удосконалено таким чином, як це показано на рис.1.3 [90]. Комбінована протяжка 1 оснащена деформуючим 2 і додатковим кільцевим індентором 3. Також протяжка має різальну секцію 4, що складається із зуба 5 і стружкової канавки 6. Обробляється деталь 7. Робота деформуючого елементу супроводжується виникненням і рухом разом з ним уздовж деталі кільцевого осередку деформації 8. У місці переходу конічної частини деформуючого елементу у циліндричну стрічку утворюється хвилеподібна позаконтактна зона 9, поверхню котрої прийнято називати позаконтактною зоною. При русі протяжки завдяки наявності позаконтактної зони, внутрішня поверхня деталі не контактує з додатковим елементом 3. При роботі зуба 5 у стружковій канавці 6 формується валик стружки 10.

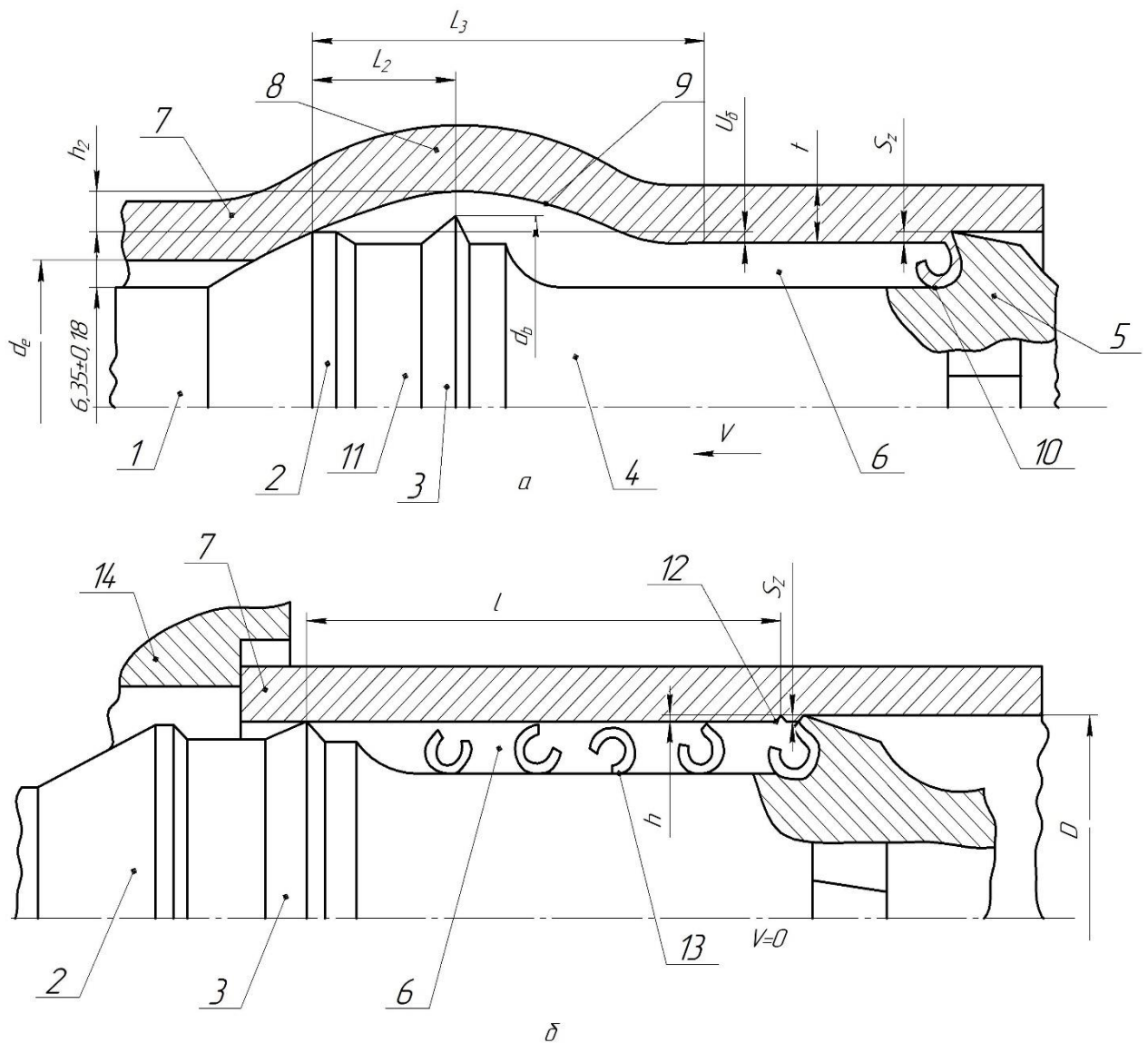


Рисунок 1.3 – Схема комбінованого протягування інструментом з кільцевим індентором (а) та момент зупинки процесу (б):

1, 11 – дистанційні втулки; 2 – деформуючий елемент; 3 – ділильний елемент; 4 – різальна частина із зубом 5; 6 – видовжена стружкова канавка; 7 – заготовка трубчастої деталі; 8 – рухома ділянка пружно-пластичної деформації; 9 – поверхня позаконтактної зони довжиною L_3 , відстанню до її максимуму L_2 і висотою h_2 ; 10 – валик стружки; 12 – кільцева стружкоподільна канавка; 13 – стружка; 14 – опора верстату.

Складові процесу та інструменту: v – швидкість і напрям руху інструменту; S_z – припуск; t – товщина стінки заготовки; $a/2$ – натяг на сторону; U_d – пружне відновлення заготовки; d_e і d_o – діаметри відповідно деформуючого і ділильного елементів.

Технологічні параметри процесу протягування наступні: швидкість протягування v , подача на зуб S_z , діаметр отвору D . Розміри самої

позаконтактної зони: довжина L_3 , відстань до максимуму $L_2 = 0.947a^{0.218}\sqrt{tD}$, де t – товщина стінки деталі, h_2 – висота, h_3 – усадка або розбивка отвору деталі після деформуючого протягування. Якщо при обробці отвору виникає усадка, то величина пружного відновлення дорівнює $U_b = 2h_2 + 2h_3$, а при розбивці відповідно. $U_b = 2h_2 - 2h_3$.

Для установки додаткового елемента 3 у максимуму позаконтактної зони використовується дистанційна втулка 11.

Після проходження деформуючим елементом 2 відрізка шляху від вхідного торцю деталі 7, що дорівнює $l+l_2$, де $l = 10^{-3}(1 \div 15)D^2S_z^{-1}$, і через кожний наступний відрізок $l+l_2$ процес зупиняють. При цьому зникає осередок деформації, а оброблювана поверхня вступає в контакт з додатковим елементом. Внаслідок цього утворюється залишкова кільцева канавка. При проходженні зуба через цю канавку відбувається поділ стружки у напрямку руху протяжки і закінчується формування чергового валика стружки. Раніш утворені валики 13 стружки просуваються вперед по канавці 6 і випадають з неї, тільки-но зуб закінчує протягування деталі 7, що опирається своїм вихідним торцем на опору 14 протяжного верстату.

Недолік методу [90] полягає у низькій стійкості ділильних елементів при вході і виході інструменту в отвір оброблюваної деталі.

1.2 Поділ поверхні деталі у повздовжньому напрямку

Суть методу отримання повздовжніх канавок самообертальними деформуючими дисками [12] полягає у наступному (рис. 1.4).

На комбінованій протяжці за деформуючим елементом 1 установлюється деформуючий диск 2 зі зміщенням e відносно осі інструменту. За рахунок цього при вході в отвір деталі 3 диск заглиблюється у її поверхню і, обертаючись з лінійною швидкістю периферії, що дорівнює швидкості протягування, формує повздовжню канавку 4 глибиною h_b .

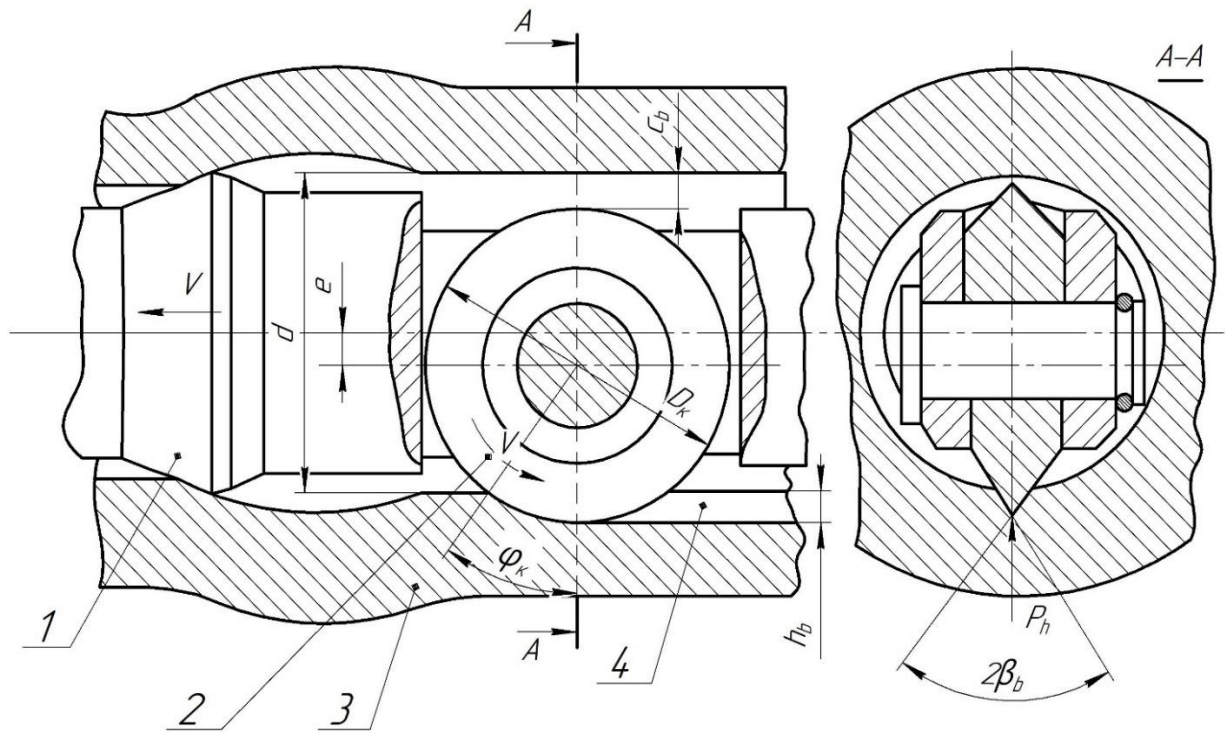


Рисунок 1.4 – Схема отримання поздовжніх канавок самообертальними деформуючими дисками:

1 – деформуючий елемент; 2 – деформуючий диск; 3 – деталь; 4 – поздовжня канавка; d — діаметр отвору деталі після деформуючого протягування; e – зміщення ділильного диску відносно осі інструменту; v – лінійна швидкість протягування і обертання ділильного диску; D_k – діаметр ділильного диску; $2\beta_b$ кут канавки; φ_k – кут контакту ділильного диску з обробленою поверхнею.

Профіль останньої відповідає профілю диска. Між поверхнею отвору, діаметрально протилежного канавці, і диском передбачено зазор C_b , що дорівнює $0,1 h_b$. Взаємозв'язок між розрахунковими геометричними характеристиками процесу накатування канавки (діаметром диска D_k , діаметром отвору d , сформованого деформуючим елементом, глибиною канавки h_b , зазором C_b , кутом контакту φ_k диска з обробленою поверхнею та зміщенням e наступна:

$$e = (h_b + \rho_b)/2, \quad (1.2)$$

$$D_k = d + h_b - \rho_b, \quad (1.3)$$

$$\sin \varphi_k = 2 \sqrt{h_b/D_k - h_b^2/D_k^2}. \quad (1.4)$$

Кількість ділильних дисків на протяжці визначається заданим числом поздовжніх канавок на деталі. Зважаючи на те, що діаметр диска співрозмірний з довжиною позаконтактної зони, що рухається за деформуючим елементом, канавка формується за її межами. Експерименти показали, що за допомогою цього методу можна отримувати канавки глибиною $h_b = (0,01 - 0,02)d$. Менші значення у цьому співвідношенні призначаються для сталей, а більші – для кольорових металів і сплавів.

Головним фактором, що обмежує глибину канавки, є поперечна жорсткість інструменту. Радіальна сила P_h , що діє на диск, залежить від глибини канавки, геометричних параметрів диску (D_k , $2\beta_b$, радіуса округлення ρ_c), фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу і ступеня його зміцнення попередньою холодною деформацією.

Для отримання поздовжніх сегментоподібних канавок було розроблено протяжний інструмент, що оснащався секціями різальних зубців, які зміщувались відносно осі протяжки [79].

Суть методу та особливості конструкції роботи протяжного інструменту полягають у наступному. Обробка отворів у деталі б виконується збіркою протяжкою, яка оснащена однією або кількома різальними секціями. Зубці 1 і 2 цих секцій зміщені відносно оправки 3 на величину e , яка забезпечується закріпленням зубців на ексцентричних втулках 4 і 5 (рис. 1.5).

Діаметр зуба D_z менший діаметру оброблюваного отвору на величину $2e$. Якщо у секції парне число зубців, то у кожній парі забезпечується діаметрально протилежне розміщення осей відносно осі протяжки.

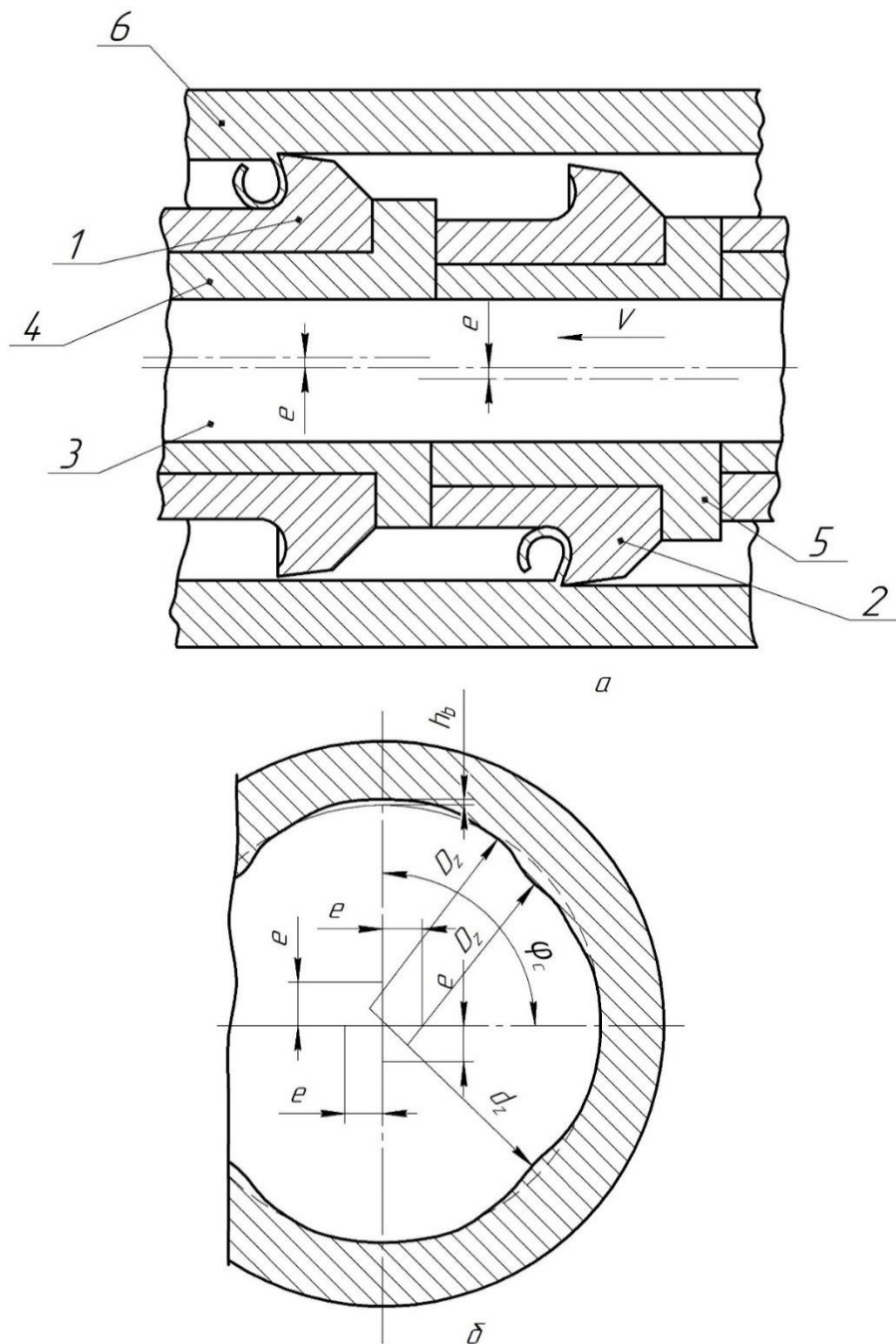


Рисунок 1.5 – Схема методу формування поздовжніх канавок зі зміщенням зуба відносно осі інструменту (а) і профіль деталі після обробки отвору ділильною секцією із чотирьох зубців (б)

При цьому суміжні пари зубців повинні бути розміщені таким чином, щоб проекції ліній, які з'єднують центри зубців кожної пари, на площину, що перпендикулярна осі протяжки, були повернуті одна відносно одної на кут $\phi_c = 2\pi/n$. Тут n – число зубців в секції з непарним числом зубців. Центр кожного з них зміщується по колу у одному напрямку, відносно центру

попереднього зуба, на кут $\varphi_c = \pi(n - 1)/n$. Завдяки цій конструктивній особливості кожен зуб працює тільки частиною своєї суцільної різальної окрайки. При цьому стружка має змінне значення по дузі контакту, а найбільша глибина h_b сегментоподібної повздовжньої канавки досягається у тій точці поверхні отвору поперечного перерізу деталі, що лежить на лінії, яка з'єднує центри зуба і оправки з боку центра зуба. Розрахункова глибина канавки буде рівною:

$$h_b = D_z/2 + [1 - \cos(\varphi_c/2)] - \sqrt{D_z^2/4 - l^2 \sin^2(\varphi_c/2)}. \quad (1.5)$$

З рівняння (1.5) витікає, що глибина канавки залежить від кількості зубців у секції і величини зміщення e . У діапазоні діаметрів отворів 50–180 мм цей фактор є несуттєвим. Проте при збільшенні числа зубців і величини зміщення e глибина канавки збільшується. Установлено, що нижнє значення зміщення слід призначати рівним $e = (1,1 \div 2)S_z$ а верхнє $e = (5 \div 6)S_z$. При цьому у секції досить мати 4–6 зубців. Стружка, що утворюється при формуванні канавки досить добре згортається у валик, хоча ширина зрізу досить велика. Пояснюється це змінною жорсткістю, що зменшується від центру зрізу до периферії.

При перетині поверхонь, що формуються сусідніми зубцями, утворюються повздовжні гребінці, які зрізуються наступними секціями зубців. Ці напівчистові, чистові та калібруючі зубці з суцільною різальною кромкою розміщуються на оправці без ексцентриситету.

Метод отримання поздовжніх канавок має також наступні переваги. Після затуплення робочої ділянки зуба, останній повертають на ексцентричній втулці на кут $2\pi(n-1)$. Потім зуб працює новою гострою ділянкою. У процесі експлуатації протяжки, зубці можна повертати $n-1$ разів, після чого останні переточуються по передній поверхні. Ця обставина дозволяє у $n-1$ разів підвищувати стійкість протяжки. Крім того, за рахунок заміни різальної кромки зі стружкоподільчими викружками на суцільну різальну кромку досягається додаткове підвищення стійкості інструменту.

Ще однією перевагою методу є те, що умови формування валика стружки більш сприятливі, ніж у відомих протяжках. Це пояснюється тим, що на стружці немає утовщень від викружок і можливістю використання великих передніх кутів (до 40°), що є неможливим для зубців суцільних протяжок. Завдяки цьому у стружкових канавках формується цілий валик стружки, що особливо важливо для отримання високої якості обробленої поверхні при протягуванні в'язких сталей. Використання зубців із суцільною різальною кромкою виключає виникнення на обробленій поверхні повздовжніх рисок і подряпин, які характерні для роботи зубців зі стружкоподільчими канавками і викружками. За рахунок того, що перед стружкоподільчою секцією для її додаткового врівноваження можуть бути встановлені деформуючі елементи, метод забезпечує високу точність обробки. Проте експериментальна перевірка методу показала, що на ділянках оброблених отворів до $0,2 d_z$, які прилягають до торців деталі, спостерігається зниження точності в 2–3 рази. Пояснюється це явище різкою зміною сили протягування на початку та на закінченні процесу зрізу усією робочою частиною зуба.

Для усунення цього недоліку метод було удосконалено таким чином, щоб забезпечити постійну площу поперечного перерізу стружки на вході та виході кожного зуба, що формує поздовжню канавку. Таким чином, у кінцевому результаті досягається плавність протягування [78]. Досягається це за рахунок установки зубців 1 і 2 секцій під кутом ψ_c до осі оправки 3 протяжки на фасонних втулках 4 (рис.1.6). Величина зміщення e ексцентриситету суцільних різальних кромek зубців регулюється за допомогою прокладок 5. Діаметр зубців визначається із залежності:

$$D_z = (d_z - e) / \cos \psi_c. \quad (1.6)$$

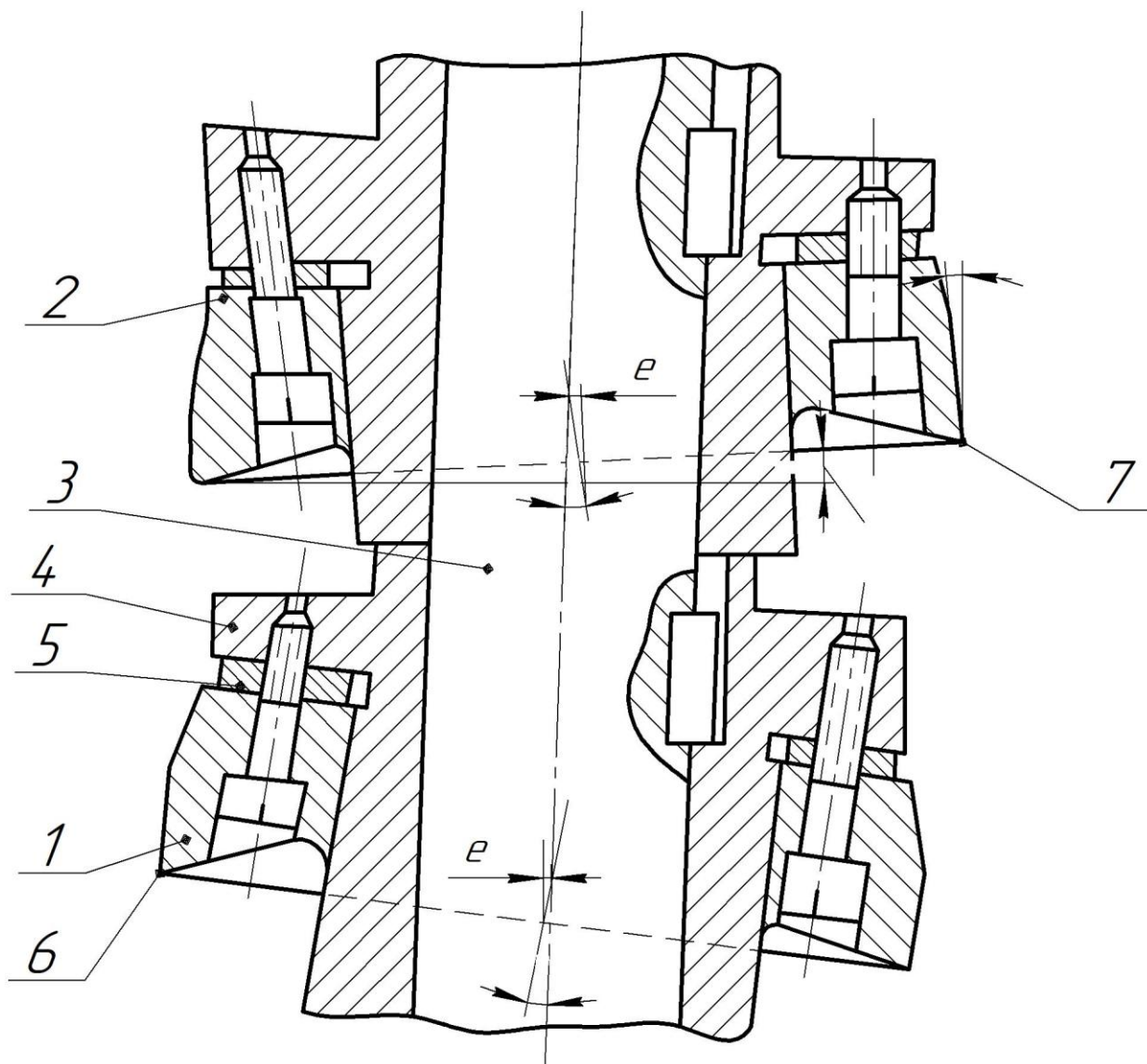


Рисунок 1.6 – Схема розміщення зубців під кутом до осі інструменту при формуванні поздовжніх канавок методом протягування зі зміщенням зуба

Оскільки кут нахилу ψ_c осі зубців до осі інструменту рівний заданому кутові зуба у точках 6 і 7 різальних кромek, де товщина зрізу є максимальною, значення цього кута слід призначати у діапазоні, що рекомендується для чорнових зубців протяжок $\psi_c = \alpha = 3 \div 4^\circ$. Із рис. 1.6 також витікає, що для оптимального значення переднього кута для конкретних умов обробки слід додавати величину ψ_c .

Апробація інструменту, створеного за принципами [78] показали, що сила протягування на вході та виході зубців змінюється плавно. Це дозволяє забезпечити високу точність на всій довжині отвору при отриманні

поздовжніх канавок. Перевагою методу є також можливість переточки затуплених зубців по циліндричній задній поверхні.

Проте, недоліком інструментів і технології отримання поздовжніх канавок рельєфу є складність цих інструментів та можливість їх застосування при діаметрах отворів деталей понад 50 – 60 мм.

На основі відомої технології волочіння труб на довгій оправці розроблено ще один спосіб отримання поздовжніх канавок [31], який було перевірено на гарячекатаних трубах 168×16 із сталей 20 та 30ХГСА, що служили заготовками для серійного виробу [31,49]. У перерізі, перпендикулярному осі, треба було забезпечити наступні розміри виробу: зовнішній діаметр 160h14; діаметр отвору 132H14; глибину двадцяти поздовжніх трикутної форми канавок на поверхні отвору 2,3jS15 при куті $2\beta_b = 130^\circ$. Обробка здійснювалась на пресах моделей П-500 зусиллям 5 МН та Д-2258 зусиллям 6,3 МН. Схема редукування передбачала переміщення матриці при нерухомій деталі та оправці. Фасонна оправка, що було виготовлена із сталі Х12МФ (HRC 61–64), мала на зовнішній циліндричній поверхні 20 поздовжніх виступів. Форма і розміри цих виступів відповідали формі і розмірам канавок виробу. Перед редукуванням оправка покривалась твердим мастилом з наповнювачем MoS_2 на клею БФ-6 (1:3), яке висушувалось на повітрі.

Сила редукування при обробці виробів із сталі 20 складала 3,5–3,8 МН, а із сталі 30ХГСА – 4,8–5 МН. При початковій довжині трубних заготовок 320 мм редукування приводило до їх подовження до 370–380 мм, тобто на 15–18%.

На рис. 1.7 показана партія деталей з поздовжніми канавками, отриманими редукуванням на фасонній оправці та фрагмент поверхні отвору з цими канавками.

Метод отримання канавок глибиною 0,005–5 мм методом холодного пластичного деформування також було перевірено на гідрофікованих пресах

зусиллям 0,2 МН і 6,3 МН (моделі Д-2238), а також на горизонтально-протяжному верстаті моделі 7Б56.

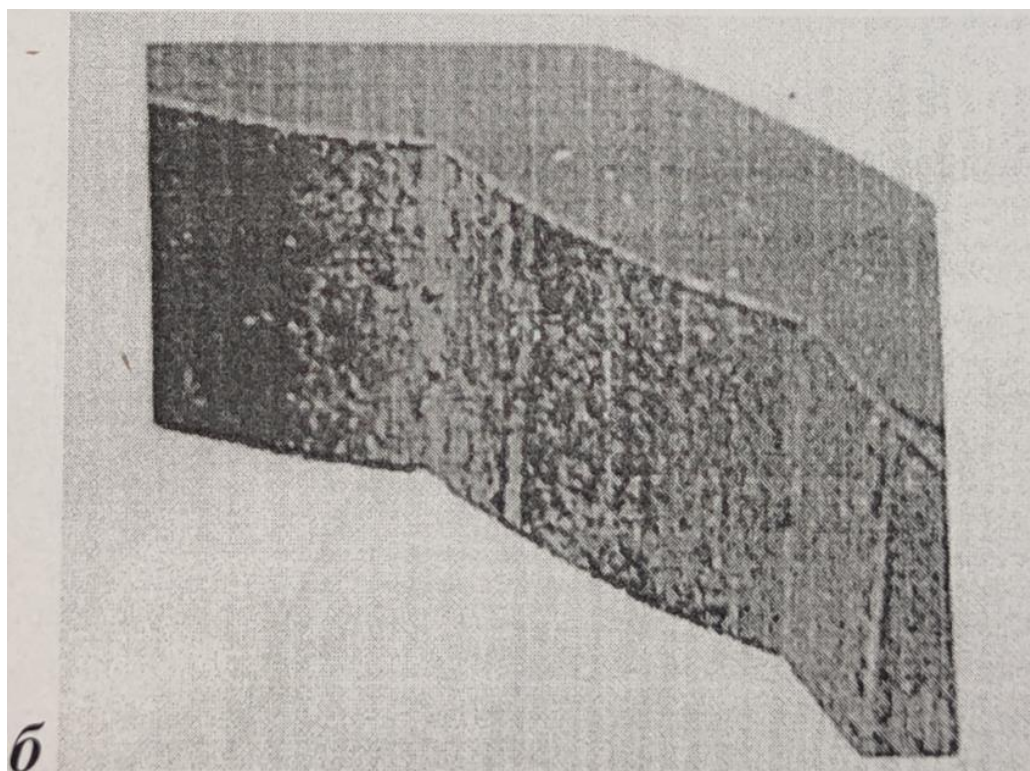
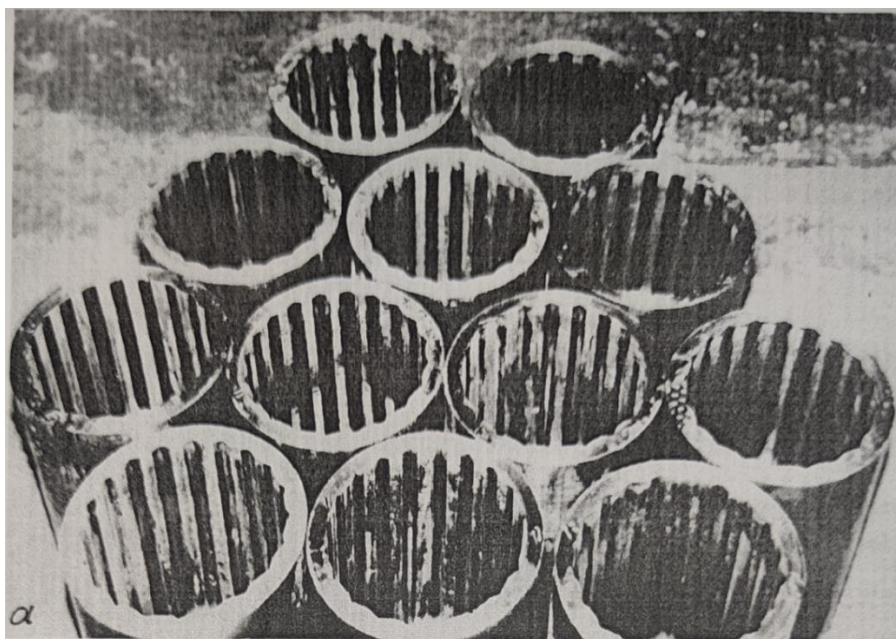


Рисунок 1.7 – Деталі з поздовжніми канавками, що отримані редукуванням (а) та фрагмент поверхні цих деталей (б)

Недоліком отримання поздовжніх канавок методом редукування полягає у складності випресування фасонної оправки після основної частини операції та підбору спеціального антифрикційного мастила.

1.3 Отримання гвинтових канавок

Гвинтові ліві чи праві канавки отримують двома способами: протягуванням інструментом із спеціальним деформуючим самообертальним елементом або редукуванням на фасонній оправці із гвинтовим виступом.

У першому випадку в основу покладене протягування отворів із одночасним обертанням інструменту [13]. Таке обертання запобігало виникненню повздовжніх нерівностей обробленої поверхні отворів у виробах спеціального призначення, де ці нерівності були недопустимими, як концентратори напружень. Пізніше протягування з обертанням інструменту було використане з метою поліпшення контактних явищ обробки, а також фізико-механічних і геометричних характеристик поверхні і поверхневого шару деталі [85].

Нижче детально розглянута конструкція протяжки із самообертальними елементами. Принагідно відзначимо, що у випадку, який там розглядається, такий елемент може утворювати канавку деформуванням при обробці пластичних матеріалів або різанням при протягуванні виробів із крихких чи напівкрихких матеріалів. Глибина гвинтової канавки може знаходитись у межах 0,02–0,1 мм, а крок визначається кутом відхилення робочої частини самообертального елемента від осі протяжки.

