

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПРИГОРОВСЬКА ТЕТЯНА ОЛЕКСІВНА

УДК 621.91:621.757

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ
БУРОВИХ ДОЛІТ РІЖУЧЕ-СТИРАЮЧОЇ ДІЇ**

05.02.08 – технологія машинобудування

Галузь знань
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(доктора філософії)

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

Т.О. Пригоровська

Науковий керівник: Роп'як Любомир Ярославович, доктор технічних наук,
с.н.с., доцент

Тернопіль – 2021

АНОТАЦІЯ

Пригоровська Т. О. Технологічне забезпечення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя МОН України; Тернопіль, 2021.

У дисертаційній роботі визначено, науково обґрунтовано та розв’язано актуальне науково-технічне завдання щодо розроблення технологічних заходів для підвищення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії шляхом дослідження та вдосконалення технологічного забезпечення виготовлення доліт та використання системного підходу до формування якості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку науково-прикладних основ удосконалення технологічного забезпечення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії. При цьому *вперше*:

- запропоновано системний підхід до забезпечення якості доліт ріжуче-стираючої дії, який включає стадії як нарізання конічної замкової нарізі та зміцнення нарізі із урахуванням кута підйому гвинтової лінії, так і складання виробів із конічними нарізевими з’єднаннями для роботи в екстремальних умовах;

- визначено момент згвинчування елементів нарізевих з’єднань із різних матеріалів із урахуванням різниці температур складання та експлуатації в свердловині;

- розроблено комплексну модель забезпечення якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії.

Набули подальшого розвитку:

- питання технології виготовлення та зміцнення конічних нарізевих з'єднань, які працюють у екстремальних умовах за високих експлуатаційних температур, а також виконання зварювальних операцій корпусів і лопатей доліт під час складання для забезпечення точності;
- дослідження залежності основних взаємозв'язків конструкторських і технологічних факторів для забезпечення точності виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії;
- науково обґрунтовані технологічні рішення із забезпечення якості виготовлення, контролю параметрів доліт ріжуче-стираючої дії для підвищення їх експлуатаційних показників.

Практичне значення отриманих результатів.. На основі теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання і стендових випробувань розроблено і впроваджено технологічні процеси виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії, які передбачають раціональний вибір способу отримання заготовок корпусів доліт, рекомендації із нарізання, шліфування, та зміцнення конічних замкових нарізей, методику контролю геометричних параметрів доліт ріжуче-стираючої дії. Розроблено контрольний пристрій для оцінювання биття і точності виготовлення доліт та стенд для випробовування доліт. Розроблено комп'ютерні програми для дослідження впливу похибок виготовлення деталей нарізевх замкових з'єднань на розподіл еквівалентних напружень, які виникають у з'єднаннях деталей.

Дисертація присвячена розробленню технологічних заходів щодо підвищення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії шляхом дослідження та вдосконалення технологічного забезпечення якості виготовлення доліт та використання системного підходу до формування якості.

Проаналізовано умови роботи, технологічні процеси та матеріали для виготовлення заготовок корпусів, ніпелів та ріжучих елементів, механічної обробки конічних замкових нарізей доліт ріжуче-стираючої дії та складання доліт.

Проведено математичне моделювання взаємодії із гірською породою долота, яке має похибки виготовлення, для визначення кінематичних та силових параметрів його роботи, досліджено вплив похибок виготовлення та складання на величину кінематичних та силових параметрів роботи долота для обґрунтування режимів випробовування доліт. Обґрунтовано способи отримання заготовок корпусів доліт, технологічні режими литва та складання доліт, а також схеми виконання зварних швів для підвищення точності доліт.

Досліджено вплив технологічних режимів різання, зміцнення конічних нарізей та методів складання на показники якості бурових доліт. Встановлено емпіричні залежності величин шорсткості від технологічних параметрів різання під час шліфування конічних замкових нарізей на деталях зі сталі та твердого сплаву.

Розроблено технологічне оснащення для контролю конічних замкових нарізей та геометричних параметрів доліт зазначеного типу, а також обладнання для стендових випробовувань доліт. Результати досліджень впроваджено у виробництво та навчальний процес.

Ключові слова: технологічний процес, бурове долото, похибки виготовлення, конічна нарізь, шліфування, зміцнення, напружено-деформований стан.

Список публікацій здобувача

1. Pryhorovska T. O. Probabilistic estimate of PCD drill bit wear rate / T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2014. – Вип. 5. – С. 39 – 45. (Scopus)
2. Pryhorovska T.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits / T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy, I. O. Kudriavtsev // *Petroleum Exploration and Development*. – 2015. – Vol. 42. – Iss. 6. – P. 888 – 892. (Scopus)
3. Pryhorovska T. O. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement / T. O. Pryhorovska // *Machining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. – Iss. 1. – P. 37– 66. (Scopus)
4. Pryhorovska T. Rock heterogeneity numerical simulation as a factor of drill bit instability / T. Pryhorovska // *Engineering Solid Mechanics*. – 2018. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 315–330. (Scopus)
5. Pryhorovska T. Analytical estimation of tooth strength, restored by direct or indirect restorations / O. Bulbuk, A. Velychkovych, V. Mazurenko, L. Ropyak, T. Pryhorovska // *Engineering Solid Mechanics*. – 2019. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 193–204. (Scopus)
6. Pryhorovska T.O. Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric form made of different materials / R. M. Tatsiy, O. Y. Pazen, S. Y. Vovk, L. Y. Ropyak, T. O. Pryhorovska // *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. – 2019. –Vol. 13. – Iss. 2. – P.36–55. (Scopus)
7. Pryhorovska T. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas / A. Velychkovych, A. Andrusyak A., T. Pryhorovska, L. Ropyak // *Oil & Gas Science and Technology*. – 2019. –Vol. 74. – Art. No. 65. – P.9. (Scopus)
8. Pryhorovska T.O. Analysis of Materials and Modern Technologies for PDC Drill Bit Manufacturing / L. Y. Ropyak, T. O. Pryhorovska, K. H. Levchuk // *Progress in Physics of Metals*. – 2020. – Vol. 21. – Iss. 2. – P. 274–301. (Scopus)
9. Pryhorovska T. Machining Error Influence on Stress State of Conical Thread Joint Details / T. Pryhorovska, L. Ropyak // *IEEE 8th International Conference on*

Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL): 06–08 September 2019 : proceedings.– Sozopol (Bolgaria). – 2019. – P. 493–497. (Scopus)

10. Pryhorovska T.O. Study on grinding mode effect on external conical thread quality / L. Ya. Ropyak, V.S. Vytvytskyi, A.S. Velychkovych, T.O. Pryhorovska, M.V. Shovkoplias // Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies ICAMaT 2020: 29–30 October 2020. – – Bucharest (Romania).– 2020. – P. 12. (Scopus)

11. Пригоровська Т.О. Дослідження напруженого стану литої заготовки лопатевого долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, І.С. Когут, В.Г. Панчук, Л.О. Борушак, І.О. Шуляр // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2017. – Вип. 2 (2). – С. 135 – 141.

12. Пригоровська Т.О. Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників / Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як, П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак // Міжвузівський збірник «Наукові Нотатки». – Луцьк. – 2018. – Вип. 63. – № 1. – С. 177 – 182.

13. Пригоровська Т.О. Дослідження впливу точності виготовлення деталей на розподіл навантаження між витками конічного з'єднання / Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, Л.Я. Роп'як // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2019. – Вип. 114 (1). – С. 81–90.

14. Пригоровська Т.О. Вивчення форми ріжучої частини долота типу PDC з метою оптимізації конструкції: дослідження кута нахилу лопатей / Т.О. Пригоровська, О.В. Пригоровський // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2019.– Вип. 47 (2). – С. 32-41..

15. Пригоровська Т.О. Дослідження геометричних особливостей конічних нарізей / І.П. Тарас, Т.О. Пригоровська// Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2020. – Вип. 48 (1). – С.16-22.

16. Pryhorovska T. Finite-element simulation of PDC drill bit's operational stress-strain state / T. Pryhorovska, O. Pryhorovskyi // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2020. – Вип. 1. – №– 97. – С. 45—56.

17. Pryhorovska T.O. Simulation of drilling equipment structural elements [Electronic resource] / L.Ya. Ropyak, T.O. Pryhorovska – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 93 p. (ISBN-13: 978-620-0-45802-5). Mode of access: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-620-0-45802-5/simulation-of-drilling-equipment-structural-elements>. (viewed on June 01, 2020). – Title from the screen.
18. Пригоровська Т. О. Дослідження процесу різьбошліфування / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»: 01 – 03 листопада 2017 р. – Краматорськ: Донбаська машинобудівна академія, 2017. – С. 200–201.
19. Пригоровська Т.О. Вплив похибок виготовлення деталей на напружено-деформований стан кінцевого нарізеного з'єднання / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах»: 30 листопада – 2 грудня 2017 р. – Київ: «Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. – С. 325–328..
20. Пригоровська Т. О. Дослідження впливу похибок виготовлення бурового долота і бурильної труби на роботу долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як // Матеріали VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні»: 6 – 10 лютого 2018. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. – С. 130–132.
21. Пригоровська Т. О. Оптимізація режимів різання при різьбошліфуванні нарізеної поверхні / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: 10 – 12 травня 2018 р. – Чернігів, Чернігівський національний технологічний університет, 2018. – С.200–201.
22. Пат. на корисну модель № 106084. Україна, МПК (2016.01) G01B 5/14. Пристрій для контролю биття бурового долота / Т.О. Пригоровська,

Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201804522 ; заявл. 24.04.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16..

23. Пат. на корисну модель № 129444. Україна, МПК (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Пристрій для контролю параметрів бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201805867; заявл. 25.05.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. 20.

24. Пат. на корисну модель № 131571. Україна, МПК (2016.01) E21B 21/06. Пристрій для дослідження фільтрації бурових технологічних рідин через зразки гірських порід / І.І. Чудик, А.Р. Юрич, А.І. Різничук, Т.О. Пригоровська, О.С. Малишевська, Л.Я. Роп'як – № u201806981 . заявл. 21.06.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2.

25. Пат. на корисну модель № 140283. Україна, МПК (2016.01) C04B 18/04, C04B 18/06, C04B 18/20. Будівельна сировинна суміш з техногенних відходів / В.Л. Челядин, Л.І. Челяд

ин, М.М. Богославець, Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович – № u201908295 ; заявл. 16.07.2019 ; 10.02.2020, Бюл. № 3.

26. Програма для дослідження впливу похибок виготовлення деталей на розподіл еквівалентних напружень у нарізевому конічному трубному з'єднанні «PipeThread» / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79153; дата реєстрації 18.05.2018, Бюл. № 49-2018.

27. Програма для дослідження впливу похибок виготовлення деталей різьбового замкового з'єднання на розподіл еквівалентних напружень, які виникають при з'єднанні деталей «ToolJoint» / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79154; дата реєстрації 18.05.2018, Бюл. № 49-2018.

28. Комп'ютерна програма. «Моделювання процесу мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів» («PEO-Andromeda (Plasma electrolytic oxidation)») / Г.В. Григорчук, А.П. Олійник, Л.І. Григорчук, В.С. Витвицький, Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, О.В. Корнута // Свідоцтво

про реєстрацію авторського права на твір № 92700. Дата реєстрації 08.10.2019, Бюл. № 55-2019.

29. Комп'ютерна програма. «Розрахунок на жорсткість проміжних валів» («ZhVK») / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як, В.С. Витвицький, Т.О. Пригоровська // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 9539. Дата реєстрації 17.01.2020. Бюл. № 57- 2020.

ABSTRACT

Pryhorovska T.O. Technological providing of PDC drill bit quality. – Qualifying scientific work. Published as a manuscript.

The dissertation for a Candidate Degree in Engineering by specialty 05.02.08 – Technology of Mechanical Engineering (13 – mechanical engineering). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas of the Ministry of Education and Science of Ukraine; Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The dissertation specifies, scientifically substantiates, and solves the current scientific and technical problem of developing technological measures to improve PDC drill bit quality by enhancing the technological support of drill bit manufacturing and using the systematic approach to quality formation.

The scientific novelty of the obtained results lies in the further development of scientific and applied bases for improving the technological quality assurance of the production of drill bits of cutting and abrasion action. *For the first time:*

- the systematic approach to PDC drill bit quality including both cutting conical locking thread and its hardening taking into account lead angle, and assembly of products with conical threaded joints for operation in extreme conditions is proposed;
- screwing torque of threaded details made of various materials taking into account assembling and operation temperature difference is defined; and
- a comprehensive model of PDC drill bit quality assurance is developed.

Further developed:

- issues of conical threaded detail manufacturing and strengthening that work in extreme conditions at high operating temperatures, as well as the performance of welding operations of PDC drill bit bodies and blades during assembly to ensure accuracy;
- relations of design and technological factors of manufacturing to ensure the PDC drill bit quality;

- scientifically substantiated technological decisions on manufacturing, drill bit's option control to increase drill bit's performance.

Practical value of the results. Based on theoretical researches, simulations, and bench tests, technological processes of PDC drill bit manufacturing and implementation are developed providing a rational choice of body blank obtaining method, recommendations on cutting, grinding, and strengthening of conical locking threads, as well as methods of PDC option controlling. A control device to evaluate drill bit radial runout and a bench to test bits are developed. Computer programs to study manufacturing error effect of threaded joints on equivalent stress the distributions is studied.

Operation conditions, technology and materials used for bit's body, nipples and cutting elements, machining of conical locking threads, and assembling of PDC drill bits are analyzed.

A mathematical modeling of PDC drill bit – rock interaction to specify kinematic and force options of bit's operation, studying of manufacturing and assembling error effect on kinematic and force options to specify drill bit test modes in order to specify rational technological options are carried out. Methods of blank manufacturing for bit's body, technological modes of casting and welding, as well as welding schemes to increase drill bit accuracy are grounded.

The influence of technological modes of cutting and hardening of conical threads and technological modes of assembling on PDC drill bit quality are studied. Empirical relations of roughness and technological modes of conical thread grinding of steel and hard alloy are specified.

Technological equipment for control of conical threads and PDC drill bit geometrical parameters, as well as equipment for bench tests of drill bits are developed. The results of researches are implemented in manufacture and educational process.

Keywords: technological process, drill bit, manufacturing errors, conical thread, grinding, hardening, stress-strain state.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ДОЛІТ, ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
1.1 Проблема забезпечення якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії	25
1.2 Технологічні рішення, що використовуються для виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії	29
1.2.1 Технологічні рішення, що використовуються для виготовлення різців доліт	31
1.2.2 Технологічні рішення, що використовуються під час виготовлення корпусів доліт ріжуче-стираючої дії	34
1.2.3 Технологічні рішення для закріплення твердосплавних породоруйнівних елементів на лопатях долота	40
1.2.4 Технологічні рішення для складання корпусів доліт із ніпелем	43
1.2.5 Технологічні рішення, що використовуються для нарізання та/або зміцнення нарізі на ніпелі долота	45
1.3 Постановка задачі досліджень	47
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ВИПРОБОВУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДОЛІТ НА ЇХ РОБОТОЗДАТНІСТЬ	50
2.1 Визначення основних похибок на кожному із етапів виготовлення долота і їхній вплив на показники відпрацювання долота. Побудова розмірного ланцюга забезпечення точності зовнішнього діаметра	51
2.2 Вплив похибок на міцність лопатей	54

	13
2.3 Дослідження силової взаємодії різця з гірською породою	65
2.4 Скінчено-елементна перевірка міцності лопатей за наявності похибки виготовлення долота (биття)	68
Висновки до розділу 2	71
РОЗДІЛ 3	
ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДОЛІТ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ВИПРОБУВАНЬ	73
3.1 Матеріали і обладнання для виготовлення моделей доліт	73
3.1.1 Матеріали для виготовлення корпусів моделей доліт	73
3.1.2 Припаювання різців до лопатей	73
3.1.3 Приварювання лопатей до корпусу доліт	74
3.1.4 Приварювання ніпелю до корпусу долота	76
3.1.5 Виготовлення литих корпусів бурових доліт	76
3.2 Скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану заготовок литих корпусів	76
3.3 Методика і засоби для контролю поверхонь доліт	79
3.3.1 Порядок контролю зовнішньої замкової конічної нарізі	79
3.3.2 Розроблення пристрою для вимірювання шорсткості нарізевих поверхонь	80
3.3.3 Розроблення пристрою для вимірювання деформацій в нарізевому конічному з'єднанні	82
3.4 Розроблення технології фрикційного зміцнення замкової конічної нарізі	83
3.4.1 Удосконалення конструкції інструменту для фрикційного зміцнення конічної замкової нарізі	83
3.4.2 Технологія фрикційного зміцнення і режими фрикційного зміцнення	93

3.4.3 Випробовування зміцнених нарізевих з'єднань на втомну міцність	96
3.5 Дослідження шліфування конічної замкової нарізі	99
3.5.1 Планування експерименту під час шліфування конічної замкової нарізі	100
3.6 Розроблення обладнання для моделювання роботи доліт ріжуче-стираючої дії для визначення впливу точності виготовлення на показники роботи	103
3.6.1 Конструкція установки для моделювання роботи доліт ріжуче-стираючої дії	103
3.6.2 Методика проведення експериментальних досліджень	104
3.7 Розроблення пристроїв для контролю нарізі та биття бурового долота	107
3.7.1 Пристрій для контролю нарізі бурового долота	108
3.7.2 Пристрій для контролю биття бурового долота	108
Висновки до розділу 3	114

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ ОТРИМАННЯ ЛИТИХ ТА ЗВАРНИХ ЗАГОТОВОК КОРПУСІВ ДОЛІТ РІЖУЧЕ-СТИРАЮЧОЇ ДІЇ	116
4.1 Скінчено-елементне дослідження напружено-деформованого стану заготовок корпусів доліт, отриманих литтям	116
4.2 Вплив технології виконання зварних швів під час складання на точність виготовлення бурових доліт	121
4.3 Експериментальні дослідження впливу послідовності виконання зварних швів на точність виготовлення бурових доліт	130
4.4 Розроблення рекомендацій із вибору методу отримання заготовки	133
Висновки до розділу 4	134

РОЗДІЛ 5

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
НА ЯКІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ
ПОКАЗНИКИ БУРОВИХ ДОЛІТ** 136

- 5.1 Визначення розподілу навантажень між витками конічного
нарізевого з'єднання аналітичним методом 136
- 5.2 Дослідження впливу конструктивних і технологічних факторів на
розподіл напружень і деформацій у конічних нарізевих з'єднаннях із
різних матеріалів 146
- 5.3 Експериментальне визначення деформацій деталей нарізевого
конічного з'єднання 153
- 5.4 Визначення моменту згвинчування під час складання корпусу
долота із ніпелем та долота із буровою колоною 156
- 5.4.1 Складання долота із буровою колоною 156
- 5.4.2 Скінчене-елементне дослідження впливу фактичних
розмірів нарізі на момент згвинчування 162
- 5.5 Оптимізація режимів різання під час шліфування нарізевій
поверхні 165
- 5.6 Експериментальні дослідження на втомну міцність зміцнених
нарізевих з'єднань 172
- 5.7 Результати експериментального вимірювання биття моделі долота
в залежності від величини неспіввісності ніпеля і корпусу 175
- 5.8 Розроблення моделі забезпечення технологічного забезпечення
точності та якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії для
підвищення експлуатаційних показників 176
- 5.9 Практичне застосування результатів досліджень 182
- Висновки до розділу 5 183
- ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ** 185
- СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ** 188

ДОДАТКИ	206
Додаток А – Список публікацій здобувачки	207
Додаток Б – Кресленики бурового долота	212
Додаток В – Результати моделювання напружено-деформованого стану долота	216
Додаток Д – Результати вимірювань деформацій деталей у конічному нарізевому з'єднанні	219
Додаток Е – Акт впровадження в виробництво	220
Додаток Ж – Комплект документів на технологічний процес виготовлення бурового долота	221
Додаток К – Розрахунок економічного ефекту	222
Додаток Л – Акт впровадження в навчальний процес	225

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Схвалена урядом Енергетична стратегія України до 2035 року першочерговим завданням вважає розвиток власної ресурсної бази і нарощення видобутку, що неможливо без використання високоефективного породоруйнівного інструменту. Якість породоруйнівного інструменту визначається як технологічними, так і експлуатаційними показниками, зазначеними у національних стандартах, та забезпечується власними розробками виробників. Проте, відповідність параметрів породоруйнівного інструменту, зазначеним у відповідних стандартах, не означає ефективності його експлуатації, тому проблема забезпечення якості породоруйнівного інструменту шляхом удосконалення технології виготовлення інструменту є актуальною.

Сьогодні долота ріжуче-стираючого типу (*PDC – polycrystalline diamond compact*) широко використовуються під час буріння порід I-VII категорії твердості і I-VIII категорії абразивності на нафту і газ, витісняючи при цьому тришарашкові долота, що пояснюється такими перевагами доліт зазначеного типу: високою зносостійкістю ріжучих елементів; відсутністю вузла підшипникової опори, що підвищує проходку інструменту і зменшує кількість спускально-піднімальних операцій; вищою механічною швидкістю, що зменшує собівартість 1 м проходки; відсутністю рухомих елементів в конструкції доліт, що виключає аварійні ситуації, які пов'язані з ними; конструкція доліт дозволяє ремонтувати і відновлювати їх після багатократного використання; застосування цих доліт дає змогу збільшити проходку на долото і механічну швидкість за менших витрат енергії на руйнування породи, оскільки порода руйнується шляхом різання.

На основі аналізу наукового доробку як вітчизняних вчених В.П. Бондаренка, Л.О. Боруцака, Ю.М. Бугая, О.Ю. Витязя, І.В. Воевідка, В.В. Врюкала, О.Т. Драганчук, Я.М. Дрогомирецького, Є.І. Крижанівського, А.Л. Майстренка, В.М. Мойсишина, О.Р. Ониська, В.Г. Панчука, Л.Д. Пітулей,

Д.Ю. Петрини, Ю.Д. Петрини, А.М. Сліпчука, І.І. Чудика, І.О. Шуляр, Л.Є. Шкіци, Р.С. Якіма, І.С. Якіма та ін., так і зарубіжних – В.А. Барвінка, І.В. Безбородової, О.Г. Блінкова, М.А. Борисова, Р.В. Буткевича, А.М. Журавльова, А.П. Мамонтова, Д.Є. Мосіна, Г.М. Сорокіна, А.Р. Яхіна та учнів встановлено, що дослідники, переважно, зосереджуються на окремих питаннях технології виготовлення доліт (наприклад, тільки паяння різців), тоді як системний підхід до технологічного забезпечення якості виготовлення доліт типу ріжуче-стираючої дії не розглядався. Зокрема потребують дослідження питання впливу технологічних параметрів механічної обробки і зміцнення конічних нарізей, а також методів складання та схем зварювання на показники точності доліт.

На основі результатів проведеного аналізу існуючих і перспективних технологічних рішень та методів підвищення точності і забезпечення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії здійснено постановку завдань досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у межах планових державних та господарсько-договірних науково-дослідних робіт з розвитку нафтогазопромислового комплексу України, зокрема держбюджетної науково-дослідної роботи за темою “Наукове обґрунтування створення мобільних установок і інструменту для буріння та ремонту свердловин вантажопідйомністю 1470 кН”, ДР № 0101U001667 (здобувачка – виконавець), господарського договору № 139/03 «Розробка та виготовлення долота ріжучої дії діаметром 292,9 мм, оснащеного породоруйнівними елементами нового технічного рівня для буріння порід середньої твердості» (замовник – Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ (здобувачка – виконавець); а також є складовою досліджень, що виконувалися в межах науково-дослідної роботи, яка фінансується за рахунок видатків загального фонду державного бюджету Д 4–19–П (РК 0119U002231) «Розробка комплексної технології покращення експлуатаційних властивостей виробів машинобудування мікродуговим

оксидуванням» (здобувачка – відповідальний виконавець), та відповідає напрямкам і завданням «Енергетична стратегія України «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» на період до 2035 року», схваленою Розпорядженням КМУ від 18 серпня 2017 р. № 605-р.

Мета роботи – дослідити та вдосконалити технологічне забезпечення виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії шляхом використання системного підходу до формування їх якості задля підвищення ресурсу їх роботи.

Відповідно до мети визначено **завдання** дослідження:

1. Проаналізувати умови роботи, технологічні процеси та матеріали для виготовлення заготовок корпусів, ніпелів та ріжучих елементів, механічної обробки конічних замкових нарізей та складання доліт ріжуче-стираючої дії.

2. Провести математичне моделювання взаємодії долота із гірською породою для визначення кінематичних та силових параметрів його роботи, дослідити вплив похибок виготовлення та складання на величину кінематичних та силових параметрів роботи долота, що необхідно для обґрунтування режимів випробовування доліт вказаного типу під час вибору раціональних технологічних параметрів процесів виготовлення деталей та складання доліт.

3. Обґрунтувати способи отримання заготовок корпусів доліт, технологічні режими литва та зварювання, а також схеми виконання зварювальних швів для підвищення точності складання доліт.

4. Дослідити вплив технологічних режимів нарізання і зміцнення конічних нарізей та методів складання на показники якості бурових доліт та встановити емпіричні залежності величин шорсткості від технологічних режимів різання під час шліфування конічних замкових нарізей на деталях зі сталі та твердого сплаву.

5. Розробити технологічне оснащення для контролю конічних замкових нарізей та геометричних параметрів бурових доліт, а також обладнання для стендових випробовувань доліт і впровадити результати досліджень у

виробництво та навчальний процес.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виготовлення деталей і складання бурових доліт ріжуче-стираючої дії зі зміцненням робочих поверхонь конічних нарізей та чинники формування їх експлуатаційних показників.

Предмет дослідження – взаємозв'язок конструкторських та технологічних факторів, що забезпечують якість виготовлення та зміцнення робочих поверхонь конічних нарізей бурових доліт ріжуче-стираючої дії, складання роз'ємних та нероз'ємних з'єднань бурового інструменту, виготовлених із різних матеріалів, а також способи підвищення його якості.

Методи дослідження. У роботі використано системний підхід до вивчення об'єкта дослідження, що передбачає математичне моделювання, використання теоретичних положень технології машинобудування, механіки, теорії різання, а також результатів аналітичних та експериментальних досліджень.

Теоретичні дослідження базуються на теорії технології машинобудування, теорії різання, механіки деформівного твердого тіла, а також на методах математичного і комп'ютерного моделювання. Для експериментальних досліджень використано методи фізичного моделювання, математичного планування експериментів, дисперсійного і кореляційного аналізів, метод скінченних елементів. Експериментальні результати отримано на розробленому та/або модернізованому технологічному та випробовувальному обладнанні.

Наукова новизна і теоретичне значення: полягає в подальшому розвитку науково-прикладних основ удосконалення технологічного забезпечення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії. При цьому *вперше:*

- запропоновано системний підхід до забезпечення якості доліт ріжуче-стираючої дії, який включає стадії як нарізання конічної замкової та зміцнення нарізі із урахуванням кута підйому гвинтової лінії, так і складання виробів із

конічними нарізевими з'єднаннями для роботи в екстремальних умовах;

- визначено момент згвинчування елементів нарізевих з'єднань із різних матеріалів із урахуванням різниці температур складання та експлуатації в свердловині;

- розроблено комплексну модель забезпечення якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії.

Набули подальшого розвитку:

- питання технології виготовлення та зміцнення конічних нарізевих з'єднань, які працюють у екстремальних умовах за високих експлуатаційних температур, а також виконання зварювальних операцій корпусів і лопатей доліт під час складання для забезпечення точності;

- дослідження залежності основних взаємозв'язків конструкторських і технологічних факторів для забезпечення точності виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії;

- науково обґрунтовані технологічні рішення із забезпечення якості виготовлення, контролю параметрів доліт ріжуче-стираючої дії для підвищення їх експлуатаційних показників.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудівної галузі. На основі теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання і стендових випробувань розроблено і впроваджено технологічні процеси виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії, які передбачають раціональний вибір способу отримання заготовок корпусів доліт, рекомендації із нарізання, шліфування, та зміцнення конічних замкових нарізей, методику контролю геометричних параметрів доліт ріжуче-стираючої дії. Розроблено контрольний пристрій для оцінювання биття і точності виготовлення доліт та стенд для випробовування доліт. Розроблено комп'ютерні програми для дослідження впливу похибок виготовлення деталей нарізевих замкових з'єднань на розподіл еквівалентних напружень, які виникають у з'єднаннях деталей. Наукові результати захищено 4 патентами України на корисні моделі. Результати, одержані в роботі, впроваджено у навчальний процес підготовки

студентів, які навчаються за освітньо-кваліфікаційною програмою бакалаврів і магістрів ІФНТУНГ за спеціальністю 131 – Прикладна механіка, та у виробництво в ТзОВ «Інтербур».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати роботи отримані здобувачкою самостійно. Постановка та формулювання основних завдань досліджень, опрацювання структури, змісту роботи, а також узагальнення наукових результатів виконані разом з науковим керівником. У працях, що написані у співавторстві, здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження та/або узагальнено висновки [1, 2]; запропоновано загальну ідею дослідження напруженого стану шаруватих конструкцій [5]; запропоновано загальну ідею дослідження [6]; розроблено математичну модель проведення досліджень, проведено розрахунки [7]; здійснено аналіз технологічних процесів та матеріалів для виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії та узагальнено результати досліджень [8]; виконані розрахунки впливу похибок виготовлення на розподіл напружень і деформацій в елементах нарізеного з'єднання [9]; поставлено задачі дослідження, виконано дослідження режимів різання під час шліфування нарізі [10]; запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження, виконані числові дослідження [11]; здійснено розроблення конструкторсько-технологічного забезпечення, обґрунтовано розташування та технологію виготовлення озброєння PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників [12]; запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження, запропоновано математичну модель, виконано розрахунки та узагальнено висновки [13]; запропоновано загальну ідею дослідження, зроблено постановку задачі дослідження, виконано комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану долота ріжуче-стираючої дії та узагальнено висновки [14]; запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження [15]; запропоновано загальну ідею дослідження, зроблено постановку задачі дослідження, виконано комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану долота

ріжуче-стираючої дії та узагальнено висновки [16]; поставлено задачі дослідження та узагальнено результати досліджень [17]; поставлено задачі, виконано дослідження режимів різання при нарізешліфуванні нарізевої поверхні [18]; проведено моделювання напружено-деформованого стану кінцевого нарізевого з'єднання [19]; виконано дослідження впливу похибок виготовлення бурового інструменту на працездатність [20]; оптимізовано режими різання [21]; запропоновано загальну ідею створення корисної моделі [22]; запропоновано введення до складу пристрою засобу для витягування нарізевого калібру [23]; запропоновано введення до складу пристрою фільтраційного стакану із зовнішніми нарізками на кінцях та використання пристрою для вибору промивних рідин під час випробовувань PDC-доліт [24]; запропоновано введення до складу суміші шламу із гальванічних ванн і використання запропонованої суміші для випробовування доліт [25]; запропоновано загальну ідею створення комп'ютерної програми, розроблено інструкцію користувача [26 – 29].

Публікації містять результати безпосередньої роботи здобувачки на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувачки в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

Апробацію матеріалів дисертації здійснено шляхом їх презентації та обговорення на науково-практичних та міжнародних конференціях а саме: XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції *«Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»* (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія, 01 – 03 листопада 2017 р.); *Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах»* (м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 01 – 03 листопада 2017 р.); VII-ї Міжнародній науково-технічній конференції *«Прогресивні технології в машинобудуванні»* (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 6 – 10 лютого 2018 р.); II Міжнародній науково-практичній

конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, Чернігівський національний технологічний університет, 10 – 12 травня 2018 р.); XVIII Міжнародній конференції *8-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2019* (Bulgaria, Sozopol, 2 – 3 September 2019 р.) (Scopus); XI Міжнародній конференції *11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies ICAMaT 2020* (Romania, Bucharest, 29 – 30 October 2020). У повному обсязі робота доповідалась і отримала позитивний відгук на розширених наукових семінарах ІФНТУНГ (2020 р.) та розширеному науково-технічному семінарі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2021 р.).

Відомості про кількість публікацій. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 29 наукових праць, з них: 8 статей у журналах, що представлені в науково-метричних базах Scopus та Web of Science; 2 тези конференцій, що представлені в науково-метричних базах Scopus; 6 статей у фахових виданнях, 4 тези міжнародних конференцій; 1 закордонна монографія; 4 патенти України на корисні моделі та 4 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерні програми).

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, п'ятих розділів, висновків до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел (139 позицій) та додатків на 19 сторінках. Загальний обсяг дисертації складає 225 сторінок, основний зміст дисертації викладено на 180 сторінках. Робота містить 44 таблиці та 95 рисунків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ДОЛІТ, ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Проблема забезпечення якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії

Показники якості доліт ріжуче-стираючої дії визначаються чинним стандартом ГОСТ 4.335-85 «СПКП. Інструмент породоразрушающий. Номенклатура показателів» [30] (табл. 1.1), відповідно до якого якість породоруйнівного інструменту є комплексною характеристикою, яка оцінюється під час експлуатації, і визначається відповідністю як технологічним показникам, так і експлуатаційним показникам. Сьогодні немає чітких підходів до формулювання комплексних вимог до параметрів технологічних систем, що визначають якість доліт, оскільки відповідність параметрів породоруйнівного інструменту зазначеним у відповідній технічній документації (стандартах, технічних умовах, кресленнях тощо) не означає ефективності його експлуатації [31]. Загалом, якість породоруйнівного інструменту визначається [32], [33]:

- моделлю якості виробу відповідно до сучасних уявлень про якість виготовлення продукції;
- методами визначення показників продукції на основі вимог споживачів;
- методами, що дають змогу забезпечувати необхідні значення показників якості продукції на етапах її життєвого циклу.