У другому випадку гвинтові канавки отримують редукуванням на фасонній оправці з гвинтовим виступом. До опису цього способу, наведеного вище (підрозділ 1.2 та рис. 1.7), слід додати, що після проведення цієї операції фасонну оправку слід вигвинчувати. Гвинтові канавки можуть мати глибину до 3 мм і профіль та крок, що відповідають профілю та кроку

оправок. Редукування виконується за один прохід і належить до класу охоплюючого деформуючого протягування.

При недоліки редукування на фасонних оправках сказано вище.

1.4 Фрагментація поверхні

Фрагментація або дискретність поверхні є складовою утворення технологічних чи експлуатаційних канавок протяжками. Причому цей інструмент частіше використовується для обробки внутрішніх поверхонь. Для цього протяжки оснащуються спеціальними обертальними чи фасонними робочими елементами. Для фрагментації поверхні може також використовуватись редукування на фасонних оправках.

Протягування інструментом із самообертальними ліво— та правозахідними елементами виконується деформуюче—різальною протяжкою [78], яка складається з наступних елементів (рис. 1.8, *a–в*): оправки 1, на котрій розміщені деформуючі елементи 2, різальні зубці 3 зі стружковими канавками 4, втулки 5 і 6, які встановлено з можливістю обертання відносно осі оправки, та упорні підшипники 7–9, що полегшують обертання втулок. Втулки 5 і 6, оснащені додатковими деформуючими елементами 10 і 11, які розміщені під кутом η до осі інструменту.

Додаткові деформуючі елементи мають передню (робочу) поверхню 12, калібруючу поверхню 13 і задню поверхню 14. Якщо втулки оснащені додатковими різальними зубцями 15, останні мають передню 16 і задню 17 поверхні, а також фаску 18. Усі деталі протяжки, що розміщені на оправці, зафіксовані у осьовому напрямку.

Кут нахилу деформуючих елементів 10 – η чи різальних зубців 15 знаходиться у діапазоні 14–82°. Змінюючи кут нахилу елементів 10 чи різальних зубців 15 до осі протяжки та їх число, можна управляти формою і розмірами площадок обробленої поверхні, розділених гвинтовими

канавками. У залежності від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу для отримання гвинтових канавок використовується або метод різання або метод пластичного деформування. При обробці деталей із бронзи, чавуну, малопластичних і загартованих сталей обертальну втулку потрібно оснащати різальними зубцями, а при обробці маловуглецевих, аустенітних чи інших високопластичних сталей і сплавів—деформуючими елементами.

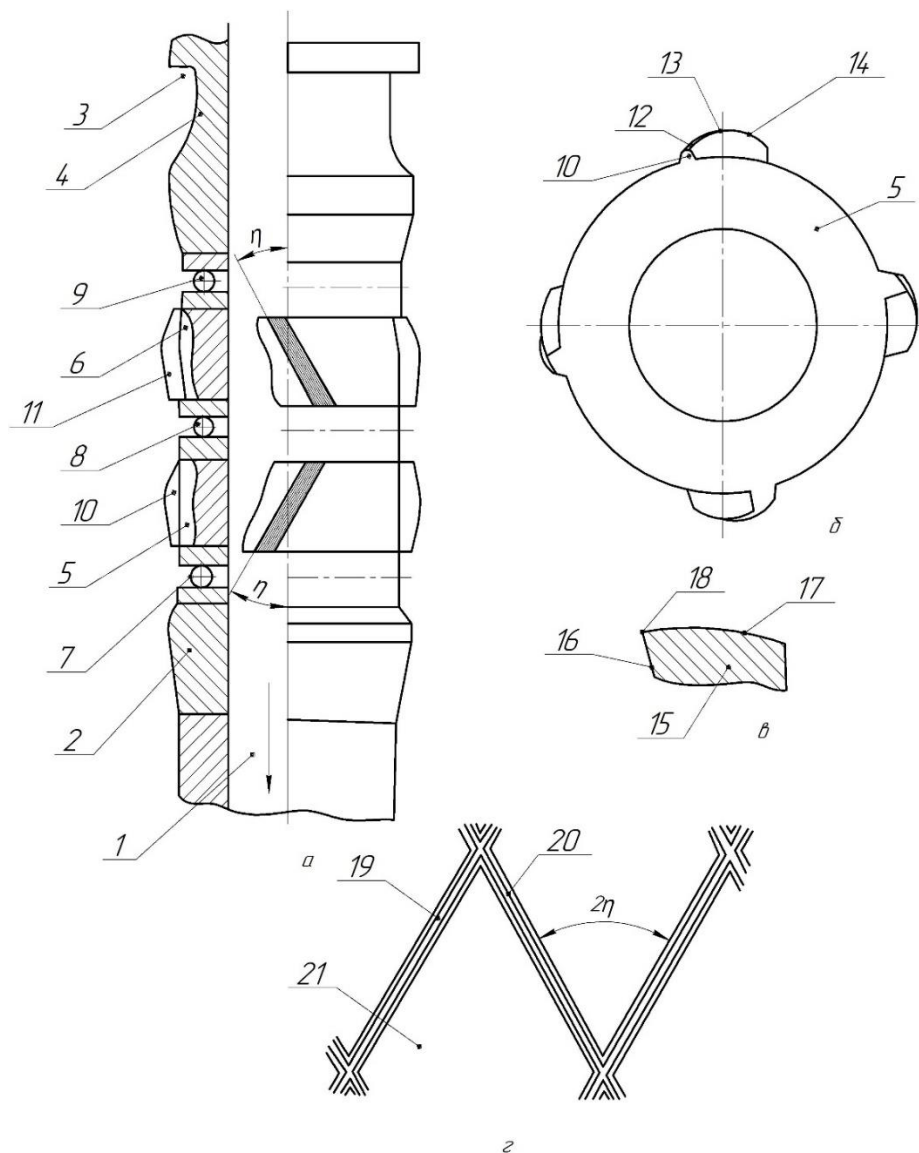


Рисунок 1.8 – Протяжка із самообертальними елементами та елемент обробленої поверхні:

*а – загальний вигляд; б – елемент для холодного пластичного деформування;
в – профіль різального зуба самообертальної секції; г – елемент обробленої поверхні
після нанесення канавок.*

При робочому ході протяжного верстату чи пресу у пристрої котрого закріплено заготовку, за допомогою деформуючого елементу 2 готується (калібрується) поверхня, що має оброблятися. При вході елементів 10 чи зубців 15 у отвір заготовки, оскільки останні нахилені під кутом до осі протяжки, а значить і до напрямку руху, виникає тангенціальна сила. Від дії цієї сили втулка 5 повертається і додаткові деформуючі елементи 10 або різальні зубці 15 утворюють на оброблюваній поверхні гвинтову канавку 19 (рис. 1.8, г) з кроком $t = \pi d / \tan \eta$ і профілем, що відповідає їх профілю, та глибиною, яка визначається натягом чи припуском відповідно на деформуючий елемент чи різальний зуб. При перетині цієї канавки різальними зубцями 3 відбувається поздовжній поділ стружки на окремі витки. Якщо протяжку оснащено ще однією втулкою 6, додаткові деформуючі елементи або різальні зубці якої розміщені під протилежними кутами до осі протяжки порівняно з елементами чи зубцями втулки 5, втулка 6 обертається у протилежний бік, а на обробленій поверхні формується канавка 20. При перетині канавок 19 і 20 на обробленій поверхні утворюються окремі ромбоподібні площадки 21 з розмірами діагоналей $a \times b$, причому $a = \pi d / n$, а $b = \pi d / n \tan \eta$, де η – число додаткових деформуючих елементів або різальних зубців на втулках. Глибина канавок у цьому випадку повинна перевищити сумарний припуск, оскільки на готовій поверхні повинна залишитись система каналів для змащування.

Кут нахилу робочих кромок додаткових ділильних елементів та ділильних різальних зубців повинен знаходитись у діапазоні $14\text{--}82^\circ$. Верхня границя значень обумовлена можливістю самообертання елемента. Таким чином, кут нахилу повинен бути меншим різниці $\pi/2$ і кута тертя, що дорівнює для більшості конструкційних матеріалів, які працюють у парі «гвинт–гайка», – $6\text{--}8^\circ$. Нижня границя діапазону визначається значенням

кутів, менше котрих стає неможливим поділ стружки у поздовжньому напрямку. Таким чином, при кутах нахилу $\eta < 11^\circ$ відбуватиметься тільки поперечний поділ стружки, навіть для глибоких отворів. Вище було показано, що це доцільно було здійснювати більш простими методами.

Глибина гвинтових канавок трикутного профілю, які можна отримувати таким методом, буде рівною $h = (0,01-0,02)d$. Тобто, для практичного застосування методу ця глибина знаходиться у діапазоні 0,2–3,6 мм. Це у випадку технологічного використання методу дозволяє готувати оброблювану поверхню для зняття усього припуску різанням.

Одним із варіантів удосконалення методу протягування із самообертальними елементами є обробка отворів інструментом, що показано на рис. 1.8 [85].

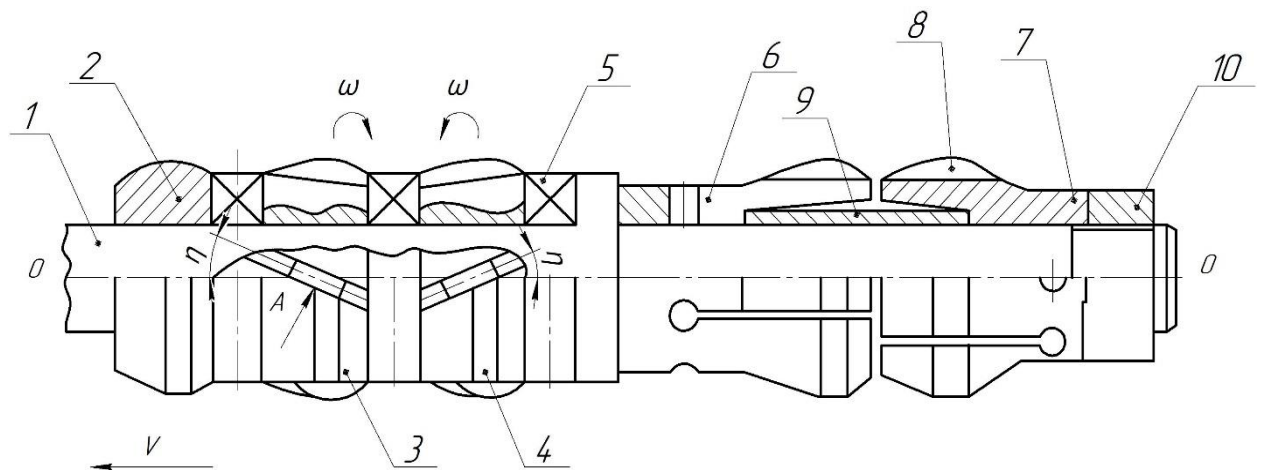


Рисунок 1.9 – Протяжка для отримання рельєфів обробленої поверхні із заповненням канавок твердим мастилом

Секція протяжки складається із оправки 1, на якій розташовані круглий напрямний елемент 2, гвинтові деформуючі елементи 3 і 4, три упорні підшипники 5, різні кільця 6 і 7 з антифрикційними блоками 8, дистанційна втулка 9 і гайка 10. Умовні позначення на рис. 1.10: v – напрямок прямолінійного руху інструменту; ω – напрямок обертального руху

гвинтових деформуючих елементів; $O-O$ – вісь обертання; η – кут нахилу деформуючих частин гвинтових деформуючих елементів.

Інструмент працює наступним чином. Напрямний елемент 2 забезпечує співвісність протяжки з оброблюваною поверхнею. Гвинтові деформуючі елементи 3 і 4 обертаються у різні боки на трьох упорних підшипниках 5. Ці елементи мають деформуючі частини, які установлені під кутом $\eta \neq 0$ до осі $O-O$. Таким чином забезпечується самообертання гвинтових деформуючих елементів і формування регулярного рельєфу на обробленій поверхні.

Зона обробки постійно змашується робочою рідиною, наприклад, гліцерином, що сприяє розм'якшенню і розчиненню оксидних плівок поверхні деталі та антифрикційних брусків 8. Останні за рахунок пружної деформації пелюсток розрізних втулок притискаються до поверхні, що обробляється. Внаслідок зношування антифрикційних брусків 8 антифрикційний матеріал заповнює впадини рельєфу поверхні.

Використання цього способу комбінованої обробки внутрішніх циліндричних поверхонь тертя підвищує продуктивність процесу, не знижуючи його якості.

Ще одним удосконаленням способу отримання рельєфів на деталях шляхом протягування інструментом із самообертальними ліво– та правозахідними елементами є наступний (рис. 1.10, *a* і *б*) [87]. Підвищення якості отримання рельєфів та розширення технологічних можливостей протягування у цьому напрямку досягається наступним оригінальним пристроєм. Цей пристрій (рис. 1.10, *a* і *б*) складається із вузла обертання, що включає в себе планшайбу 1 з упорним підшипником 2, обойми 3 з порожниною для закріплення деталі 4, деформуючої протяжки з оправкою 5. На цій оправці розташовані передня 6 та задня 7 напрямні, дистанційна втулка 8, деформуючі блоки 9 і 10 з деформуючими елементами 11 і 12, гайка 13.

Протягування і отримання рельєфів виконується наступним чином. Інструмент здійснює прямолінійний рух v відносно поверхні деталі, що

обробляється. Деформуючий блок 10 входить у отвір деталі 4, яка під дією осової сили протягування притискається до площини кільця упорного підшипника 2, завдяки тому, що деформуючі елементи 12 розміщені на блоках під кутом нахилу η до осі інструменту на відстані l_1 , яка більша за довжину деталі l , що обробляється, а значить і до напрямку руху, виникає тангенціальна сила.

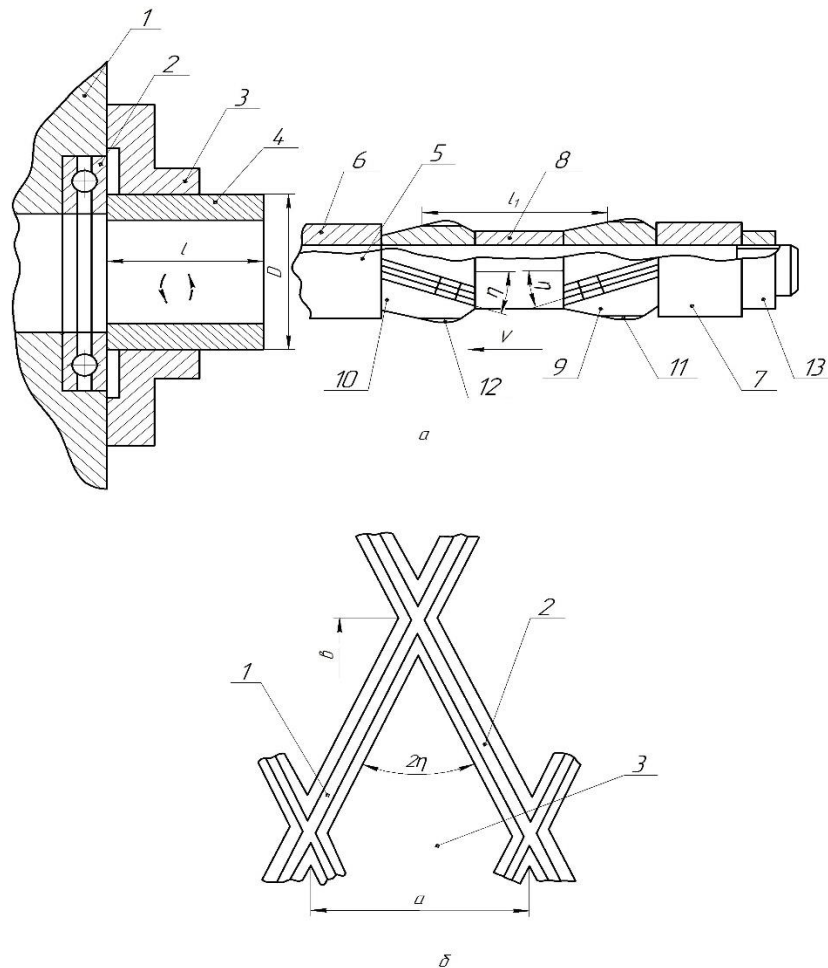


Рисунок 1.10 – Протяжка для отримання точних рельєфів поверхні отворів деталей (а) та форми рельєфу обробленої поверхні (б)

Від дії останньої оброблювана деталь обертається, а деформуючі елементи утворюють на її внутрішній поверхні канавку з кроком $t = \pi d / \tan \eta$ профілем, що відповідає профілю деформуючих елементів і глибиною, що визначається натягом на деформуючий елемент. При виході деформуючого блоку 10 із отвору формування канавки припиняється. Потім у роботу вступає деформуючий блок 9, деформуючі елементи 11 якого розташовані

під протилежним кутом нахилу η до осі протяжки. Оброблювана деталь 4 при цьому обертається у протилежний бік і на її внутрішній поверхні формується інша гвинтова канавка.

При перетині канавок 1 і 2 (рис. 1.10, б) на обробленій поверхні утворюється регулярний рельєф чотирикутного типу з розмірами по діагоналі $a \times b$, причому $a = \pi d/n$, а $b = \pi d/ntg\eta$, де n – число деформуючих елементів блоку.

Використання даного удосконалення способу протягування дозволяє формувати на внутрішніх циліндричних поверхнях деталей точний рельєф.

Фрагментація поверхні може також здійснюватись за допомогою редукування (охоплюючого протягування) на двох фасонних оправках за схемою, розглянутою вище (рис. 1.7). У цьому випадку процес виконується почергово на ліво– та правосторонніх фасонних оправках з вигвинчуванням деталей або оправок. Фрагментація поверхні особливо ефективна для деталей, котрі в процесі експлуатації повинні руйнуватися. У першу чергу це стосується осколочних оболонок боєприпасів.

Фрагментацією поверхні деталі є також виконання протягування з наступним розкочуванням кульковим інструментом [88]. При здійсненні цього способу на останній деформуючий елемент 1 (рис. 1.10 а) протяжного інструменту, що має робочий 2 і зворотній 3 конуси і циліндричну стрічку 4 (рис. 1.11, б) наносять сегментні пазы 5 для створення виступів 6 і впадин 7. При цьому кроком 8 та шириною виступів b можна варіювати разом з величиною подачі на оберт при розкочуванні S при відпрацюванні і оптимізації рельєфу деталі у конкретних умовах експлуатації. Сегментна форма пазів дозволяє запобігати з'явленню концентрації напружень у впадинах 7, а також є технологічною при виготовленні деформуючого елементу. Як варіант, допустимо нанесення плоских лисок, що розділяють виступи 6. Після виготовлення описаного деформуючого елементу здійснюють роздачу (рис. 1.11, б), причому рельєф внутрішньої поверхні 9 трубчастої заготовки 10 формується як відбиток рельєфу останнього

деформуючого елементу 1, являючи собою систему повздовжніх впадин 11 і вершин 12 (рис. 1.11, б і 1.12, а).

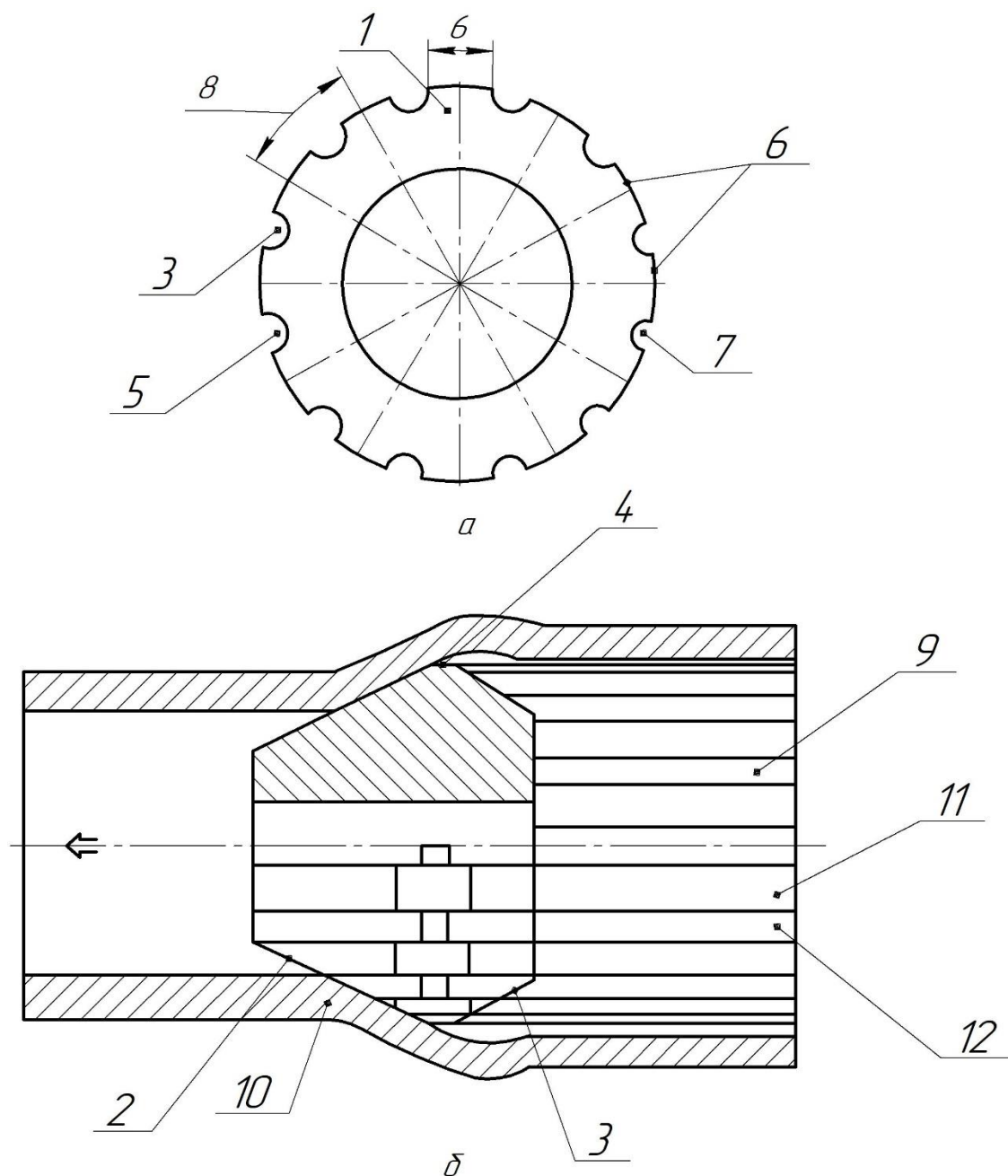


Рисунок 1.11 – Профіль (а) і принцип роботи фасонного деформуючого елемента протяжки для отримання поздовжніх канавок рельєфу (б)

Далі здійснюють наступну операцію розкочування (рис. 1.12; а і б). Під час розкатування вершини 12 рельєфу внутрішньої поверхні пластично деформуються. При цьому припуск на сторону a і висота вершин H пов'язані

нерівністю $a < H < a + R_{max}$, а припуску a достатньо для заочування вершин 12 до величини, меншої допустимої нерівності R_{max} . Величина пластичної деформації не повинна досягати дна впадини 11 (рис. 1.12, а). Подача на оберт при розкочуванні S задає крок нерівностей у повздовжньому перерізі деталей (рис. 1.12, б).

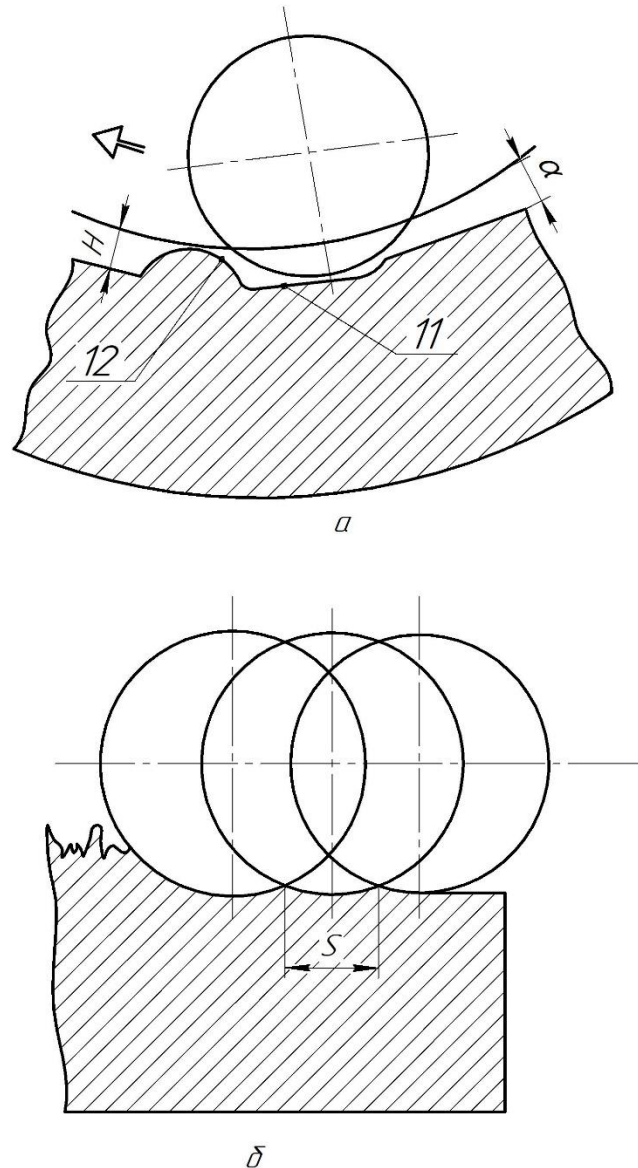


Рисунок 1.12 – Схема процесу розкочування кульковим інструментом після протягування фасонним деформуючим елементом у поперечному (а) і повздовжньому (б) напрямках

Таким чином «спіраль» (рис. 1.13, б) сліду обробки при розкочуванні перетинає систему поздовжніх слідів обробки 14 і відтинає чотирикутники з

попарно рівними боками. Для формування впадин у вигляді ромбу ширина виступів B пов'язана з подачею на оберт S , яку виведено із подібності трикутників ABC і $A_1 B_1 C_1$ (рис.1.13, б):

$$B = \pi d S / \sqrt{S^2 + \pi^2 d^2}. \quad (1.7)$$

Реалізація способу поєднання деформуючого протягування з фасонним деформуючим елементом інструменту з наступним розкочуванням кульковою розкаткою дає можливість створювати упорядкований рельєф на внутрішній поверхні трубчастих виробів.

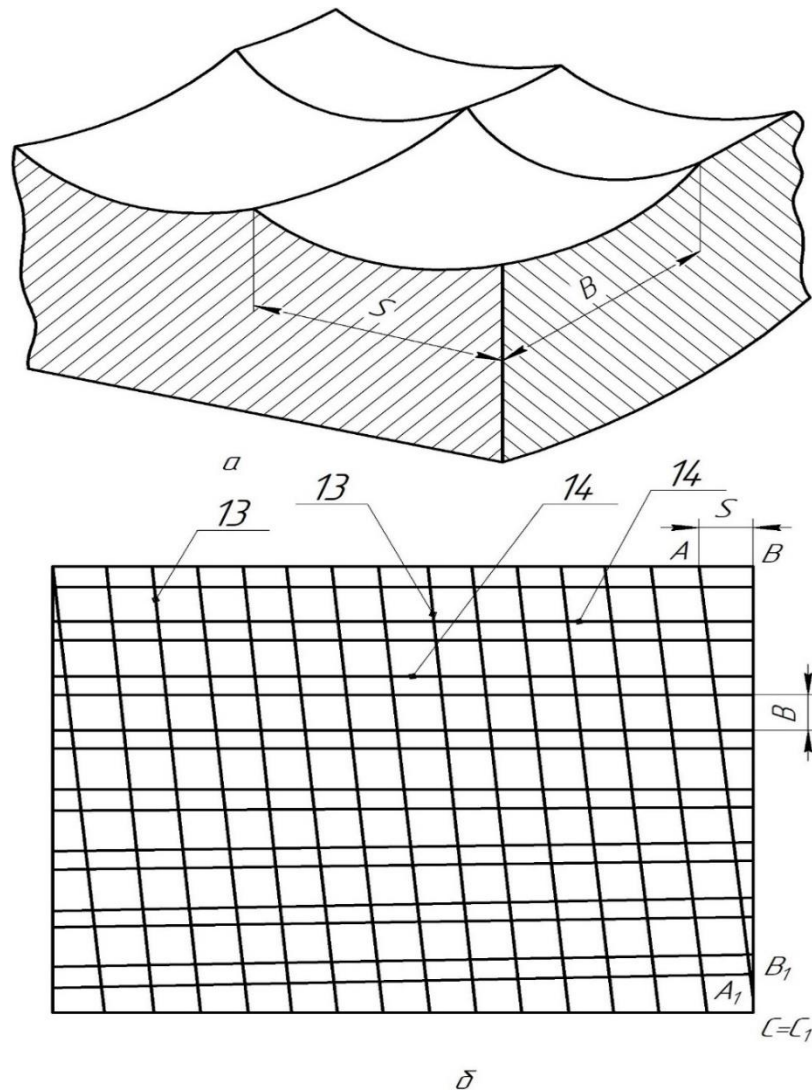


Рисунок 1.13 – Фрагмент рельєфу поверхні деталі, обробленої протяжкою з фасонним деформуючим елементом і кульковою розкаткою (а) і розгортка циліндру внутрішньої поверхні отвору деталі, обробленої протягуванням і розкочуванням (б)

Крім того, з'являється можливість управляти цим рельєфом при оптимізації експлуатаційних властивостей поверхонь, а також значно зменшити обробку за рахунок підвищення коефіцієнту використання металу і відмови від чорної лезової обробки (розточування, зенкерування тощо).

Фрагментація поверхні деталей машин може бути також створена з використанням двох технологічних процесів редукування на фасонній оправці та наступної обробки різання лезовим інструментом, наприклад, точіння чи розточування. У цьому випадку редукування здійснюється по описаній вище схемі отримання повздовжніх канавок на фасонній оправці (підрозділ 1.2, рис. 1.7). Потім ці канавки перерізаються гвинтовою квазіпоперечною канавкою необхідного кроку і глибини різанням лезовим інструментом.

Відомо також плосковершинне алмазне хонінгування, у процесі якого сталі або чавунні заготовки після чорної обробки алмазними брусками зернистістю 100/80–250/200 хонінгують брусками малої зернистості 14/10–40/28 [80]. Отримана поверхня після обробки має плоскі виступи та впадини, що чергуються між собою. Глибина впадин для мастила знаходиться у межах 2.5–10 мкм. Метод використовується, головним чином, для нанесення твердого мастила при хонінгуванні отворів деталі типу гільз ДВЗ.

Суть процесу, описаного у роботі [44], полягає у тому, що зношена поверхня деталі обкочується фасонним роликом з утворенням профільних гвинтових канавок. При цьому видавлений роликами метал утворює на краю канавок виступи, що збільшують діаметр зношеної поверхні. Це позитивно впливає на зносостійкість та довговічність відновленої поверхні.

Типи упорядкованих рельєфів, що створено безпосередньо у процесі механічної обробки, ґрунтовно вивчено проф. Шнейдером Ю.Г. та його учнями [102]. Проте ці рельєфи мають, головним чином, декоративно-естетичне призначення.

Для попереднього поділу поверхонь осколочних оболонок військового призначення використовувалось також холодне прокатування. При цьому

один з роликів прокатного стану був фігурний, тобто мав трикутні виступи, що чергувались з плоскими циліндричними поверхнями, а другий – був гладеньким циліндром. Потім лист згортався до форми циліндра, зварювався по дотичній і калібрувався. Таким чином готова обечайка бойової частини отримувала гвинтові канавки, що служили границею майбутніх осколків.

1.5 Висновки до розділу

Таким чином, вивчення і аналітичний огляд науково-технічної літератури з проблем рельєфоутворення дозволив визначити недоліки відомих технологій та інструментів для їх реалізації, які полягають у наступному.

Більшість способів утворення рельєфів базуються на операції протягування отворів деталей, що звужує їх застосування для інших поверхонь деталей.

Немає наукової угрунтованої класифікації регулярних рельєфів за призначенням та технологію отримання.

Немає системного дослідження впливу факторів процесу рельєфоутворення на параметри рельєфу: профіль та зміну фізико-механічних і хімічних властивостей матеріалу у районі дії деформуючого чи різального елемента.

Не існує досліджень дискретності поверхні після нанесення рельєфів тобто співвідношення площі опорних площадок і канавок.

Виходячи із сказаного, були визначені мета і завдання дисертаційного дослідження.

Мета – поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту нанесенням регулярних мікро- і макрорельєфів технологічного і експлуатаційного призначення заглибленням лінійних інденторів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні **завдання**:

- розробити математичну модель дії характеристик процесу заглиблення лінійних інденторів : сили індентування , твердості і пластичності зразка на параметри канавки регулярного рельєфу;
- створити класифікацію регулярних рельєфів поверхні деталі за призначенням та технологію отримання;
- розробити розрахунок дії сили заглиблення та геометричних параметрів інструменту на форму та розміри канавки рельєфу;
- провести експериментальне дослідження процесу заглиблення лінійного індентора;
- розробити взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентуванням;
- розробити оригінальний метод отримання регулярного рельєфу, що забезпечує утворення дискретності поверхонь деталей;
- побудувати типову технологію та інструменту для виробництва і відновлення деталей засобів транспорту з регулярними рельєфами, що служитиме основою для поліпшення експлуатаційних властивостей таких деталей.