Це спричинює низку проблем у об'єктивному і правильному прийнятті рішень на стадіях проектування, конструювання та виготовлення бурових доліт [34]. Перед початком буріння заміряють діаметр долота калібрувальним кільцем (рис. 1.1). Власне, втрата долотом діаметру є однією із причин виходу із ладу долота і припинення буріння (рис. 1.2, 1.3) [35, 36]. Допуски зовнішнього діаметра бурових доліт типу PDC за API представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.1 – Показники якості доліт ріжуче-стираючої дії відповідно до
ГОСТ 4.335-85

Назва показника	Позначення показника якості	Назва властивості, що характеризується
1. Показники призначення		
1.1 Зовнішній діаметр, мм	D	Відповідність стандартному ряду
1.2. Граничне відхилення зовнішнього діаметра, мм	ΔD	Точність виготовлення
1.6. Радіальне биття калібруючої поверхні щодо осі нарізи, мм	ΔDH	Точність виготовлення
1.7. Осьове навантаження, кН	G	Здатність працювати в заданому діапазоні навантажень
1.8 Частота обертання, хв-1	n	Здатність працювати в заданому діапазоні частот обертання
1.9. Середня механічна швидкість проходки, м / год	v_m	Здатність ефективно руйнувати гірську породу
2. Показники надійності		
2.1 Середнє напрацювання до відмови за ГОСТ 27.002-83	$T_{ср}$	Безвідмовність
2.2 Коефіцієнт збереження продуктивності за ГОСТ 27.004-85	$K_{пр}$	Рейсова швидкість проходки, що забезпечує ефективний темп поглиблення стовбура свердловини.
2.3 Встановлений термін зберігання, років	t_c	Збережуваність
3. Показники економного використання сировини і матеріалів		
3.1 Питомі експлуатаційні витрати (на 1 м проходки), грош.од./м	C	Здатність забезпечувати економічність буріння свердловин, віднесена до показника
4. Показники технологічності		
4.1. Питома матеріаломісткість, кг/м	$t_{уд}$	Економія матеріалів
4.2. Питома трудомісткість виготовлення, нормо-год / м	$T_{уд}$	Трудомісткість
5. Показники транспортабельності		
5.1. Середня трудомісткість підготовки продукції до транспортування, нормо-год	T	Пристаєваність до переміщення
5.2. Габаритні розміри транспортного місця, м	–	Ті самі
6. Показники стандартизації і уніфікації		
6.1. Коефіцієнт застосованості, %	$K_{пр}$	–
7. Показники патентно-правові		
7.1. Показник патентної чистоти	$Пн.ч.$	–
8. Показники економічні		
8.1. Собівартість одиниці продукції	E	–

Таблиця 1.2 – Допуски зовнішнього діаметра бурових доліт типу PDC [36], [37]

Номінальний діаметр долота, дюйм (мм)	Допуск	
	в дюймах	в міліметрах
6 3/4" і менше (171,45 мм і менше)	від 0,015 до +0,00	від 0,381 до +0,00
6 25/32" – 9" (171,45–228,6 мм)	від 0,020 до +0,00	від 0,504 до +0,00
9 1/32" – 13 3/4" (228,6–349,25 мм)	від 0,030 до +0,00	від 0,762 до +0,00
13 25/32" – 17 1/2" (349,25–444,5 мм)	від 0,045 до +0,00	від 1,143 до +0,00
17 17/32" і більше (444,5 мм і більше)	від 0,063 до +0,00	від 1,6002 до +0,00



Рисунок 1.1 – Контроль прохідним кільцем-шаблоном Round Ring™ з внутрішнім діаметром 216,05 мм (номінальний діаметр долота – 215,9 мм (8 1/2"), висота кільця-шаблону Round Ring™ – 30 мм) [38]



Рисунок 1.2 – Долото 11 5/8 DS 66Н виробництва Reed-Nucalог, гірські породи: аргіліти, кам'яні солі (родовища Новоукраїнське, Чутове, Розпашна) (фото з відкритих джерел Інтернет)



Рисунок 1.3 – Долото 11 5/8 М 516 LPX виробництва Smith, гірська порода – глина (родовище Тюменської області) (фото з відкритих джерел Інтернет)

На основі аналізу наукового доробку як вітчизняних вчених В.П. Бондаренка, Л.О. Боруцака, Ю.М. Бугая, О.Ю. Витязя, І.В. Воевідка, В.В. Врюкала, О.Т. Драганчук, Я.М. Дрогомирецького, Є.І. Крижанівського, А.Л. Майстренка, В.М. Мойсишин, О.Р. Ониська, В.Г. Панчука, Л.Д. Пітулей, Д.Ю. Петрини, Ю.Д. Петрини, А.М. Сліпчука, І.І. Чудика, І.О. Шуляр, Л.Є. Шкіци, Р.С. Якіма, І.С. Якіма та ін., так і зарубіжних – В.А. Барвінка, І.В. Безбородової, О.Г. Блінкова, М.А. Борисова, Р.В. Буткевича, А.М. Журавльова, А.П. Мамонтова, Д.Є. Мосіна, Г.М. Сорокіна, А.Р. Яхіна та учнів встановлено, що дослідники, переважно, зосереджуються на окремих питаннях технології виготовлення (наприклад, тільки паяння різців), тоді як системний підхід до технологічного забезпечення якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії не розглядався. Зокрема потребують дослідження питання впливу технологічних параметрів механічної обробки і зміцнення конічних нарізей, а також методів складання та схем зварювання на показники точності доліт. Роботи присвячено узагальненій проблемі забезпечення якості породоруйнівних інструментів, переважно, тришаршкових доліт. Дослідниками встановлено, що якість породоруйнівного інструменту забезпечується власними розробками виробників, і в основі цього процесу лежить система всебічного керування якістю і вимоги міжнародних стандартів ISO серії 9001:2000 [39].

Проаналізувавши показники роботи доліт ріжуче-стираючої дії [40], встановлено, що основною проблемою в застосуванні доліт ріжуче-стираючої дії під час буріння твердих і надтвердих порід є значне спрацювання доліт. Основними характеристиками спрацювання доліт (як власного, так і іноземного виробництва) на родовищах України є: зношення зубців – 17 %, злам зубців – 30 %, сколювання зубців – 31 %, випадіння зубців – 3 %, відсутність спрацювання – 19 %, тобто основним чинником, що впливає на стійкість і керованість долота є нерівномірність навантаження між різцями долота. Саме ці показники забезпечуються під час виготовлення доліт, тому удосконалення технологічних процесів виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії дають значний резерв для підвищення ефективності буріння.

1.2 Технологічні рішення, що використовуються для виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії

Технологія виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії різниться в залежності від того, у який спосіб виготовлені корпуси долота: матричні долота виготовлені спіканням твердого сплаву, а сталеві – шляхом лиття або шляхом механічної обробки із суцільної сталеві заготовки (рис. 1.4 та рис. 1.5).



Рисунок 1.4 – Технологія виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії

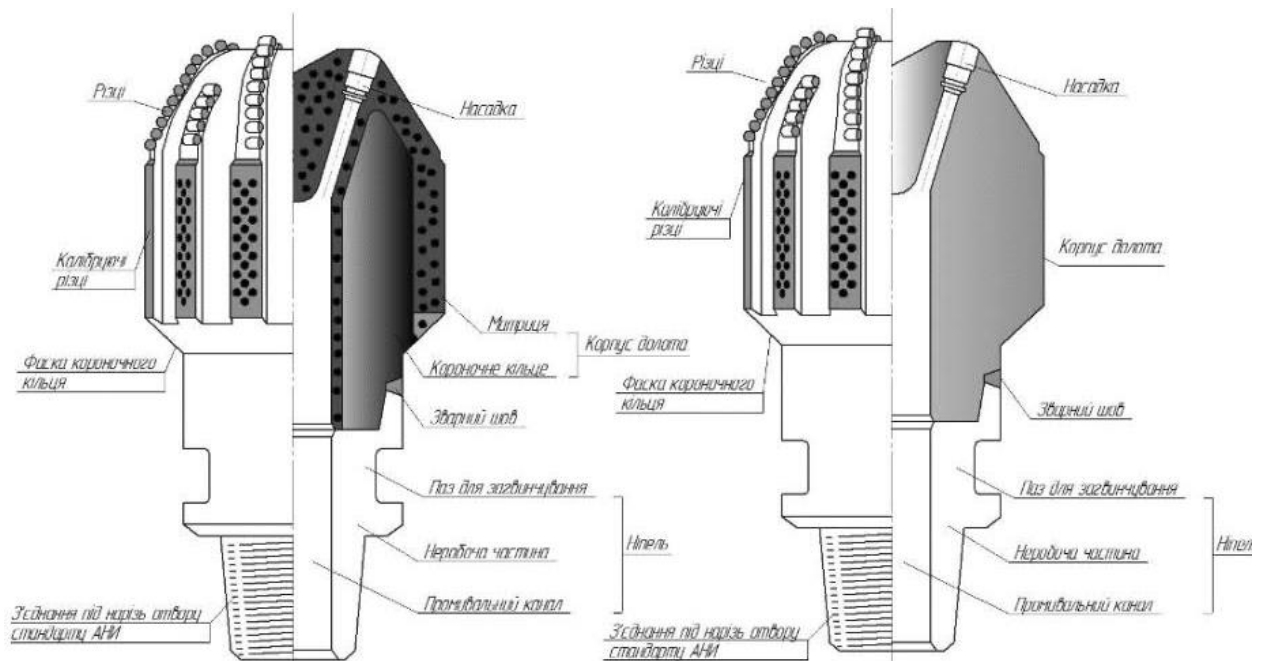


Рисунок 1.5 – Схеми конструкцій доліт із корпусом із твердого сплаву та сталі (Джерело: матеріали фірми Huges Christensen)

Технологічний процес виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії включає такі основні операції:

- для доліт із суцільним корпусом: лиття корпусу в кокіль або фрезерування корпусу із лопатями на п'ятикоординатному верстаті; припаювання алмазно-твердосплавних пластин до різців; припаювання твердосплавних різців до лопатей; виготовлення ніпелю, нарізання нарізі, шліфування зовнішньої конічної нарізі; складання корпусу із ніпелем, зварювання ніпеля із корпусом;

- для доліт із привареними лопатями: фрезерування корпусу, нарізання нарізі, фрезерування лопатей, ніпелю та нарізання нарізі на ніпелі на п'ятикоординатному верстаті з ЧПУ; припаювання алмазно-твердосплавних пластин до різців; припаювання різців до лопатей долота з постійним регулюванням нагрівання і термоконтролем у процесі паяння; приварювання лопатей із попередньо припаяними різцями до корпусу долота; виготовлення ніпелю, нарізання нарізі, шліфування зовнішньої конічної нарізі; виконання складання корпусу долота (із лопатями із припаяними різцями) із ніпелем долота; зварювання ніпеля із корпусом.

1.2.1 Технологічні рішення, що використовуються для виготовлення різців доліт

Технологічні рішення, що використовуються для виготовлення алмазно-твердосплавних пластин

Основним ріжучим елементом сучасного різця для доліт ріжуче-стираючої дії є алмазно-твердосплавна пластина (АТП), яка являє собою шар спечених за високої температури і високому тиску полікристалічних синтетичних алмазів на підложці з карбиду вольфраму. АТП являє собою диск діаметром $13,5^{+0,5}$ мм і товщиною від 0,7 до 0,8 мм (рис. 1.6 та рис. 1.7). АТП виготовляють різних конфігурацій, проте найбільш поширеними є пластини круглої форми, які виготовляють діаметрами 8, 13 та 19 мм.



Рисунок 1.6 – Сучасні різці з АТП (Джерело: матеріали сайту виробника пластин Supreme Superhard Materials Co.Ltd)

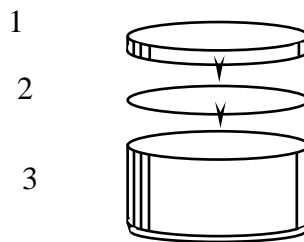


Рисунок 1.7 – Схема різця: 1 – ріжучий елемент типу 2530 NS; 2 – твердий припой; 3 – циліндр з карбиду вольфраму

Для виготовлення АТП використовуються алмазні порошки AC15 – AC400 ТУ У 88.090.043.2000 [41], [42] та металеві зв'язки М2-01 (М1), М6-14 (МЖ), М6-15 (МЗ), М6-16 (М03) за СТП 90.502. –85 [43] (табл. 1.3 та табл. 1.4).

Таблиця 1.3 – Порошки алмазні елітні АС15 – АС400 ТУ У 88.090.043.2000

Назва	Основні характеристики елітних порошків
Діапазон зернистостей	Від 800/630 до 100/80
Діапазон марок	Від АС400Т до АС50Т, від АС100 до АС15
Регульовані показники якості	Міцність, термостійкість, питома магнітна сприйнятливність, шорсткість поверхні, питомий електроопір
Однорідність порошку за обраним показником якості	У 2-3 рази вище, ніж у серійному порошку

Товщина алмазного шару складає 0,635 мм за товщини диску 2,92 мм і 7,37 мм. АТП спікають за температури 2070 К, тиску 8 ТПа та витримці 8 с. При цьому відбувається просочування алмазного шару кобальтом, і утворюється спечений полікристалічний алмазний шар, який міцно з'єднаний із твердосплавними пластинами. Після охолодження знижують тиск і дістають АТП. Перед паянням пластини обробляють механічно, а для певних типів доліт верхня пластина шліфується [41].

Зносостійкість пластин визначається струганням блоків дрібнозернистого кварцевого піщаника на стенді, виконаному на базі поперечно-стругального верстату. За критерій зносостійкості приймається величина площадки зносу, яка стандартно становить 0,5 мм при шляху стругання 300 м за таких режимів: глибина різання за прохід 0,5 мм, поперечна подача 3,5 мм, швидкість різання 0,235 м/с (30 ходів/хв) [44]. АТП можуть бути виготовлені за двохстадійною технологією спікання – окремо полікристалічний шар і окремо твердосплавна підложка з наступним їхнім з'єднанням [45]. Для буріння міцних і тріщинуватих порід на поверхню АТП можуть наносити демпфувальне двошарове покриття [46]. Для підвищення зносостійкості АТП підвищують чистоту поверхні синтетичних алмазів [41].

Крім того, для підвищення зносостійкості пластини пропонується використовувати суміші для спікання, що містять 75-80 % міцних зерен [47], окремі тверді полікристалічні агрегати, які розподілені певним чином в усьому об'ємі [48], термостабільні тверді області [49], або попередньо спечені алмазно-твердосплавні гранули [50]. Також проблему підвищення

зносостійкості АТП вирішують шляхом вибору компонентів алмазного шару з різною твердістю та тріщиностійкістю, та їх розташування, або виконанням на алмазному шарі пластини заглиблень у вигляді квадратів, п'ятикутників тощо [51]. АТП припаюють до державок різної форми, які припаюються до лопатей долота.

Таблиця 1.4 – Склад і основні властивості основних металевих зв'язок для алмазних інструментів за СТП 90.502. –85

Властивості	Металева зв'язка			
	M2-01 (M1)	M6-14 (MЖ)	M6-15 (M3)	M6-16 (M03)
Хімічний склад фаз, масові %	Cu – 80 Sn – 20	Cu – 32 Fe – 51 Ni – 9 Sn – 8	Cu – 81 Sn – 14 Fe – 5	Co – 99 Fe – 1
Температура спікання, °С	750±15	800±1	750±15	830±15
Границя міцності на стиск, МПа	1170	1570	1340	1860
Границя міцності при згині, МПа	550	1030	700	1140
Опір зсуву, МПа	290	470	360	510
Міцність алмазоутримування, МПа	190	240	210	270
Твердість	92	97 (101)	85	97
Питома ударна в'язкість, кДж/м ²	18,8	29,5	87,5	66,1
Відносна усадка при стискуванні, %	13	11	27	23
КТР, К ⁻¹	18,7	15,6	16,6	13,0
Густина, г/см ³	8,55	8,19	8,21	8,68
Відносна зносостійкість, I	1	1,77	0,79	1,82

Технологічні рішення, що використовуються для паяння алмазно-твердосплавних пластин до різців

Алмазно-твердосплавні різці (АТР) отримують шляхом паяння алмазно-твердосплавних пластин (АТП) з твердосплавними державками, що виготовлені із твердих сплавів у виді порошків на основі карбіда вольфрама ВК10КС, ВК11-ВК за ГОСТ 3882-74, де в якості зв'язки використовують кобальт. Твердосплавні державки являють собою циліндри із твердого сплаву діаметром 13,5 мм та висотою 3,5 мм. Для паяння використовують мідно-срібний припой ПСр-40 (табл. 1.5).

Вимоги до процесу паяння: температура плавлення припою не повинна перевищувати 650-700⁰С, припой має бути рідкотекучим та мати високу змочуваність відносно матеріалів, що паяються; міцність паяного шва на зріз не нижче 300 МПа.

Параметри нагрівання за допомогою генератора ВЧИ4-10У4 потужністю 10 кВт: струм сітки $I_{\text{сіт}}=0,1$ А, струм анода $I_{\text{ан}}=0,6 - 0,7$ А.

Таблиця 1.5 – Характеристики припою ПСр-40

Базова система припою	Час нагрівання, с	Інтервал плавлення, °С	Площа розтікання, мм ²	Міцність на зріз $\tau_{\text{зр}}$, МПа
Ag-Cu-Zn-Cd	24	590 – 610	89,89	245

1.2.2 Технологічні рішення, що використовуються під час виготовлення корпусів доліт ріжуче-стираючої дії

Сталеві корпуси виготовляються із суцільного матеріалу або привареними. Суцільні корпуси являють собою двокомпонентну конструкцію (корпус і ніпель), яку виготовляють шляхом оброблення прокату на верстатах із ЧПУ (рис. 1.8). Для виготовлення суцільних сталевих корпусів використовують сталь 14ХН3МА-В і 14ХН3МА-Ш за ТУ 14-1-5425-2001 для сталевих корпусів [52], [53], а сталеві зварні корпуси виготовляють шляхом лиття із жароміцної сталі 25Г2С2Н2МА [53]. Для підвищення ударної в'язкості застосовують подвійний відпуск із пришвидшеним охолодженням після повторного відпуску [54], [55].

Для виготовлення тврдосплавних корпусів використовують твердий сплав у виді порошків вольфрамо-кобальтової групи, наприклад ВК10КС, ВК11-ВК за ГОСТ 3882-74 [56], який спікають.



Рисунок 1.8 – Виготовлення суцільних сталевих корпусів доліт (Джерело: матеріали фірми Huges Christensen)

Таблиця 1.6 – Хімічний склад сталей 14ХНЗМА-В і 14ХНЗМА-Ш за ТУ-14-1-4612-89 (масові %)

Сталь	C, %	S, %	Mn, %	Cu, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %	S, %	P, %
14ХНЗМА-В	0,12 –	0,20 –	0,60 –	≤0,25	3,1 –	1,35 –	0,10 –	≤0,01	≤0,02
	0,16	0,35	0,80		3,4	1,55	0,15		
14ХНЗМА-Ш	0,13 –	0,20 –	0,40 –	≤0,25	3,35 –	≤0,20	0,20 –	≤0,01	≤0,02
	0,17	0,30	0,60		3,55	0,30	0,30		

Таблиця 1.7 – Механічні властивості сталей 14ХНЗМА-В і 14ХНЗМА-Ш

Сталь	Границя текучості, МПа	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, кДж/м ²	Твердість за Брінелем
14ХНЗМА-В	≥835	≥930	≥10	≥55	≥1080	≤269
14ХНЗМА-Ш	≥830	≥931	≥10	≥55	≥1080	≤270

Таблиця 1.8 – Хімічний склад порошку ВК10КС, ВК11-ВК за ТУ 48-19-60-78

Марка суміші	Масові %				
	Co	Fe	C, загалом	C, вільний, не більше	O ₂ , не більше
ВК10КС	9,8-10,2	0,2	5,30-5,60	0,10	0,5
ВК11-ВК	10,8-11,2	0,3	5,20-5,50	0,15	0,5

Таблиця 1.9 – Вимоги до твердих сплавів ВК10КС, ВК11-ВК за ГОСТ 3882-74 [57]

Густина, г/см ³	Твердість, HRA	σ_z , МПА	Вільний С, %	Структура	
				мікро	макро
14,1 – 14,4	≥ 87	≥ 1900	$\leq 0,2$	1. Не допускаються включення η -фази 2. Не допускається окремі великі зерна WC розміром > 50 мкм	Однорідна, без сторонніх включень. Пори не допускаються розміром понад 100 мкм

Технологія захисту заготовок сталевих корпусів

Суттєвою проблемою сталевих доліт є абразивне зношення сталевих ділянок лопатей, розташованих навколо ріжучих і калібруючих елементів, а також припою, який утримує їх від виривання, оголення, збільшення виступання і поступового випадання окремих елементів. З метою підвищення абразивної стійкості ділянки сталевих корпусів навколо ріжучих і калібруючих елементів, а також припою, поверхня армується або на неї наносяться захисні покриття. Так, в роботі [58] запропоновано для підвищення зносостійкості сталевому корпусу долота використовувати покриття із твердого сплаву. Розроблено метод дугового наплавлення твердого сплаву, перевагами якого є можливість зміни властивостей наплавленого металу і нанесення його на поверхню як тонким (до 0,3 мм), так і товстим (до 5 мм) шарами. Основою цього методу є електроди для дугового наплавлення, виготовлені із порошків ВК20КС, ВК15С, ВК8 и безвольфрамового ТН20, регенерованих методом вібророзмелювання. В подальшому такі покриття механічно обробляють, наприклад, точуть за допомогою різців із матеріалів Эльбор-Р, АСПК, СВБН-1, СВБН-5В за таких режимів різання: $s_{пр} = 0,07 - 0,11$ мм/об; $t = 0,1 - 0,5$ мм. Для покриття окремих ділянок сталевих корпусів доліт дуговим способом наплавляються покриття, виготовлені із матеріалів TeroCote 7888т, Diamax M, реліт ЛЗ-11-7,, які є похідними від карбідів вольфраму [59]. Застосування композиційного сплаву TeroCote 7888т (колотий карбід вольфраму) на Ni-основі забезпечує ефективний захист за умов гідроабразивного зносу. За нормальних умов зносостійкість захисного

покриття TeroCote7888т перевершує зносостійкість реліту «ЛЗ-11-7» і Diamax М в 1,5 і 2,0 рази відповідно.

Іншим способом нанесення захисного покриття є напилення, як це зазначено в [60]. Тут на поверхні корпусу долота виконано напилення у виді шару-підкладки, на який нанесене стійке захисне покриття наплавленням. Твердість напиленого шару-підкладки менше твердості наплавленого захисного твёрдосплавного покриття, але вище твердості матеріалу корпусу долота, при цьому товщина напиленого шару становить 0,3 – 0,8 мм.

Технологія виготовлення заготовок матричних корпусів доліт

Виготовлення корпусу із твердого сплаву (т.зв. матричні долота) є характерним, переважно, для закордонних виробників. Такий корпус конструктивно складається із двох частин: коронкового кільця і коронки. Оскільки композит з твёрдосплавного матеріалу, який застосовується для виготовлення бурової коронки, є відносно твердим і складно піддається машинній обробці, коронкове кільце спікається разом із коронкою, а потім використовується для приварювання отриманого корпусу долота до ніпелю долота.

Традиційно корпуси таких бурових доліт виготовляються шляхом спікання графітових форм. Порожнини графітових форм обробляються за допомогою п'яти координатного верстату з ЧПУ. Після цього за допомогою ручних інструментів відбувається тонка обробка порожнини графітової ливарної форми для надання конструкції специфічних конструктивних рис (рис. 1.9). Отвори для встановлення різців вирізаються фрезою. За потреби, можуть застосовуватися заздалегідь виготовлені елементи або вкладиші (які являють собою керамічні компоненти, графітові компоненти або піщані набивні компоненти, покриті гумою), що містяться всередині форми (рис. 1.10). Порожнина графітової форми заповнюється матеріалом з твёрдосплавних частинок (карбід вольфраму, карбід титану, карбід танталу і ін.) (рис. 1.11 та рис. 1.12).

Потім попередньо виготовлене коронкове кільце встановлюється всередині форми в певному місці і в необхідному положенні. Заповнену форму з карбід-вольфрамом і сталевим каркасом піддають попередньому нагріванню, щоб спалити можливі непотрібні домішки. Після попереднього нагрівання сплав латуні і рідкої добавки додають до завантаження всієї конструкції в піч для спыкання (рис. 1.13).

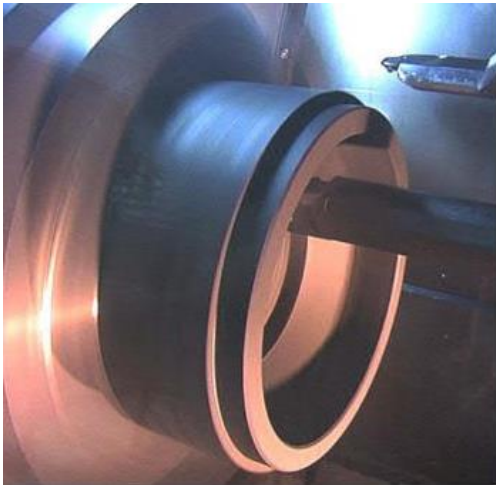


Рисунок 1.9 – Створення графітової форми-шаблону

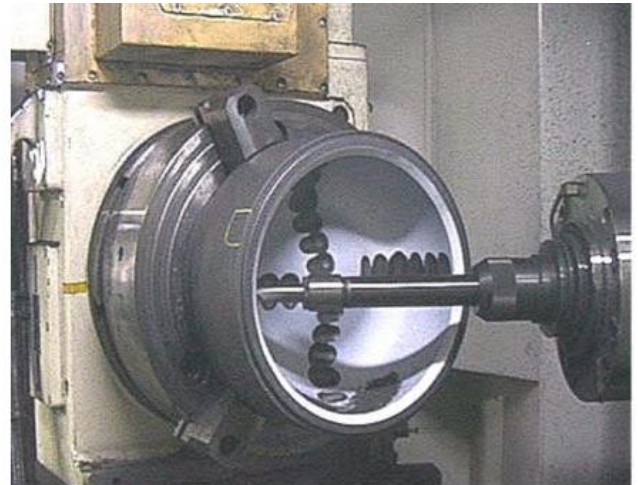


Рисунок 1.10 – Фрезерування отворів під різці



Рисунок 1.11 – Формування шаблону із графітовими вставками під різці

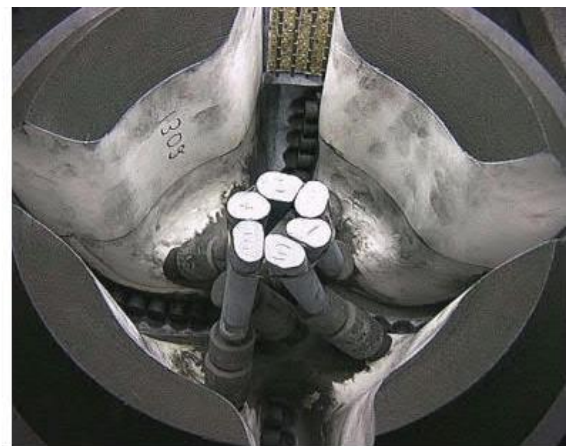


Рисунок 1.12 – Формування шаблону із вставками під отворів



Рисунок 1.13 – Встановлення коронкового кільця в графітій формі для спікання

(Джерело: матеріали фірми Huges Christensen)



Рисунок 1.14 – Спечена заготовка долота

Коронкове кільце, щонайменше, частково завантажують в матеріал з твердих карбідних частинок, розміщених усередині форми. Для ущільнення матеріалу форма далі може піддаватися дії вібрації. Далі частинки твердого сплаву заливаються розплавленим сполучним матеріалом на основі міді. Форма і корпус охолоджуються для затвердіння сполучного матеріалу. Коронкове кільце прикріпляється до утвореної коронки, а всі вкладиші виймаються із корпусу долота (рис. 1.14). При цьому для виймання корпусу долота, як правило, потрібно зруйнувати графітову форму.

Суцільні тврдосплавні корпуси можуть отримуватися як без різців, так і разом із різцями. Пропонується технологія [61] виготовлення бурових доліт діаметром до 212 мм за умов високого тиску до 1,5 ГПа та температури до 1250 °С у камері високого тиску багаторазового використання. Ця технологія передбачає можливість спікання суцільного корпусу без різців, спікання тврдосплавної матриці разом із впіканням сталевого кільця, а також можливість спікати корпус разом із попередньо отриманими різцями із термостійкими АТП (при цьому, така технологія накладає обмеження на матеріал АТП, тобто можуть застосовуватися лише термостійкі матеріали

типу «карбонадо»). Для покриття корпусів доліт для підвищення їхньої корозійної стійкості можуть використовуватися твёрдосплавне армування, нітроцементация [62].

1.2.3 Технологічні рішення для закріплення твёрдосплавних породоруйнівних елементів на лопатях долота

Для закріплення різців в отворах лопатей використовують індукційне паяння за допомогою генераторів СВЧ із частотою 10-99 КГц. Для здійснення припаювання різців до отворів використовують припої Ag–Cu–Zn–Ni–Mn, Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–2Pd, Cu–Zn–Mn–Ni–Sn–Cr (ПМ-50), Cu–Mn–Ni–Si–Fe (ПМ-72), Ag–Cu–Zn–Sn–Mn–Ni [63], [64].

Основною проблемою під час здійснення паяння різців до лопатів є складність забезпечення рівномірного нагрівання в заданому діапазоні температур, що менше температури розтріскування АТП (у готових пластин існує три порога термостійкості: близько 400 °С, близько 750 °С і близько 1250 °С. Відповідно, за цих температур частина алмазного конгломерату дає тріщини. Тому під час виготовлення пластин для бурових доліт намагаються наблизити їх термостійкість до 800 °С і більше) [64]. Оптимальною швидкістю нагрівання вважається 40 – 1000 С/с, що досягається вибором оптимальної відстані між лопаттю та індуктором від 8 до 15 мм.

Припаювання різців доліт здійснюють використовуючи срібний твёрдий припой, при чому різець складним чином кріпиться на підложку і між різцем і гніздом утворюється тонкий шар сплаву (рис. 1.15). Опори різців та отвори для них ретельно очищаються для розміщення припою на дно кожного отвору. Для нейтралізації продуктів окислення, які можуть перешкодити правильному проведенню паяння, на опори різців накладається флюс, що також, забезпечує рівномірний розподіл припою по тілі різця. Різці встановлюються в отворах і закріплюються спеціальним пружинним пристроєм. Корпус долота поміщається в піч і в відновному середовищі нагрівається до температури

700 °С. За цієї температури формується з'єднання між поверхнями опори різця і отвору. Після охолодження припой твердне, і пружинний фіксуючий пристрій знімається. Індукційне паяння не забезпечує рівномірного прогрівання всього матеріалу, а тільки його поверхневого шару [64].



Рисунок 1.15 – Припаяні різці до лопатей доліт (Джерело: матеріали фірми Hudges Christensen)

Пропонується така технологія пайки за допомогою двопетельного індуктора, який вводиться у робочу область лопаті з різцями (рис. 1.16). Перша петля індуктора прогріває робочу зону до 680 – 700 °С, а друга петля виконує роль попереднього підігріву до 580 – 600 °С. В цьому випадку використовується поверхневе і глибинне нагрівання, що дозволяє отримувати рівномірне прогрівання виробу в потрібній зоні без перегрівання окремих ділянок, для чого доводиться збільшувати час прогріву і знижувати питому потужність, що підводиться до виробу. За допомогою високочастотного нагрівання стало можливим здійснювати одночасне паяння всіх різців з лопаттю. При цій технології АТП знаходиться за високої температури мінімальний час і зберігає необхідні для експлуатації технологічні

властивості. При цьому температурне поле в зоні паяння різців вирівнюється по всій лопаті, температура паяння становить приблизно 680 – 700 °С.

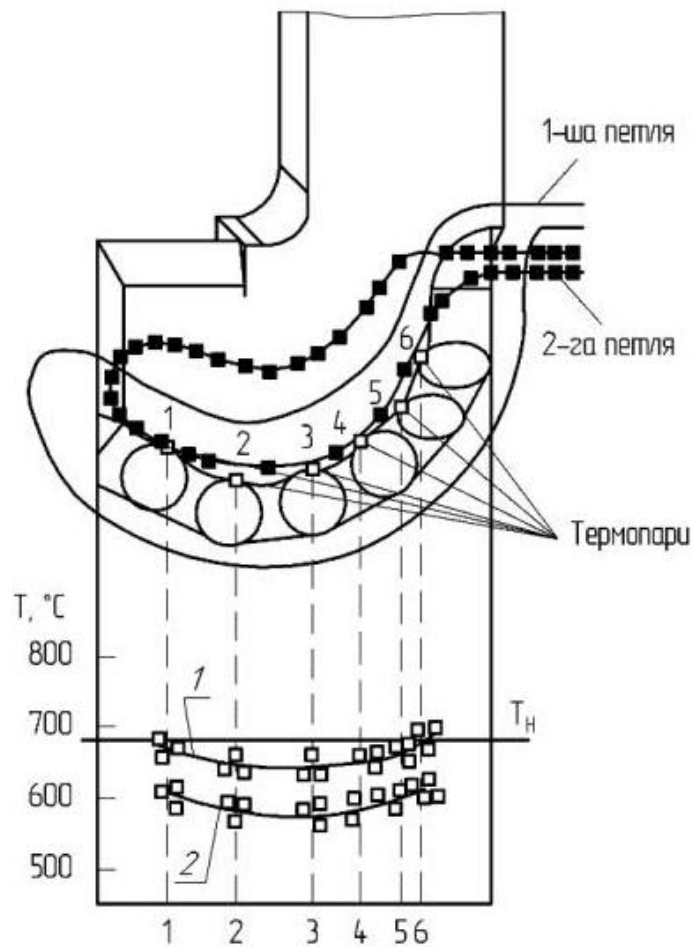


Рисунок 1.16 – Схема розміщення двопетельного індуктора та розподіл температур в зоні паяння

Поряд із тим, відомий спосіб кріплення різців бурового інструменту [65], [66], в якому різці розташовуються у втулках, виконаних з пластичного металу, які запресовуються в робочому органі бурового інструменту, причому на зовнішній поверхні втулок виконані поздовжні канавки. Запресовування різців в пластичні втулки зменшує напруження стиснення і збільшує фактичну поверхню контакту. Під дією напруження стиснення і розтягування, пластичні втулки деформуються і знижуються сумарні напруження, що діють на різці. Закріплення проводиться без підігрівання і паяння. Проте, цей спосіб не дозволяє здійснити розворот і нову установку вставки незношеною стороною.

В роботі [67] запропоновано різці розташовувати у втулках з пластичного металу в отворах на лопатях, кріплення різця здійснюється за допомогою пари вставлених із зусиллям одна в іншу конічних стопорних втулок.

1.2.4 Технологічні рішення для складання корпусів доліт із ніпелем

Ніпель являє собою циліндричну деталь, що містить в своїй конструкції два типи нарізей: метричну і приєднювальну замкову (рис. 1.17). За допомогою приєднювальної замкової нарізі долото приєднується до бурової колони.



Рисунок 1.17 – Ніпель долота (Джерело: матеріали фірми Huges Christensen)

Традиційна (заводська) технологія складання зварюванням з'єднання включає такі операції [68]:

- згвинчування по метричній нарізі до упору в торець;
- рівномірне виконання по колу трьох прихоплювальних зварних шви.
- Приварювання звинчених деталей.

До недоліків технології можна віднести наступні:

- розташування прихоплювальних зварних швів не регламентується.
- зварювання з'єднання здійснюється з будь-якого місця.
- напрямок обходу зварного шва не регламентується.

Якість складеного з'єднання визначається за параметром співвісності осі корпусу і ніпеля на етапах орієнтування метричної нарізі цих деталей в упор торцьових поверхонь і фіксації взаємного положення зварюванням. Під час виконання зварювання деталі нагріваються, і виникають теплові деформації – відбувається зміщення або викривлення осей корпусу і ніпеля (неспіввісність). Заводська технологія передбачає виготовлення нарізеного з'єднання (квалітет точності 6н) [69], проте навіть це не дає необхідної точності з'єднання деталей після виконання зварювання. Статистика експлуатації бурового інструменту [68], точність взаємного розташування (неспіввісність і перекошення осей) корпусу і ніпеля істотно впливає на роботоздатність долота. Значна величина перекошення осі корпусу стосовно осі ніпеля призводить до нерівномірного зносу ріжучих лопатей долота, тим самим ресурс долота скорочується в декілька разів. При цьому зношення основних ріжучих лопатей нерівномірне, в той час як інша лопать знаходиться в робочому стані. Неспіввісність зазначених деталей долота, отримана після зварювання, впливає на керованість долота під час буріння і може привести до відведення долота в свердловині від заданої траєкторії. При виконанні операції зварювання теплові деформації змінюють величину радіального відхилення на порядок, що говорить про суттєві недоліки існуючої технології складання [69].