Основні результати аналітичного огляду літератури джерел подано у наших публікаціях [56, 73].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Ієрархія головних факторів, що впливають на характеристики регулярних рельєфів

Для того, щоб підготуватись до експериментального дослідження, слід визначити модель цього дослідження.

Модель – це об'єкт (процес, установка, матеріал тощо), що знаходиться у подібності до об'єкту, який моделюється.

Подібність – це однозначне співвідношення між двома об'єктами.

Натурне і фізичне моделювання будуються на теорії подібності, оскільки у обох випадках модель і оригінал подібні за фізичною природою.

У той же час математичне моделювання – використання моделей, які відрізняються за фізичною природою від об'єктів, що моделюються, але мають з останніми схожий математичний опис. Отже, математичні моделі належать до класу моделей прямої аналогії, у котрих кожній фізичній величині оригіналу відповідає у моделі величина іншого вигляду, що змінюється у просторі і часі подібним чином [2, 96].

Нанесення рельєфів на поверхню деталі включає комплекс досліджень: технологічних процесів, вибору конструкції лінійного індентору, вимірювального інструменту, приладів для дослідження канавок та простору біля канавки тощо.

Технологічні процеси, з позицій моделювання, включають сукупність різних термічних, механічних, фізико-хімічних та ін. перетворень, що призводить до отримання матеріалів, заготовок та деталей із заданими властивостями. Тому ці процеси є найбільш складними системами, які необхідно спростити, тобто застосувати системний підхід до дослідження. Цей підхід ґрунтується на декомпозиції системи на більш прості підсистеми,

що взаємодіють між собою, роздільному вивченню їх структури і функцій, з наступним синтезом отриманих відомостей. При синтезі враховується виявлена ієрархія процесів за масштабами дії, просторова і часова послідовність, а також синергетичні ефекти, загальна дія яких змінює суму окремо взятих дій [1, 2, 63].

Системний підхід дозволяє аналізувати і моделювати технологічний процес, який подається у вигляді окремих блоків. Це суттєво спрощує описання складних явищ, не випускаючи просторово–часову структуру системи і характер зв'язку між окремими рівнями та підсистемами.

Отже, для моделювання дослідження, враховуючи сказане вище, нами була обрана математична модель прямої аналогії.

Для побудови математичної моделі процесу нанесення рельєфів було обрано метод крутого сходження. Даний метод дозволяє отримувати статистичні математичні моделі процесів, використовуючи факторне планування, регресивний аналіз та рух уздовж градієнту[1, 6].

При плануванні експерименту проводився вибір кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з заданою точністю. При цьому вагомим є наступне:

- прагнення до мінімізації загальної кількості дослідів;
- одночасне варіювання всіма змінними, що визначають процес, за спеціальними правилами–алгоритмами;
- використання математичного апарату, який формалізує багато дій дослідника;
- вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії дослідів.

Задачі пошуку оптимальних умов є одними з найбільш розповсюджених науково-технічних задач. Задачі, що сформульовані таким чином, називаються задачами оптимізації. Процес їх вирішення називається процесом оптимізації або просто оптимізацією[2, 6, 54, 105].

Для опису об'єкта дослідження зручно користуватися уявленням про кібернетичну систему. Таку кібернетичну систему називають «чорним ящиком» (рис. 2.1). Стрілки праворуч показують числові характеристики мети дослідження і позначаються буквою y та називаються параметрами оптимізації [59]. За параметр оптимізації прийнято глибину канавки h .

Для проведення дослідження необхідно мати можливість впливати на поведінку «чорного ящика». Всі способи такого впливу позначаються буквою x та називаються факторами. У нашому випадку – це сила індентування P (нормальна сила), розмірність кН; твердість за Віккерсом та мікротвердість матеріалу зразка (відповідно HV та H_μ , розмірність МПа); і відносне видовження останнього δ (%). Це ієрархія факторів процесу. Інші фактори, за теорією умовиводу, є набагато менш значимими, тому не беруться до уваги. [54, 105].

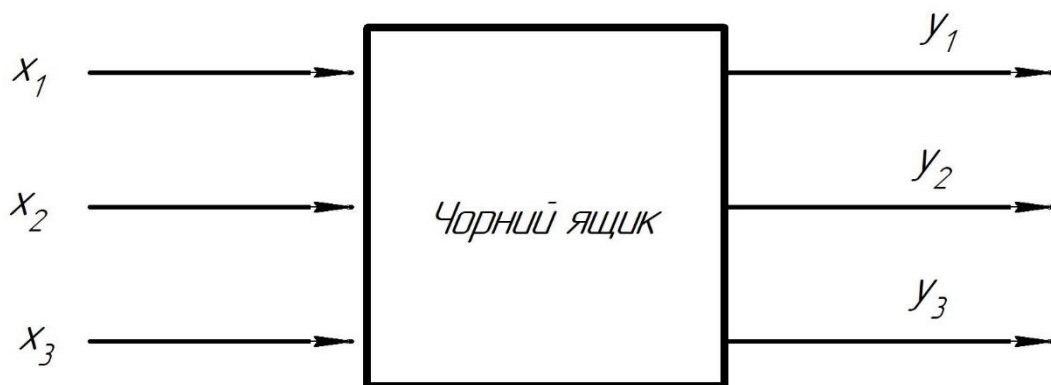


Рисунок 2.1 – Схема опису об'єкту дослідження

2.2 Модель дослідження і план експерименту

Під математичною моделлю мається на увазі рівняння, що пов'язує параметр оптимізації з факторами. Це рівняння у загальному вигляді можна записати так:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (2.1)$$

Така функція називається функцією відгуку. Кожний фактор може набувати у досліді одне з кількох значень, які називаються рівнями.

До об'єкту дослідження висувалися наступні вимоги:

- результати дослідження мають бути повторюваними, тобто, при неодноразовому проведенні дослідження в різний час, результати мають бути схожими та вписуватися в межі заздалегідь заданої похибки;
- об'єкт має бути керованим, тобто, можна вибирати різні рівні факторів.

До параметра оптимізації висувають кілька вимог. Параметр повинен бути кількісним, тобто виражатися у числовому вигляді, має бути вимірюваним за будь-якої комбінації вибраних рівнів факторів. Множина значень, які може отримувати параметр оптимізації, називається областю визначення.

Наступна вимога: параметр оптимізації повинен виражатися одним числом. Ще однією з вимог є універсальність або повнота параметра оптимізації, тобто його здатність характеризувати об'єкт з різних сторін.

До факторів математичної моделі висувають наступні вимоги: кожен фактор має область визначення – це сукупність всіх значень, які може приймати фактор. Модель має бути безперервною та дискретною.

Фактори мають бути поєднувальні, що означає, що всі їх комбінації є можливими та безпечними.

Важливим також є незалежність факторів, тобто можливість визначення фактору на будь-якому рівні, незалежно від інших факторів. Звідси випливає така вимога – відсутність кореляції між факторами. Залежність між факторами має бути нелінійна.

Для факторів існує область визначення. Це означає, що у кожного фактора є мінімально та максимально можливі значення, між якими він може змінюватися або безперервно, або дискретно.

При плануванні повного факторного експерименту слід вибрати нульовий рівень, тобто багатовимірну точку у факторному просторі. Це здійснюється на основі аналізу апріорної інформації. Побудова плану

експерименту проводиться шляхом вибору експериментальних точок, що симетричні відносно нульового рівня[63].

При виборі інтервалів варіювання, визначалося деяке число, додавання та віднімання якого дає відповідно верхній та нижній рівні фактора. Для спрощення записів умов експерименту та обробки експериментальних даних масштаби на осях було обрано так, щоб верхній рівень відповідав +1, нижній – 1, а основний – 0.

Точність фіксування факторів визначалася точністю пристроїв та стабільністю рівня в ході дослідів. Точність умовно можна розділити на три рівні:

- високий – похибка не більше 1%;
- середній – похибка не більше 5%;
- низький – похибка не більше 10%.

При високій точності фіксування факторів та нелінійній кривизні поверхні відгуку, обирається вузький інтервал варіювання.

Експеримент, в якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів, називається повним факторним експериментом[1, 63].

Властивості повного факторного експерименту типу 2^k :

- симетричність відносно центру експерименту – алгебраїчна сума елементів вектор-стовпців кожного фактору має бути рівна нулю;
- умова нормування – це сума квадратів елементів кожного стовпця, що рівна числу дослідів:

$$\sum_{i=1}^N x_{ji}x_{ui} = 0; \quad (2.2)$$

- ортогональність матриці; виконується при умові, що сума добутків будь-яких двох членів вектор-стовпця матриці рівна нулю:

$$\sum_{i=1}^N x_{ji}x_{ui} = 0, \quad (2.3)$$

де $j \neq u, j, u = 0, 1, 2, \dots, k$.

У нашому випадку ми маємо нелінійну модель, в якій один фактор залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. Розглянемо матрицю повного факторного експерименту типу 2^3 з нелінійною залежністю між факторами. В цьому випадку матриця матиме наступний вигляд (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Матриця повного факторного експерименту типу 2^3 з нелінійною залежністю між факторами

№ спроби	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y
1	+	-	-	+	+	-	-	+	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	+	y_4
5	+	-	-	-	+	+	+	-	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	-	+	-	-	-	y_8

Виходячи з даної матриці, запишемо рівняння математичної моделі:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2.4)$$

Проведення повторних (або паралельних) дослідів не дає повністю однакових результатів, тому що завжди існує помилка досліду (помилка відтворюваності). Цю помилку потрібно оцінити при паралельних дослідах. Для цього дослід відтворюється за можливості в однакових умовах декілька разів, а потім береться середнє арифметичне всіх результатів.

Відхилення результату будь-якого досліду від середнього арифметичного можна подати як різницю $y_g - \bar{y}$, де y_g – результат окремого досліду. Наявність відхилень свідчить про змінність, варіаційність значень повторних дослідів. Для вимірювання цієї змінності використовувалась дисперсія. Дисперсією s^2 називається середнє значення квадрату відхилень величини від її середнього значення.

Для перевірки математичної моделі процесу нанесення регулярних рельєфів на адекватність було внесено значення параметрів оптимізації, отриманих при експериментальних дослідженнях зразків.

Використовувалися наступні рівні факторів: $x_1 = 0,02 \text{ МН}$; $x_2 = 160 \text{ НВ}10$; $x_3 = 5\%$.

У нашому випадку ми маємо нелінійну модель, у якій один фактор залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. Використовувалася матриця повного факторного експерименту типу 2^3 з нелінійною залежністю між факторами.

Значення параметрів оптимізації визначається експериментально[108].

2.3 Обладнання, експериментальні інструменти та досліджувані матеріали

Нормальна сила P , тобто сила, що діяла на лінійний індентор у напрямку формування канавки рельєфу, створювалась на гідравлічних пресах: лабораторному ($P_{\max} = 0,02 \text{ МН}$; рис. 2.2) і випробувально-дослідницькому ($P_{\max} = 0,2 \text{ МН}$; рис. 2.3) [73].



Рисунок 2.2 – Гідравлічний прес 0,02МН



Рисунок 2.3 – Гідравлічний прес ПММ–200

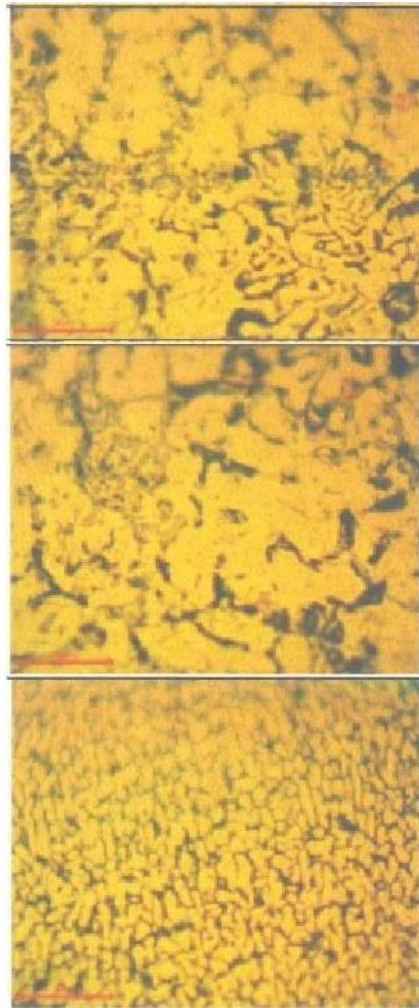
Лінійні індентори, що слугували для отримання одиничних канавок рельєфів, були виготовлені із швидкорізальної сталі Р18 ($63\ HRC$; $\sigma_{зг} = 3200\ \text{МПа}$; ударна в'язкість $3,5\ \text{Дж/м}^2$; теплостійкість $550\ ^\circ\text{C}$). Робоча поверхня інденторів шліфувалась і полірувалась до шорсткості $Ra < 0,02$. Подвійний кут при вершині становив: 60° ; 70° ; 80° ; 90° ; радіус при вершині був рівним $r=0,005$; $0,02$; $0,1$; $0,5\ \text{мм}$. Глибина канавок h мікро- і макрорельєфу знаходилась в межах $0,02 - 5\ \text{мм}$ [54, 58].

Досліджувані зразки, на котрі наносились канавки рельєфу, виготовлялись із матеріалів, механічні властивості котрих подано у табл. 2.2 [16, 17, 26, 29, 34, 35, 72, 83, 106, 111].

Таблиця 2.2 – Марка та механічні властивості матеріалів

Матеріал	Стан	Властивості				
		HB/HV10 кг/мм ² /МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
Сталь 38ХН3МА, крупногабаритні відповідальні деталі	гартування + середнє відпускання	260/2700	790	620	11	33
Сталь 12Х18Н10Т, корозійностійка аустенітна	гартування, 1050 °С	170/1950	510	200	40	55
Бронза ливарна олов'яниста Бр ОЦС 5–5–5	лиття у кокіль	60/700	160	100	6	10
Латунь деформівна Л62, деталі, отримувані холодним пресуванням	відпал	56/600	330	110	49	–
Дуралюмін Д16 (2117), за ДСТУ 11069–01	природно зістарений плакований	27/300	520	380	11	15
Титановий сплав ВТ6 (6% Al; 4% V); деталі високої питомої міцності	лиття у кокіль у захисній атмосфері + відпал	270/2900	900	770	10	30
Чавун сірий феритно- перлітний СЧ20; блоки і гільзи ДВЗ; станини верстатів	виплавка шихти у вагранках та електропечах	230/2500	200	–	–	–
Чавун сірий феритний ковкий КЧ 33–8; фланці; картери редукторів; важелі	графітизуючий відпал білих доевтектичних чавунів	160/1750	320	–	8	–

Що стосується алюмінієвого сплаву Д16(2117), то канавки регулярного рельєфу наносились і досліджувались також у зонах термічного впливу (ЗТВ) сплавлення і зварювального шва (рис.2.4 і 2.5).



*а) Зона вихідного матеріалу,
що зварюється*

*б) Перехідна зона або
зона термічного впливу*

в) Зона зварювального шва

Рисунок 2.4 – Мікроструктура (x500) алюмінієвого сплаву Д16 після наплавлення неплавким електродом у середовищі аргону з додаванням водню ($\text{Ar} + 10\% \text{H}_2$):

а – зона початкового матеріалу (низ) і ЗТВ (верх); б–зона ЗТВ; в – зона шва.

Попередньо пластини із цього сплаву зварювались дуговим зварюванням у середовищі аргону з додаванням водню за методом М.М.Бенардоса. Присадкою служив дріт із сплаву Д16 без захисного покриття. Неплавким був вольфрамовий електрод з присадкою оксиду танталу (1,3%).

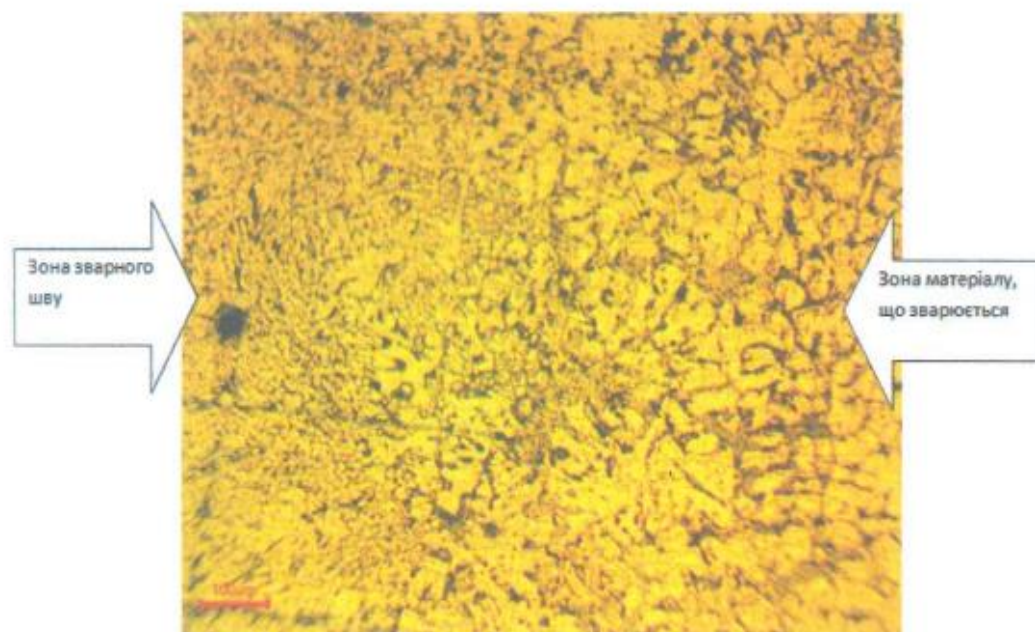


Рисунок 2.5 – Перехідна зона (x100) мікроструктур, поданих на рис. 2.4

Для виявлення мікроструктури зразки із алюмінієвого сплаву Д16 після полірування застосовувалось травлення реактивом – сумішшю плавикової та азотної кислоти і води ($\text{HF} + \text{HNO}_3 + 70\% \text{H}_2\text{O}$) [36, 77].

У всіх експериментах використовувалась мастильно–охолоджувальна рідина (МОР) на основі ріпакової олії [33, 62].

2.4 Методи вивчення фізико-механічних властивостей досліджуваних матеріалів та прилади для проведення експериментів

Для приготування металографічних шліфів служила установки Beta Grinder-Polisher фірми Buehler (рис. 2.6) та ХИМ – 1012. Перед утворенням рельєфів досліджувані матеріали шліфувались і полірувались за допомогою алмазних паст із синтетичними алмазами марок АСМ 5/3 і АСМ 3/1. Для вивчення мікроструктури використовувались стандартні травники, що рекомендуються окремо для кожного із матеріалів. Для дослідження мікроструктури застосовувались оптичні мікроскопи МИМ-7 і GX53

(рис.2.7). Корисні збільшення цих мікроскопів варіювалось у межах $\times 200$ – $\times 1000$ [1, 92].



Рисунок 2.6 – Установка для отримання металографічних шліфів
Beta Grinder-Polisher



Рисунок 2.7 – Інвертований оптичний мікроскоп GX53

Зміна властивостей експериментальних зразків у зонах контакту з лінійним індентором, у основі канавки порівняно з властивостями матеріалу за межами дії пружно-пластичної деформації вивчалась за методами мікротвердості. Для цього використовувались мікротвердоміри ПМТ-3 і DuraScan-20 (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Мікротвердомір DuraScan-20

Суть використаного у наших дослідженнях способу отримання поздовжніх канавок полягає у наступному (рис. 2.9). Трубну заготовку 1 вільно розміщують на фасонній оправці 2, виступи 3 якої мають профіль поздовжніх канавок, що формуються. Потім заготовку разом з оправкою прошовують через нерухому матрицю 4, що має робочий конус, циліндричну стрічку та зворотній конус. Оскільки швидкість заготовки v_3 , що задана штовхачем 5 в осередку деформації 6 збільшується до швидкості v_n , оправка отримує деяке переміщення у процесі охоплюючого протягування (редукування) відносно деталі назустріч останній зі швидкістю $(v_n - v_0)$. З цієї причини зв'язок оправки зі штовхачем повинен бути пружним. Процес обробки має три стадії: вільне редукування, що закінчується в момент торкання до поверхні отвору заготовки вершинами виступів оправки; заглиблення цих виступів і формування циліндричної поверхні отвору деталі при повному контакті останньої з оправкою. На усіх стадіях обробки відбувається видовження деталі. Після редукування оправка видаляється з отвору [31].

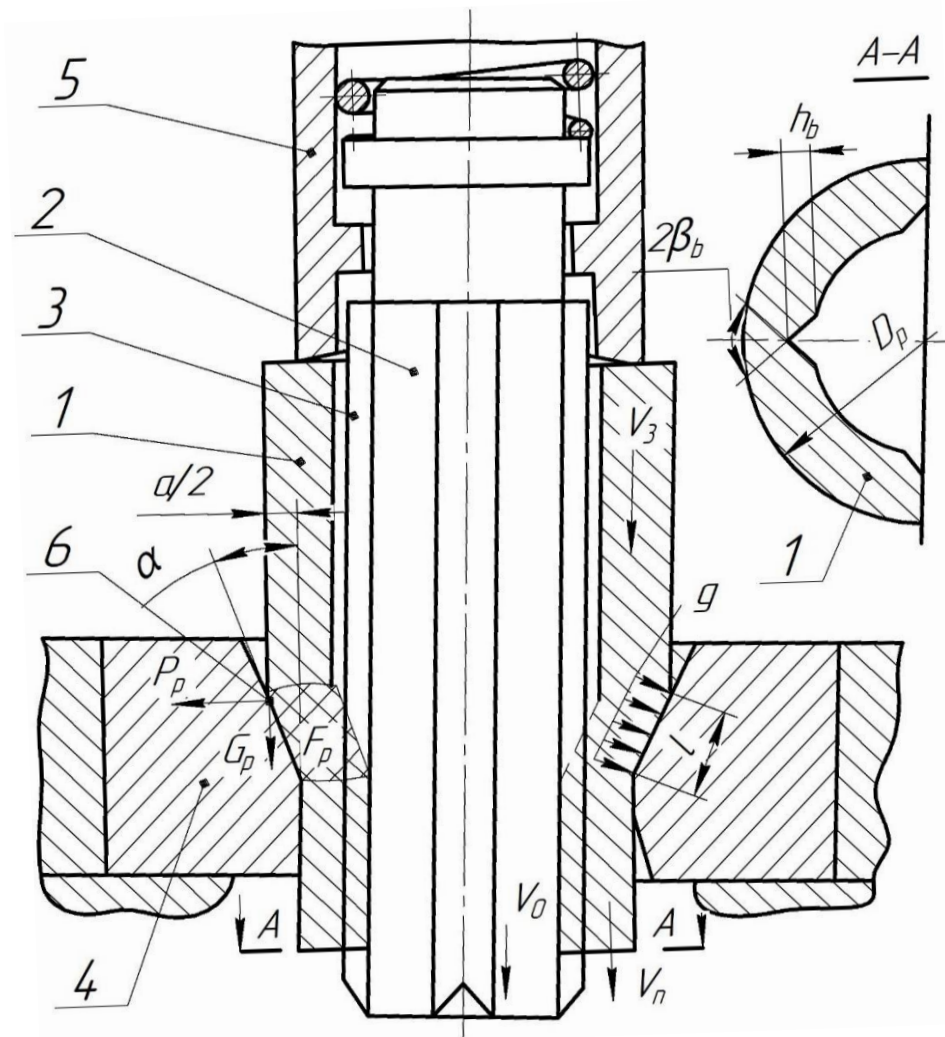


Рисунок 2.9 – Схема отримання поздовжніх канавок методом редукування на фасонній оправці

Силкові та контактні характеристики редукування наступні (рис. 2.9). Сила редукування Q_p ; сила тертя F_p ; радіальна сила P_p ; довжина контакту l ; тиск q при заданих куті робочого конуса α матриці, натягу на сторону $a/2$ і матеріалу деталі розраховуються окремо у кожному окремому випадку.

Рекомендовані характеристики процесу: матеріал матриці – твердий сплав ВК15; матеріали оправки – сталі ХВГ, Х12МФ або Р6М5 при твердості 60 – 63 HRC.

Профіль канавки рельєфу (глибина, дійсний кут після індентування, область основи і напливи) досліджувались у залежності від глибини наступними методами. Для мікрорельєфів використовувався стандартний

профілограф-профілометр «Калібр-ВЭИ». Макропрофілі безконтактним методом вивчались за допомогою подвійного мікроскопу. Використовувався також нутромір індикаторний, у якому голка була замінена на лезо.

Було також використано для цього оригінальний прилад, що показано на рис. 2.10.

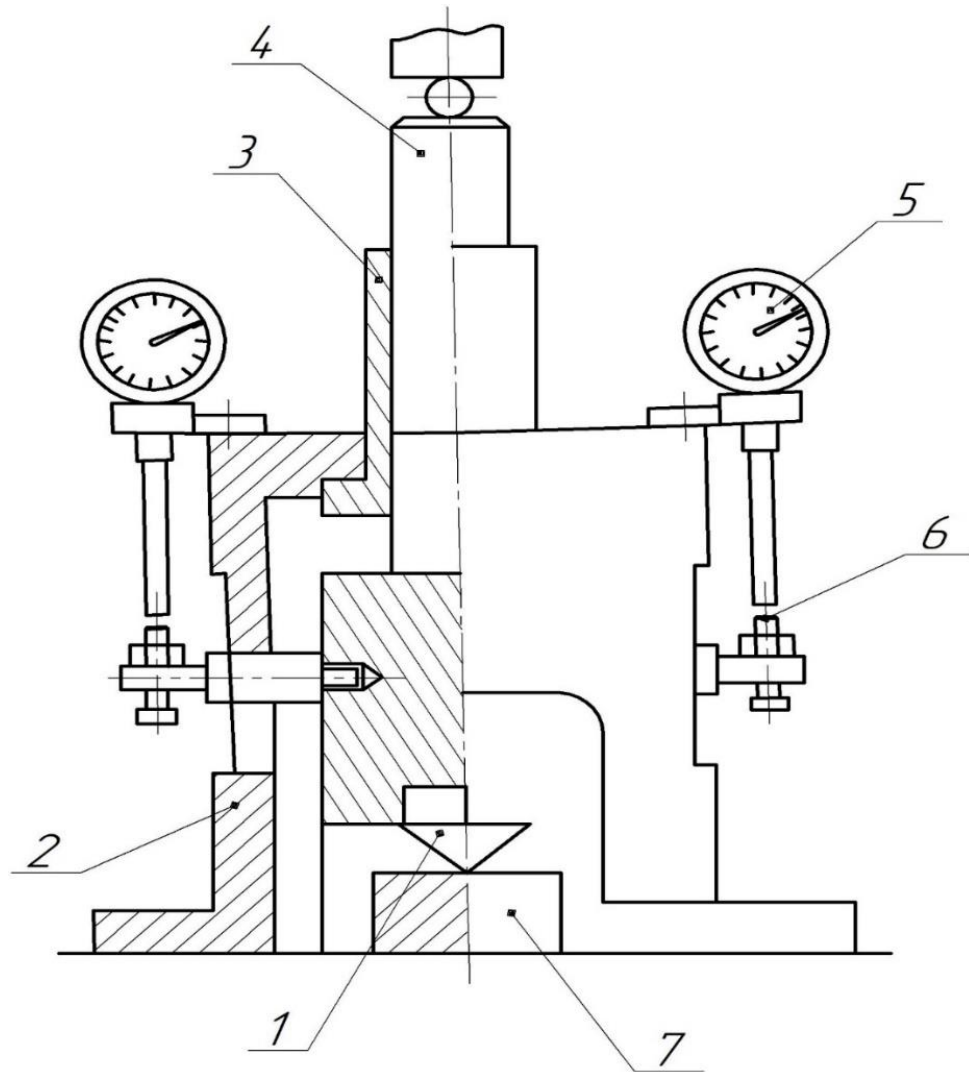


Рисунок 2.10 – Прилад для вимірювання заглиблення лінійного індентора

За основу приладу для вимірювання заглиблення лінійного індентора взято плунжерну пару паливного насоса ДВЗ. [82]. Втулка 3 цієї пари закріплена у корпусі 2. На плунжер, 4 що ковзає по втулці, закріплено тримач з наконечником сіндентером 1, який заглиблюється у металевий зразок 7. При навантаженні плунжера силою P індикатори 5 за допомогою гвинтів 6 фіксують заглиблення індентора в зразок.

2.5 Висновки до розділу

Визначена ієрархія головних факторів, що впливають на глибину та профіль регулярних рельєфів. Це – сила дії лінійного індентора на оброблюваний матеріал, твердість і відносне видовження матеріалу.

При моделюванні досліджень вибрана і розроблена математична модель дослідження та план проведення експериментальних досліджень типу 2^3 .

Вибрано пресове гідрофіковане обладнання для експериментів зусиллям від 0,02 МН та 0,2 МН; створено лінійні індентори із загартованої сталі Р18 з кутом при вершині $60^\circ - 90^\circ$; визначено марки досліджуваних матеріалів: по 2 марки легуваних сталей і сірих чавунів та сплавів на основі міді, алюмінію і титану; розроблено процеси мікроструктурного аналізу та дослідження мікротвердості; вибрано методи та пристрої для вивчення нанесеного рельєфу [37].

Результатом розробки основних металів дослідження подано у наших публікаціях [54, 105, 111].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІКИ ЗАГЛИБЛЕННЯ ЛІНІЙНОГО ІНДЕНТОРА У ПОВЕРХНЮ ДЕТАЛІ

3.1 Класифікація регулярних рельєфів за методом отримання та призначенням

Наведений вище (розділ 1) аналітичний огляд наукових джерел дозволив створити наступну класифікацію відомих методів отримання регулярних рельєфів холодним пластичним деформуванням (ХПД) [20, 44, 48, 50, 53, 60] обробкою різанням [3, 5, 8, 11, 21, 79] та поєднанням цих процесів [7, 9, 24, 46, 53, 66, 13, 75] (рис. 3.1).

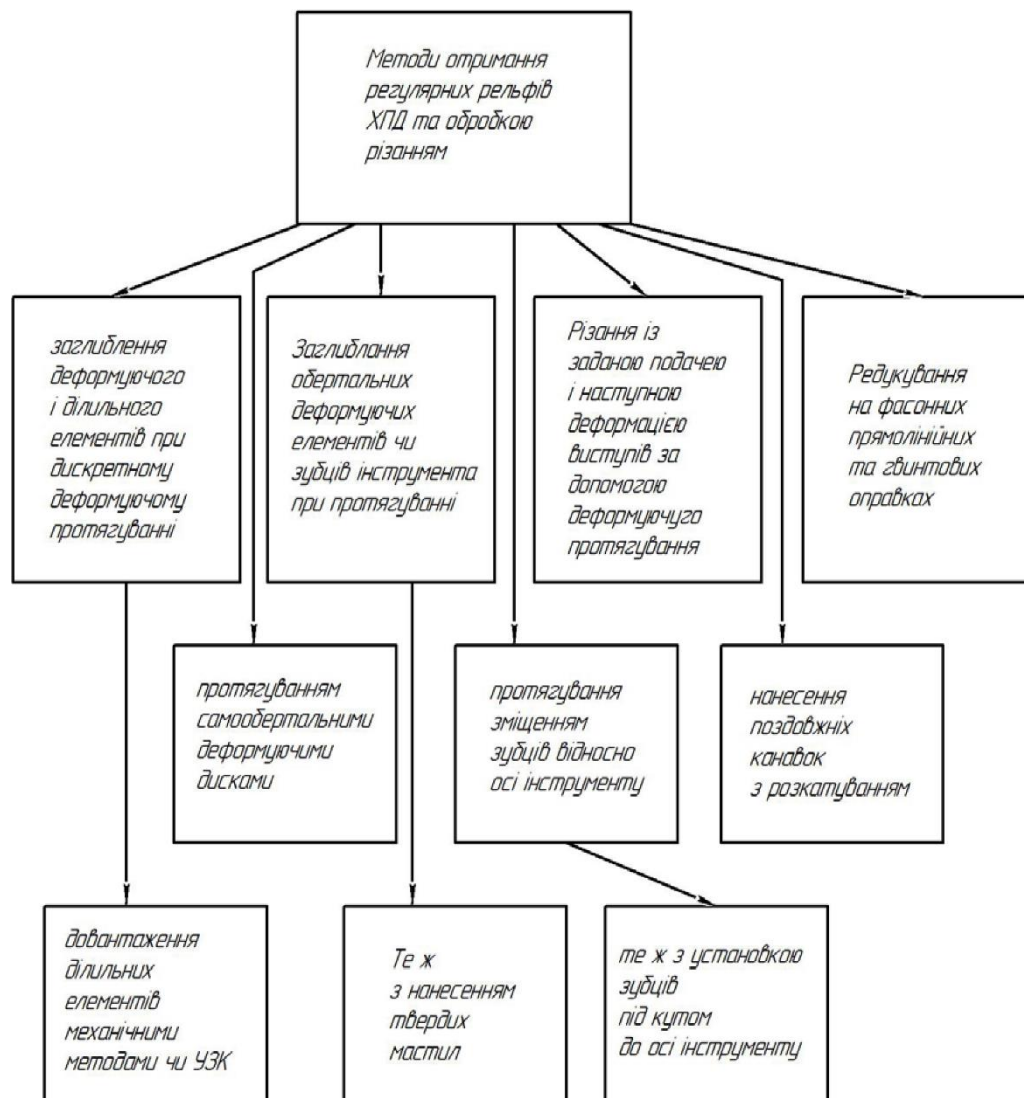


Рисунок 3.1 – Класифікація методів отримання регулярних рельєфів

Для першого етапу досліджень у експериментах користувались аналогіями з методами заглиблення дільного елемента при дискретному протягуванні і редукування на фасонній прямолінійній оправці. Ці методи є статичними, тому аналогії є виправданими.