Експерименти [70] показали, що відразу після виконання прихоплювального зварного шва виникає відхилення осі корпусу в напрямку, протилежному місцю шва, обумовлене локальним тепловим розширенням матеріалів, що з'єднуються деталей в нагрітій зоні. При зниженні температури корпус починає відхилятися в протилежному напрямку, а після охолодження корпус зміщується в бік шва. Оскільки вектор теплових деформацій в з'єднанні завжди спрямований в бік прихоплювального зварного шва, то в роботі [68]

було запропоновано технологію, яка коректує взаємне положення деталей, вибираючи положення прихоплювальних швів, і компенсуючи зміщення осей деталей, що з'єднуються, отримані на попередніх переходах. Місце розташування кожного наступного шва визначається після оцінки досягнутого ефекту при виконанні попереднього.

1.2.5 Технологічні рішення, що використовуються для нарізання та/або зміцнення нарізі на ніпелі долота

Розглянемо отримання нарізі на ніпелі долота. Ця операція може здійснюватися або за допомогою токарного верстату, або за допомогою верстату з ЧПК. В першому випадку долото встановлюється в токарний патрон, де жорстко фіксується кулачками. Базові виступи патрону мають осі, які співпадають із віссю звареного корпусу і патрону. Щоб уникнути можливості віджимання корпусу різцями при нарізанні нарізі, після фіксації корпусу патроном, різцем обробляється конічна поверхню ніпеля, що співісна осі корпусу долота і патрона. Після цього в поверхню центрального отвору до жорсткого дотику, вводиться конічний упорний центр пінолі задньої бабки токарного верстата, в свою чергу, співвісний осі патрона. Після цього проводиться нарізання конічної приєднувальних нарізі різцем теоретично співвісній геометричній осі зібраного долота.

Нарізання нарізі на верстаті із ЧПК [71] відбувається за допомогою стандартного циклу нарізання конічної нарізі, в якому задаються такі параметри: координати кінцевої точки наріз, її крок, висота профіля, глибина різання за прохід, найменший діаметр для конічної нарізі, відносна координата точки виходу різця за координатою X. Необхідне число проходів система управління визначає автоматично як найбільше ближче ціле від поділу висоти профілю на глибину різання.

Для ніпелів із діаметром 65 – 70 мм замість операції нарізання нарізі можна виконати операцію нарізенакатування, з використанням на верстаті з

ЧПК тангенційної нарізенкатної головки (рис. 1.18). Тангенційна нарізенкатувальна головка встановлюється в одній із позицій багатопозиційної револьверної головки станка або на поперечному супорті автомату, і подається в поперечному напрямку на заготовку, що закріплена на обертовому шпинделі. Важливою перевагою цього способу отримання нарізі є можливість повної автоматизації процесу отримання високоякісних нарізей на високих режимах при ефективній інтеграції його із іншими видами механообробки, що являють собою єдину багатоінструментальну наладку верстату. Нарізенкатувальна двороликова тангенційна головка має два ролики з паралельним розміщенням осей, обертання яких здійснюється під дією заготовки, що примусово обертається. Вершини ниток одного ролика повинні бути розміщені точно один навпроти іншого. Головка здійснює радіальну подачу, ролики переміщуються паралельно до оброблюваної поверхні. Закінчення накатування відбудеться, коли осі роликів і заготовки будуть знаходитися в одній площині. Довжина накатуваної нарізі не перевищує ширини роликів. Накатні ролики мають багатозахідну нарізь з напрямком, що є протилежним до нарізі деталі.

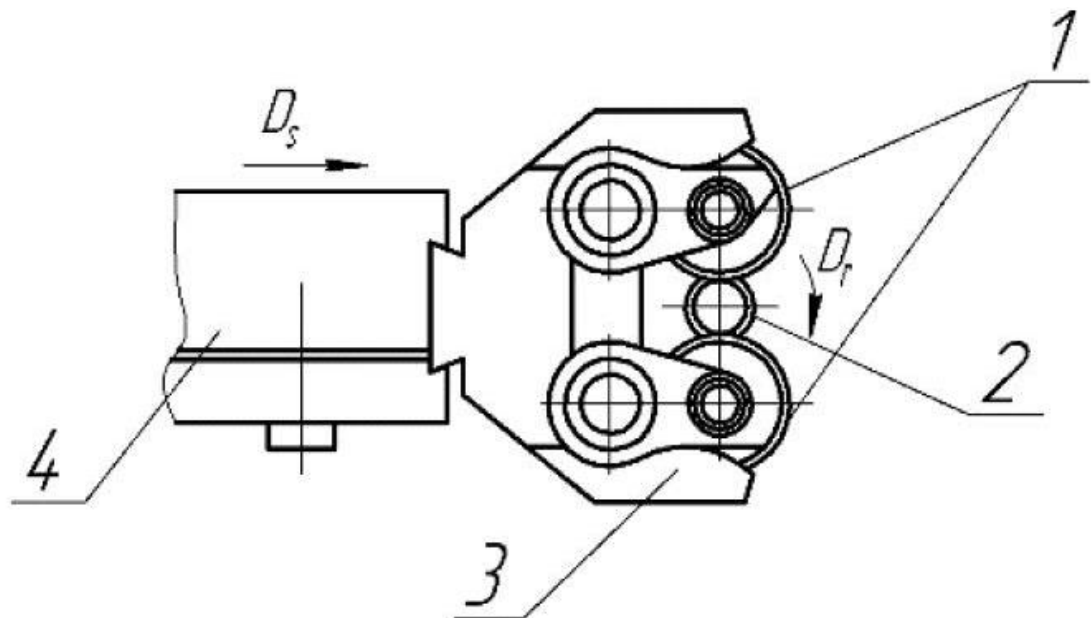


Рисунок 1.18 – Двороликова тангенційна головка для накатування нарізі:

1 – накатні ролики, 2 – заготовка, 3 – корпус головки, 4 – державка

Синхронізація обертання роликів і деталі відбувається двома способами: додатковими конструктивними елементами або незалежним обертання роликів, кінематичний зв'язок встановлюється безпосередньо під час роботи за рахунок осевого самовстановлення одного із роликів. В цьому випадку може мати місце неправильна орієнтація нарізей роликів, що є причиною браку. Тривалість циклу накатування не перевищує 6 с. Процес нарізенакатування не тільки підвищує ефективність цієї операції, а й якість отриманої нарізі. Нарізева поверхня, отримана накатуванням, є більш міцною та надійною, що особливо актуально для ніпеля бурового долота, через який передаються значні крутні моменти і знакоперемінні циклічні осеві зусилля. Збільшення мікротвердості нарізевої поверхні, накатаної на легованих і конструктивних сталях, складає 13 – 33 %, а глибина наклепування 0,15 – 0,4 мм. [72].

1.3 Постановка задачі дослідження

Показники відпрацювань доліт залежать від точності його виготовлення та нарізання приєднювальних нарізей. Дослідження свідчать про зниження проходки, яке спричинене радіальним биттям долота, що обумовлено неспіввісністю геометричної осі корпусу долота з віссю приєднювальної нарізі на хвостовику ніпеля долота [73]. Це в подальшому призводить до нерівномірності розподілу навантаження між лопатями, підвищення спрацювання окремих лопатей, виникненню відхиляючих радіальних сил, що, в свою чергу, спричиняє вихід з ладу долота в цілому. Це питання досить широко висвітлене в науковій літературі стосовно шарошкових доліт, проте стосовно доліт ріжуче-стираючої дії таких робіт виявлено мало.

Також важливим фактором роботи доліт є сталість діаметру долота. Різниця доліт за діаметром, навіть в межах величини допуску, призводить до значного зниження проходки (від 20 до 30 і більше %), коли під час зміни доліт в свердловині, розріз якої складений твердими і міцними породами, спускають

наступне долото з найбільшим допуском на діаметр [74]. Тому проблема підвищення якості виготовлення для ріжуче-стрираючого типу є актуальною. Відповідно, заходи підвищення точності долота, мають бути спрямовані на забезпечення точності зовнішнього діаметру та точності приєднувальної нарізі.

Висновки до розділу 1

В розділі проаналізовано сучасний рівень техніки і технології виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії, а також сучасні перспективні напрямки підвищення точності і якості доліт. Розглянуто основні вимоги до точності і якості доліт ріжуче-стираючої дії, зазначені як у вітчизняних, так і міжнародних стандартах.

Проаналізовано статистичні показники відпрацювання доліт; встановлено, що основним чинником, що впливає на стійкість і керованість долота є нерівномірність навантаження між різцями долота. Саме ці показники забезпечуються під час виготовлення доліт, тому удосконалення технологічних процесів виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії дають значний резерв для підвищення ефективності буріння.

Проаналізовано технологічні рішення та процеси, які використовуються для виготовлення корпусів доліт (із сталевих заготовок та із твердого сплаву шляхом спікання), складання заготовки корпусу із ніпелем, нарізання та/або зміцнення нарізі на ніпелі долота, тврдосплавних породоруйнівних елементів (різців) долота, паяння до них пластин та закріплення різців на лопатях долота.

Встановлено, що якість породоруйнівного інструменту є комплексною характеристикою, яка визначається системою технологічних, експлуатаційних, економічних та інших показників. Провідна роль у забезпеченні якості належить технологічним чинникам. Технологічні параметри відомих процесів виготовлення породоруйнівних елементів бурових доліт не є належним чином теоретично обґрунтовані, що ускладнює оптимізацію технологічних процесів. Дослідники, переважно,

зосереджуються на окремих питаннях технології виготовлення (наприклад, тільки пайки різці), тоді як комплексне питання технологічного забезпечення точності та якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії не розглядалося. Питання впливу технології виготовлення долота ріжуче-стираючої дії на показники його роботи в літературі не розглянуто детально. Загальна характеристика наукової проблеми показує, що певні питання технологічного забезпечення виготовлення породоруйнівних елементів бурових доліт вимагають подальшого розроблення, вдосконалення і модернізації.

Мета та задачі дослідження наведені у вступі.

Результати розділу опубліковано у працях авторки [1], [8].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ВИПРОБОВУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДОЛІТ НА ЇХ РОБОТОЗДАТНІСТЬ

2.1 Визначення основних похибок на кожному із етапів виготовлення долота і їхній вплив на показники відпрацювання долота. Побудова розмірного ланцюга забезпечення точності зовнішнього діаметра

Сучасний буровий інструмент працює за умов високих навантажень, в корозійному середовищі за умов високих температур [3], що викликає тому набувають актуальності питання вдосконалення технології його виготовлення для підвищення керованості долота під час буріння [74], [75].



Рисунок 2.1 – Долота ріжуче-стираючої дії із привареними лопатями та нарізями (Джерело: фото із відкритих джерел Інтернет)

Під час виконання технологічних операцій виготовлення долота виникають такі види похибок:

- теплові деформації, які виникають під час приварювання лопатей до корпусу – $\Delta_{ЛОП}^{\Sigma}$ (рис. 2.1);

- похибки виготовлення нарізі корпусу і ніпеля (рис. 2.2) – неточності за кроком нарізі Δp та за кутом підйому нарізі $\Delta \alpha_2$;
- теплові деформації, які виникають під час згвинчування корпусу долота із ніпелем та подальшого приварювання (рис. 2.3) – похибка перекошення осей ніпелю і корпусу долота $\Delta \beta$ та похибка неспіввісності ніпелю і корпусу долота $\Delta_{Н/К}$.

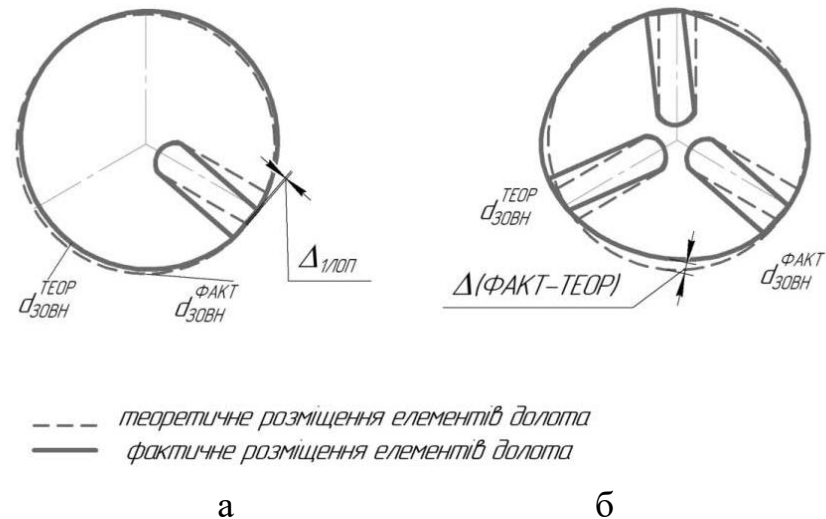


Рисунок 2.2 – Формування похибок зовнішнього діаметра долота під час приварювання лопатей до корпусу долота однієї лопаті (а) та трьох лопатей (б)

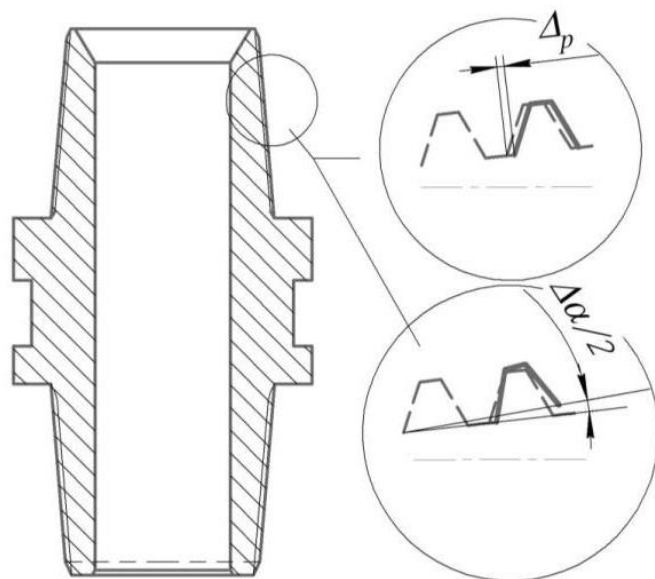


Рисунок 2.3 – Похибки виготовлення нарізі

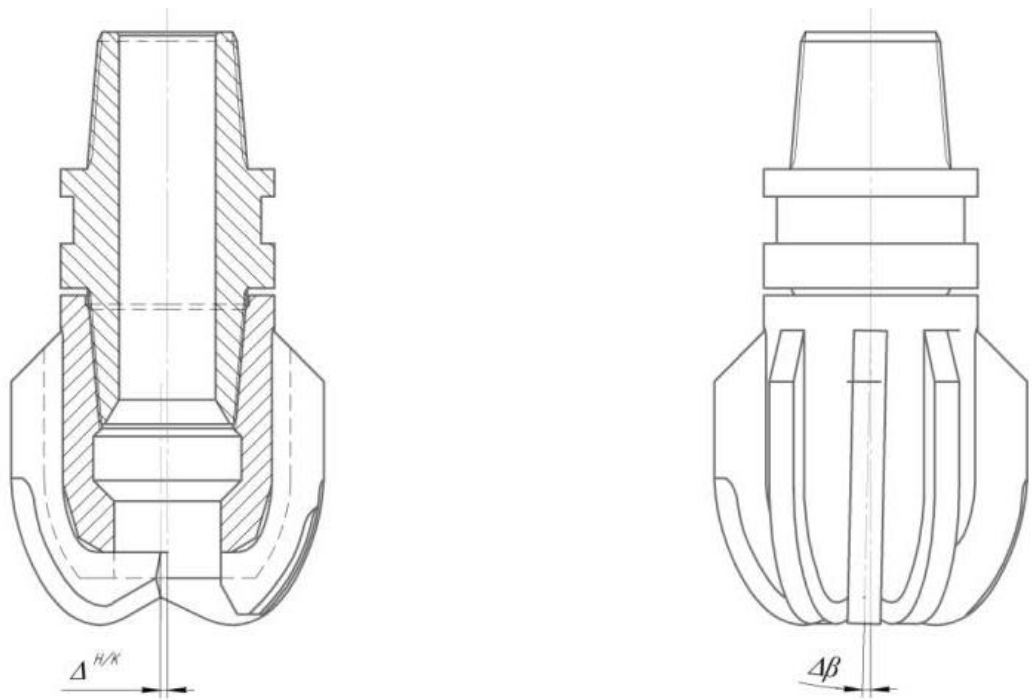


Рисунок 2.4 – Формування похибок зовнішнього діаметра долота під час згвинчування корпусу і ніпеля долота та подальшого зварювання

Для забезпечення точності зовнішнього діаметра долота необхідно запропонувати технологічні методи зменшення зазначених вище похибок. Для цього розроблено розмірний ланцюг формування зовнішнього діаметру долота як замикаючої ланки.

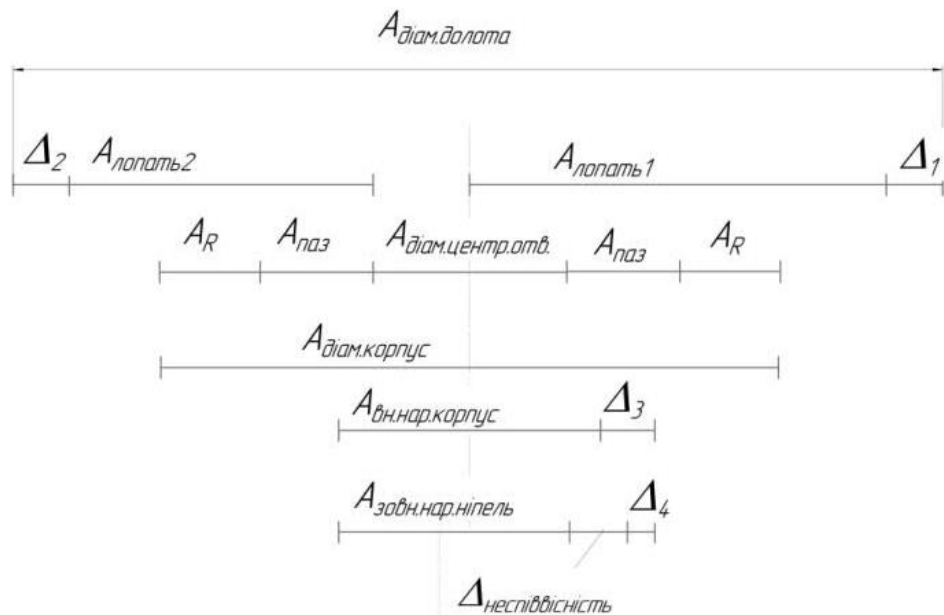


Рисунок 2.5 – Побудова розмірного ланцюга забезпечення точності зовнішнього діаметру долота (деталізація похибок – у табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Характеристика ланок розмірного ланцюга

Ланка	Позначення	Розмір, мм	Допуск, мм	Тип ланки
Зовнішній діаметр долота	$A_{\text{діам.долота}}$	292,2	+0,76	Збільшуюча
Ширина лопаті 2	$A_{\text{лоп.2}}$	145,5	-0,4	Збільшуюча
Ширина лопаті 1	$A_{\text{лоп.1}}$	106,0	-0,35	Збільшуюча
Діаметр внутрішнього отвору корпусу	$A_{\text{діам.отв.}}$	90	-0,32	Зменшуюча
Ширина пазу для встановлення лопаті	$A_{\text{паз}}$	30	+0,2	Збільшуюча
Проекція криволінійної поверхні корпусу на горизонтальну площину	A_R	72,8	Не регламентовано	Збільшуюча
Зовнішній діаметр корпусу	$A_{\text{діам.корпус}}$	230	+2,9 мм (h16)	Збільшуюча
Теплові деформації, що виникають під час приварювання лопаті 2	Δ_2	Не регламентовано	Не регламентовано	Регулююча
Теплові деформації, що виникають під час приварювання лопаті 1	Δ_1	Не регламентовано	Не регламентовано	Збільшуюча
Неспіввісність осей корпусу і ніпелю (до зварювання)	$\Delta_{\text{неспіввісність}}$	–	-0,15	Збільшуюча
Діаметр внутрішньої нарізі корпусу	$A_{\text{вн.нар.к}}$	3 152	ГОСТ 5286-76	Збільшуюча
Діаметр зовнішньої нарізі ніпелю	$A_{\text{вн.нар.н}}$	3 152	ГОСТ 5286-76	Збільшуюча
Похибка теплових деформацій ніпелю під час приварювання корпусу до ніпелю	Δ_3	–	Не регламентовано	Регулююча
Похибка теплових деформацій корпусу під час приварювання корпусу до ніпелю	Δ_4	–	Не регламентовано	Регулююча

Зовнішній діаметр бурового долота є основним його розміром, і зменшення цього розміру є причиною зупинення буріння та заміни долота. Поряд із тим, підвищене спрацювання різців долота, а отже втрата долотом зовнішнього діаметру, пов'язується із втратою долотом керованості та його коливаннями. Сьогодні в науковій літературі не наведено безпосереднього зв'язку між показниками керованості бурового інструменту та технології його виготовлення, проте зазначено, що збільшення перекошення осей ніпеля та корпусу, а також неспіввісності під час складання призводить до лінійного

зростання величини биття долота під час його роботи [68], [69]. Окрім того, в науковій літературі не регламентовано величини допуску зовнішнього діаметру долота, які отримуються під час кожної із операцій. Також в технічній документації не регламентовано величину биття бурового долота.

Аналіз технології забезпечення точності зовнішнього діаметру долота дає підстави стверджувати, що для забезпечення необхідної його точності необхідно мінімізувати величину теплових деформацій, які виникають під час отримання заготовки корпусу та величину теплових деформацій, які виникають під час складання ніпелю та корпусу.

2.2 Вплив похибок на міцність лопатей

У попередньому підрозділі було встановлено основні види похибок, які виникають під час виготовлення доліт. Під час роботи долота із неспівісністю між ніпелем і корпусом виникає притискна сила, яка створює додаткове навантаження, тому на окремі лопаті і різці зростає навантаження, і вони зношуються більше. В свою чергу, це викликає подальше збільшення нерівномірності навантаження і спрацювання (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Фото спрацьованих доліт

Для визначення впливу основних похибок виготовлення доліт на розподіл навантаження між лопатями долота та оцінювання його міцності за наявності похибок, прийнята така схема – рис. 2.7. Визначимо вплив такої похибки на величину сил різання тарівень напружень та міцність лопатей долота під час буріння гірської породи (рис. 2.7). Нехай бурове долото, яке має похибку виготовлення у вигляді неспіввісності корпуса та ніпеля – Δ (рис. 2.7, б), працює у компоновці колони труб, виготовлених із різних матеріалів, яка оснащена калібратором.

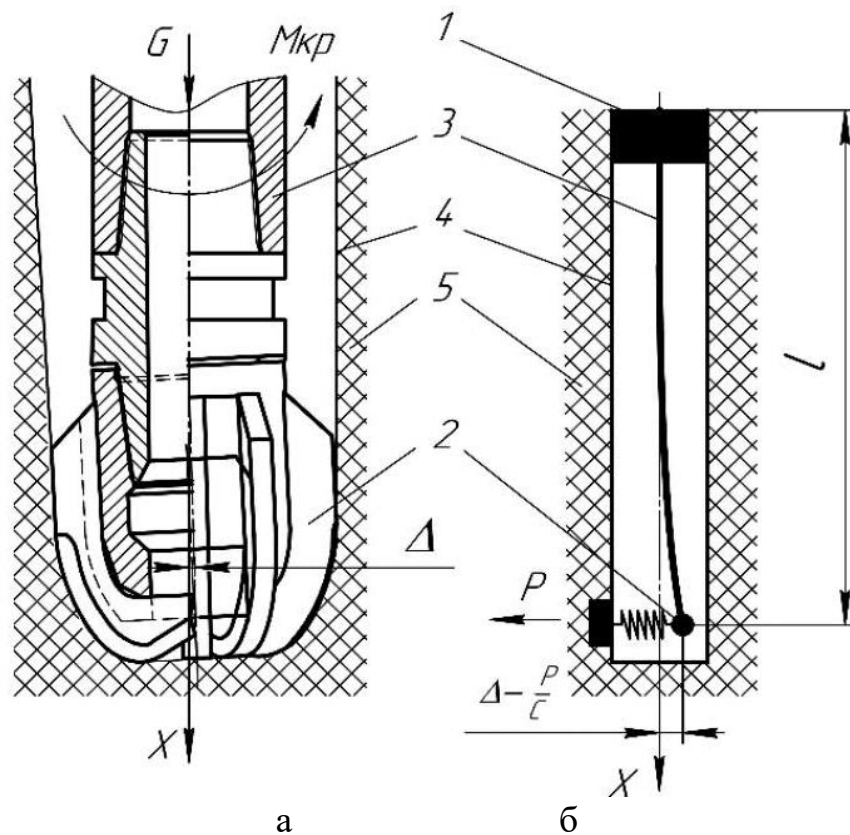


Рисунок 2.7 – Взаємодія бурового долота із вибоєм свердловини (а) та розрахункова схема для знаходження сили притискування бурового долота до стінки свердловини (б): 1 – калібратор; 2 – долото; 3 – обважнена бурильна труба; 4 – стінка свердловини; 5 – гірська порода

Долото і калібратор з'єднані між собою обважненими бурильними трубами завдовжки l . Для спрощення моделі вважаємо, що у зоні розташування калібатора в свердловині є заземлення. Похибка виготовлення Δ призведе до позаштатного кінематичного навантаження пружної системи,

внаслідок чого на долоті виникне додаткова поперечна притискна сила P (рис 2.7, а). Податливість гірської породи, з якою контактує породоруйнівні елементи долота, імітуємо пружною опорою з жорсткістю C , порівняно з нею долото вважатимемо абсолютно жорстким. Користуючись принципом незалежності дії сил для лінійних систем запишемо канонічне рівняння методу сил

$$\delta_{11}P + \Delta_{1p} = \Delta - \frac{1}{C}P, \quad (2.1)$$

де $\delta_{11} = l^3/3EJ$ та $\Delta_{1p} = 0$ – поперечні переміщення правого торця пружної системи (звільненого від в'язей) від дії відповідно одиничної сили та зовнішнього силового навантаження; E – модуль пружності матеріалу бурильної труби; $J = 0,05D^4[1 - (d/D)^4]$ – осьовий момент інерції перерізу бурильної труби, d, D – внутрішній та зовнішній діаметри бурильної труби. Розв'язавши рівняння (2.1), отримуємо вираз для додаткової притискної сили на долоті

$$P = \frac{\Delta}{\frac{1}{3} \frac{l^3}{EJ} + \frac{1}{C}} \quad (2.2)$$

Оцінимо можливий діапазон зміни притискної сили P залежно від похибки виготовлення бурового долота Δ . Для визначеності виберемо конкретний типорозмір обважненої бурильної труби із зовнішнім діаметром 203 мм та внутрішнім діаметром 80 мм та вважатимемо, що долото контактує з абсолютно жорсткою стінкою свердловини (отримаємо верхні оцінки можливих величин притискної сили). Відстань між долотом та першим калібратором 1 м. Розглянемо бурильні труби, які виготовлено з різних металевих сплавів – сталевому сплаву 40ХН, алюмінієвого сплаву АД31, дюралюмінієвого сплаву Д16Т, титанового сплаву ВТ1-0 та волокнистого вуглецевого матеріалу. Модулі пружності для перелічених металевих сплавів: сталевому – $2,1 \cdot 10^5$ МПа; алюмінієвого – $6,7 \cdot 10^4$ МПа; дюралюмінієвого – $7,3 \cdot 10^4$ МПа; титанового – $1,12 \cdot 10^5$ МПа. Окремо слід відзначити, що сучасні

технології конструкційних матеріалів дозволяють використовувати для виробництва бурового інструменту інтелектуальні композитні матеріали, які одержані шляхом армування вуглецевої матриці волокнистим вуглецевим матеріалом (Carbon-carbonic compositional materials). Зокрема, бурильні труби з таких матеріалів демонструють високу економічну ефективність у нафтогазовому секторі [76], [77], [78], [79], [80], [81]. Тому для аналізу вибрали ще один варіант – Drill Pipe Based on Composite Carbon Fiber Material (модуль пружності в осьовому напрямку такого матеріалу – $5,6 \cdot 10^4$ МПа).

На рис. 2.8 проілюстровано залежність нештатної поперечної сили притискання бурового долота до стінки свердловини від величини похибки виготовлення долота (неспіввісності корпусу та ніпеля).

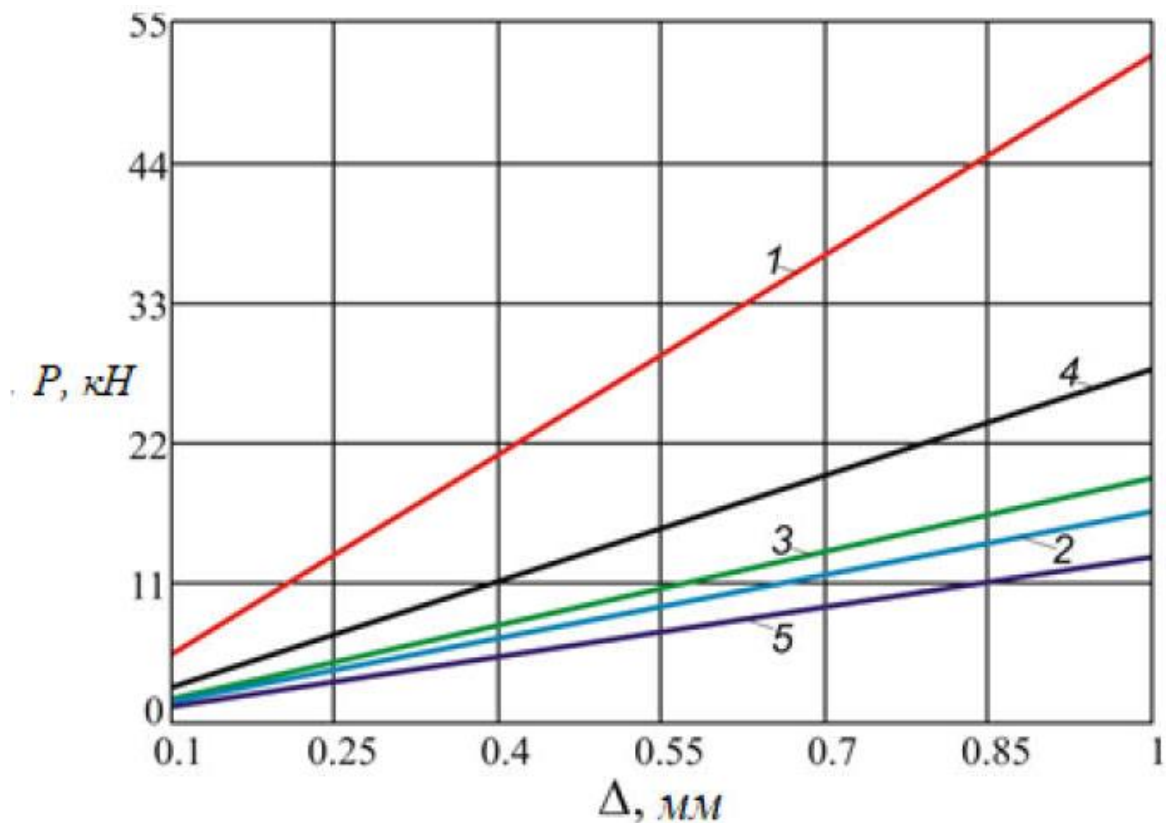


Рисунок 2.8 – Нештатна поперечна сила притискання бурового долота до стінки свердловини (верхня оцінка):

- 1 – вуглецева сталь; 2 – алюмінієвий сплав; 3 – дюралюміній;
4 – титановий сплав; 5 – Composite Carbon Fiber Material

Аналіз залежностей поданих на рис. 2.8 показує, що найменшу чутливість до геометричної похибки виготовлення бурового долота виявляє пружна система бурильної колони скомпонованої з композитних карбонових бурильних труб (Drill Pipe Based on Composite Carbon Fiber Material), а найбільшу – зі сталевих труб. У випадку використання труб із легких сплавів алюмінію та титану величина сили притискання бурового долота до стінки свердловини займає проміжні значення.

Тепер детальніше розглянемо особливості процесу взаємодії озброєння бурового долота ріжуче-стираючого типу з гірською породою.

Штатна ситуація. У разі коли ідеально виготовлене бурове долото ($\Delta=0$) працює в ідеальному отворі свердловини, радіальне заглиблення усіх лопатей долота в гірську породу бічної стінки отвору свердловини є однаковим, позначимо таке радіальне заглиблення a_0 (рис. 2.9).

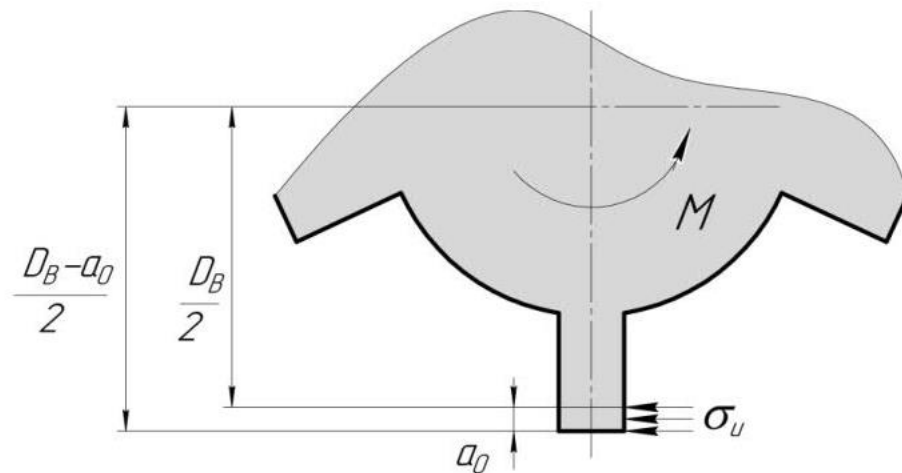


Рисунок 2.9 – Схема контактної взаємодії лопаті бурового долота зі стінкою свердловини (штатна ситуація)

Оскільки a_0 є малою величиною, то вважатимемо, що контактні напруження розподілені рівномірно за площею контакту лопаті з гірською породою. При цьому сили різання розподілені між усіма лопатями долота рівномірно.

Тоді глобальне рівняння рівноваги системи, записане відносно поздовжньої осі свердловини Ox , можна представити у такому вигляді (для визначеності приймемо, що долото має шість лопатей $n = 6$):

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_u a_0 H \frac{D_b - a_0}{2} = 3\sigma_u A_0 (D_b - a_0) \quad (2.3)$$

де σ_u – границя міцності гірської породи, H – довжина лопаті, D_b – діаметр долота, A_0 – площа контакту лопаті з гірською породою, M – крутний момент на долоті.

Нештатна ситуація. У разі коли бурове долото виготовлене з похибкою (тобто $\Delta \neq 0$) відбувається неоднорідний розподіл зусиль різання між лопатями долота. У випадку коли $\Delta > a_0$ частина лопатей втрачає контакт з гірською породою, і в цьому разі неоднорідність розподілу зусиль стає суттєвою, і може спричинити втрату міцності конструкції. На рис. 2.10 представлено два найнесприятливіших випадки розміщення лопатей долота відносно стінки свердловини.

Визначимо величину додаткового радіального заглиблення лопатей в гірську породу Δ_r^i та величину радіальних сил P_i , які виникають через нештатну ситуацію.