Досліди показали, що при подвійному куті при вершині лінійного індентора $\alpha = 60^\circ$ і радіусі при вершині $\rho = 5$ мкм між силою заглиблення P у зразок із сталі 38ХН3МА і глибиною канавки h спостерігається залежність $h/P = 0,075$, а при силі $P = 0,02$ МН формується канавка глибиною $h = 2$ мм [56, 62, 73, 105].

На рис. 3.2 дано загальний вигляд такої канавки.

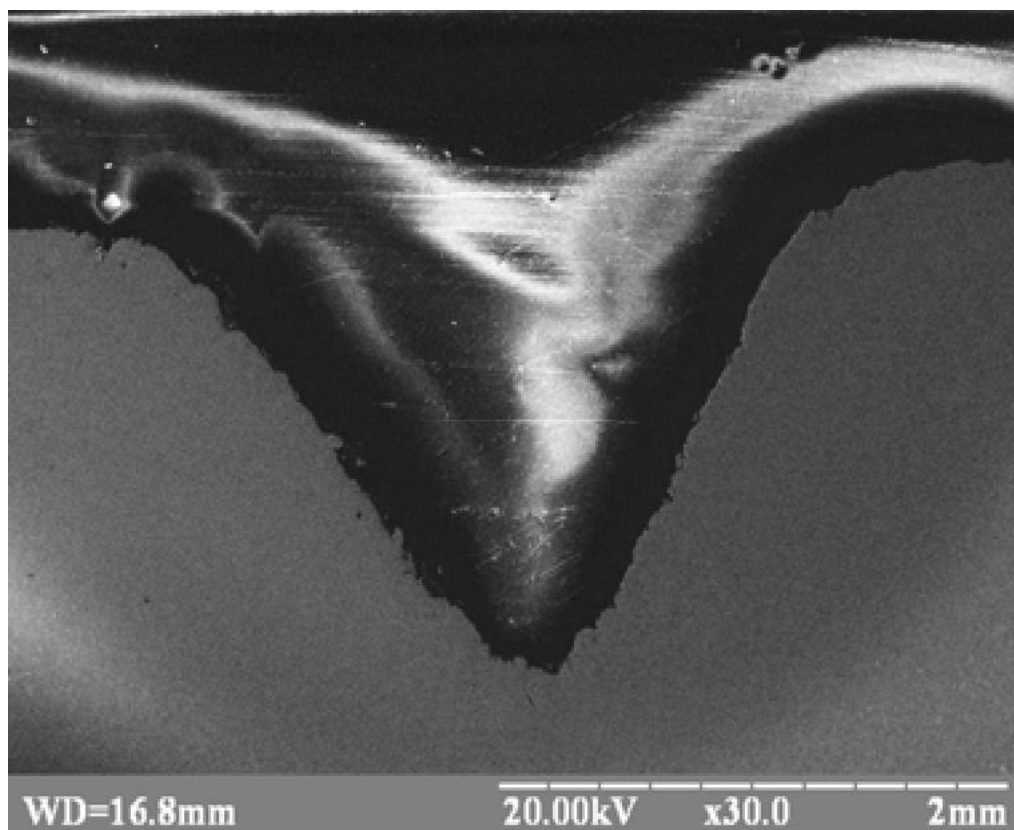


Рисунок 3.2 – Мікрофотографія канавки, отриманої заглибленням трикутного лінійного індентору

У процесі досліджень розроблено також класифікацію регулярних мікро- та макрорельєфів за призначенням (функціями). При цьому розглядались лише рельєфи, що створювались методами ХПД та обробкою різанням. Класифікація подана на рис. 3.3.

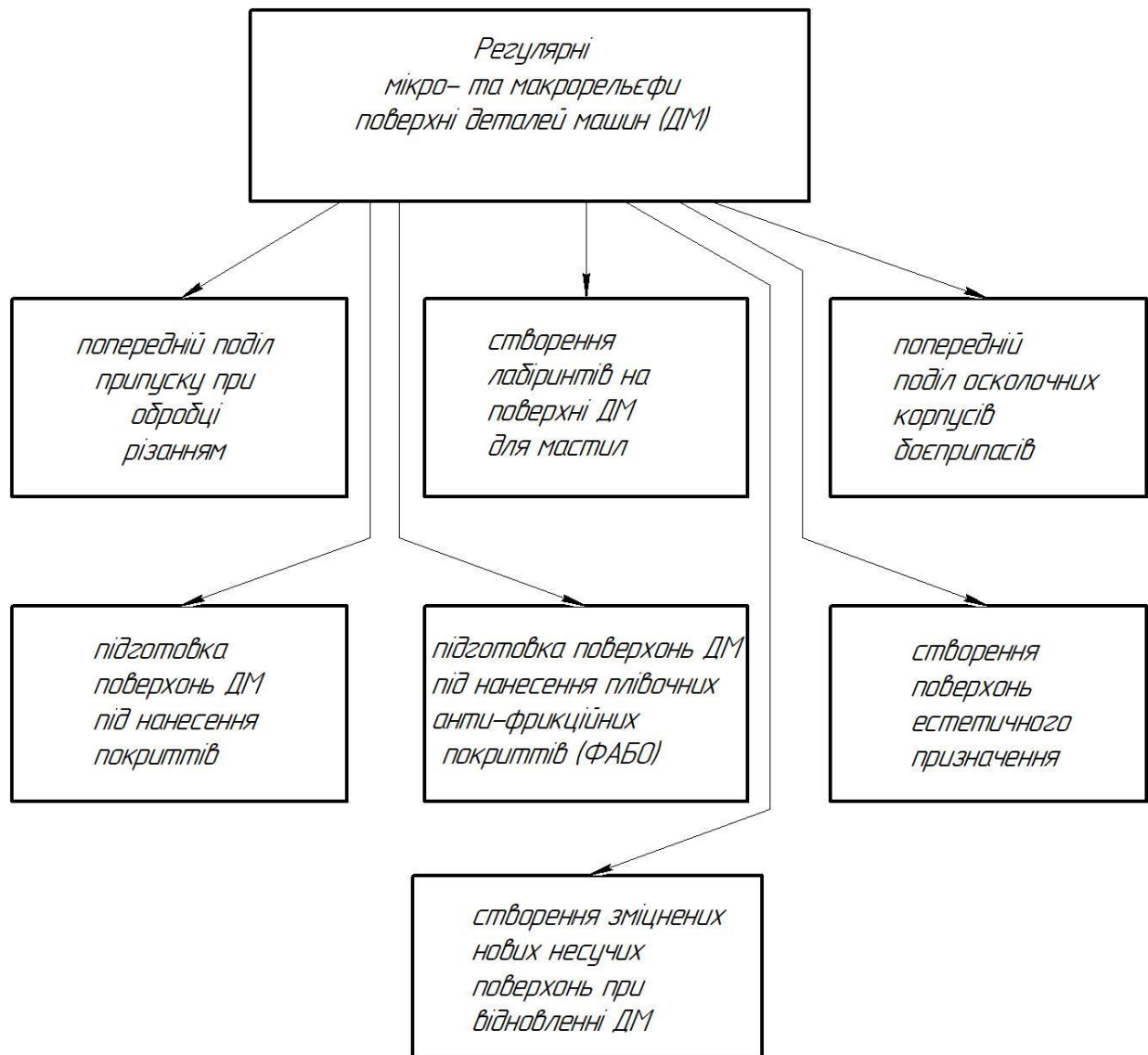


Рисунок 3.3 – Класифікація регулярних рельєфів за призначенням

Попередній поділ припуску при обробці різанням відіграє важливу роль у випадках виготовлення деталей із пластичних матеріалів (сталей у незагартованому та поліпшеному стані, міді, латуней, бронз, алюмінієвих та титанових деформівних сплавів тощо). Ці метали і сплави при обробці різанням дають міцну зливну стружку, а при отриманні якісних глибоких отворів пакуються у стружкових канавках інструменту, погіршуючи геометричні властивості поверхонь деталей та створюючи небезпеку для інструменту. Усе це складає проблеми при видаленні: стружки із зони різання при усіх методах лезової обробки. Тому нерідко сказане служить головною ознакою оброблюваності. Існує кілька методів поліпшення

утворення і видалення стружки: металургійні, за рахунок легування матеріалу відповідними елементами (наприклад, фосфором конструкційної сталі); термічним поліпшенням (наприклад, деяким підвищенням твердості); конструкційні – впливом на форму і розміри передньої поверхні інструменту чи його стружкової канавки; технологічні – використанням вібрацій тощо. Разом з тим, існуючі методи не є універсальними, про що свідчить їх розмаїття. Крім того ряд з них – складні і вартісні.

Тому попередній поділ припуску при обробці різанням рельєфами поверхні заготовки, особливо при отриманні точних глибоких отворів, є досить ефективним і універсальним. Нами рекомендується глибина трикутної канавки у межах 0,5–0,7 товщини припуску, кут при вершині лінійного індентора 60° – 90° , радіус при його вершині до 0,05 мм, а крок канавок таким, щоб забезпечити довжину стружки 50–200 мм. Останнє залежить від товщини припуску [26, 73].

Ще одним призначенням рельєфів поверхні деталей машин є створення лабіринтів для рідких, консистентних та твердих мастил. У першому випадку канавки повинні перетинатися, створюючи єдиний лабіринт, а рідке мастило повинно подаватись, як правило, при роботі пари деталей примусово або вільно. Прикладом такої пари може бути шийка колінчастого вала, ДВЗ або компресора і підшипник ковзання. Глибина канавки повинна бути такою, щоб забезпечувати рясне мащення, радіус округлення канавки рекомендується 0,1–0,5 мм, опора поверхні деталі повинна складати 95–98 %. Сказане стосується і консистентних мастил, а джерелом твердого мастила може слугувати елемент (своєрідна шайба) самого складного інструмента. Канавки лабіринту у цьому випадку можуть також слугувати макрооб'ємами для розміщення шламу, особливо при припрацюванні пари деталей [73, 111].

Надзвичайно перспективним є використання мікро– та макрорельєфів поверхні при підготовці останньої перед нанесенням покриттів. При цьому методи нанесення регулярних рельєфів слід поєднувати з іншими методами підготовки поверхні – хімічними, механічними та термічними. Саме у цьому

випадку досягається максимальний ефект підвищення міцності зчеплення покриття з основою.

Метод нанесення регулярних рельєфів у цьому випадку ефективно замінює досить складний метод нарізання рваної різьби. Тим більше, що пластичний метал основи біля впадини зміцнюється холодною пластичною деформацією. При використанні для цього методу регулярних рельєфів можна рекомендувати наступні рекомендації: кут при вершині індентора – 60° , радіус округлення цієї вершини 0,2–0,3 мм, крок канавки – у залежності від необхідної дотичної міцності покриття. Метод слід застосовувати при покриттях товщиною понад 0,5 мм, Попередня перед інтендуванням очистка поверхні металічними щітками, коли видаляється шар товщиною 0,5–1 мкм, і забезпечується шорсткість 2–5 мкм, дає найкращий ефект. Покриття слід наносити негайно після закінчення комбінованої підготовки поверхні, оскільки тривала витримка активованої поверхні з великою ефективною площею може супроводжуватися окисленням, що знизить міцність зчеплення покриття з основою [73].

Підготовка поверхонь деталей під нанесення плівочних антифрикційних покриттів (ФАБО) є різновидом попередньо розглянутого процесу. Проте, слід додати, що у цьому випадку з'являється можливість отримання поверхні з комбінованими властивостями. Адже об'єм канавки заповнюється пластичним матеріалом, наприклад латунню чи деформівним алюмінієм або подібним матеріалом, а зміцнений ХПД у районі периферії канавки матеріал основи стає несучим. Є також інші варіанти цього методу, про що мова йтиме нижче [111].

Для технології виготовлення корпусів (оболонок боєприпасів) можна рекомендувати попередній поділ цих корпусів системою канавок, про що уже йшлося у розділі 1 даного дослідження. Корпус боєприпасів це трубчасті деталі з діаметром отвору від 30 до 200 мм, на внутрішню поверхню яких наносяться макрорельєфи, котрі розділяють деталь на осколки різної величини при спрацюванні твердої вибухової речовини. Глибина канавок

трикутної форми залежить від товщини t стінки корпусу ; як правило, дорівнює $h=(0,3-0,5)t$. Кут розкриття канавки знаходиться у межах 60° , а радіус округлення біля основи повинен бути мінімальним, тобто $\rho=0,05-0,1$ мм. Переваги методу порівняно з відомим методами попереднього поділу осколочних корпусів полягають у тому, що метал у основі канавки сильно зміцнюється холодною пластичною деформацією. В результаті на розрив корпусу витрачається менше, ніж зазвичай, енергії, а її залишок, що є більшим, використовується на розліт осколків більш ефективно [73].

Для виготовлення корпусів діаметром понад 80мм використовується фасонна стрічка товщиною до 8мм, а для менших діаметрів – інструмент з самообертальними робочими елементами. Для отримання рельєфів у товстостінних деталях застосовується технологія фасонного волочіння. Про особливості цих процесів детально сказано у розділі 1 нашого дослідження.

Для створення покриттів естетичного призначення [4, 76] використовуються мікрорельєфи глибиною до 0,05мм з наступними тонкими декоративними покриттями потрібного кольору методами PVD [73].

Ще одну властивість рельєфів, отриманих методами ХПД, тобто заглибленням лінійного клинового індентора, слід використати при відновленні зношених деталей. При заглибленні індентора і утворенні канавки матеріал перетікає з канавки у бокові виступи, висота котрих може бути значною, перевищуючи висоту зношування. Оскільки матеріал виступів набуде значного холодного зміцнення, то ці виступи після певних технологічних операцій можуть стати новими опорними площадками на поверхні деталі. Ці площадки матимуть подвійну функцію. З одного боку вони дозволять повернути потрібний розмір деталі, а з іншого – складуть опір новому зношуванню, оскільки отримають підвищену твердість [58, 59].

3.2 Розрахунок дії сили заглиблення та геометричних параметрів інструменту на форму та розміри канавки рельєфу

Технологічний процес отримання мікро– та макрорельєфів за допомогою лінійного клинового індентора має в основі холодне пластичне деформування (ХПД) і є одним із кількох методів останнього. Проблеми цього процесу можуть бути вирішені за допомогою феноменологічної теорії деформування, що є по суті новим розділом прикладної теорії пластичності [31, 39].

Однією з технологічних прикладних задач цієї теорії є оцінка залишкової пластичності у площинах деталі. Це необхідно для з'ясування можливості реалізації наступної операції, що пов'язується із пластичним деформуванням, а також отримання виробів з необхідними фізико-механічними характеристиками.

Оскільки дослідження процесу заглиблення лінійного клинового індентора потребує врахування кількох факторів, для спрощення експериментів обираємо найважливіший з них – ресурс пластичності. Цей фактор накладає певні обмеження на процес заглиблення, що нами вивчається, наприклад, на отримання коліс внутрішнього зубчастого зачеплення за один прохід. Можливим також є при цьому вивчення впливу проміжної термообробки (відпалу чи нормалізації), на відновлення запасу пластичності у найбільш небезпечним з позицій руйнування областях деталі.

Існує кілька розрахунково-експериментальних методів визначення умов пластичності. На нашу думку, одним із найбільш ефективним з них є метод ліній ковзання [39]. Сутність методу полягає у наступному. На початкових стадіях пластичної деформації на поверхні зразка виникає сітка ліній, що перетинаються під прямим кутом і нахилених під кутом 45° до осі зразка. Ці лінії, що прийнято називали лініями ковзання, є слідами перетину поверхонь зразка площинами максимальних дотичних напружень. Лінії ковзання мають таку властивість, що дозволяє використати їх для

знаходження напружень об'єму тіла при плоскій та асиметричній деформації. Знаючи напруження у будь-якій точці тіла, можна визначити напруження на контактній поверхні, а також повне зусилля деформації. В реальних умовах після отримання епюри нормальних напружень слід підібрати найбільш придатну алгебраїчну залежність, що описує цю епюру.

На рис. 3.4, як приклад, наведено поле ліній ковзань при заглибленні гострого клина у полосу кінцевої товщини.

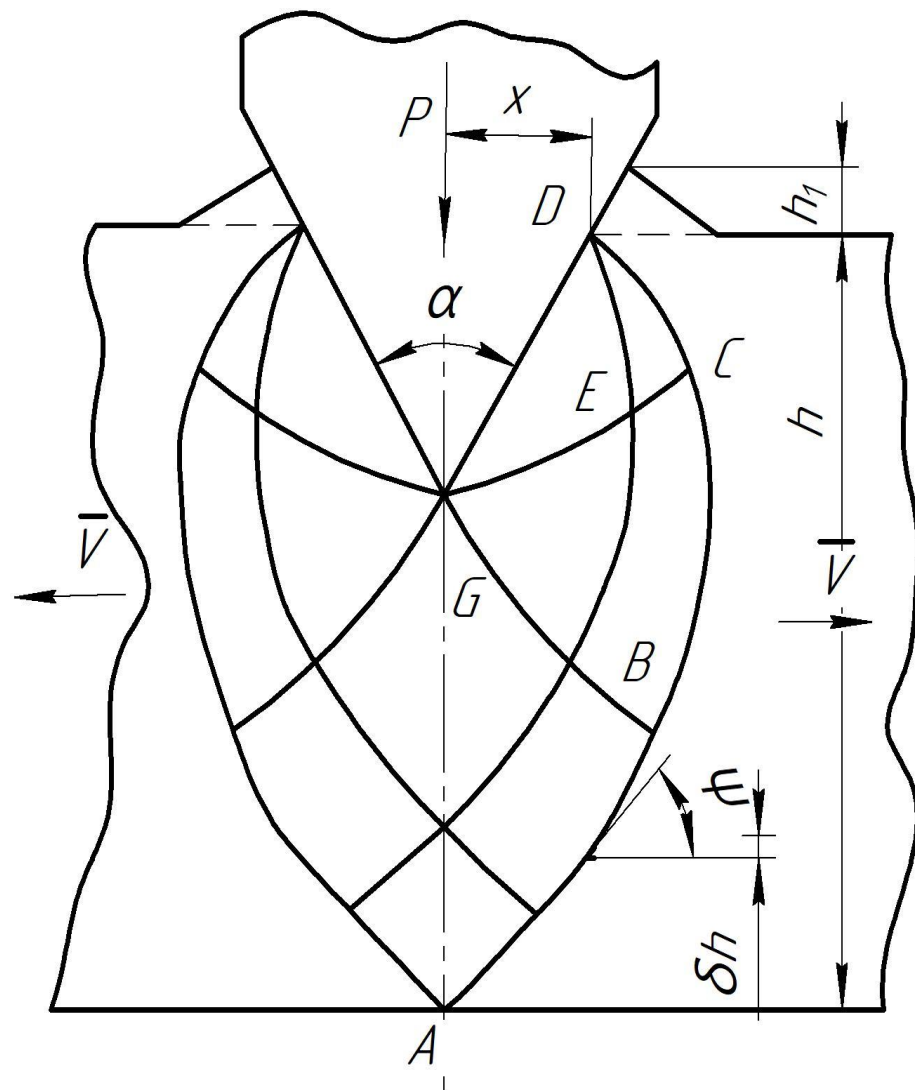


Рисунок 3.4 – Поле ліній ковзань при заглибленні гострого клина у полосу кінцевої товщини

Спостерігається у цьому випадку збільшення довжини зразка у напрямку, що перпендикулярний поздовжній площині симетрії клинового

інструменту. Позначення на рисунку: $\vec{V}$ —вектори швидкості у напрямку збільшення довжини зразка; P —сила заглиблення; α —кут клина інструменту ; h — товщина полоси (зразка); h_1 — висота виступу після заглиблення інструменту.

Спільна сила на границі ABCD дорівнює нулю. Далі визначається тиск у точці А і проводиться розрахунок з використанням рівняння Генки.

Локальною пластичною деформацією (ЛПД) називають деформацію, при якій пластичною деформацією охоплена лише частина поперечного перерізу деталі (заготовки). ЛПД виникає при заглибленні інструменту у заготовку на початковій стадії деформування, зокрема при вимірюванні твердості, у прокатуванні, при виконанні розділювальних операцій, а також при реалізації інших технологічних процесів обробки металів тиском. Таким чином, і при заглибленні лінійного індентора можна з упевненістю говорити про локальну пластичну деформацію.

Задачі стосовно вдавлювання клину у напів безкінечну поверхню з різними кутами нахилу були розглянуті у роботі Р.Хілла [94] і розвинуті В.В. Соколовським [84]. Останній отримував з позиції ліній ковзання кінематику процесу, однак, зупинився лише на постановочному характері проблеми.

Тому нами розглянута нижче побудова поля ліній ковзання і відповідних годографів швидкостей для реального процесу заглиблення лінійного індентору з оцінюванням факторів, що впливають на пластичну течію металу.

Побудова поля ліній ковзання (рис. 3.5 а) слід починати у області 1–2–3–4 з вибору кута тертя β :

$$\tau = \sigma_{zc} \cos 2\beta, \quad (3.1)$$

τ — дотичне напруження текучості;

σ_{zc} — межа текучості при зсуві.

Кут φ визначається з умови, що у області 1–2–5 лінія 1–5 є вільною поверхнею, що забезпечує рівність зсунутих об'ємів ($F_A = F_{B/2}$).

При побудові годографа швидкостей (рис. 3.5 б) і полюса O у площині xy спочатку відкладаємо вектор швидкості інструменту (y, y_1) . Швидкість точки 2 у пластичній області визначаємо з умови, що ця точка рухається дотичною до поверхні клинового індентора (лінія 1–2, рис. 3.5а) до лінії розриву швидкостей і лінії 2–3–4–5. Провівши з полюса годографа (точка O) лінію, що паралельна до лінії ковзання у точці 2, а із точки кінця вектора швидкості лінійного індентора лінію, що паралельна поверхні останнього, знайдемо на перетині положення точку 3 на площині годографа. Вектор 01 , 3 визначить швидкість точки 3 у пластичній області і величину розрива швидкостей уздовж жорсткопластичної границі 2–3–4–5. Вона відіб'ється на площині годографа ліній кола з центром у полюсі годографа (1,31,4).

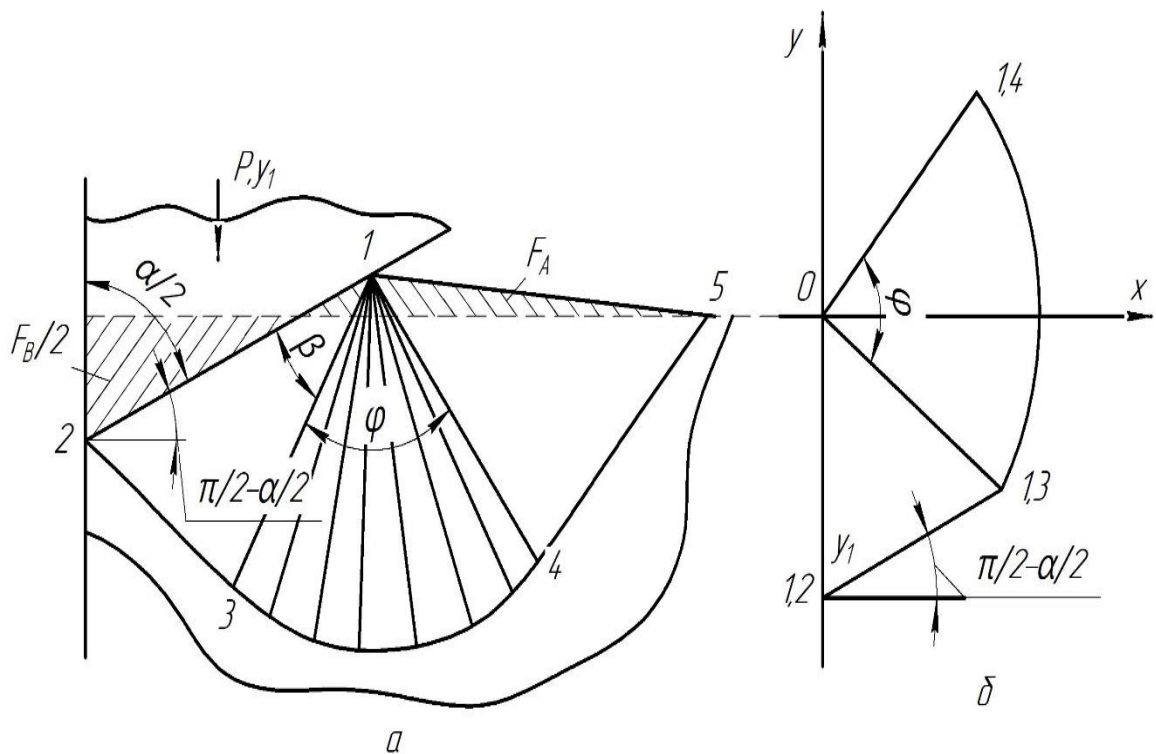


Рисунок 3.5 – Поле ліній ковзання (а) і годограф швидкостей (б) при заглибленні лінійного клинового індентора з шорсткою поверхнею ($\tau \neq 0$)

Змінюючи кут тертя β можна будувати лінії ковзання, коли $\tau \neq 0$, що важливо для реальних технологічних процесів.

У випадках, коли радіус при вершині лінійного індентора є значним, наприклад тоді, коли рельєфи мають служити лабіринтами для мастила, поле

ліній ковзання і годографа швидкостей виглядатиме так, як це показано на рис. 3.6.

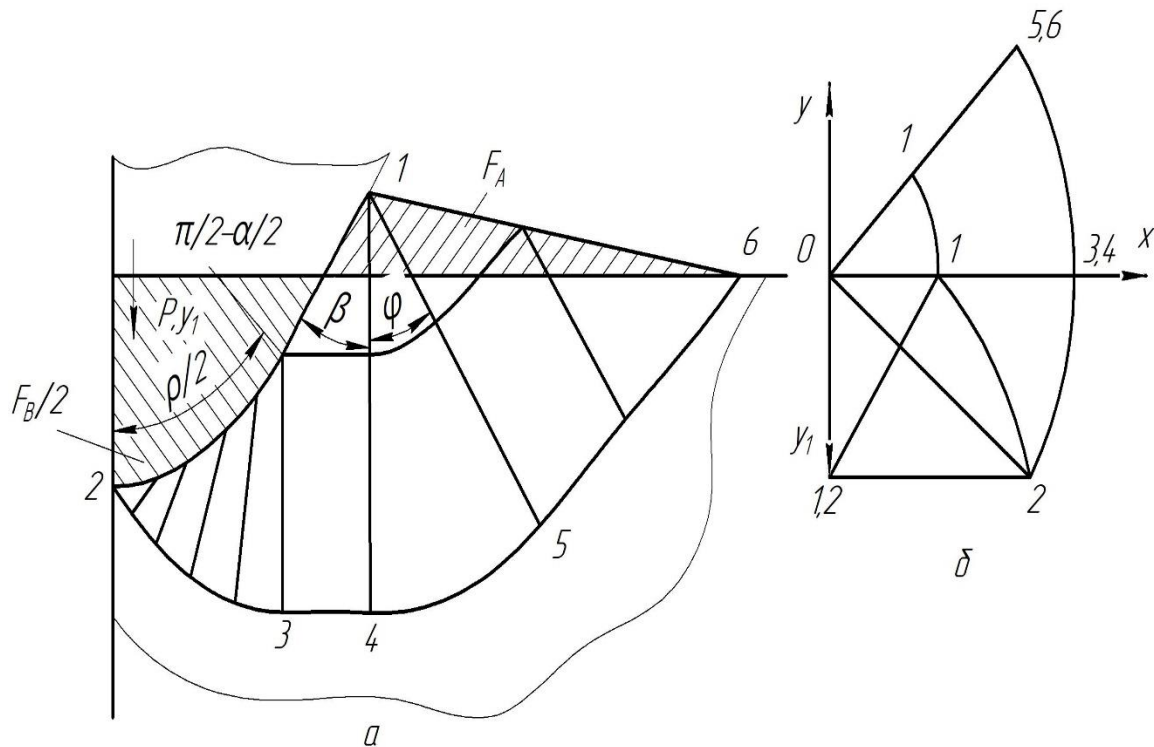


Рисунок 3.6 – Поле ліній ковзання (а) і годограф швидкостей (б) при заглибленні лінійного клинового індентора з радіусом при вершині ρ і шорсткою поверхнею ($\tau \neq 0$)

Слід відзначити, що напруження σ_N при вдавлюванні у поверхню клинового лінійного індентора близькі до показників твердості за Віккерсом та Брінелем, тобто:

$$\sigma_N n_E = HV, \quad (3.2)$$

$$\sigma_N n_E = HV + HB, \quad (3.3)$$

де n_E – коефіцієнт зміцнення металу у осередку деформації ($n_E > 1$) при ЛПД.

При цьому залежність (3.2) стосується випадку, коли радіусом при вершині індентора може знехтувати (рис. 3.5) а залежність (3.3) діє, коли цей радіус є значним (рис. 3.6).

Розглянуті вище підходи стосуються побудови кінематично можливих полів ліній ковзання для двох основних випадків заглиблення лінійного

індентора. Однак, ці підходи вимагають уточнення, викликаного можливим зміцненням матеріалу деталі чи заготовки.

На рис. 3.7 показана схема дії сили P заглиблення лінійного індентора у металевий зразок. При розробці цієї схеми за основу була прийнята схема проф. Давиденкова Н.Н. (Некоторые проблемы механики материалов. Ленинградское газетно-журнальное изд-во, Ленинград, 1943) [82]. На рис. 3.7: h – глибина заглиблення; α – кут при вершині індентора; ρ – радіус округлення вершини індентора; h_1 – висота виступів матеріалу після заглиблення індентора; A – площа цих виступів; B – площа поперечного перерізу утвореної канавки.

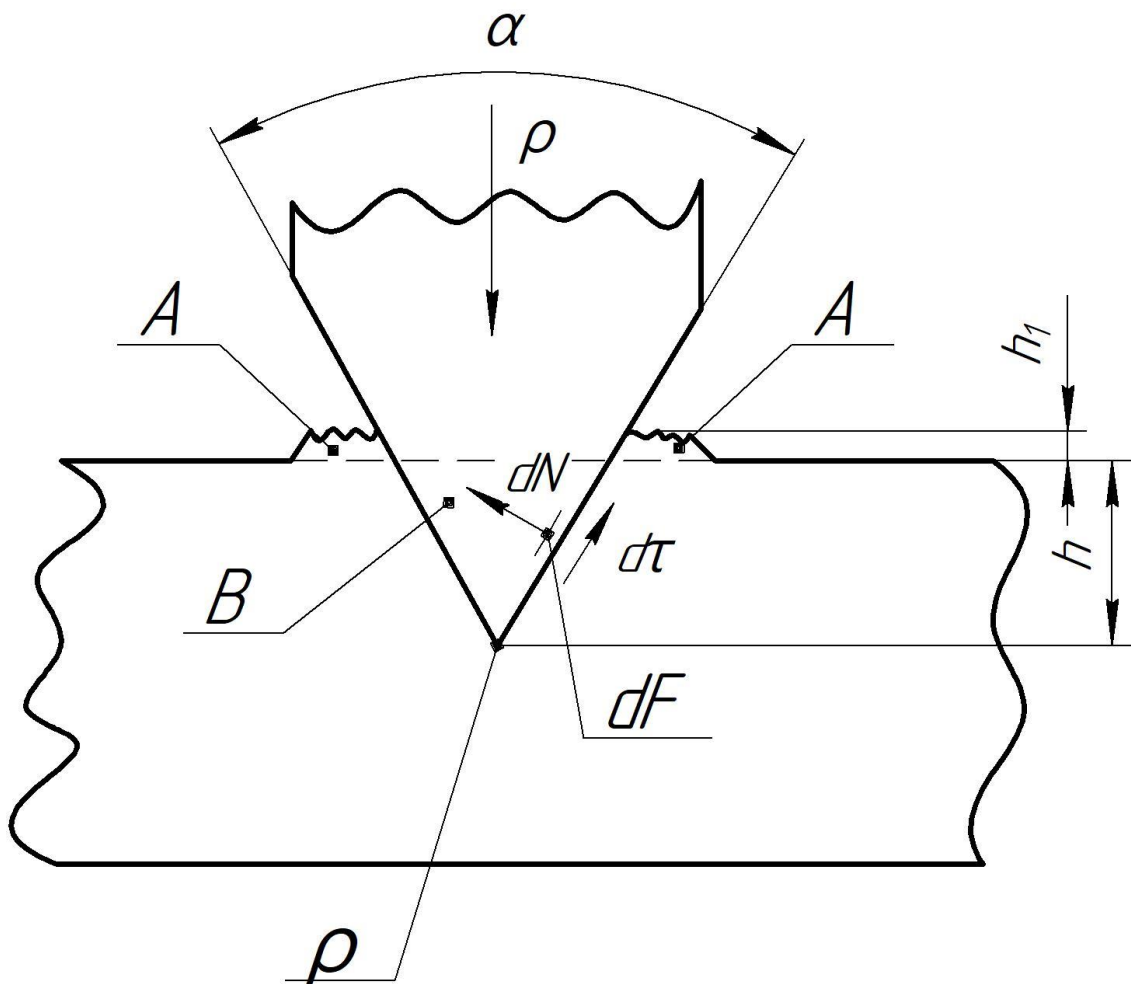


Рисунок 3.7 – Схема дії сили заглиблення на елементарну площадку твірної індентора

Проекція елементарної нормальної сили dN на напрямок дії зовнішньої сили P дорівнюватиме:

$$dN = \sigma_N \sin \frac{\alpha}{2} dF, \quad (3.4)$$

де σ_N – контактне напруження; dF – площа елементарної площадки.