Уявимо, що під дією притискної сили P долото перемістилось в напрямку дії цієї сили на величину $P/C = \delta$ (рис. 2.10). Оскільки деформаціями долота ми нехтуємо і розглядаємо його як тверде тіло, то

$$b_0 k_0 = b_1 k_1 = b_2 k_2 = \frac{P}{C} = \delta.$$

Для довільно розташованої лопаті завжди можна розглянути трикутник аналогічний до трикутника $b_2 s k_2$ (рис. 2.10) і виразити радіальні переміщення лопатей Δ_r^i через δ . Для розглянутого випадку матимемо: $\Delta_r^0 = \delta$; $\Delta_r^1 = \Delta_r^2 = \delta \cos \vartheta$. Радіальні P_r та тангенціальні P_{ti} сили у відповідних напрямках знаходимо вважаючи, що реакція гірської породи пропорційна величині переміщення. Для зображеного (рис. 2.10) випадку матимемо:

$$P_0 = \frac{1}{3}P; P_1 = P_2 = \frac{1}{3}P \cos \vartheta; P_{t0} = 0; P_{t1} = P_{t2} = \frac{1}{3}P \sin \vartheta.$$

Тепер глобальне рівняння рівноваги системи, записане відносно поздовжньої осі долота, набуде такого вигляду (рис. 2.10):

$$M = \sum_{i=1}^{n^*} \left[\sigma_u (a_0 + \Delta_r^i) H \frac{D_b - (a_0 + \Delta_r^i)}{2} + f P_i \frac{D_b}{2} \right], \quad (2.4)$$

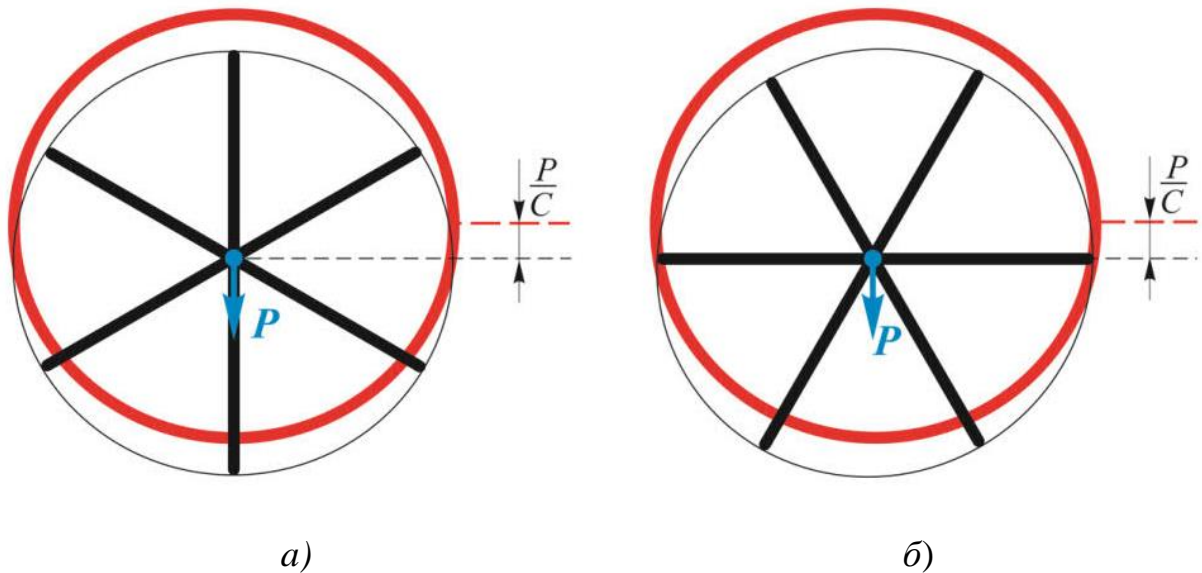


Рисунок 2.10 – Контактна взаємодія металевих лопатей бурового долота зі стінкою свердловини (нештатна ситуація):

а – працюють три лопаті; *б* – працюють дві лопаті.

де n^* – кількість лопатей, які контактують з гірською породою, f – коефіцієнт тертя контактної пари лопать – гірська порода.

При виконанні числових розрахунків жорсткість модельної пружної опори (рис. 2.11) визначатимемо, користуючись відомими значеннями коефіцієнтів постелі гірських порід k . В такому разі

$$C = kn^*hH, \quad (2.5)$$

де h – ширина лопаті.

Визначимо максимальні напруження, які можуть виникати в матеріалі лопаті. Зважаючи на переважаючий вплив на міцність згину і осьового навантаження, впливом зсуву знехтуємо. Тоді, в штатному режимі експлуатації (рис. 2.8, а) матимемо:

$$\begin{cases} \sigma_{\max}^+ \\ \sigma_{\max}^- \end{cases} = \pm \frac{M_z}{W_z} = \pm \frac{(\sigma_u a_0 H) \left(L - \frac{a_0}{2} \right)}{\frac{Hh^2}{6}} = \pm \frac{6}{h^2} \sigma_u a_0 \left(L - \frac{a_0}{2} \right), \quad (2.6)$$

де σ_{\max}^+ та σ_{\max}^- – найбільші розтягуючі та найбільші стискаючі напруження в матеріалі лопаті, M_z – максимальний згинальний момент, W_z – осьовий момент опору, L та h – висота та ширина лопаті.

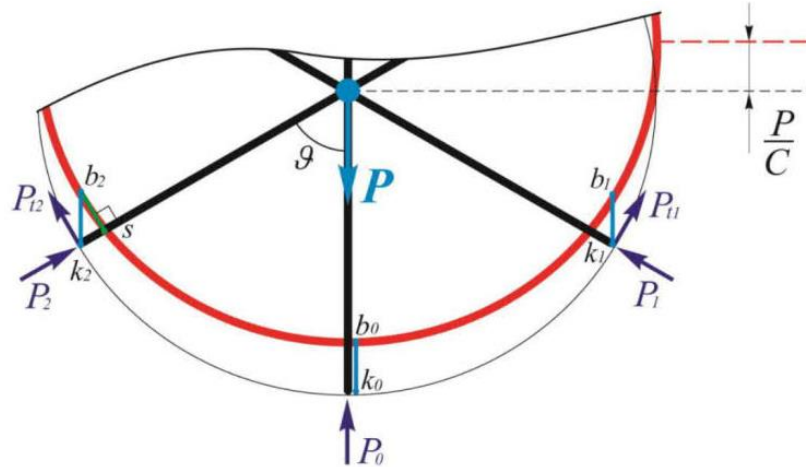


Рисунок 2.11 – Розрахункова схема для визначення додаткового радіального заглиблення лопатей в гірську породу Δ_r^i та величини радіальних сил P_i

В нештатному режимі експлуатації найбільш навантаженою виявилась вертикальна лопать (рис. 2.13, а). Найбільші розтягуючі та стискаючі напруження в матеріалі лопаті

$$\begin{cases} \sigma_{\max}^+ \\ \sigma_{\max}^- \end{cases} = -\frac{N_x}{A_{bl}} \pm \frac{M_z}{W_z} = -\frac{P_i}{Hh} \pm \frac{(\sigma_u (a_0 + \Delta_r^i) H) \left(L - \frac{a_0 + \Delta_r^i}{2} \right) + fP_i L}{\frac{Hh^2}{6}}, \quad (2.7)$$

де A_{bl} – площа поперечного перерізу лопаті, N_x – осьова сила.

Найбільші за модулем напруження:

$$|\sigma_{\max}^-| = \frac{1}{A_{bl}} \left[P_i + \frac{6}{h} \left((\sigma_u (a_0 + \Delta_r^i) H) \left(L - \frac{a_0 + \Delta_r^i}{2} \right) + fP_i L \right) \right]. \quad (2.8)$$

Якщо лопать виготовлена із пластичного матеріалу, то для забезпечення міцності необхідно щоб напруження, обчислені за формулою (2.8) не перевищували допустимих напружень.

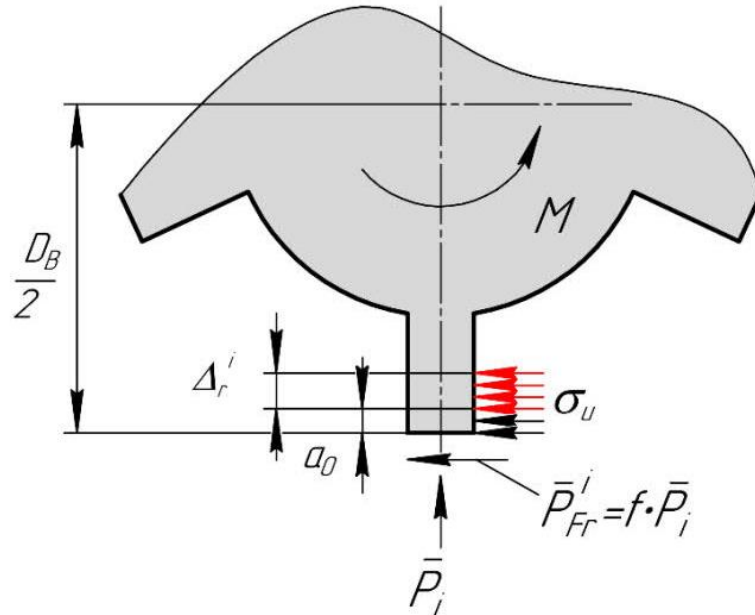


Рисунок 2.12 – Схема навантаження лопаті бурового долота в нештатній ситуації
(чорним кольором показано штатні навантаження, а червоним – додаткові, які виникають через нештатну ситуацію)

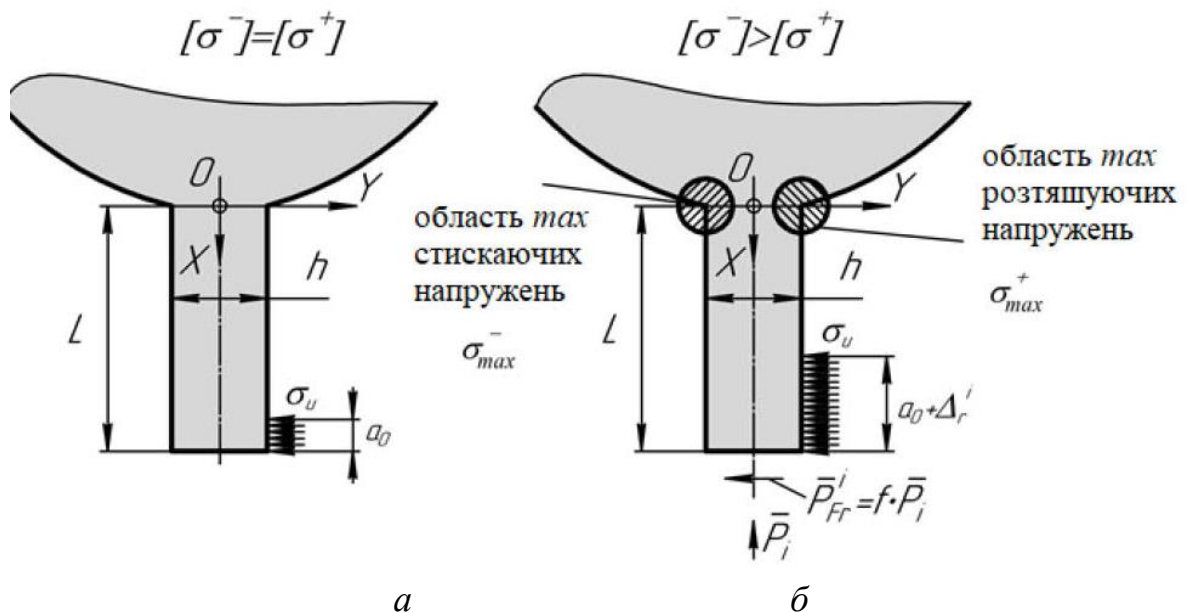


Рисунок 2.13 – Розрахункова схема для оцінка міцності лопаті бурового долота: *a* – штатний режим експлуатації; *б* – нештатний режим експлуатації

Якщо лопать знаходиться під кутом до напрямку дії притискної сили, то у формулі (2.7) необхідно також врахувати вплив на величину напружень тангенціальної сили P_{ii} :

$$\begin{cases} \sigma_{\max}^+ \\ \sigma_{\max}^- \end{cases} = -\frac{P_i}{Hh} \pm 6 \frac{(\sigma_u(a_0 + \Delta_r^i)H) \left(L - \frac{a_0 + \Delta_r^i}{2} \right) + (fP_i \pm P_{ii})L}{Hh^2}.$$

Розглянемо конкретний числовий приклад. Нехай відстань між буровим долотом і першим калібратором $l=1\text{ м}$. Внутрішній та зовнішній діаметри обважнених бурильних труб $d=147\text{ мм}$, $D=190,5\text{ мм}$, модуль пружності матеріалу труб $E=2,1 \cdot 10^{11}\text{ Па}$. Буріння проводять шестилопатеvim долотом з такими параметрами: діаметр долота $D_d=190,5\text{ мм}$; довжина лопаті $H=226\text{ мм}$; ширина лопаті $h=29,8\text{ мм}$; висота лопаті $L=49\text{ мм}$. Основна гірська порода, яка утворює бічну стінку свердловини – вапняк дрібнокристалічний з коефіцієнтом постелі $k=490\text{ МН/м}^2$ та границею міцності $\sigma_U=90\text{ МПа}$. Коефіцієнт тертя між лицьовою поверхнею лопатей і гірською породою прийняли $f=0,12$.

Обчислюємо осьовий момент інерції поперечного перерізу обважнених бурильних труб

$$\begin{aligned} J &= 0,05D^4[1 - (d/D)^4] = 0,05 \cdot 190,5^4 [1 - (147/190,5)^4] = \\ &= 4,25 \cdot 10^7 \text{ мм}^4 = 4,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4. \end{aligned}$$

За формулою (2.5) визначаємо жорсткість модельної пружної опори для випадку (рис. 2.13, а)

$$C = kn * hH = 490 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 29,8 \cdot 10^{-3} \cdot 226 \cdot 10^{-3} = 9,89 \cdot 10^6 \text{ Н/м}.$$

Прийнявши, що похибка Δ може варіюватись в діапазоні від 0,2 до 1,0 мм, за формулою (2.2) визначаємо можливий діапазон зміни додаткової поперечної притискної сили. Наприклад, при $\Delta=0,4\text{ мм}$ матимемо:

$$P = \frac{\Delta}{\frac{1}{3} \frac{l^3}{EJ} + \frac{1}{C}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{3} \cdot \frac{1^3}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 4,25 \cdot 10^{-5}} + \frac{1}{9,89 \cdot 10^6}} = 2,89 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Далі, використовуючи схему подану на рис. 2.13, обчислюємо додаткове радіальне заглиблення лопаті в гірську породу

$$\Delta_r = \frac{P}{C} \cos \vartheta = \frac{2,89 \cdot 10^3}{9,89 \cdot 10^6} \cos 0 = 0,292 \text{ мм}$$

і радіальну силу $P_0 = P/3 = 0,96$ кН, які виникають внаслідок наявності похибки виготовлення долота (у разі, якщо лопать перебуває під кутом до напрямку дії притискної сили, то необхідно також обчислити тангенціальну силу P_{ti}).

Далі ми задались зовнішнім крутним моментом на долоті $M = 3$ кН·м (роторне буріння) і з рівняння (2.3) визначили радіальне заглиблення лопатей долота в гірську породу бічної стінки отвору свердловини під час ідеального процесу буріння. За формулою (2.8) обчислювали максимальні напруження, які виникають в лопатях бурового долота при нештатній ситуації його взаємодії з вибоєм свердловини (табл. 2.2). За вибраного режиму експлуатації $M = 3$ кН·м максимальні напруження в лопатях ідеально виготовленого бурового долота становлять 167,5 МПа.

Таблиця 2.2 – Максимальні напруження за різних величин похибки виготовлення бурових доліт

Показники	Похибка Δ , мм				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Притискна сила P , кН	1,45	2,89	4,33	5,78	7,22
Додаткове радіальне заглиблення Δ_r , мм	0,146	0,292	0,438	0,584	0,730
Додаткова радіальна сила P_0 , кН	0,48	0,96	1,44	1,92	2,41
Максимальне напруження в лопаті $ \sigma_{\max}^- $, МПа	202,2	233,5	264,8	296,2	327,3

Аналіз результатів розрахунків, наведених у табл. 2.2 показує, що зростання величини похибки виготовлення бурових доліт призводить до зростання притискної сили, додаткового радіального заглиблення, додаткової радіальної сили, а також максимальних напружень у лопаті. Зростання цих показників є суттєвим, тому необхідно технологічними методами забезпечувати підвищення точності виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії.

Сьогодні долота ріжуче-стираючої дії є широкоживаними і їх популярність у світі продовжує зростати. Основна перевага цих доліт над конкурентами – відсутністю рухомих елементів у конструкції, крім того вони технологічні щодо виготовлення і ефективні щодо експлуатації. Для отримання всіх можливих переваг таких доліт на практиці потрібно забезпечити належну точність виготовлення цих виробів. Аналіз кількох серій доліт дозволив встановити, що основними похибками виготовлення є величина неспіввісності між корпусом і ніпелем долота, а також перекошення осей корпусу і ніпеля. Такі похибки при експлуатації можуть впливати на керованість долота. При використанні долота з похибкою в компоновці низу бурильної колони виникають позаштатні напруження. Також додаткові напруження виникають і в елементах самого долота. Найперше при неспіввісності осей ніпеля і корпусу на долоті виникає додаткова поперечна притискна сила. Визначено, що така притискна сила залежить від величини похибки, від компоновки низу бурильної колони, від марки матеріалу труб та від коефіцієнту постелі породи, з якої сформована стінка свердловини. Основним елементом компоновки низу бурильної колони є обважені бурильні труби. З-поміж низки відомих на сьогодні марок обважених бурильних труб найменшу чутливість до геометричної недосконалості долота виявляють композитні карбонові бурильні труби. Аналіз контактної взаємодії долота зі стінкою свердловини при експлуатації в нештатному режимі дозволив здійснити оцінку позаштатних напружень, які виникають у лопатях долота. Такі результати дозволяють оцінювати міцність лопатей долота і визначати допустимі похибки виготовлення, за яких експлуатація долота залишатиметься безпечною.