Проекція дотичного напруження $d\tau$:

$$d\tau = \eta \sigma_N \cos \frac{\alpha}{2} dF, \quad (3.5)$$

де η – коефіцієнт тертя (за законом Амонтона – Кулона).

Таким чином:

$$P = \int_0^F (\sigma_N \sin \frac{\alpha}{2} + \eta \sigma_N \cos \frac{\alpha}{2}) dF, \quad (3.6)$$

або після інтегрування:

$$P = \pi h^2 \sigma_N \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \eta \right), \quad (3.7)$$

чи:

$$h = \sqrt{\frac{P}{\pi \sigma_N \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \eta \right)}}. \quad (3.8)$$

Для визначення глибини h канавки за залежністю (3.8) слід знати значення середнього коефіцієнта тертя η та контактного напруження σ_N . Приймаємо середнє значення для заглиблення лінійного індентора у всі матеріали $\eta=0,1-0,3$. Контактне напруження σ_N можна визначити із залежності (3.7), знаючи силу P і глибину канавки h .

Що стосується виступів A металу, які утворюються при заглибленні лінійного індентора, то з великою точністю їх площа буде рівнятися поперечній площі канавки, тобто:

$$A \approx 0,5B. \quad (3.9)$$

При цьому допускалось, що величина контактного напруження постійна на усіх ділянках площі контакту аж до рівня початкової поверхні заглиблення. Для визначення глибини заглиблення h слід знати значення

коефіцієнту тертя η та контактного напруження σ_N . На основі відомих джерел по визначенню η приймемо найвище значення коефіцієнта тертя, тобто $\eta=0,3$. При заглибленні полірованого загартованого сталюого індентора у досліджувані нами матеріали подача рідкого мастила у зону тертя практично не впливає на значення η .

Вплив тертя на заглиблення можна визначити, використавши залежність (3.7). Позначивши заглиблення конуса з урахуванням тертя h_1 , а без нього урахування h_0 , і відповідно бокові поверхні F_1 і F_0 , отримаємо:

$$\begin{aligned} F_1 &= \pi h_1^2 \frac{tg/2}{\cos \alpha/2} ; \\ F_0 &= \pi h_0^2 \frac{tg/2}{\cos \alpha/2} . \end{aligned} \quad (3.10)$$

Тоді з урахуванням тертя отримаємо:

$$\begin{aligned} P &= \int_F^0 \sigma_N \sin \alpha/2 + \eta \sigma_N \cos \alpha/2 \, dF_1 = \sigma_N \left(\sin \frac{\alpha}{2} + \eta \cos \alpha/2 \right) F_1 = \\ &= \sigma_N \left(\sin \frac{\alpha}{2} + \eta \cos \alpha/2 \right) \frac{\pi h_1^2 tg \alpha/2}{\cos \alpha/2} , \end{aligned} \quad (3.11)$$

і без тертя:

$$P = \sigma_N \sin \alpha/2 \frac{\pi h_0^2 tg \alpha/2}{\cos \alpha/2} . \quad (3.12)$$

У цьому випадку $h_0/h_1 = \sqrt{1 + \eta tg \alpha/2}$. При коефіцієнті тертя $\eta=0.3$ значення h_0/h_1 зміниться для різних кутів при вершині індентора наступним чином: при $\alpha=60^\circ$ — $h_0/h_1 = 1.23$; при $\alpha=70^\circ$ — $h_0/h_1 = 1,20$; при $\alpha=80^\circ$ — $h_0/h_1 = 1,17$; при $\alpha=90^\circ$ — $h_0/h_1 = 1,14$. Отже, під впливом тертя ($\eta=0.3$) заглиблення зменшиться для індентора з кутом при вершині $\alpha=60^\circ$ на 23%, а при $\alpha=90^\circ$ — на 14%. Таким чином, вплив тертя на величину заглиблення h є суттєвим, але не вирішальним.

Величину контактного напруження σ_N можна визначити за залежністю (3.7). Розрахунки показали, що ця величина практично не залежить від сили заглиблення P для усіх досліджуваних метеріалів.

Тут доцільно відзначити, що існує безпосередній зв'язок між дотичними напруженнями τ і твердістю матеріалу HB, що визначається залежностями проф. Розенберга О.М. [75]:

$$\tau = 0,185HB \quad (3.13)$$

і проф. Сагарди – між контактними напруженнями і твердістю матеріалу HV [82].

$$\sigma_N = 1,23HV. \quad (3.14)$$

Обидві ці залежності придатні для наших подальших досліджень.

3.3 Експериментальне дослідження процесу заглиблення лінійного індентора

Теоретичні положення, що нами викладено вище, перевірялись експериментально. Для цього використовувались два преси зусиллями 0,02кН та 0,2 кН, лінійні індентори з різними значеннями кутів α розкриття і радіусом округлення ρ вершини і вся номенклатура зразків з досліджуваних матеріалів. Швидкість заглиблення лінійних інденторів у всіх випадках була однакою $v=0,03\text{м/с}$. Експерименти проводились з використанням МОР на основі ріпакової олії. У роботах [47, 52, 62, 65, 67] доведено, що ця МОР є найбільш ефективною з позиції екології та мастильних властивостей. Завдяки останній характеристиці у дослідях було досягнуто приблизно однакові умови тертя та убезпечено процес заглиблення без виникнення місточків адгезії [95]. Для визначення значень глибини канавки та інших факторів процесу використовувалась уся гама стандартних та удосконалених нами приладів та пристроїв, описаних вище у розділі 2 дослідження.

Із рис. 3.8 видно, що глибина h канавки сильно залежить від кута α розкриття індентора при інших незмінних параметрах : радіуса округлення вершини індентора, середовища та швидкості заглиблення. Зміна кута

розкриття індентора від $\alpha=90^\circ$ до $\alpha=60^\circ$ при одній і тій же силі заглиблення дозволяє практично збільшити удвічі глибину канавки.

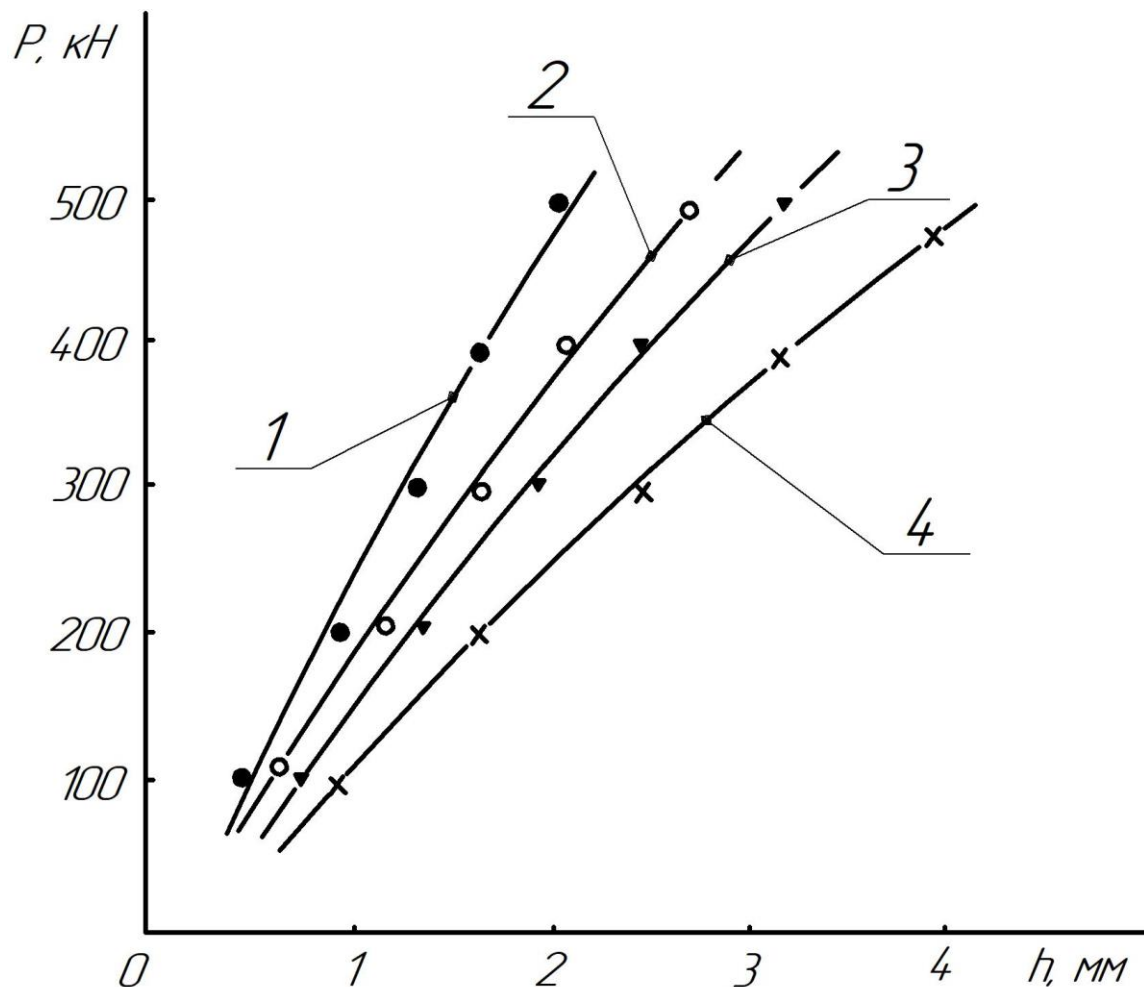


Рисунок 3.8 – Залежність глибини h канавки від сили заглиблення P лінійного індентора при значеннях кута α розкриття індентора (зразок – сталь 38ХНЗМА; радіус округлення вершини індентора $\rho=0,02$ мм; середовище –МОР на основі ріпакової олії; швидкість заглиблення – $v=0,03$ м/с.):

$$1-\alpha=90^\circ; 2-\alpha=80^\circ; 3-\alpha=70^\circ; 4-\alpha=60^\circ.$$

Твердість HV та відносне видовження δ досліджуваних матеріалів також сильно впливають на глибину h канавки, при інших незмінних умовах проведення експерименту. Установлено (рис. 3.9), що зміна вказаних основних властивостей матеріалу приводить до суттєвого збільшення глибини h канавки. Так, при силі заглиблення $P=300$ кН у латунь Л62

досягається глибина канавки $h=5$ мм. При цій же силі заглиблення індентора у зразок з титанового сплаву ВТ6 сягає лише $h=1,85$ мм.

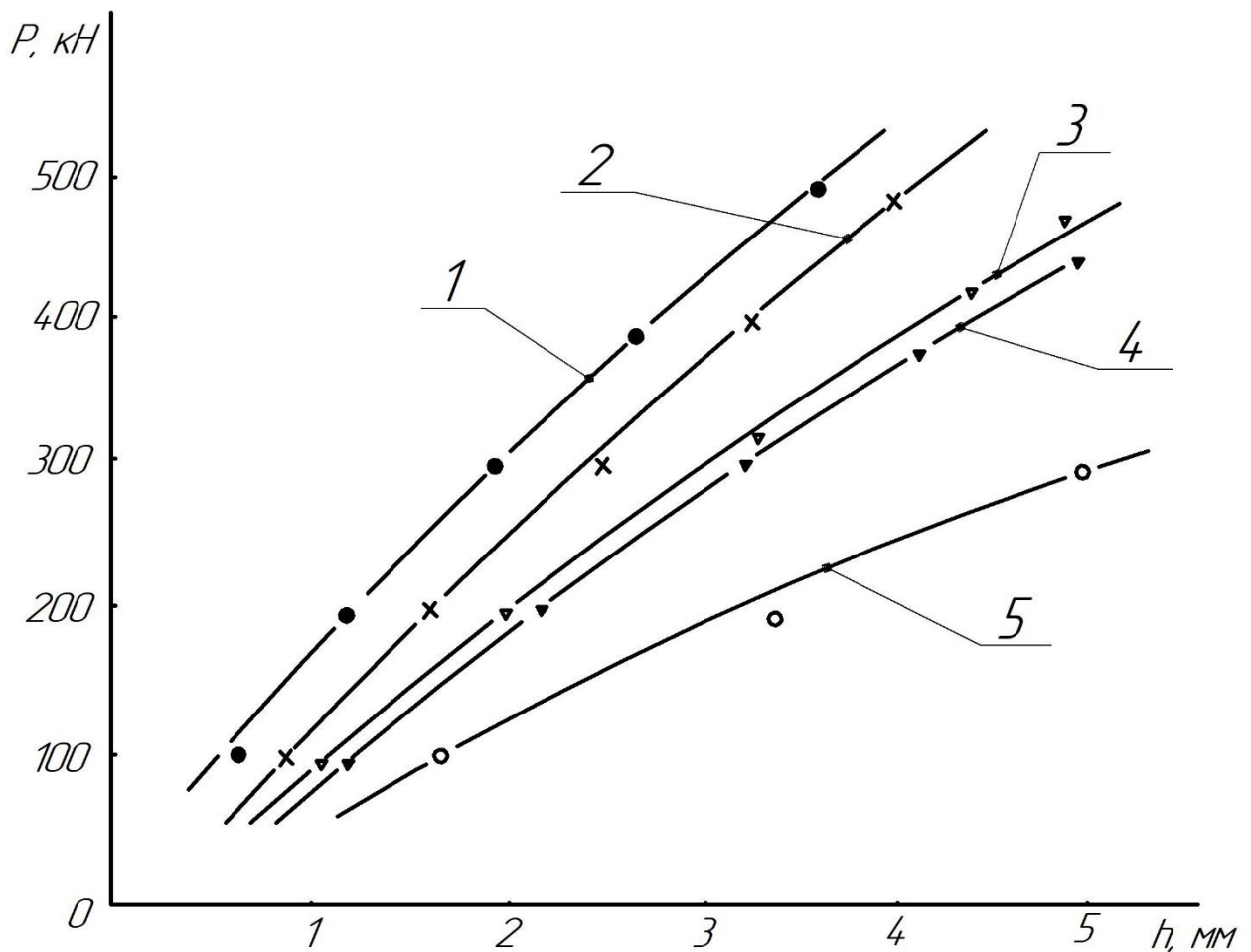


Рисунок 3.9 – Залежність глибини h канавки від сили заглиблення P лінійного індентора у зразки з (кут розкриття індентора $\alpha = 60^\circ$; радіус округлення вершини індентора $\rho = 0,02$ мм; середовище – МОР на основі ріпакової олії; швидкість заглиблення – $v = 0,03$ м/с.):

1– титанового сплаву ВТ6 ; 2 – сталі 38ХНЗМА ; 3 – сталі 12Х18Н10Т; 4 – чавуну КЧ33–8 ; 5 – латуні Л62.

Вище відзначалось, що радіус округлення ρ вершини індентора, а значить, і аналогічний геометричний параметр профілю канавки мікро– та макрорельєфу визначає службове призначення рельєфу. Тому в експериментах досліджувалась зміна ρ у діапазоні $\rho = 0,005 - 0,32$ мм з позицій впливу на потрібну силу заглиблення $P.B$ становлено , що збільшення величини ρ у дослідженому діапазоні потребує приблизно у два рази більшої

сили заглиблення. Це стосується зразків із сталі 38ХНЗМА (рис. 3.10). Однак, сказане також стосується і інших матеріалів, результати дослідження за участю яких тут не приводяться.

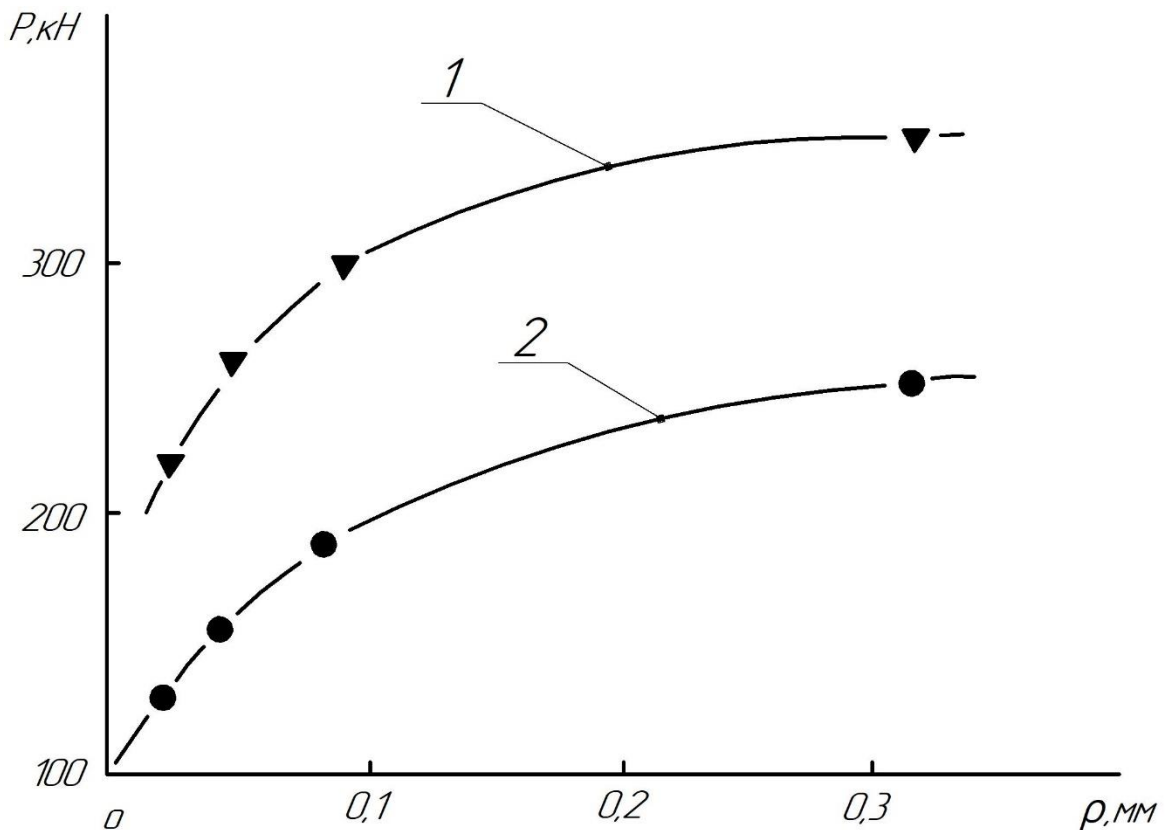


Рисунок 3.10 – Залежність сили заглиблення P лінійного індентора від радіусу округлення ρ вершини індентора при значеннях кута α розкриття індентора (зразок – сталь 38ХНЗМА. Середовище – МОР на основі ріпакової олії; швидкість заглиблення – $v = 0,03$ м/с.):
 $1 - \alpha = 90^\circ$; $2 - \alpha = 60^\circ$.

Великі радіуси округлення ρ індентора застосовуються у тих випадках, коли макрорельєфи служать лабіринтами для мастил у парах тертя. У цих випадках деталі з такими лабіринтами повинні працювати тривалий час і макрорельєф не повинен бути концентратом напружень. Тому нами було проведена серія досліджень по впливу колоподібного індентора на силу заглиблення P при великих радіусах закруглення r ($r = \rho$). Результати цих досліджень подана на рис. 3.11. Установлено, що отримання подібних характеристик рельєфу вимагає прикладення великих сил заглиблення P . Так,

для отримання канавки радіусом 0,2 мм у зразку зі сталі 38ХНЗМА потрібна сила заглиблення P порядку 1000 кН.

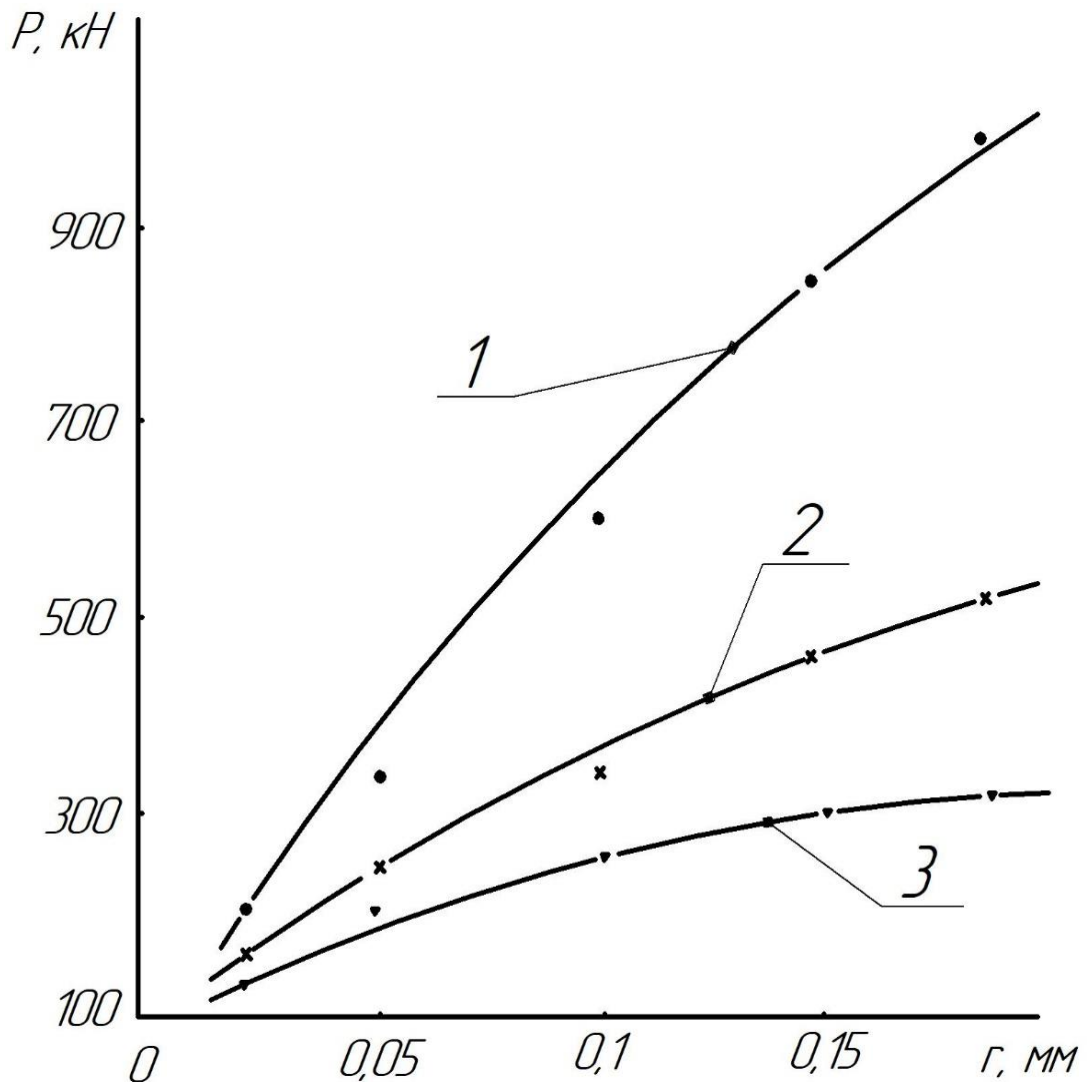


Рисунок 3.11 – Залежність сили заглиблення P колоподібного індентора від радіусу закруглення r індентора для зразків зі (середовище – МОР на основі ріпакової олії; швидкість заглиблення – $v = 0,03$ м/с.):

1–сталі 38ХНЗМА; 2–чавуну СЧ20; 3–бронзи Бр ОЦС 5–5–5.

У ряді випадків, коли канавки макропрофілю служать для технології отримання складних профілів поверхонь деталей (зубчасті колеса внутрішнього зачеплення, шлиці, трапецевидна різьба тощо) лінійні індентори повинні мати профіль майбутніх канавок. Експерименти показали, що у таких випадках потрібна більша на 20–40 % сила заглиблення P трапецевидного індентора, ніж трикутного (рис. 3.12)

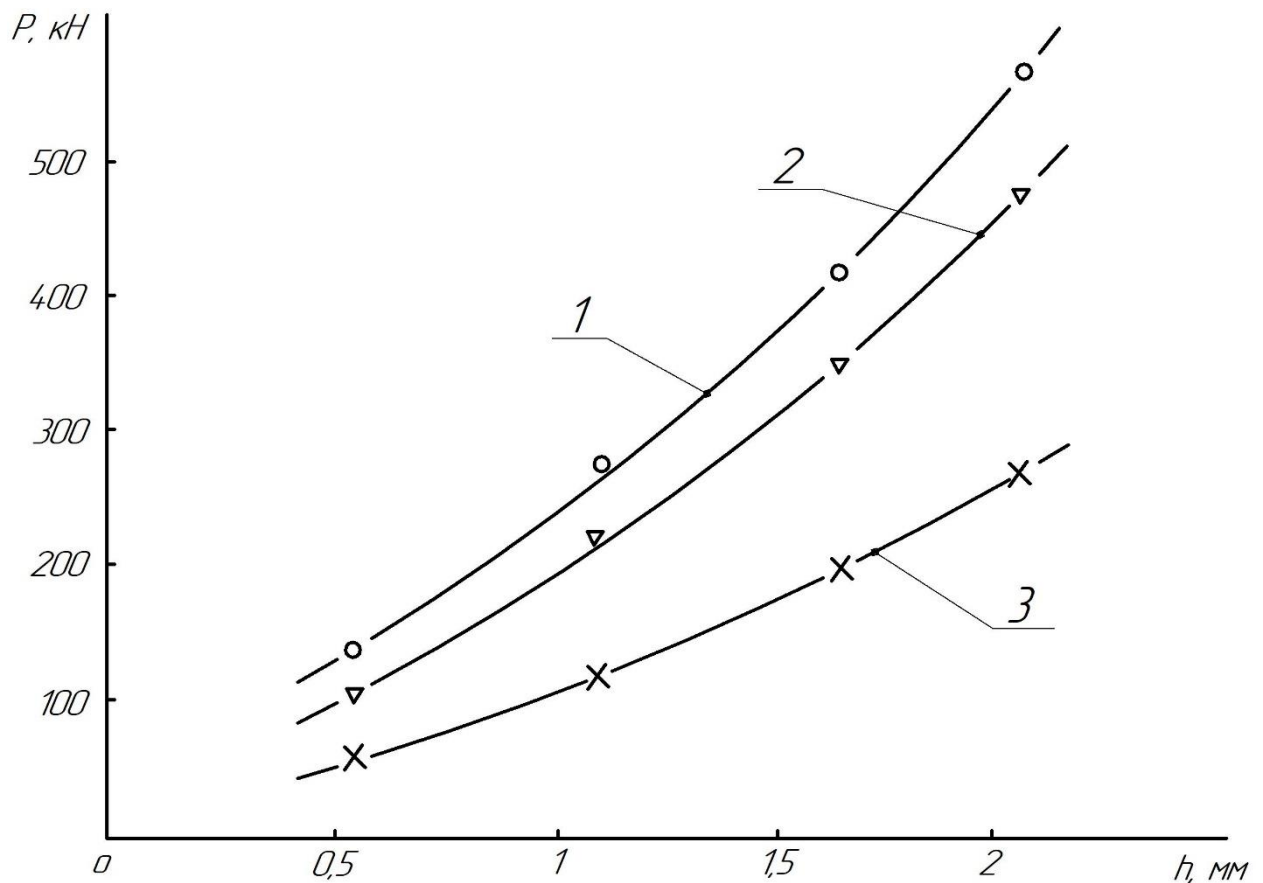


Рисунок 3.12 – Залежність силу заглиблення P трапецевидного індентора від глибини h канавки для зразків зі (кут розкриття індентора $\alpha=70^\circ$; Середовище – МОР на основі ріпакової олії; швидкість заглиблення – $v = 0,03$ м/с.):

1–титанового сплаву ВТ6; 2– сталі 38ХНЗМА; 3– чавуну КЧ 33–8.

Оскільки у процесах відновлення зношених деталей широко застосовується наплавлення, у роботі досліджувалась зміна глибини канавки при зварюванні плавленням. Відомо, що вказаний процес є основною наплавлення. Для дослідження використовувались зразки із дуралюмініу Д16 (2117), які мали у початковому стані твердість $HV\ 300$ МПа і відносне видовження $\delta=11\%$. Зварювання плавленням виконувалось за схемою Бенардоса М.М., тобто неплавким вольфрамовим електродом з присадкою оксиду лантану (1,3%). Присаджувальним плавким матеріалом служив дрід із дуралюмініу Д16, а середовищем для зварювання – суміш аргону (90%) і водню (10%).

На рис. 3.13 подані результати цього експерименту. Початковий матеріал (основа) має глибину h канавки 2мм, яка задавалась. Зона термічного впливу (ЗТВ) завдяки укрупненню зерен мікроструктури характеризується глибиною канавки $h=2,4$ мм, а зона сплавлення $h=1,83$ мм. По центру зварювального шва глибина канавки є найменшою ($h=1,75$ мм), що свідчить про найбільшу твердість металу. Після зварювання не використовувалась нормалізація або відпал. На рис. 3.13 подано шліф одного із зразків без збільшення. На шліфі позначено: 1 – нетравлена зона; 2 – зона основи; 3 – ЗТВ; 4 – зона сплавлення; 5 – зона шва.

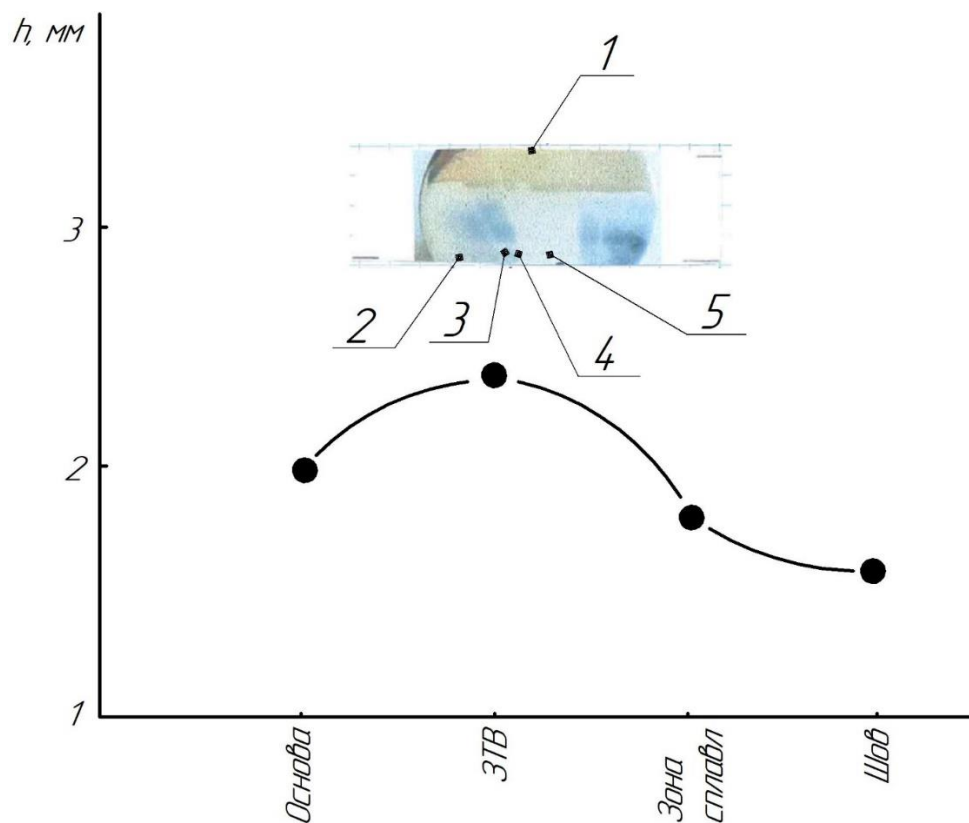
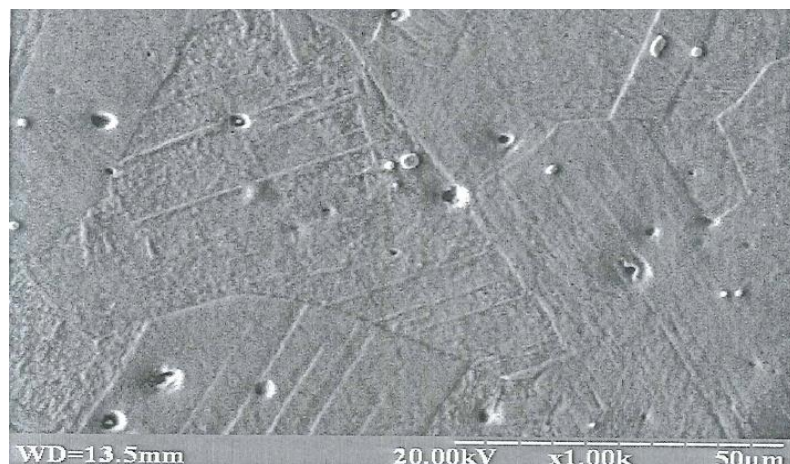


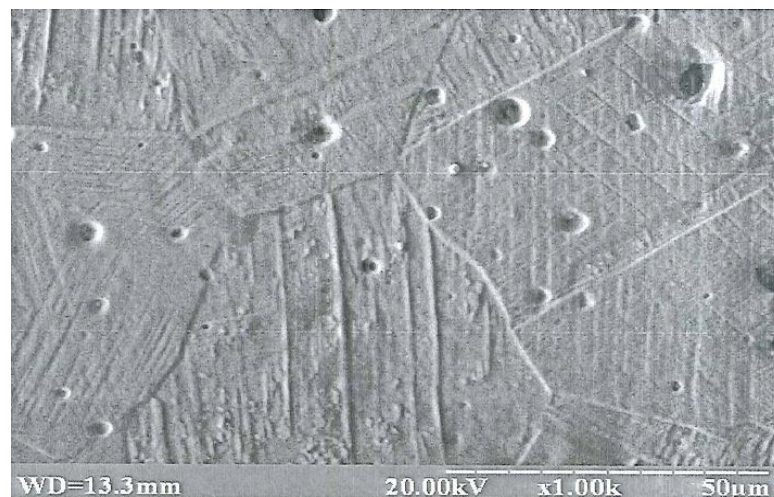
Рисунок 3.13 – Залежність глибини h канавки заглиблення лінійного індентора з кутом α розкриття ($\alpha=60^\circ$) і радіусом округлення вершини $\rho=0,02$ мм від місця розміщення при наплавленні зразка із дюралюміна Д16 (2117) за схемою Бенардоса М.М.

У середовищі суміші аргону Ar і водню H_2 (Ar=90% ; $H_2=10\%$). Швидкість заглиблення – $v = 0,03$ м/с. Над графіком рис. 3.13 – шліф зразка.

Для визначення густини дислокацій у матеріалі зразків після заглиблення інденторів використовувався електронний мікроскоп РЕМ–106И [1]. На рис. 3.14 а подано розподіл дислокацій в районі вершини канавки ($h = 2\text{мм}$; сталь 12Х18Н10Т), а на рис. 3.14, б – те ж на відстані 0,5 мм від вершини . Аналіз картини дислокацій до заглиблення індентора і після заглиблення у цьому випадку показує збільшення їх густини з 10^4 см^{-2} до $10^5 - 10^6\text{ см}^{-2}$, тобто на один – два порядки. Це полегшує поділ на окремі частини (осколки) трубчастих деталей, що охоплюють вибухові речовини боєприпасів [73].



а



б

Рисунок 3.14 – Розподіл картини дислокацій після заглиблення індентора біля вершини канавки (а) та на відстані 0,5 мм від вершини (б); сталь 12Х18Н10Т, $h = 2\text{мм}$.

На рис. 3.15 подано приклади наших експериментів та отриманню канавок при заглибленні індентора [61].



а



б

Рисунок 3.15 – Поперечний переріз канавок, які отримано у зразках зі сталі 38ХНЗМА (а) і бронзи ОЦС 5–5–5 (б) при заглибленні лінійного індентора:

$a - h = 3 \text{ мм}; \rho = 0,02 \text{ мм}; \alpha = 70^\circ$; $б - h = 1 \text{ мм}; \rho = 0,5 \text{ мм}; \alpha = 90^\circ$.

Середовище – МОР на основі ріпакової олії; швидкість заглиблення – $v = 0,03 \text{ м/с}$.

На рис. 3.16 подана мікрофотографія досліджуваного зразка біля вершини канавки [59]. Контактні напруження (тиск) та дотичні напруження можна визначити по залежності (3.13) і (3.14), маючи отримані значення мікротвердості H_μ .

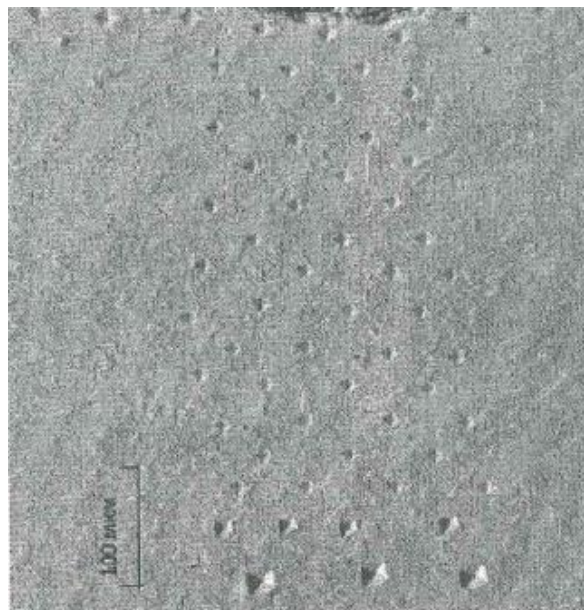


Рисунок 3.16 – Мікрофотографія (x100) зразка зі сталі 38ХНЗМА в області вершини канавки, дослідженого методом мікротвердості на твердомірі ПМТ–

На рис. 3.16 показані канавки після заглиблення лінійного індентора:
 $h=2$ мм; $\alpha=60^\circ$; $\rho=0,02$ мм.

3.4 Взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентування

У процесі індентування змінювались три основні параметри цього процесу: сила заглиблення індентора P , твердість HV або мікротвердість H_μ оброблюваного матеріалу та відносне видовження δ досліджуваних матеріалів.

Вплив сили заглиблення P , що вимірювалась у κH на 1мм довжини леза лінійного індентора, полягає у безпосередній дії на глибину канавки h та дії на цей параметр оптимізації через проміжні фактори. Такими факторами є радіус округлення ρ та кут α при вершині індентора, що сильно впливають на глибину канавки. Більш слабка дія спостерігається з боку мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) та швидкості v заглиблення. Перший зі слабких факторів має убезпечити індентування від адгезійних явищ і знизити фактор тертя. Цим умовам найкраще відповідає МОР на основі ріпакової олії. Швидкість заглиблення у межах $v=0,01-0,05$ м/с практично не впливає на глибину канавки.

Твердість чи мікротвердість усіх досліджуваних матеріалів та їх пластичність, що визначається відносним видовженням, належать до основних факторів процесу індентування. Тому також можуть сильно безпосередньо впливати на глибину канавки. Посередковано ці фактори формують параметри оптимізації через кут α при вершині індентора та радіус ρ . Слабкий вплив на глибину канавки мають склад МОР та швидкість заглиблення.

Таким чином, складовими «чорного ящика» (рис. 2.1) у процесі експериментів визначені радіус округлення ρ та кут α при вершині індентора

(фактори інструмента) і мастильно–охолоджувальна рідина та швидкість заглиблення як складові процесу.

У результаті проведення дослідів отримана експериментальна залежність глибини канавки мікро– і макрорельєсів від факторів процесу:

$$h = C_h P^x HV^y \delta^z \rho^m \alpha^n v^p MOP^q . \quad (3.15)$$

На рис. 3.17. подано взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентуванням.

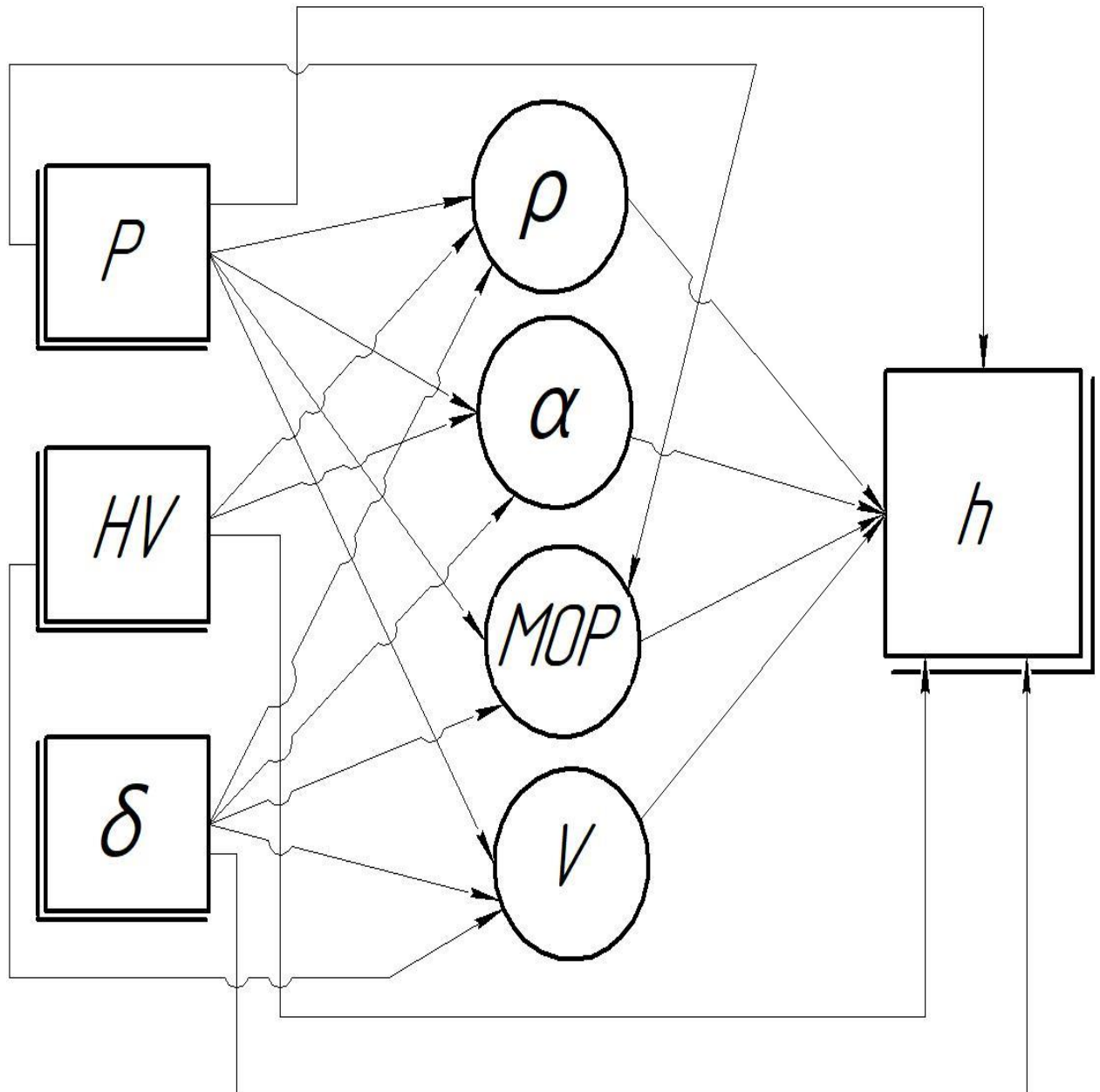


Рисунок 3.17 – Взаємозв'язок явищ при заглибленні лінійного індентора

3.5. Висновки до розділу

Розроблена класифікація регулярних рельєфів за методом отримання холодним пластичним деформуванням та обробкою різанням, що включає 10 методів.

Розроблена класифікація регулярних рельєфів за призначенням: технологічні (для попереднього поділу припуску перед зрізанням та підготовки поверхні під нанесення покриттів); експлуатаційні (для створення лабіринтів під мастильно–охолоджувальні матеріали); поділу осколочних корпусів на фрагменти при ініціюванні вибухових речовин; декоративні.

Розроблена механіка заглиблення лінійного індентора у металевий зразок, що об'єднує значення сили заглиблення з геометричними параметрами індентора, коефіцієнта тертя, контактним напруженням та глибиною канавки.

Експерименти на 8-ми типових представниках конструкційних матеріалів підтвердили теоретичні положення механіки заглиблення.

Визначено взаємозв'язок явищ між основними факторами процесу індентування – нормальною силою твердістю (мікротвердістю) та відносним видовженням матеріалу, проміжними факторами – кутом при вершині та радіусом округлення вершини індентора, швидкістю заглиблення останньою і МОР на основі ріпакової олії та параметром оптимізації – глибиною канавки мікрорельєфу. Розроблено відповідне рівняння, що пов'язує усі ці характеристики.

Теоретичні та експериментальні аспекти механіки заглиблення лінійного індентора у поверхню деталі висвітленні у наших працях [55, 53, 56, 58, 59, 73 111].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЬЄФОУТВОРЕННЯ

4.1 Відновлення зношених деталей засобів транспорту заглибленням лінійних інденторів

Як відомо [18, 27, 32, 95], зношування це процес відділення матеріалу з поверхні твердого тіла (деталей машин) при терті, що проявляється при поступовій зміні розмірів цього тіла. Знос – це результат зношування, що визначається у визначених одиницях (висоти, довжини, маси тощо).

На основі результатів наукових досліджень описаних вище нами розроблено метод відновлення зношених деталей заглибленням лінійного індентора, схема якого подана на рис. 4.1.

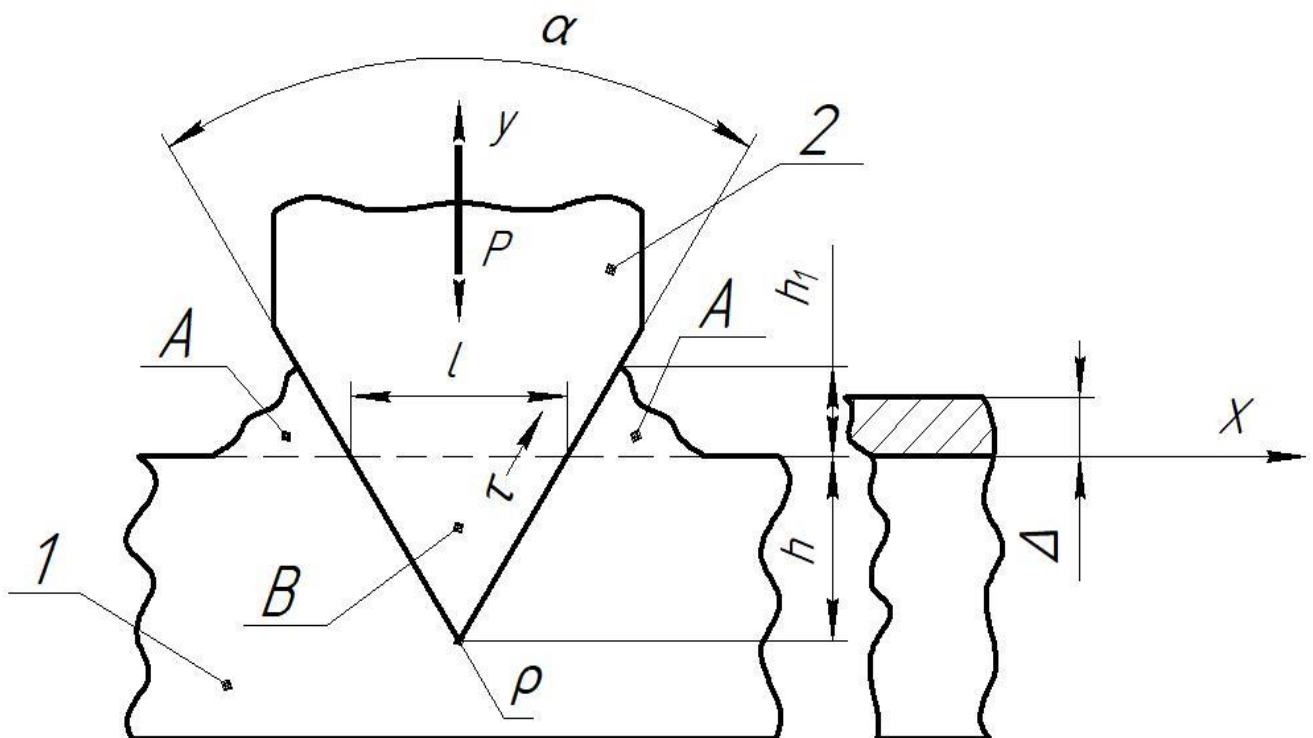


Рисунок 4.1 – Схема методу відновлення зношених деталей
заглибленням лінійного індентора:

1 – деталь; 2 – інцендор; Δ – висота зносу.

На рис. 4.1 показано схему методу відновлення у поперечному перерізі. Причому прийнято, що висота приросту h_1 розміру деталі приблизно дорівнює половині заглиблення h індентора, а площа прирощених ділянок $2A$ дорівнює площі канавки B при початковій ширині l .

При заглибленні лінійного індентора слід також враховувати тертя. Як відзначалося нами вище, при кутах індентора $\alpha=60^\circ$ це може змінити глибину h на величину 23%. Із наведеної нижче залежності (4.1) витікає, що для досягнення найбільшої глибини канавки і, відповідно висоти припуску h_1 , слід використовувати кути профілю індентора порядку 60° , і мінімальний контактний тиск τ :

$$P = 2\tau \cos \alpha / 2. \quad (4.1)$$

Слід відзначити, що рекомендований кут профіля індентора обмежується також міцністю і стійкістю.

Із аналізу стійкості та продуктивності лінійних інденторів при відновленні деталей засобів транспорту також витікає, що радіус при вершині інструмента повинен знаходитись в межах $\rho=0,1-0,2$ мм. Для утворення опорних площадок після відновлення, про що буде сказано нижче, слід працювати в межах:

$$h_1 = (1,5 \div 2)\Delta, \quad (4.2)$$

де Δ – величина зносу деталі.

4.2 Отримання дискретних поверхонь деталей машин

При вивченні відомого методу отримання регулярних мікрорельєфів заданою подачею різання та наступною деформацією вершин нерівностей протягуванням було встановлено, що ці виступи «завалюються» у сторону руху протяжного інструменту. Це пояснюється тим, що при деформуючому протягуванні діють не тільки нормальні, але і дотичні навантаження. Останні обумовлюються тертям між контактуючими поверхнями. В результаті

висотні параметри шорсткості деформуються (здавлюються) не тільки від дії нормального навантаження, але і від дії сили тертя. Таким чином, можна спостерігати «завалювання» складових мікрорельєфу, що виступають. Одночасно зі зменшенням висоти мікронерівностей відбувається заповнення впадин оброблюваної поверхні за рахунок масопереносу матеріалу [73]. На рис. 4.2 подано типовий характер деформування мікровиступу поверхні трубчастої деталі із сталі 38ХНЗМА.

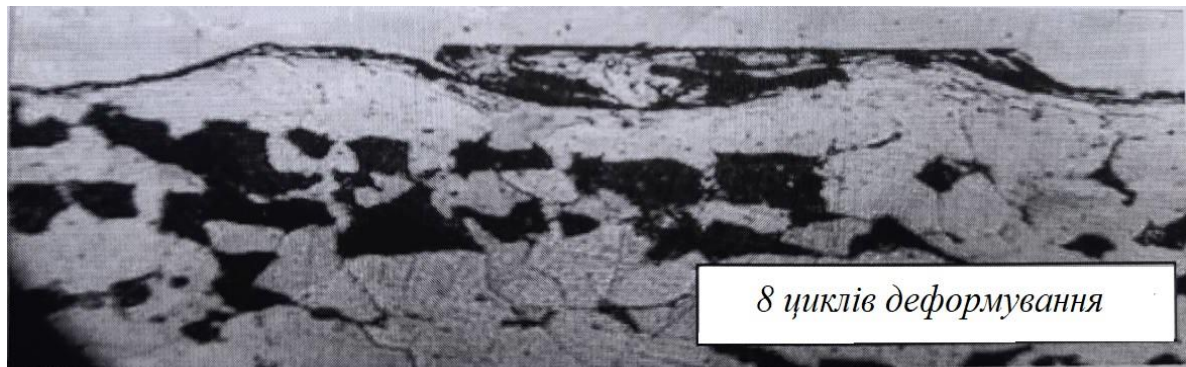


Рисунок 4.2 – Результат деформування мікровиступу поверхні деталі (сталі 38ХНЗМА) після обробки деформуючою протяжкою, $\times 500$. Видно заповнення впадин поверхні матеріалом вершини виступу і утворення квазіопорної площадки.

В результаті такого процесу утворюється мережа квазіопорних площадок поверхні, що легко руйнуються у торцях тертя деталей. Сказане вище дало підстави для удосконалення методу, що полягає у використанні проміжної втулки між гребінцями утвореної різанням поверхні та протяжкою. Цей метод дає можливість отримання канавок рельєфу та нової опорної поверхні у необхідному співвідношенні [73].

Суть методу пояснюється кресленнями, де на рис. 4.3 показано отримання канавок рельєфу поверхні деталі різанням, на рис. 4.4 – розміщення проміжної втулки і деформуючого елемента відносно деталі перед пластичною деформацією відносно деталі вершин рельєфу; на рис. 4.5 – готова дискретна поверхня деталі.

Пристрої складаються з різального інструменту 1, деталі 2 з попередньо утвореним різанням рельєфом 2, проміжної втулки 4, деформуючого елементу 5, опори 6, готової дискретної поверхні деталі 2 з опорними площадками 7 і канавками 8 рельєфу.

Умовні позначення: V – швидкість обертання деталі; V_n – швидкість деформуючого елементу; φ – кути у плані різального інструменту і профілю одиничного елементу рельєфу після різання; S і t – відповідно крок і висота одиничного елементу, d – внутрішній діаметр проміжної втулки; $\varepsilon/2$ – деформація на сторону деформуючого елементу; a і b – відповідно довжина опорної площадки і готової канавки мікрорельєфу; $\Delta\varphi$ і t_1 – відповідно кут розхилу і глибина канавки рельєфу.

Метод, що пропонується, рекомендується виконувати на токарних універсальних та протяжних верстатах наступним чином.

Різальний інструмент 1 із твердого металокерамічного сплаву здійснює прямолінійний рух уздовж деталі 2 (рис. 4.3). Інструмент має геометричні параметри різальної частини у плані, що відповідають профілю канавок рельєфу 3. Деталь 2, на поверхні якої буде створюватися рельєф, обертається відносно інструменту зі швидкістю $V \geq 100$ м/хв. Подача на оберт S та глибина різання разом зі швидкістю V і профілем інструменту φ забезпечують утворення заданого профілю поверхні. Швидкість різання, матеріал інструменту і мастильно-охолоджувальна рідина на основі мінеральної чи рослинної оливи запобігають рельєф від адгезійних явищ. Операція попереднього формування рельєфу виконується на токарних верстатах за кінематикою точіння. Остаточне формування дискретної поверхні деталі 2 виконується на протяжних верстатах (рис. 4.4). при цьому на поверхні деталі із зазором $< 0,005$ мм розміщують проміжну втулку 4 із сталі 65Г твердістю 50 – 55 HRC і установлюють деталь зі втулкою в опорі 6. Після цього через втулку пропускають наскрізь протяжку 3 з деформуючим елементом 5, який виконує роботу з деформацією $\varepsilon \leq 0,002d$, де d – діаметр отвору проміжної пружної втулки. Деформація через втулку передається виступом попередньо

утвореного рельєфу. На дискретній поверхні деталі 2 формується регулярний мікрорельєф з опорною поверхнею 7 довжиною a кожного одиничного виступа (рис. 4.5). При цьому кожен виступ зазнає дії лише радіальної складової сили протягування, чим запобігається «зминання» вершин у напрямку руху протяжного інструмента. Висота впадин t_1 – завжди менша початкової висоти t , а кут розхилу $\Delta\varphi$ – початкового кута φ .

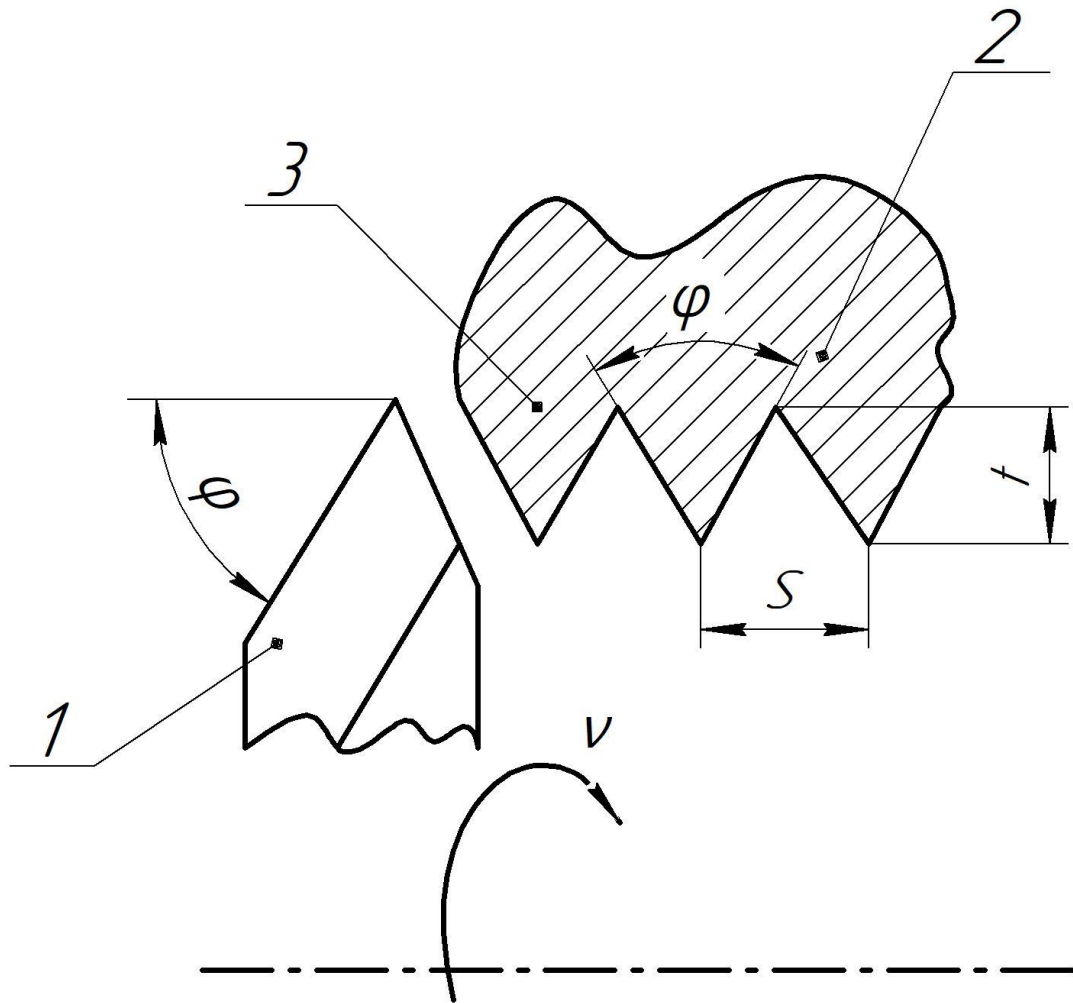


Рисунок 4.3 – Отримання канавок рельєфу поверхні деталі різанням

Метод має ще один позитивний ефект, який полягає у холодному деформуючому зміцненні виступів рельєфу, а отже, і опорних площадок дискретної поверхні.

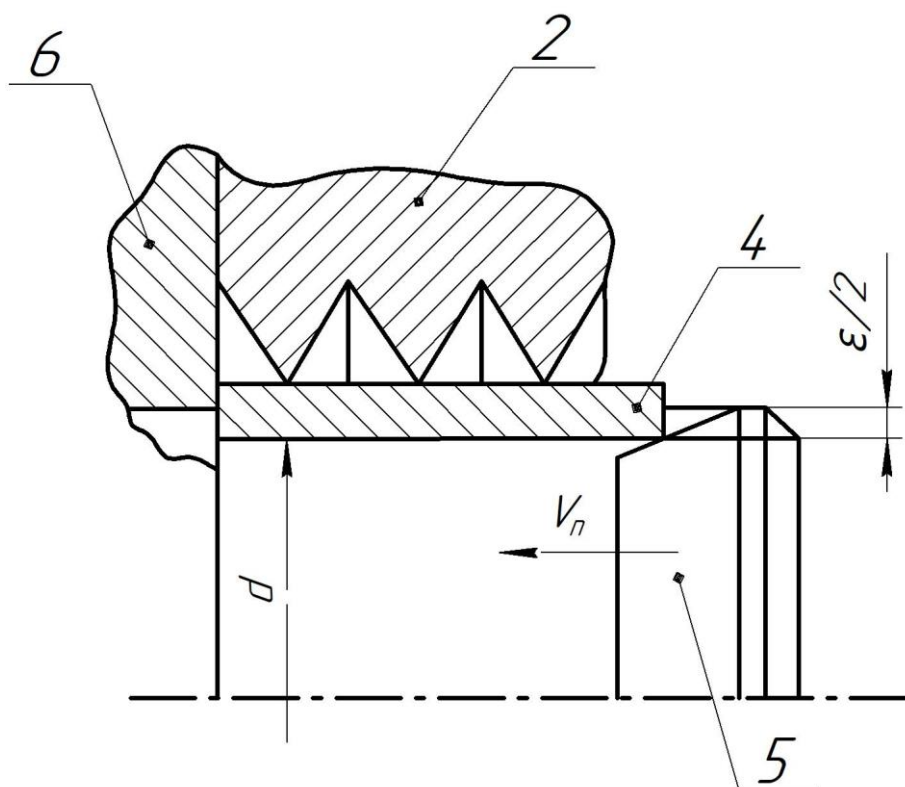


Рисунок 4.4 – Розміщення проміжної втулки і деформуючого елементу відносно деталі перед пластичною деформацією відносно деталі вершин рельєфу

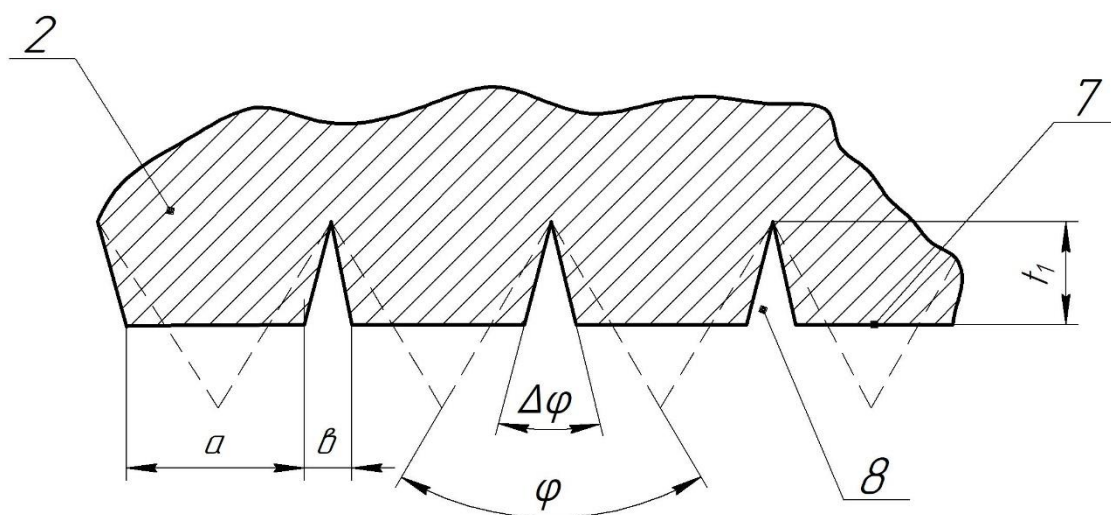


Рисунок 4.5 – Готова дискретна поверхня деталі

Використання запропонованого методу отримання деталей з дискретною поверхнею дозволить формувати такі поверхні з дискретністю 5–50% ($b/a + b$) і отримувати об'єми для мастила у парах тертя.

Дослідження також показали, що ДП можна віднести до класу технологічних та гібридних методів інженерії поверхні. Так, маючи технологічні характеристики ДП, зокрема величину і дрібність деформації, можна створити на оброблюваній поверхні деталі регулярні мікро – та макрорельєфи потрібного типу, а також управляти числом елементів на одиницю площі, відносною опорною поверхнею і кутами напрямку розміщення елемента. Обробку, що передує ДП, слід виконувати розточуванням, різальним протягуванням або іншими процесами різання.

Як приклад, на рис. 4.6 і 4.7 показана крива опорної поверхні 3 і ділянка отвору із регулярним кільцевим мікрорельєфом ($\eta = 70\%$). Наведені експериментальні дані було отримано з використанням нашого технічного рішення [86].

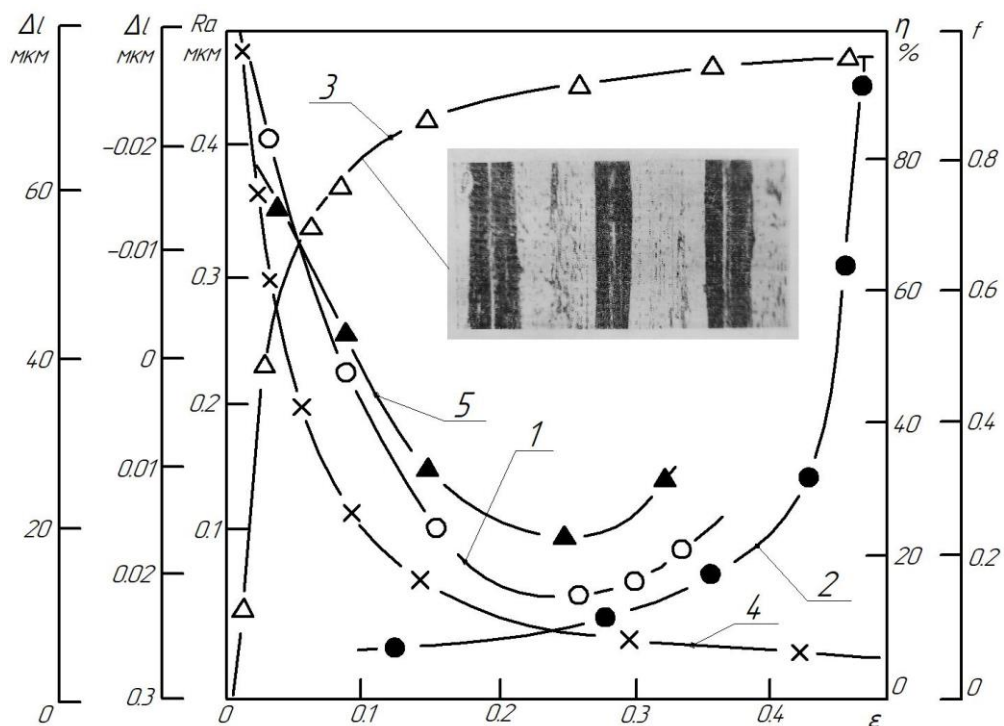


Рисунок 4.6 – Залежність шорсткості Ra (1), точності Δ отвору по колу (2), опорної поверхні η (3), коефіцієнту тертя f (4) та зношування деталі Δl (5) від

відносної деформації ε при ДП гільзи зі сталі 38ХНЗМА. По центру – мікропрофіля ($\times 80$) ділянки поверхні отвору з регулярним кільцевим мікрорельєфом: світлі полоси – опорні площадки, темні – канавки.

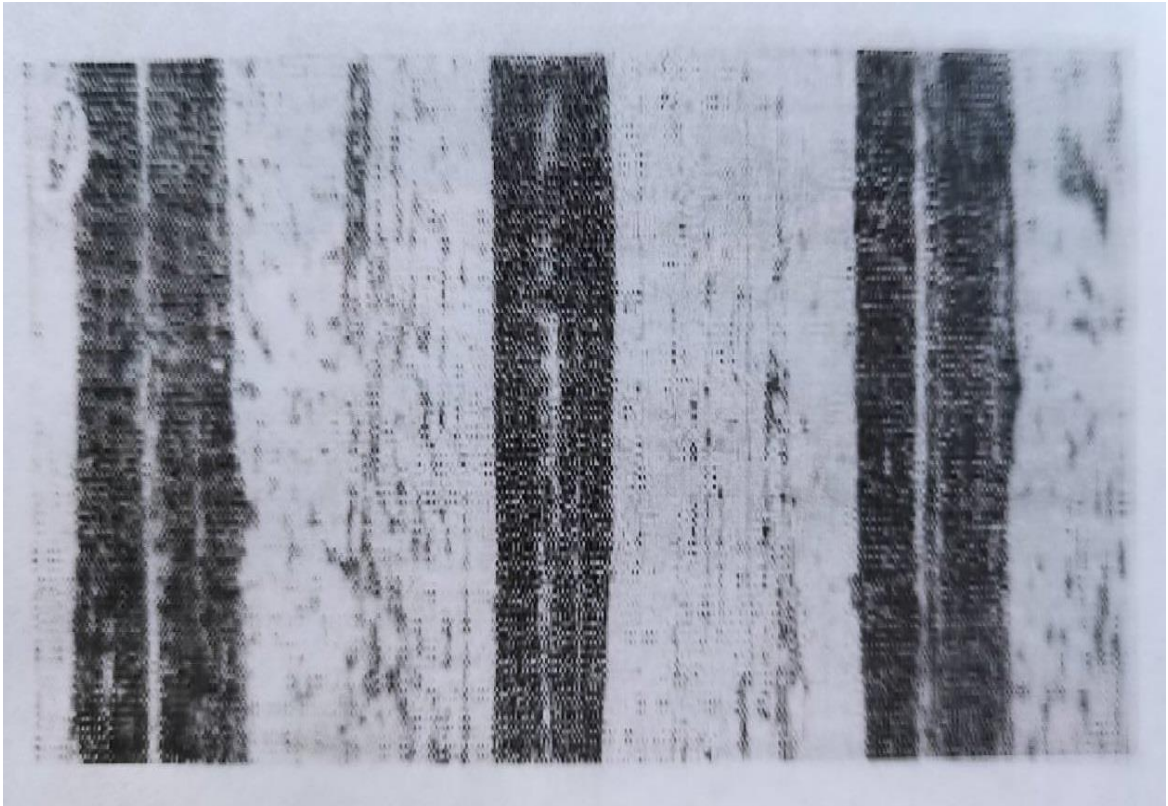


Рисунок 4.7 – Мікрофотографія (у плані, $\times 270$) ділянки поверхні отвору з регулярним мікрорельєфом: світлі полоси – опорні площадки, темні – канавки.

Регулярні технологічні рельєфи слід використовувати як мікрорезервуари для мастила при роботі пар тертя ковзання, зокрема у силових органах гідросистем, у амортизаторах, домкратах, підшипниках. Це запобігає захопленню у деталях, що контактують. Для цієї ж мети доцільно використовувати ще одну властивість поверхневого шару після ДП – підвищення межі текучості оброблюваного матеріалу на 40 – 70% і, як наслідок, – допустимих контактних навантажень за критерієм виникнення місточків захоплення. Сказане підтверджується кривою залежності коефіцієнта тертя від ступеня деформації при ДП (рис. 4.6). Цей графік

свідчить про те, що навіть при незначних деформаціях поверхня, яка зміцнена ХПД, отримує надійних захист від адгезійних явищ.

4.3 Метод отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення

Використання теорії деформування для вирішення технологічних процесів дозволяє дати відповідь також у тих випадках, коли після ХПД застосовується термообробка чи азотування. Це важливо, оскільки властивості матеріалу після фінішних операцій залежать від ступеню використання запасу пластичності, перевищення якого приводить до різкого поліпшення механічних властивостей матеріалу. Важливою також є оцінка залишкової пластичності у різних геометричних площадках деталі після ХПД.

Оскільки дослідження у цій дисертації потребує врахування багатьох факторів, потрібно вибрати один з них, найбільш впливовий на якість. Цим може стати ресурс пластичності ψ , який накладає на кожний процес ХПД певні обмеження [39, 40]. Що стосується отримання зубців евольвентного профілю коліс внутрішнього зачеплення – це їх формування профілюванням за один прохід.

Виходячи із викладеного, практичне значення має виконання наукових досліджень, у першу чергу експериментальних, по встановленню впливу технологічних факторів процесу на величину ψ . Це дає можливість вибрати оптимальну схему деформування і за раціональної побудови технологічних операцій прогнозувати отримання виробів з необхідними характеристиками.

Процес обтиску на жорсткій оправці для отримання зубців коліс внутрішнього зачеплення, що виконується за відомою схемою (рис 2.9), має переваги над традиційними технологіями, що полягають у наступному. Досягається енергозощадження у першу чергу за рахунок економії

матеріалу і електроенергії; підвищується міцність заготовки після ХПД; зменшується шорсткість поверхні.

Розглянемо задачу розрахунку напруженого стану при заглибленні у жорсткопластичний напівпростір індентора трапецевидного поперечного перерізу з урахуванням сил тертя по поверхні контакту тіл. Силу P у напрямку осі z індентора приймаємо такою, що припадає на одиницю довжини останнього. Координатні осі x та y співпадають з поперечним перерізом індентора. Припускаємо, що у цій площині відбуваються основні процеси деформування жорсткопластичного матеріалу. Насправді, у напрямку осі z деформація практично відсутня. Це дає можливість визначати напружений стан матеріалу, як плоску деформацію. Внаслідок симетрії, як раніше у наших дослідженнях, розглянемо праву половину області пластичної деформації (рис. 4.8).

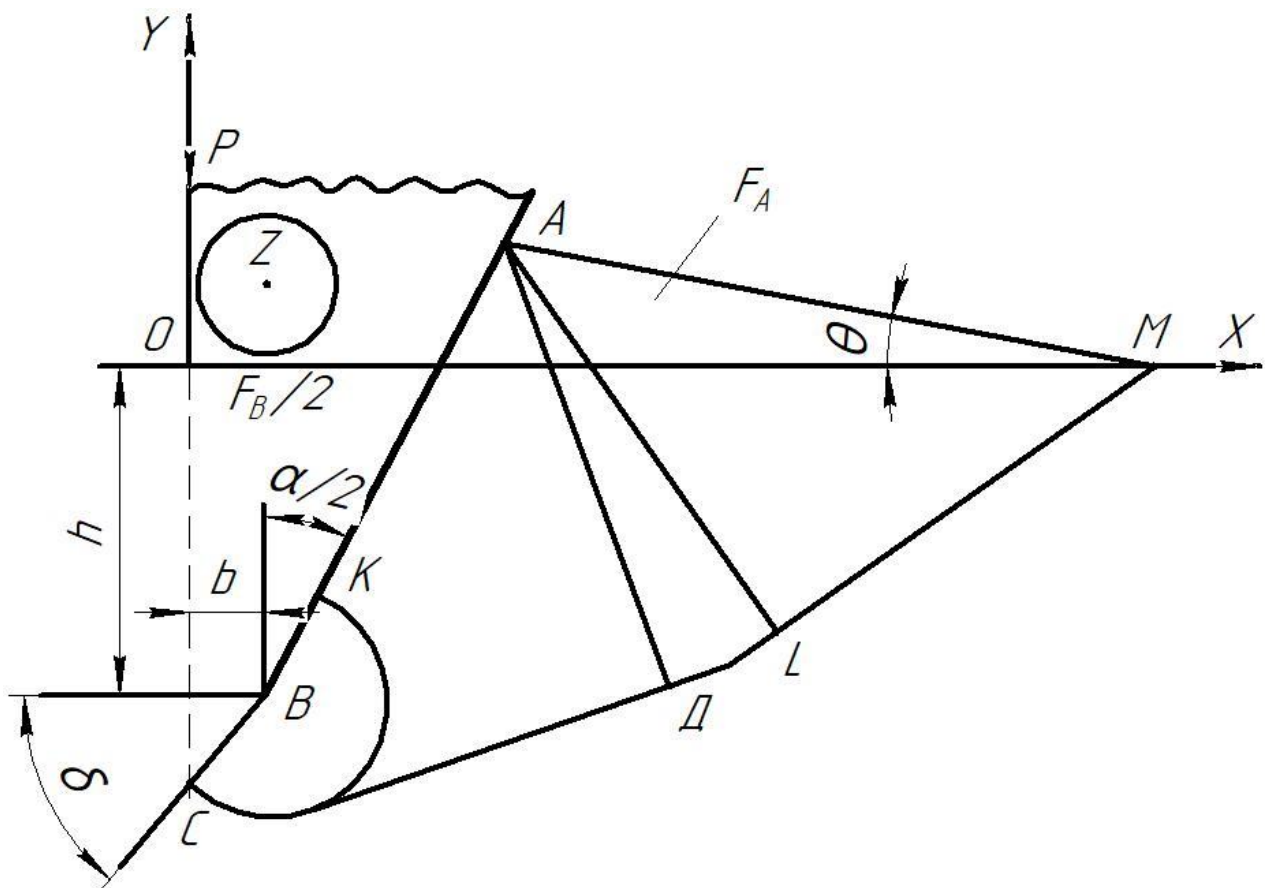


Рисунок 4.8 – Область пластичної деформації при заглибленні трапецевидного лінійного індентора, коли $h \gg b$

Компоненти напружень у площині xOy при плоскій деформації визначаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma + k \cos 2\varphi, \\ \sigma_y &= \sigma - k \cos 2\varphi, \\ \tau_{xy} &= k \sin 2\varphi,\end{aligned}\tag{4.3}$$

де k – інтенсивність дотичних напружень, що від інтенсивності напружень σ_u відрізняється числовим коефіцієнтом $k = G_u / \sqrt{3}$; $G_u = \frac{G_x + G_y}{2}$;

φ – кут, який утворює головне напруження у площині xOy з віссю x .

Напруження G_x , G_y і τ_{xy} визначаються методом характеристики [40].

Випадок отримання зубчастого внутрішнього зачеплення вважаємо подібним до заглиблення трапецевидного клинового індентора з урахуванням сил тертя. На бокових поверхнях торкання цього індентора з матеріалом заготовки компоненти напружень додаються напруження від заглиблення площадки шириною $2b$. Вважаємо, що у найбільш небезпечній площині АВ:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -k[1 + \pi + \alpha - 2\theta + 2\delta - \cos 2(\alpha/2 + \delta)], \\ \sigma_y &= -k[1 + \pi + \alpha - 2\theta + 2\delta - \cos 2(\alpha/2 + \delta)], \\ \tau_{xy} &= k \sin 2(\alpha/2 + \delta)\end{aligned}\tag{4.4}$$

де θ – кут АМО (кут напливу).

У нашому випадку сила P_2 тиску плоскої ділянки індентора, виходячи із наведених вище міркувань:

$$P_2 = 4kb(1 + \pi + \delta).\tag{4.5}$$

У той же час, сила P_1 тиску на матеріал, що деформується, від заглиблення гострого клина з кутом α при вершині індентора :

$$P_1 = 2kh \frac{(1 + \alpha - 2\theta + 2\delta) \sin \frac{\alpha}{2} + \sin(\frac{\alpha}{2} + 2\delta)}{\cos \alpha/2 - \sqrt{2} \sin(\frac{\pi}{4} + \delta) \sin \theta}.\tag{4.6}$$

Отже, сила P від заглиблення трапецевидного клина у випадку отримання впадини зубця колеса внутрішнього зачеплення складає:

$$P = P_1 + P_2. \quad (4.7)$$

Відзначаємо, що висота зуба цього колеса $h=2,2 m$, де m – модуль колеса, а $2b$ – ширина впадини між сусідніми зубцями.

Таким чином, технологічний процес, який побудовано на наших дослідженнях, може бути наступним:

- підготовка трубної заготовки під наступні операції деформуюче–різальним протягуванням, у процесі якого виправляється початкова некруглість отвору та видаляється дефектний поверхневий шар товщиною 0,1–0,5мм [45, 51, 57, 64, 69, 70, 71];
- отримання впадин між зубцями колеса внутрішнього зачеплення і власне формування зубців методом заглиблення трапецевидного лінійного індентора у заготовку із пластичного матеріалу; цю операцію слід виконувати як редукуванням заготовки на багатозубій фасонній оправці (див. нижче підрозділ 4.4) з наступним видаленням останньої з отвору на гідравлічному пресі чи протяжному верстаті [74];
- термообробка колеса внутрішнього зачеплення з особливостями для кожного матеріалу [17, 30, 72];
- фінішні операції у залежності від вимог до зачеплення (шевінгування, хонінгування, чистова обробка ХПД) [22, 22, 23, 25];
- безводневе азотування у тліючому розряді (БАТР), протягом якого зубці та впадини колеса із сталей зміцнюються до твердості HV 0,7–1,0 МПа [49].

Проведення останньої операції робить неможливо « водневу хворобу» сталейних деталей і дозволяє підвищити швидкість БАТР у 2–3 рази завдяки попередньому холодному зміцненню виробів.

Перспективними також є нанесення плівочних покриттів, зокрема вакуумних [8, 14, 95, 100].

На рис. 4.9 подано дослідний зразок колеса внутрішнього евольвентного зачеплення модулем $m= 1,5$ мм із сталі 38ХНЗМА, отриманим заглибленням (редукуванням) багатозубого лінійного індентора.

Досліди показали, що технологією, заснованою на ХПД, можна виготовляти колеса із внутрішніми евольвентними зубцями модулем $m = 0,25\text{--}2,5$ мм [74].



Рисунок 4.9 – Дослідний зразок колеса внутрішнього евольвентного зачеплення модулем $m = 1,5$ мм (сталь 38ХН3МА, редукування на багатозубій оправці)

4.4 Дослідний зразок інструменту та практичні випробування результатів дослідження

У випадку, коли основа деталі, на поверхню якої наноситься канавка, є жорсткою (вали, осі, корпусні деталі, зубчасті колеса тощо) , такий виріб вважається пружним напівпростором. Основа деталі у цьому випадку опирається розповсюдженню пластичної деформації від лінійного індентора. У іншому випадку, коли основа деталі не є жорсткою (втулки, інші трубчасті вироби) потрібне підсилення цієї основи додатковим елементом. Така схема нанесення рельєфів подана на рис. 2.9. Додатковим підсилюючим елементом у цьому випадку служить нерухома матриця, а канавки формуються фасонною оправкою.

В усіх випадках профіль канавки і сама канавка буде відповідати профілю робочої частини лінійного індентора по довжині останнього.

На рис. 4.10 подано основні типові профілі канавок, які і служать для визначення робочих розмірів індентора.

Канавки профілю 1 призначаються для поділу припуску при обробці різанням і для поділу корпусів боєприпасів при спрацюванні вибухової речовини. Такі канавки мають найменший радіус в основі ($\rho \leq 0,005$ мм) і мінімальний кут профілю ($\alpha=60^\circ$). Тобто, канавка утворюється при заглибленні гострого індентора. Профіль 2 канавки може використовуватися для поділу припуску, а також для формування різьби і для лабіринтів, у яких розміщується рідке мастило. У цьому випадку $\rho \approx 0,02$ мм. Профіль канавки 3 макрорельєфу відрізняється тим, що майже не створює концентраторів напружень на поверхні деталі.

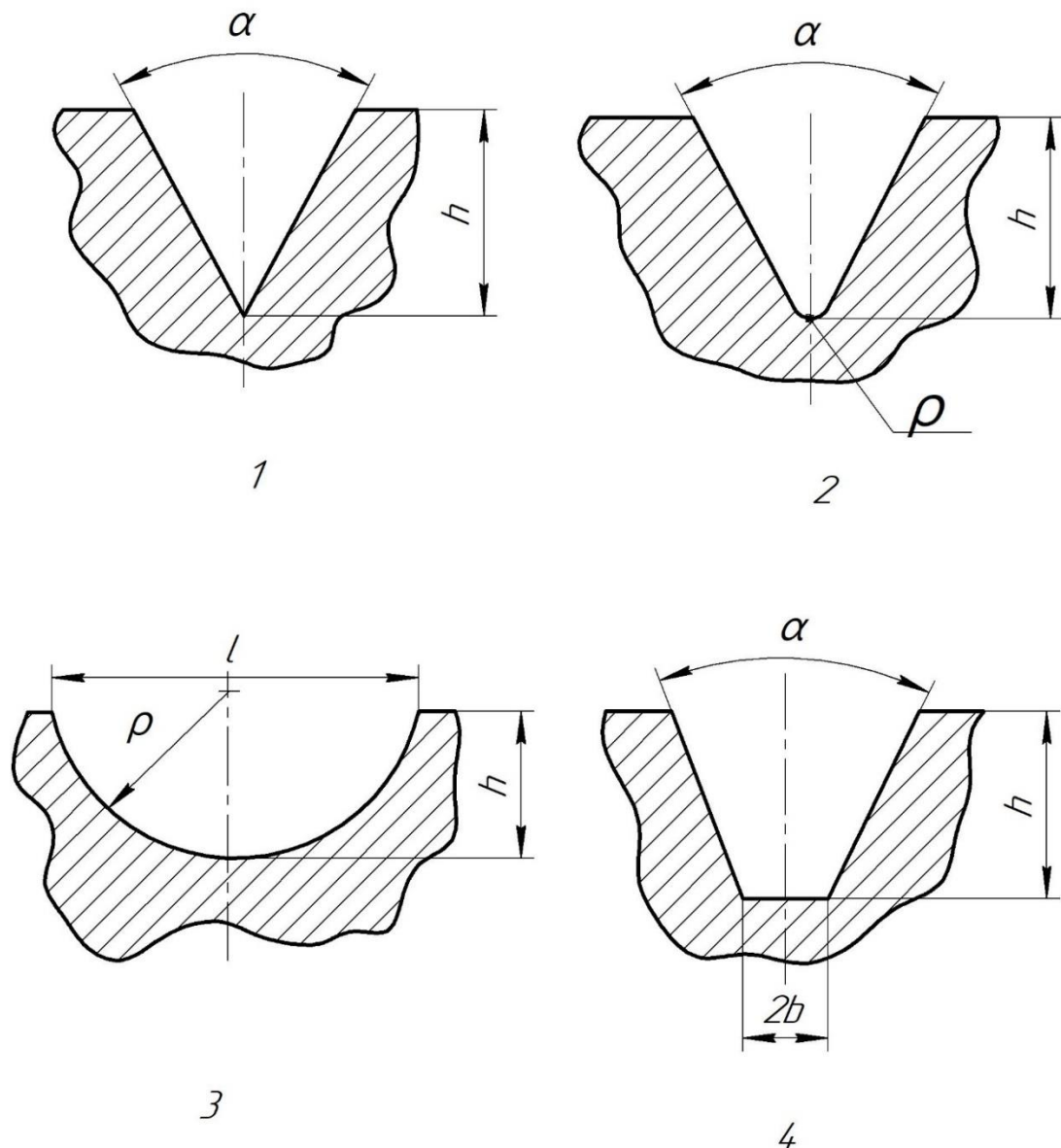


Рисунок 4.10 – Типові профілі канавок макрорельєфу

Тому цей профіль може використовуватись при підготовці поверхонь для нанесення покриттів, у тому числі плівочних за методом ФАБО [97, 98, 99, 100, 101, 114], для створення зміцнених нових несучих поверхонь при відновленні деталей, для отримання поверхонь естетичного призначення. Нарешті, профіль 4 макрорельєфу використовується у робочих елементах лінійних інденторів для створення різноманітних службових поверхонь отворів деталей машин фасонним редукуванням (евольвентного профіля зубчастих коліс внутрішнього зачеплення [74], втулок зі шлицями або шпоночними канавками тощо). Експерименти показали, що у цьому випадку глибина канавки профіля може бути рівною до 5мм.

Для лінійних інденторів відповідного профілю слід рекомендувати зносостійкі тверді сплави групи ВК, фізико–механічні властивості котрих наведено у табл. 4.1 [26].

Таблиця 4.1 – Фізико–механічні властивості твердих сплавів, що рекомендуються для виготовлення робочих елементів протяжок

Твердий сплав	Склад, %		Фізико–механічні характеристики		
	WC	Co	Густина $\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	Границя міцності на згин, МПа, не менше	Твердість <i>HRC</i> , не менше
ВК6	94	6	14,6–15,0	1519	88,5
ВК6М	94	6	14,8–15,1	1421	90,0
ВК8	92	8	14,4–14,8	1666	87,5
ВК15	85	15	13,9–14,1	1800	86,0
ВК20	80	20	13,4–13,7	1950	84,0
ВК25	75	25	12,9–13,2	2000	82,0

Як це витікає з табл. 4.1, універсальним комплексом фізико-механічних та експлуатаційних характеристик для роботи елементів деформуючих протяжок відзначається твердий сплав ВК15.

За стандартом *ISO 513–2004* деякі марки вітчизняних твердих сплавів мають таку відповідність міжнародній класифікації: *BK6*, *BK6M* та *BK60M* – жовтий колір маркування, *MOS* і *M10*; *BK6* і *BK8* – червоний колір маркування і відповідно *K20* і *K30*.

Цей же твердий сплав можна рекомендувати і для матриць наряду зі стал марок ХВГ, Х12МФ або Р6М5. Однак, матриці із твердого сплаву слід бандажувати, наприклад кільцями із сталі 30ХГСА.

На рис. 4.11 подано зразок розробленого нами на основі теоретичних та експериментальних досліджень інструменту (вставки – індентори, твердий сплав ВК 15; $\alpha=90^\circ$; діаметр по вершинах індентора – 60мм) і фрагмент досліджуваного зразка із дуралюмініу Д16 (2117) за ДСТУ 11069–01 після індентування цим інструментом [59].



Рисунок 4.11 – Дослідний зразок інструмента (зліва) та фрагмент зразка після індентування (дуралюмін Д16, справа)

У випадку, коли індентування сталей деталей призводять до небажаного вичерпання запасу пластичності матеріалу, слід рекомендувати після ХПД середнє відпускання з температур 300–350° [72]. Для деталей, коли застосовується імпульсне безводне азотування як фінішна операція, слід користуватись рекомендаціями роботи [49].

Проведені експерименти на дослідних зразках усіх груп матеріалів підтвердили результати, що отримані теоретично.

На основі результатів дослідження розроблено та випробувано зразок інструменту, який оснащено 19–ма лінійними інденторами. Випробування на трубчастих деталях із дуралюмініу Д16 (2117) показали перспективність використання отриманих результатів у виробництві та у навчальному процесі спеціальностей “Прикладна механіка” і “Матеріалознавство” (додаток Б).

4.5 Висновки до розділу

Розроблено метод відновлення зношених деталей заглибленням лінійного індентора. Встановлено, що висота приросту розміру деталі дорівнює половині заглиблення. Кути профілю індентора для заглиблення повинні бути порядку 60° з позиції міцності і стійкості інструмента, а радіус при його вершині повинен знаходитись в межах 0,1–0,2 мм.

Створено принцип отримання дискретних поверхонь деталей машин, які чергуються з канавками мікро– і макропрофілю, в межах дискретності 5–50 %. Для реалізації цього принципу запропоновано використовувати проміжну технологічну пружну деталь між оброблюваною поверхнею та інструментом, завдяки чому ліквідується дія дотичних навантажень і підвищується межа текучості оброблюваного матеріалу на 40–70%. Завдяки цьому підвищуються контактні навантаження опорних поверхонь деталі за критерієм виникнення місточків схоплювання.

На основі механіки заглиблення трапецевидного індентора у жорстко–пластичний напівпростір розроблено метод отримання прямозубих зубчастих коліс евольвентного внутрішнього зачеплення модулем $m = 0,25\text{--}2,5$ мм. Процес здійснюється на жорсткій багатозубій оправці копіюванням за схемою редукування. Розглянуто задачу розрахунку напруженого стану, у результаті чого визначено силу заглиблення трапецевидного індентора, як суму сил заглиблення гострого клина та плоскої його ділянки. Подано типовий технологічний процес методу отримання коліс внутрішнього зачеплення, що включає підготовку отвору трубчастой заготовки власне, метод ХПД і фінішні операції термо- та абразивної обробки, а при необхідності, безводневого азотування.

Розроблено дослідний зразок інструменту для реалізації результатів дослідження, що є багатозубою оправкою зі стальним корпусом (таль 30ХГСА) та твердосплавними вставками (сплав ВК8). Профіль вставок відповідає профілю потрібних канавок макрорельєфу поверхні отвору деталі. Випробувано зразок інструменту на деталях із дуралюмініу Д16 (2117), що показало перспективність використання отриманих результатів у виробництві та у навчальному процесі спеціальності «Прикладна механіка» і «Матеріалознавство» (додаток В).

Результати дисертаційного дослідження, що лягли у основу їх практичного застосування, висвітлено у наших працях [56, 74, 86, 105, 111].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дослідження у межах дисертаційної роботи вирішено науково–технічне завдання поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту, зокрема колінчастих та газорозподільчих валів, втулок, цапф, блоків та головок циліндрів, інших корпусних деталей, зубчастих коліс, деталей трансмісії та ходової частини тощо, нанесенням регулярних рельєфів. Це стало можливим завдяки наступному.

1. Розроблено математичну модель процесу заглиблення лінійних інденторів у оброблюваний матеріал, що визначає вплив найбільш вагових факторів: сили індентування, твердості і пластичності зразка на параметри канавки регулярного рельєфу: глибину, радіус основи та кут у плані.

2. Уперше створено класифікацію регулярних рельєфів за методами отримання холодною пластичною деформацією та обробкою різанням і за призначенням : для попереднього поділу припуску при обробці різанням; для підготовки поверхонь деталей під нанесення покриттів у тому числі плівочних антифрикційних (ФАБО); для створення лабіринтів на поверхні деталей для мастил; для попереднього поділу осколючастих корпусів боєприпасів; для створення зміцнених нових несучих поверхонь, зокрема дискретних при відновленні зношених деталей; для отримання складних профілів на поверхнях отворів деталей: шпонкових, шліцьових, внутрішніх зубців зубчастого зачеплення; естетичного призначення.

3. Розроблено розрахунок дії сили заглиблення і геометричних параметрів лінійного індентора на форму та розміри канавки рельєфу: глибину в межах 0,02–5 мм; радіус основи в діапазоні 0,005–0,5 мм і кути у поперечному перерізі 60°; 70°; 80°; 90°; при цьому на силу заглиблення впливатиме тертя, знижуючи цю силу на 23% для кута індентра 60° і на 14% для кута 90°.

4. Вибрано пресове гідрофіковане обладнання для експериментів зусилля 0,02МН та 0,2 МН; створено лінійні індентори із загартованої сталі Р18 з кутом при вершині 60° – 90° ; визначено марки досліджуваних матеріалів: по 2 марки легованих сталей і сірих чавунів та сплавів на основі міді, алюмінію і титану; розроблено процеси мікроструктурного аналізу та дослідження мікротвердості; вибрано методи та пристрої для вивчення нанесеного рельєфу.

5. Підтверджено експериментально теоретичні положення про дію сили заглиблення, твердість та пластичність на глибину канавки рельєфу. При цьому ці фактори проявляються як безпосередню дію на параметр оптимізації, так і через проміжні фактори: радіус округлення та кут при вершині індентора і склад МОР та швидкість заглиблення. Перші два проміжних фактори сильно впливають на глибину канавки, а два останніх виявляють слабку дію. Побудовано взаємозв'язок явищ при рельєфоутворенні індентуванням і отримано експериментальну залежність глибини канавки від факторів процесу.

6. Розроблено методи відновлення зношених деталей заглибленням індентора та рельєфоутворенням, засновані на поєднанні обробки різанням із заданою подачею з деформуючими протягуванням, причому для отримання опорної поверхні застосовується проміжна втулка, що зазнає лише пружних деформацій.

7. На основі механіки заглиблення трапецевидного індентора у жорстко–пластичний напівпростір розроблено метод отримання прямозубих зубчастих коліс евольвентного внутрішнього зачеплення модулем $m = 0,25$ – $2,5$ мм. Процес здійснюється на жорсткій багатозубій оправці копіюванням за схемою редукування.

8. Процес поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин за рахунок нанесення рельєфів рекомендується здійснювати у такій послідовності основних операцій: підготовка поверхні під індентування; заглиблення лінійного індентора; видалення виступів металу різанням. Для

отворів порожнистих деталей останнім рекомендується різальне протягування.

9. Розроблено дослідний зразок інструменту для реалізації результатів дослідження, що є багатозубою оправкою з твердосплавними вставками. Випробувано інструмент на деталях з дуралюміну Д16, що показало перспективність використання отриманих результатів у виробництві та у навчальному процесі НТУ спеціальностей «Прикладна механіка» і «Матеріалознавство».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аксьом П.А. Поліпшення властивостей відновлювальних деталей засобів транспорту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Аксьом Петро Андрійович; Національний транспортний університет МОН України. 2020. 20 с.
2. Анкунда С.Н., Хейфец И. М. Системный подход к построению моделей технических объектов и технологических процессов. Инженерия поверхности и реновация изделий: Матер. междунар. науч.–практич. конф., (Одесская обл., Затока, 1–5 июля 2015 г.). Киев: АТМ Украины, 2015. С. 14–17.
3. Армареко И.Дж.А. Обработка металлов резанием. И.Дж.А. Армареко, Р.Х. Браун. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
4. Бердичевский Е.Г. Эстетические показатели качества поверхности художественных изделий. Е.Г. Бердичевский. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 16-й междунар. научно–технической конференции.* м. Одеса, 20 – 23 сентября 2016 г., Одесса: АТМ Украины, 2016. С. 13 – 15.
5. Бобров В.Ф. Развитие науки о резании металлов. В.Ф. Бобров [и др.]. М.: Машиностроение, 1967. 414 с.
6. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. В.З. Бродский. М.: Наука, 1976. 223 с.
7. Будяк Р.В. Вдосконалення процесу механічної обробки гільз гідроциліндрів комбінованим протягуванням: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Будяк Руслан Володимирович; Кіровоградський національний технічний університет МОН України. 2014. 20с.
8. Воеводин Г.А. Влияние микроструктуры обрабатываемого материала на характеристики процесса резания и износ инструмента. Физические процессы при резании металлов. Сб. научн. тр. Волгоград: Волгогр. политехн. ин–т, 1984. С. 76–86.

9. Войтов В.В. Обработка резанием с одновременным пластическим деформированием. В.В. Войтов, В.Н. Подураев, Л.В. Севастьянов, Г.Ф. Шатуров // Интенсификация технологических процессов механической обработки: Прогрессивные режущие инструменты, устройства и способы обработки: Тез. докл. всесоюз. конф. 14–16 октября 1986 года. Л., 1986. С. 35–36.

10. ГОСТ 24773–81. Поверхности с регулярным микрорельефом: классификация, параметры и характеристики. Москва, Государственный комитет СССР по стандартам. 1981. 13с.

11. Грановский Г.И. Резание металлов. Г.И. Грановский, П.П. Грудов. М.: Машгиз, 1954. 472 с.

12. Деформирующая протяжка [Текст] : а. с. 192865 СССР. В.В. Морозов, О.А. Анпилогов, Ю.Ф. Бусел, А.Д. Крицкий, Г.В. Неклюдов, Э.К. Посвятенко, О.А. Розенберг, П.П. Рукавишников. № 3054506; приоритет 06.12.82 ; зарегистр. 05.08.83.

13. Деформирующе-режущая протяжка [Текст] : а. с. 1336369 СССР МКИ В23Д 43/02/ Э.К. Посвятенко, А.И. Захаренко, А.И. Кодрик И.В. Лунгол. – № 4037622/25–08 : заявл. 25.03.86 ; : зарегистр. 08.05.87.

14. Дмитриченко Н.Ф. Тенденции поверхностного упрочнения зубчатых колес в автомобилестроении. Н.Ф. Дмитриченко, Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко. Надійність і довговічність машин і споруд. К.: Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2005. Вип. 24. С. 127–144.

15. ДСТУ 2860:1994. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ, Держстандарт України, 1995. 26 с.

16. Дурягіна З.А. Сплави з особливими властивостями. З.А. Дурягіна, О.Я. Лизун. Львів: Львівська політехніка, 2007. 236 с.

17. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник. Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. 226 с.

18. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 288 с.
19. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
20. Иванов И.И. Основы теории обработки металлов давлением: учебник. И.И. Иванов [и др.]. – М.: ФОРУМ: ИНФРА–М, 2007. 144 с.
21. А.И. Грабченко и В.А. Залогі. Сумы: Университетская книга, 2017. 451 с.
22. Іванов Ю.М. До розрахунку деформуючих інструментів, що працюють за схемою ковзання. Ю.М. Іванов // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. Київ: НТУУ “КПІ”, 1999. – Вып. 37. С. 162–168.
23. Іванов Ю.М. Сучасні ресурсозберігаючі технології виробництва та ремонту виконавчих органів гідросистем автомобілів і тракторів. Ю.М. Іванов, Ю.Б. Паладійчук // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кіровоград: КНТУ, 1999. Вип. 28. С. 286–289.
24. Іванов Ю.М. Холодне пластичне деформування як засіб інженерії поверхні деталей машин. Ю.М. Іванов, Е.К. Посвятенко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ", 2001. № 6. С. 110–113.
25. Іванов Ю.М. Шляхи удосконалення ресурсозберігаючих комбінованих технологічних процесів виготовлення та ремонту деталей транспортних засобів. Ю.М. Іванов // Резание и инструмент в технологических системах. Харьков, 1999. Вып. 55. С. 129–134.
26. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: монографія. Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Є. Шейкін та інш. Кропивницький, 2021. 466 с.

27. Інженерія поверхні. Підручник. К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. К.: Наук. думка, 2007. 559 с.
28. Інноваційні технології композиційного зміцнення поверхні елементів виробів для оборонної та енергетичної галузей. А.П. Марченко, М.А. Ткачук, О.В. Соболев, Е.К. Посвятенко та ін. // Механіка та машинобудування: наук.–техн. журнал. Х.: НТУ «ХПІ», 2017. № 1. С. 234–245.
29. Канарчук В.Є. Деформаційне зміцнення конструкційних і легованих сталей. В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. Київ: НТУ, ТAU, 2002. Вип. 13. С. 7–12.
30. Канарчук В.Е. Прикладное автотракторное материаловедение: Учеб. Пособие. В.Е. Канарчук, В.И. Шевченко. К.: УМК ВО, 1991. С. 84–88.
31. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография. Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко и др. Харьков, «Планета–Принт», 2018. 259 с.
32. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении: Монография. В.Д. Кузнецов. М.: Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1956. – 284 с.
33. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ. 2–е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. – 64 с.
34. Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507–1: 2005, ІДТ): ДСТУ ISO 6507–1: 2007. [Чинний від 01. 01.2009] К.: Держспоживстандарт України, 2009.–25с. (Національні стандарти України)
35. Матеріалознавство: Підручник. За ред. проф. С.С. Дьяченко. Х.: ХНАДУ, 2007. – 440 с.
36. Металлография железа. Т.2 Структура сталей (с атласом микрофотографий). Перев. с. англ. М.: Металлургия, 1972. – 284 с.

37. Методологічні основи наукових досліджень: підручник для студентів технічних спеціальностей. Н.І. Посвятенко, О.Є.Тверитнікова, Е.К. Посвятенко, Ю.Є. Демідова. Харків: «Факт», 2022. 320с.

38. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів: Монографія. Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, О.В. Чернявський, П.М. Єрьомін; за ред. проф. Посвятенка Е.К. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2017. – 288 с.

39. Нахайчук О.В. Исследование механики внедрения плоского штампа в жесткопластический материал с использованием метода конечных элементов. О.В. Нахайчук // Физика и техника высоких давлений. 2004. Т.14. № 1. С. 71–78.

40. Нахайчук О.В. Механика деформирования при внедрении трапецеидального индентора. О.В. Нахайчук //Вибрации в технике и технологиях. 2000, №2(14). С. 47–51. ISBN 5–7763–9123–7.

41. Немировский Я.Б., Шепеленко И.В., Медведева О.В. Ресурсосберегающая и экологически чистая технология нанесения антифрикционных покрытий. *Матеріали VI Міжнародної науково – практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020» (08 – 12 вересня 2020 р.), випуск 6. – Херсон: ХНТУ, 2020. С.138 – 139.*

42. Немировський Я.Б. Наукові основи забезпечення точності при деформуючому протягуванні: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.08. Немировський Яків Борисович; Національний транспортний університет України “Київський технічний університет імені Ігоря Сікорського ” МОН України. – 2018. 40с.

43. Особенности контактных явлений при деформирующем протягивании с использованием твердых смазок. Я.Б. Немировский, Э.К. Посвятенко, И.Ю. Росточкий, Ю.А. Цеханов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Технології в машинобудуванні. Серія: Технологія машинобудування. Харків: НТУ "ХПІ, 2019. № 19 (1344). С. 61–68.

44. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: навч. Посібник. І.С. Афтаназів, А.П. Гавриш, П.О. Киричок та ін. Житомир: Житомирський інженерно-технологічний ін-т, 2001. 516 с.

45. Посвятенко Э.К. Гибридные процессы инженерии поверхности деталей машин. Э.К. Посвятенко // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 8-й межд. науч. техн. конф. К.: АТМ України, 2008. – С. 195–198.

46. Подураев В.Н. Физико-химические методы обработки: монография. В.Н. Подураев, В.С. Камалов. М.: Машиностроение, 1973. 346 с.

47. Посвятенко Е. К. Поліпшення властивостей аустенітних сталей як конструкційного матеріалу. Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 6 seria: Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015, s. 113 – 118.

48. Посвятенко Е.К. Геометричні та фізико–механічні характеристики поверхонь деталей після холодного деформування. Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кіровоград: КНТУ, 2001. Вип. 30. С. 128–131.

49. Посвятенко Е.К. Модифікування поверхневого шару деталей безводневим азотуванням у тліючому розряді, інтенсифікованим холодним пластичним деформуванням. Е.К. Посвятенко, А.В. Рутковський, В.В. Алексеев // Вісник Національного транспортного університету. К: НТУ, 2010. №21(2). С. 60–63.

50. Посвятенко Е.К. Наукове підґрунтя процесів модифікування матеріалів холодним пластичним деформуванням. Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. Харків: НТУ "ХП", 2001. Вип. №1 (4). С. 219–227.

51. Посвятенко Е.К. Основи розрахунку комбінованого інструменту для процесів на базі протягування. Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Резание и инструмент в технологических системах. Харьков, 2001. Вып. 59. С. 171–175.

52. Посвятенко Е.К. Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей. Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Серія: технічні науки. Ч.1. К.: НТУ, 2016. № 18. С.94–100.

53. Посвятенко Е.К. Формування регулярного макрорельєфу поверхонь отворів деталей комбінованим протягуванням. Е.К. Посвятенко, Ю.Б. Паладійчук // Вісник Національного технічного ун-ту України «Київський політехн. ун-т». К: Машинобудування, 1999. Вип.37. С. 256–261.

54. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин рельєфами поверхні // Вісник Національного транспортного ун-ту: Серія: Технічні науки. К.: НТУ, 2021. Вип. 1 (48). С.270–282.

55. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Утворення і призначення регулярних рельєфів на поверхнях деталей машин // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матер. 18–го междунар. науч.-техн. семинара, (г.Брно, 10–16 февраля 2018г) Киев: АТМ Украины, 2018. С. 204 –208.

56. Посвятенко Е.К., Шепеленко І.В., Рибак І.П. Утворення регулярного рельєфу протягуванням // Е.К., Посвятенко та інші. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: Монографія. Кропивницький, 2021. С. 362–397.

57. Посвятенко Едуард. Холодне пластичне деформування, як ефективний метод інженерії поверхні деталей машин. Едуард Посвятенко, Наталія Посвятенко // Scientific letters of academic society of Michal Baludansky. KOSICE, Slovakia; 2019, № 7. С. 73–78.

58. Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Створення рельєфів поверхні деталей засобів транспорту лінійним індентуванням // Прогресивна

техніка, технологія та інженерна освіта: Матеріали міжнар. Наук.–техн. конф. (м. Київ, 6–9 жовтня 2020р.) Київ, 2020. С. 182–185.

59. Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин холодним пластичним деформуванням // Вісник Національного Транспортного університету : Серія: Технічні науки. наук–техн. зб. . 2022. Вип. 1(51). С. 307–313.

60. Посвятенко Э.К. Малоотходная технология изготовления поршневых пальцев на основе редуцирования трубных заготовок. Э.К. Посвятенко, А.Д. Крицкий, Р.А. Маслов // Кузнечно–штамповочное производство, 1987. №7. С. 12–13.

61. Посвятенко Э.К. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности Э.К. Посвятенко, В.Д. Гончаров, С.С. Дьяченко // Резание и инструмент в технологических системах. 2009. Вып. 77. С. 53–65.

62. Посвятенко Е. К. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно–охолоджуючих рідин на фізико–механічні та технологічні властивості аустенітних сталей. Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Н. І. Посвятенко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. Вып. 88. С. 172 – 178.

63. Посвятенко Е. К. Математична модель обробки деталей транспортних засобів із аустенітних сталей. Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 16–й Международной научно–практической конференции, 20 – 23 сентября 2016 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2016. С. 122 – 126.

64. Посвятенко Е.К. Відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей. Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. К.: НТУ, 2015. Вип. №2 (32). С. 210 – 218.

65. Посвятенко Е.К. Основні напрямки поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей. Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, Р.В. Будяк //

Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. К.: НТУ, 2016. Вип. №1 (34). С. 370 – 377.

66. Посвятенко Е.К. Особенности механики резания материалов, армированных холодной деформацией. Е.К. Посвятенко, Н.І. Посвятенко, Р.В. Будяк // Резание и инструмент в технологических системах. Харьков, 2012. Вып. 81. С. 238 – 248.

67. Посвятенко Е.К. Особенности обработки деталей транспортных средств из аустенитных сталей. Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. К.: НТУ, 2015. Вип. №1 (31). С. 443–449.

68. Посвятенко Е.К. Про вплив дислокацій на фізико–механічні властивості феритних та аустенітних сталей. Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, О.В. Мельник. Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 17–го Международного научно–технического семинара, 20–24 февраля 2017 г., г. Свалява. Киев: АТМ Украины, 2017. С. 239–241.

69. Посвятенко Е.К. Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей. Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом. Управління проектами, системний аналіз і логістика. Науковий журнал, серія “Технічні науки”. К.: НТУ, 2016. Вип. 18, Ч. 1. С. 94–100.

70. Посвятенко Э.К. Наростообразование при протягивании стали, упрочненной холодной деформацией. Э.К. Посвятенко, И.В. Лунгол. Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч. –техн. сб. Харьков: ХГПУ, 1997. Вып. 51. С. 195–198.

71. Посвятенко Э.К. Научное обоснование эффективности процесса деформирующе–режущего протягивания: автореф. дис. ... д–ра техн. наук: 05.03.01. Посвятенко Эдуард Карпович; Ин–т сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. К., 1993. – 35 с.

72. Прикладне матеріалознавство: підручник. О.В. Сушко, Е.К. Посвятенко, С.В. Кюрчев, С.І. Лодяков. Мелітополь: ТОВ “ Forward press ”, 2019. 352с.

73. Рибак І.П. Протяжки для утворення регулярного рельєфу // Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, І.В. Шепеленко. Протягування та протяжний інструмент: Монографія. Кропивницький, 2020. С. 246–273.

74. Рибак І.П., Бобро А.М., Посвятенко Е.К. Отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення редукуванням // Тези доповідей LXXVII наукової конф. проф.–викл. складу, аспірантів, студентів та співробітників. Київ: НТУ, 2021.С.9.

75. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания й деформирующего протягивания. А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. Київ: Наукова думка, 1990. – 320 с.

76. Романов А.А. Декоративные покрытия. А.А. Романов // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2003, №4. С 30–32.

77. Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. – 492 с.

78. Сборная протяжка переменного резания [Текст] : а. с. 1188995 СССР : МКИ В23Д 43/00/ Э.К. Посвятенко, О.А. Розенберг, И.В. Лунгол, Ю.Ф. Бусел, В.В. Турич. № 3713885/25–08 ; заявл. 26.03.84 ; зарегистр. 01.06.85.

79. Сборная протяжка переменного резания [Текст] : а. с. 733193 СССР : МКИ В23Д 43/00/ О.А. Розенберг, Ю.Ф. Бусел, Э.К. Посвятенко, В.Н. Рогожин, Р.А. Кобылин. № 2513335/25–08; заявл. 01.08.77 ; зарегистр. 07.01.80.

80. Сверхтвёрдые материалы. Получение и применение: Монография в 6 томах. Том 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке. Под. ред. В.В. Рогова, К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «Алкон» НАНУ, 2006–260с.

81. Синергетика и усталостное разрушения металлов. Под редакцией доктора технических наук В.С. Ивановой. М.: Наука, 1989. 248 с.
82. Синтетические алмазы в машиностроении. Под редакцией доктора технических наук В.Н. Бакуля. К.: Наукова думка, 1976. 352 с.
83. Сніжної Г.В. Вплив магнітного стану аустенітної матриці на механічні властивості сталі AISI 321. Г.В. Сніжної // Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. 2014. №7 (114). С. 105 – 109.
84. Соколовский В.В. Теория пластичности. В.В. Соколовський. М.: Высшая школа .1969. 608с.
85. Спосіб комбінованої обробки поверхонь тертям [Текст]: патент на корисну модель 74723 Україна: МПК (2012.01) C23C 26/00 М.І. Черновол, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський, Е.К. Посвятенко, А.В. Кропівна. № 201204618 ; заявл. 12.04.2012 опубл. 12.11.2012, Бюл. №12. – 3 с.
86. Спосіб отримання деталі з дискретною поверхнею: МПК (2000) B23D 43/00/ Е.К. Посвятенко, І.П. Рибак.
87. Спосіб формування регулярного мікрорельєфу [Текст]: патент на корисну модель 119711 Україна: МПК (2017.01) B23D 43/00. І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський, Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, П.М. Ерьомін, О.О. Чернявський, Мохамед Р.Ф. Будар. 201702084 ; заявл. 06.03.2017 ; опубл. 10.10.2017, Бюл. №19.– 3 с.
88. Способ обработки внутренней поверхности заготовок типа труб [Текст] : а. с. 1549733 СССР : МКИ В24В 39/02/ А.В. Драчук, Э.К. Посвятенко, Ю.В. Гешелин, И.Н. Голобородий, Р.А. Маслов, В.П. Ильченко. № 4323246/25–27 ; заявл. 08.11.87 ; опубл. 15.03.90, Бюл. №10. – 5 с.
89. Способ протягивания глубоких отверстий [Текст] : а. с. 1199492 СССР : МКИ В23Д 43/00/ Э.К. Посвятенко, И.В. Лунгоя, В.В. Турич. № 3737161/25–08 ; заявл. 04.05.84 : опубл. 23.12.85, Бюл. № 47. – 3 с.

90. Способ протягивания глубоких отверстий [Текст] : а. с. 1400807 СССР: МКИ В23Д 43/00/ Э.К. Посвятенко, И. В. Лунгол, В.В. Турич. № 4163450/31–08 ; заявл. 19.12.86 ; опубл. 07.06.88, Бюл. №21. – 2 с.

91. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.Н. Степнов, А.В. Шаврин. М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.

92. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів: підручник. К.Е. Посвятенко, Р.В. Будяк, О.В. Мельник, В.Г. Нікітін. К.: Національний транспортний університет, 2019. 176 с.

93. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: Пер с англ. Г. Хакен. М.: Мир, 1985. – 419 с.

94. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Р. Хилл // Гостехтеорлитиздат, 1956.–407с.

95. Шевеля В.В. Фреттинг–усталость металлов. В.В. Шевеля, Г.С. Калда. Хмельницький: Поділля, 1998. – 300 с.

96. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента: Пер. с англ. Шенк Х. Москва: Мир. 1972. – 381 с.

97. Шепеленко И.В. Влияние состояния исходной поверхности на процесс ФАБО. И.В. Шепеленко, В.В. Черкун // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, Мелітополь, 2013. Вип.3 (1). С. 150 – 155.

98. Шепеленко И.В. Совершенствование процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки цапф шестерен гидронасосов/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Ремонт, восстановление, модернизация, 2012. №9. С.32–35.

99. Шепеленко І.В., Чернявський О.В., Посвятенко Е.К. Перспективи комбінованих плівочних антифрикційних покриттів деталей машин. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 18–й

Международной научно-практической конференции, 3–07 сентября 2018 г., г.Одесса Киев: АТМ України, 2018. С. 136.

100. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування: автореф. дис. д-ра техн. наук: 0.5.02.08. Шепеленко Ігор Віталійович; Національний технічний університет України “Київський технічний університет імені Ігоря Сікорського” МОН України. 2021. 43с.

101. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К. Інтенсифікація процесу нанесення антифрикційних покриттів. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали ХХІ Міжнародної науково – технічної конференції (06 – 09 жовтня 2020 р.), Київ, НТУ «КПІ», 2020. С.94 – 96.

102. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом: Монография. Ю.Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.

103. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення: ДСТУ ГОСТ 25142:2009 ДСТУ ГОСТ 25142: 2009. [Чинний від 01.02.2009]. К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 22с. (Національні стандарти України).

104. Designing the structures of discrete solidalloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Posviatenko E., and ect. // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies, 2020, vol. 3. №7 (105), PP. 57–65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203524>

105. Influence of material and the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak and other. Eastern- European journal of enterprise technologies, 2018, № 5/12 (95). P. 48 – 56 (Scopus).

106. ISO 14577–3:2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 3: Calibration of reference blocks. Geneva, ISO Publ, 2015. 8p.

107. Modeling of contact interaction of microroughnesses of treated surfaces during finishing antifriction non–abrasive treatment FANT.I. Shepelenko, Y. Nemyrovskiy, Y. Tsekhanov, E. Posviatenko, et al. // *Mechatronic Systems 2. Applications in Material Handling Processes and Robotics. Monografia*. 2021. pp. 237–246. Taylor Francis Group, CRC Press, Balkema book (2021), Boca Raton, London, New York, Leiden. ISBN 9781003225447. DOI: 10.1201/9781003225447-21

108. Nemyrovskiy Ya. B. The use of deforming broaching for enhancing the efficiency of cutter chisels. Ya. B. Nemyrovskiy, V. V. Krivosheya, I.V. Shepelenko et al. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020. №2. pp.61–66. (Scopus).

109. Nemyrovskiy Ya. Designing the structures of discrete solid–alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength/ Ya. Nemyrovskiy, I. Shepelenko, E. Posviatenko et al. // *Eastem–European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, Vol.3, NO 7 (105), pp. 57–65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203524>

110. Nemyrovskiy Ya. B. The use of deforming broaching for enhancing the efficiency of cutter chisels. Ya. B. Nemyrovskiy, V. V. Krivosheya, I.V. Shepelenko et al. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020. №2. pp. 61–66. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2Q20-2/061>

111. Posviatenko Eduard, Posviatenko Nataliia, Rybak Illia. Structural Metal Materials of Machine Parts with Regular Surface Reliefs // *Bezpiecznstwo i Materiały Eksploatacyjne. wybrane zagadnienia: monografia*, № 20. Rzeszow, 2020. P. 81–84.

112. Rasheed A. Abdullah. Experimental quality improvement of the application of antifriction coating/ Abdullah Rasheed A, Ihor Shepelenko, Eduard Posviatienko // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1706, First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials 13–14 August 2020, Coimbatore, India, pp. 1–11. <https://DOI:10.1088/1742-6596/1706/1/012187>.

113. Shepelenko I. Peculiarities of Interaction of Micro-roughnesses of Contacting Surfaces at FANT/ I. Shepelenko, Y. Nemyrovskiy, Y. Tsekhanov et al. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Perakovic D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham (2020), pp. 452–461. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-744>.

114. Shepelenko I.V. The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method/ I.V. Shepelenko, E.K. Posviatenko, V.V. Cherkun// *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*, Хмельницький, 2019. №1. С.35 –39.

115. Shepelenko Ihor. Restoration of bronze bushes by the method of surface plastic deformation / Ihor Shepelenko, Warouma Arifa, V.V. Sherkun // *International Journal of Engineering Technology*, 5 (2016), pp. 29–32. <https://doi.org/10.14419/iiet.v5iL565i>

116. Shepelenko I. Compression Mechanics of Cylindrical Samples with Radial Deformation Limitation I. Shepelenko, Y. Tsekhanov, Y. Nemyrovskiy et al. // In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. (2021), pp. 53–62. <https://doi.org/10.1007/978-3-03Q-77823-16>

117. Synergetic aspects of growth in machining of metal materials E.Posvyatenko, N. Posvyatenko, O. Mozghovyi, R. Budyak, and etc. // *Mechatronic Systems 2. Applications in Material Handling Processes and Robotics. Monografia*. 2021. pp. 121–130. Taylor Francis Group, CRC Press, Balkema book (2021), Boca Raton, London, New York, Leiden (Scopus). ISBN 9781003225447. DOI: 10.1201/9781003225447-21.

ДОДАТКИ

ОПИС КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб отримання деталі з дискретною поверхнею

Спосіб отримання деталей з дискретною поверхнею здійснюють обробкою різанням і деформуванням протягуванням, між вершинами рельєфу поверхні і деформуючим елементом установлюють пружну проміжну втулку, зовнішня поверхня якої пластично деформує вершини рельєфу, завдяки чому утворюється дискретна поверхня деталі з опорними площадками і впадинами.

Корисна модель належить до машинобудування, а саме до отримання деталей з дискретною поверхнею з канавками при їх виготовленні та відновленні.

Відомий спосіб обробки внутрішньої поверхні заготовки типу труб, згідно з яким роздачу здійснюють з утворенням повздовжніх виступів та впадин деформуючим протягуванням, а наступну розкатку здійснюють по сформованих при роздачі виступах [1]. Недоліком способу є відсутність опорних площадок на поверхні деталі.

Найбільш близьким аналогом є спосіб отримання дискретних поверхонь деталей машин поєднанням попередньої обробки різанням з наступною дією деформуючого протягування на вершини виступів нерівностей [2]. Недоліком даного способу є те, що безпосередня дія деформуючих елементів на вершині виступів викликає виникнення, крім радіальних, також і значних дотичних сил. В результаті відбувається небажане пластичне зміщення «змінення» вершин у напрямку руху протяжки. Це призводить до зниження несучої здатності поверхні і як експлуатаційних властивостей деталей.

В основу корисної моделі поставлено завдання підвищення несучої здатності дискретної поверхні деталі шлях використання пружної проміжної

втулки між вершинами виступів регулярного рельєфу поверхні і деформуючими елементами протяжки.

Поставлення завдання вирішується за рахунок того, що опорні площадки поверхні деталей утворюються пластичним деформуванням вершин канавок рельєфу деформуючим елементом протяжки через проміжні втулку.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де на фіг. 1 показано отримання канавок рельєфу поверхні деталі різанням; на фіг. 2 – розміщення проміжної втулки і деформуючого елемента відносно деталі перед пластичною деформацією вершин рельєфу; на фіг. 3 – готова дискретна поверхня деталі.

Пристрої складаються з різального інструменту 1, деталі 2 з попередню утвореним різанням рельєфом 3, проміжна втулка 4, деформуючого елемента 5, опори 6, готової дискретної поверхні деталі 2 з опорними площадками 7 і канавками 8 рельєфу.

Умовні позначення: v – швидкість обертання деталі; v_n – швидкість деформуючого елемента; φ – кути у плані різального інструменту і профілю одиничного елемента рельєфу після різання; S і t – відповідно крок і висота одиничного елемента; d – внутрішній діаметр проміжної втулки; $\varepsilon/2$ – деформація на сторону деформуючого елемента; a і b – відповідно довжина опорної площадки і готової канавки мікрорельєфу; Δ_φ і t_1 – відповідно кут розхилу і глибина канавки рельєфу.

Спосіб, що пропонується, рекомендується виконувати на токарних універсальних та протяжних верстатах наступним чином.

Різальний інструмент 1 і 3 твердого металокерамічного сплаву здійснює прямолінійний рух уздовж деталі 2 (рис. 1). Інструмент має геометричні параметри різальної частини у плані, що відповідають профілю канавок рельєфу 3 деталі 2 на поверхні якої буде створюватися рельєф, обертається відносно інструменту зі швидкістю $v \geq 100$ м/хв. Подача на оберт S та глибина різання разом зі швидкістю v і профілем інструменту φ

забезпечують утворення заданого попередавого профілю поверхні. Швидкість різання, матеріал інструменту і мастильно-охолоджувальна рідина на основі мінеральної чи рослинної оливи запобігають рельєф від адгезійних явищ. Операція попереднього формування рельєфу виконується на токарних верстатах за кінематикою точіння. Остаточне формування дискретної поверхні деталі 2 виконується на протяжних верстатах (рис. 2). При цьому на поверхні деталі зі зазором $< 0,005\text{мм}$ розміщують проміжну втулку 4 із сталі 65Г твердість 50-55 HRC і установлюють деталь зі втулкою в опору 6. Після цього через втулку пропускають наскрізь протяжку 3 деформуючим елементом 5 який виконує роботу з деформацією $\epsilon \leq 0,002 d$, де d -діаметр отвору проміжної пружної втулки. Деформація через втулку передається виступом попередньо утвореного рельєфу. На дискретні поверхні деталі 2 формується регулярний рельєф з опорною поверхнею 7 довжиною a кожного одиничного виступа (рис. 3). При цьому кожен виступ зазнає дії лиш радіальної складової сили протягування, чим запобігається «зминання» вершин у напрямку руху протяжного інструменту. Висота впадин t_1 завжди менша початкової висоти t , а кут з зазору $\Delta\phi$ - початкового кута ϕ .

Спосіб має ще один позитивний ефект, який полягає у холодному деформуючому зміцненні виступів рельєфу, а отже і опорних площадок дискретної поверхні.

Використання запропонованого способу отриманням деталей з дискретною поверхнею дозволить формувати такі поверхні з дискретністю 5-50% $(v/a+v)$ і отримувати об'єми для мастила у парах тертя.

Джерела інформації :

1. А.С 1549733 СССР; Способ обработки внутренней поверхности заготовки типа труб МПк В24В39/02; А.В.Драчук, Е.К. Посвятенко, Ю.В. Гетшклин, И.Н. Голобородый, Р.А. Маслов, В.П. Ильченко; Оpubл. 15.03.90, бюл. 10.
2. Посвятенко Е.К. Протягування как составляющая технологических процессов методов инженер поверхности деталей машин / Е.К.

Посвятенко – Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць .Х: НТУ «ХПІ» 2003, вип. 2 С.328-333.

Формула корисної моделі

Спосіб отримання деталей з дискретною поверхнею, що включає формування канавок рельєфу поверхні обробкою різанням і опорних площадок наступним деформуючим протягуванням, відрізняється тим, що з метою підвищення несучої здатності поверхні, між вершинами канавок і деформуючим елементом розміщують пружну проміжну втулку багаторазового використання, а опорні площадки поверхні деталі отримують холодною пластичною деформацією вершин канавок рельєфу деформуючим елементом протяжки через проміжну втулку.

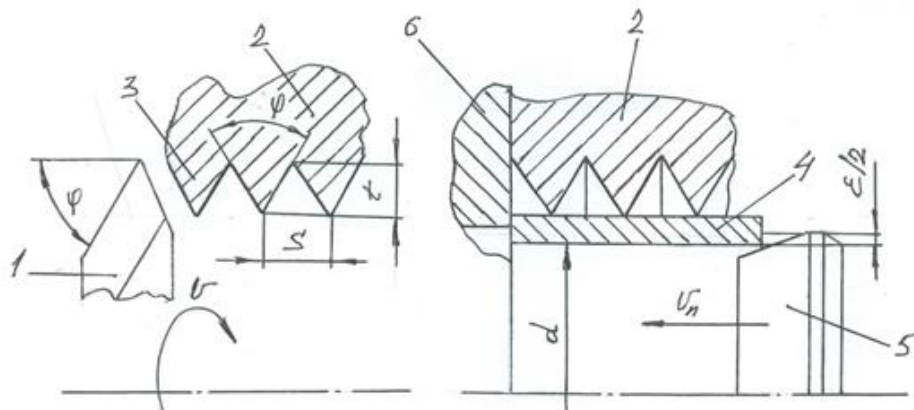


Рисунок 1

Рисунок 2

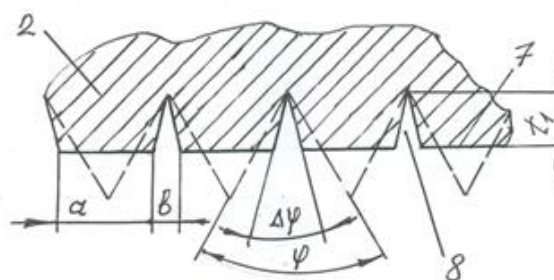


Рисунок 3

Додаток Б


 «ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Перший проректор
 Національного
 транспортного
 університету

 О.К. Гришук
 2 березня 2023р.
АКТ

Про використання результатів дисертаційної роботи аспіранта Іллі Рибак «Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту нанесенням регулярних рельєфів» у навчальному процесі Національного транспортного університету (НТУ).

м.Київ, березень 2023р

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавства» (ВРМ) професор Олександр Мельниченко, науковий керівник дисертаційної роботи професор кафедри Едуард Посвятенко та аспірант кафедри Ілля Рибак, склали цей акт на предмет використання результатів дисертаційної роботи Іллі Рибак «Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту нанесенням регулярних рельєфів» у навчальному процесі кафедри ВРМ Національного транспортного університету.

При виконанні дисертаційної роботи уперше створено класифікацію регулярних рельєфів за призначенням, зокрема для підготовки поверхонь деталей під нанесення захисних покриттів, у тому числі плівочних антифрикційних (ФАБО).

Метод підготовки поверхонь деталей засобів транспорту під нанесення захисних покриттів включено до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Газотермічна обробка металів» для студентів першого освітнього рівня за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». Лабораторна робота № 9 методичних вказівок виконується студентами за темою «Дослідження міцності покриттів, нанесених газотермічними методами на поверхню деталі з регулярними рельєфами».

Завідувач кафедри ВРМ професор		Олександр Мельниченко
Професор кафедри ВРМ професор		Едуард Посвятенко
Аспірант		Ілля Рибак

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Видання, які входять до проіндексованих баз даних Scopus:

1. Posviatenko, E., Posviatenko, N., Budyak, R., Shvets, L., Paladiichuk, Y., Aksom, P., Rybak, I., Sabadash, B., & Hryhoryshen, V. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 5/12 (95). pp. 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142924>.

URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/142924>

Здобувачем розроблено план проведення дослідження і загальну методику проведення експериментів.

Фахові видання:

2. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин рельєфами поверхні. *Вісник Національного транспортного університету. Серія: Технічні науки*. 2021, Вип. 1(48). С. 270–282. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-270-282>.

URL: <http://visnik.ntu.edu.ua/pages/issue-48-en/articles/27.html>

Здобувачем розроблена модель заглиблення лінійного індентора у зразок, конкретизована методика досліджень, описані експериментальні результати дослідження.

3. Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин холодним пластичним деформуванням. *Вісник Національно Транспортного університету. Серія: Технічні науки*. 2022, Вип. 1(51). С. 314–322. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-314-322>

URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/51/314_322.pdf

Здобувачем розроблена класифікація рельєфів за призначенням, механіка заглиблення лінійного індентора у зразок, випробувано зразок багатозубого інструменту.

4. I.V. Shepelenko, E.K. Posviatenko, Y.B. Nemyrovskiy, V.V. Cherkun, I.P. Rubak. Creation of new technobogical methods for surface engineering based on broaching. *Problems of Tribologi*. V.27. №2/104–2022. pp. 6–12. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-6-12>

URL: <http://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/841/1307>

Здобувачем запропоновано і визначено експериментально властивості дискретних поверхонь

Монографії:

5. Посвятенко Е.К., Рибак І.П., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В. Протяжки для утворення регулярного рельєфу. Протягування та протяжний інструмент: Монографія. Кропивницький, 2020. С. 246–273. ISBN 978–617–7813–08–7.

URL: <https://www.amazon.com/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D1%82%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B6%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D1%96%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82-Ukrainian/dp/6202521139?asin=6202521139&revisionId=&format=4&depth=1>

Здобувачем здійснено аналіз відомих методів отримання рельєфів. Визначено недоліки цих методів.

6. Посвятенко Е.К., Шепеленко І.В., Рибак І.П. Утворення регулярного рельєфу протягуванням. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: Монографія. Кропивницький, 2021. С. 362–397. ISBN 978–617–7813–32–2.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=JwU_B&S21ALL=%28%3C

10. Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Створення рельєфів поверхні деталей засобів транспорту лінійним індентуванням. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: Матеріали міжнародна. науково-технічна. конференція. м. Київ, 6–9 жовтня 2020 р., Київ, 2020. С. 182–185.

URL: <http://conf.mmi.kpi.ua/2020>

Здобувачем проаналізовано методи створення рельєфів.

11. Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Роль технологічних регулярних мікро- та макрорельєфів поверхні деталей машин. *Тези доповідей LXXVI Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів.* м. Київ, 20–21 травня 2020 р., Київ 2020. С. 12–13.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWIV/view>

Здобувачем описано роль рельєфів у підвищенні експлуатаційних властивостей деталей.

12. Рибак І.П., Бобро А.М., Посвятенко Е.К. Отримання зубчастих коліс внутрішнього зачеплення редукування. *Тези доповідей LXXVII Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів.* м. Київ, 5 жовтня 2021 р., Київ, 2021. С. 9.

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view

Здобувачем проведено експериментальну частину отримання зубчастих коліс.

13. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Рибак І.П. Механіка заглиблення лінійного індентора у поверхню деталі. *Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 22-ї Міжнародної науково-технічної конференції.* м. Київ, 15–16 червня 2022 р., 2022. С. 101–106.

Здобувачем розроблено принципи механіки заглиблення індентора з урахуванням тертя.

14. Посвятенко Е.К., Рибак І.П. Метод формування канавок для поділу трубчастих деталей на частини. *Тези доповідей LXXVIII Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів.* м. Київ, 2–3 листопада 2022 р., Київ, 2022. С. 10. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78

URL:<https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view>

Здобувачем визначено параметри лінійних інденторів, що необхідні для максимального вичерпування пластичних властивостей оброблюваного матеріалу.