2.3 Дослідження силової взаємодії різця з гірською породою

Для визначення проєкцій сил реакції гірської породи R_{ij} (RX_{ij} , RY_{ij} , RZ_{ij}) [3] за основу вибрана модель контрактної взаємодії різця

із породюю, запропонована А. К. Wojtanowicz та Е. Kuru. Відмінністю між даною моделлю та представленою в цій роботі є те, що в роботі розглядаємо напрямок сили реакції породи паралельним до напрямку анізотропії порід, а не паралельним до напрямку прикладеного навантаження. Також, в даній дисертаційній роботі розглядаються дві контактні ділянки: ділянка на передній поверхні різця та ділянка на бічній поверхні різця.

Складаємо векторне рівняння рівноваги різця.

$$\overline{R} + \overline{P} + \overline{F}_T + \overline{F}_T^* + \overline{F}_W = 0 \quad (2.9)$$

Для нового різця:

$$\begin{cases} RX = P_{ij} \cdot \cos P_{Xij} - F_{Tij}^* \cdot \cos P_{Xij} - F_{Tij} \cdot \sin P_{Xij} - F_{Wij} \cdot \sin R_{Xij} \\ RY = P_{ij} \cdot \cos P_{Yij} - F_{Tij}^* \cdot \cos P_{Yij} - F_{Tij} \cdot \sin P_{Yij} - F_{Wij} \cdot \sin R_{Yij} \\ RZ = P_{ij} \cdot \cos P_{Zij} - F_{Tij}^* \cdot \cos P_{Zij} - F_{Tij} \cdot \sin P_{Zij} - F_{Wij} \cdot \sin R_{Zij} \end{cases} \quad (2.10)$$

Для зношеного різця:

$$\begin{cases} RX_{ij}^D = -F_W \cdot \sin R_{Xij} \\ RY_{ij}^D = -F_{Tij}^* - F_{Wij} \cdot \sin R_{Yij} \\ RZ_{ij}^D = -F_{Tij}^* \cdot \cos P_{Zij} - F_{Wij} \cdot \sin R_{Zij} \end{cases} \quad (2.11)$$

Таким чином, на довільний різець діють наступні сили: сила прикладеного навантаження P_{ij} (орієнтоване під кутами $P_{Xij}; P_{Yij}; P_{Zij}$ до відповідних осей, аналогічно до розміщення різця); сила реакції породи R_{ij} (орієнтована під кутами $R_{Xij}; R_{Yij}; R_{Zij}$ до відповідних осей, спрямована до найближчих концентраторів напружень, є лінією розміщення неоднорідностей породи), а також сили тертя F_{mij} та F_{m*ij} на контактній та потенційно зношеній частинах різця (які спрямовані по контактній поверхні різця і породи і для незношеного різця орієнтована під кутами $P_{Xij}; P_{Yij}; P_{Zij}$ до відповідних осей, аналогічно до розміщення різця).

На рис. 2.14 показано розміщення даних сил у випадку зношеного і незношеного різців.

Сумарне значення сили реакції породи

$$R = \sqrt{RX^2 + RY^2 + RZ^2} \quad (2.12)$$

є однаковою для випадків врахування анізотропії та не врахування: $|R| = |R^D|$, проте вони мають різні напрямки, оскільки ми розглядаємо напрямок сили реакції породи паралельним до напрямку анізотропії порід, а не паралельним до напрямку прикладеного навантаження.

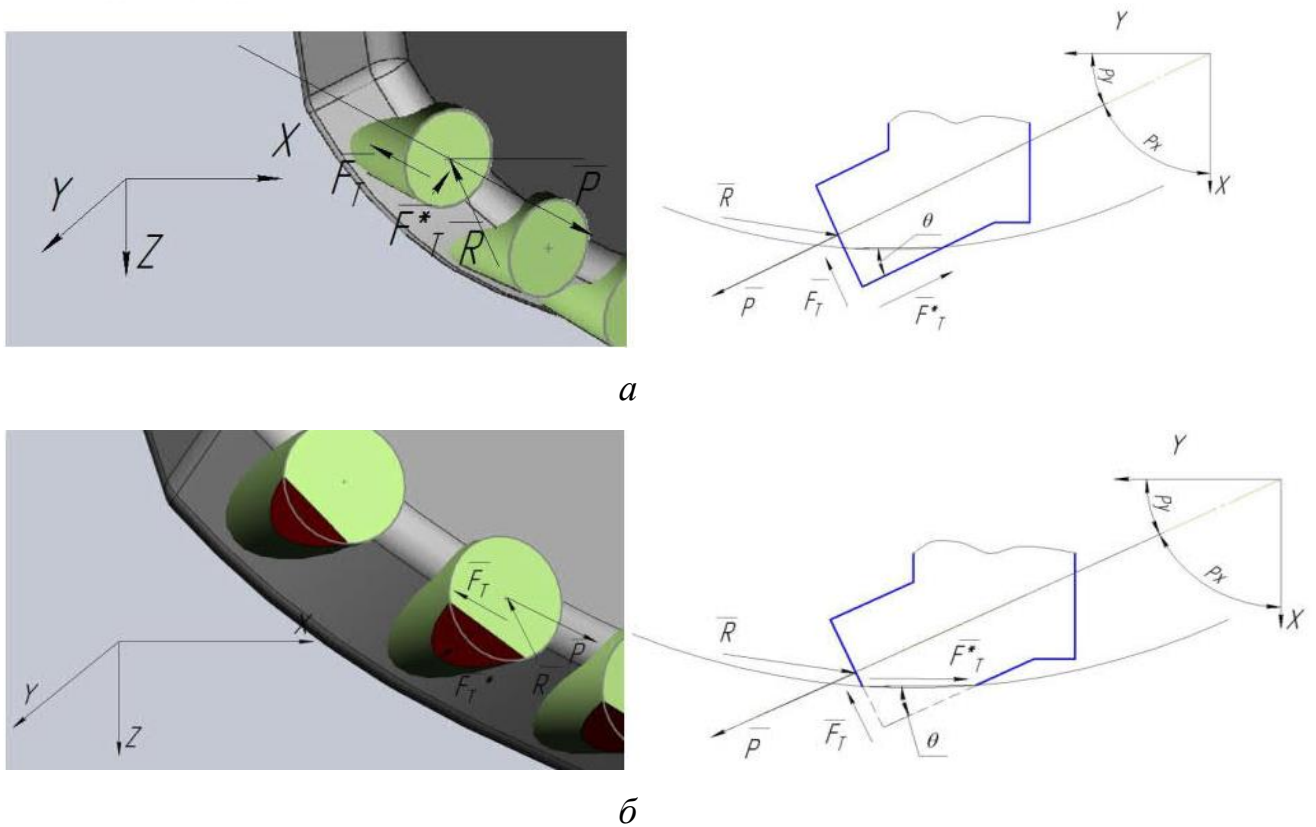


Рисунок 2.14 – Схема прикладання сил для нового (а) і зношеного (б) різців

В межах цієї дисертаційної роботи ми припускаємо, що в реальних умовах проекція на вісь X сили реакції породи відхилиться від осі X на кут R_X , проекція на вісь Y сили реакції породи відхилиться від осі Y на кут R_Y , проекція на вісь Z сили реакції породи відхилиться від осі Z на кут R_Z відповідно. Також вважаємо, що складові реакції породи не є взаємно перпендикулярними.

У свою чергу, відхилені компоненти сили реакції породи визначаються за формулою:

$$RX^D = RX \cdot \cos R_X, \quad RY^D = RY \cdot \cos R_Z, \quad RZ^D = RZ \cdot \cos R_Z, \quad (2.13)$$

тут D відповідає відхиленій величині відповідної проекції сили реакції породи.

Остаточно розв'язок системи рівнянь має вид:

- для нового різця:

$$\begin{cases} RX_{ij}^D \cos R_X = P_{ij} \cdot \cos P_{Xij} - S_{2ij}^* \cdot f_{2ij}^* \cdot \sigma^* \cdot \cos P_{Xij} - S_{1ij} \cdot \sigma \cdot f_{1ij} \cdot \sin P_{Xij} - S_{2ij}^* \cdot \sigma^* \cdot \sin R_X \\ RY_{ij}^D \cos R_Y = P_{ij} \cdot \cos P_{Yij} - S_{2ij}^* \cdot f_{2ij}^* \cdot \sigma^* \cdot \cos P_{Yij} - S_{1ij} \cdot \sigma \cdot f_{1ij} \cdot \sin P_{Yij} - S_{2ij}^* \cdot \sigma^* \cdot \sin R_Y \\ RZ_{ij}^D \cos R_Z = P_{ij} \cdot \cos P_{Zij} - S_{2ij}^* \cdot f_{2ij}^* \cdot \sigma^* \cdot \cos P_{Zij} - S_{1ij} \cdot \sigma \cdot f_{1ij} \cdot \sin P_{Zij} - S_{2ij}^* \cdot \sigma^* \cdot \sin R_Z \end{cases} \quad (2.14)$$

- для зношеного різця:

$$\begin{cases} RX_{ij}^D = -F_W \cdot \sin R_{Xij} \\ RY_{ij}^D = -F_{Tij}^* - F_{Wij} \cdot \sin R_{Yij} \\ RZ_{ij}^D = -F_{Tij}^* \cdot \cos P_{Zij} - F_{Wij} \cdot \sin R_{Zij} \end{cases} \quad (2.15)$$

Де f_1 і f_2 – коефіцієнти тертя для ділянок «алмазно-твердосплавна пластина і порода» та «тіло різця-порода» відповідно; σ_1 та σ_2 – питомий опір руйнуванню породи та опір породи на тиск, S_{1ij} – площа ділянки контакту на передній поверхні різця, f_{1ij} – коефіцієнт тертя «алмаз-порода», σ – границя міцності породи; S_{1ij} – площа ділянки контакту на передній поверхні різця, S_{2ij}^* – площа ділянки контакту на бічній поверхні різця.

2.4 Скінчено-елементна перевірка міцності лопатей за наявності похибки виготовлення долота (биття)

Для перевірки міцності лопатей за наявності похибки виготовлення деталей та обґрунтованих аналітично режимів випробовування для дослідження впливу технологічних параметрів виготовлення доліт на їх роботоздатність, було проведено скінчено-елементне моделювання роботи долота. За аналог була прийнята модель долота ИСМ 14.4764.1001 (додаток Б).

Числовий експеримент був проведений з використанням ряду наведених нижче припущень: у розрахунку не враховувалась виділення тепла в зоні різання; коефіцієнт тертя по передній поверхні приймався постійним по всій її

довжині, не залежно від дотичних напружень; коефіцієнт тертя по задній поверхні приймався постійним і рівним коефіцієнту на передній поверхні; ріжуча кромка приймалася постійною, форма різця не змінювалася; зношування не враховувалося.

Матеріали, що використовувалися для моделювання представлено у табл. 2.3. Товщина зварного шва – 10 мм. Задавалися такими величинами неспівності між корпусом та ніпелем: 0,2 мм, 0,4 мм, 6,6 мм, 0,8 мм, 1,0 мм.

Таблиця 2.3 – Матеріали елементів доліт і породи, що використовувалися під час моделювання

Матеріал / Корпус	Порода	Лопать	Зварний шов	Корпус долота
Суцільний	Concrete-L	BoronCarbi	Constructional Steel	Constructional Steel
Із привареними лопатями	Concrete-L	BoronCarbi	–	BoronCarbid

У моделі було прийнято такі обмеження: температура оточуючого середовища 20 °С; для долота передбачалася можливість здійснювати обертовий рух і переміщення відносно вертикальної осі, порода розглядалася фіксованою; коефіцієнт тертя між лицьовою поверхнею лопатей і гірською породою прийняли $f = 0,12$; задавалися значення швидкості переміщення долота вздовж вертикальної осі у 0,1 м/с; крутний момент – 3 кН/м, кількість обертів долота $n=45 \text{ хв}^{-1}$.

Таблиця 2.4 – Властивості матеріалів, що використовувалися для моделювання

Матеріал / Властивості	Густина, кг/м ³	Об'ємний модуль пружності, Па	Модуль зсуву, Па
Concrete-L	2440	$0,42 \cdot 10^5$	$7,88 \cdot 10^9$
BoronCarbi	2516	$2,33 \cdot 10^{11}$	$1,99 \cdot 10^{11}$
Constructional Steel	7800	$2,05 \cdot 10^{11}$	$79,3 \cdot 10^{11}$

В основу моделі було покладено фундаментальне рівняння руху точок твердого тіла, яке можна записати у вигляді [82]:

$$\rho \cdot U_1 = \rho \cdot f_1 + \sigma_{ij}$$

де U_1 , U_1^* , U_1^{**} – відповідно вектори переміщення точок твердого тіла, їх швидкість і прискорення; f_1 - щільність в даний момент прискорення; ρ – щільність в даний момент часу; σ_{ij} – компоненти тензора напружень Коші.

Граничні умови математично формулюються у вигляді:

$$\text{у силах на границях тіла } \sigma_{ij} \cdot n_{ij} = F(t); \quad (2.16)$$

$$\text{в переміщеннях на кордоні тіла } u = U; \quad (2.17)$$

$$\text{у силах на контактній границі } (\sigma^+ - \sigma^-)n = 0 \text{ при } u^+ = u^- \quad (2.18)$$

$$\text{Рівняння збереження маси } \rho V = \rho_0, \quad (2.19)$$

де $V = \det\left(\frac{\partial u_i}{\partial U_i}\right)$ – початкова щільність матеріалу.

$$\text{Рівняння енергії } E = V \cdot s_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} - (p - q) \cdot V \quad (2.20)$$

Де $s_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q) \cdot \delta_{ij}$ – компоненти девіатора тензора напружень Коші;

$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \cdot \delta_{ij} - q$ – гідростатичний тиск (від'ємний при розтягу); q – об'ємна

в'язкість; δ_{ij} – символ Кронекера; ε_{ij} – компоненти тензора швидкості деформації.

В роботі прийнято допущення про плоску деформацію: $u_z = 0$, $\varepsilon_z = 0$, $b = 1$.

Сили, що діють на тверде тіло, можна визначили за формулою [82]

$$f = f_{contact} + f_{load} - I \quad (2.21)$$

f_{load} – приведені до вузлів сітки об'ємні і зовнішні сили, діючі на тіло; $f_{contact}$ – приведені до вузлів сітки сили на контактній межі тіла; I – внутрішні сили

За результатами моделювання встановлено, що як для суцільних, так і для доліт із привареними лопатями найбільші напруження спостерігаються в момент вривання долота в породу. Для всіх типів доліт ділянками із найбільшими напруженнями є нарізеві ділянки. Для доліт із привареними

лопатями такими ділянками також є ділянки зварних швів. Максимальні напруження у лопатях, отримані скінчено-елементно, представлено у табл. 2.5.

Розбіжності у величині максимальних напружень в лопаті, отриманих аналітично та скінчено-елементним моделюванням, становлять, в середньому, 15–20 %, що пояснюється вибором аналогів матеріалів та спрощеннями під час моделювання.

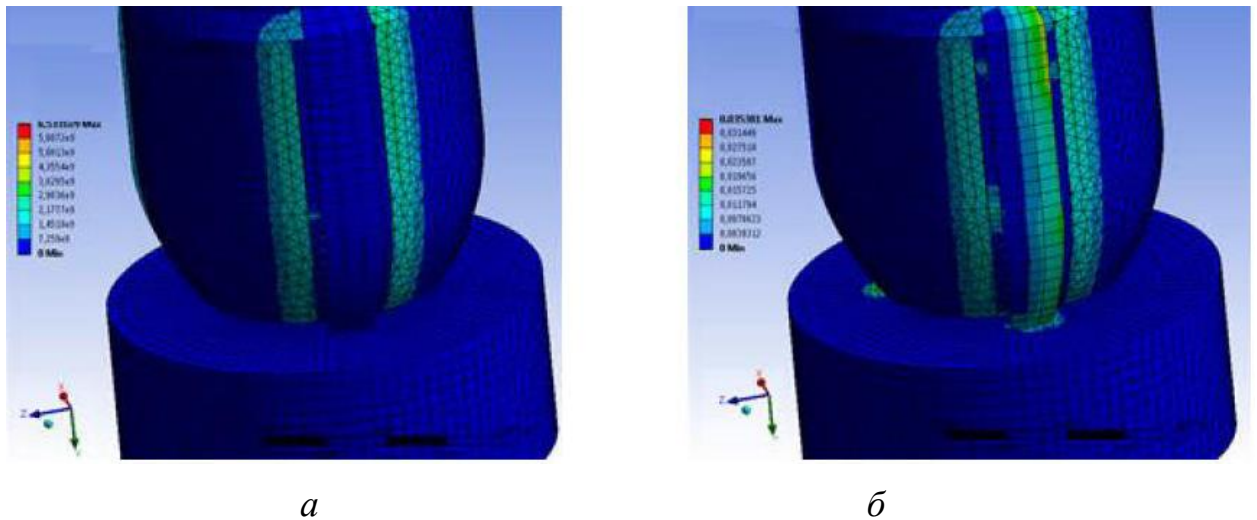


Рисунок 2.15 – Еквівалентні напруження, МПа (*a*) та деформації (*б*) в елементах долота із привареними лопатями під час врізання у породу для величини похибки неспівісності 0,2 мм

Таблиця 2.5 – Результати скінчено-елементних розрахунків напружень у лопатях долота

Показник	Похибка Δ , мм				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Максимальне напруження в лопаті $ \sigma_{\max}^- $, МПа	228,4	268,4	297,5	308,7	351,2

Висновки до розділу 2

Розглянуто основні похибки на кожній технологічній операції виготовлення долота і їхній вплив на показники відпрацювання долота. Встановлено, що внаслідок наявності похибки виготовлення бурового долота

у вигляді неспіввісності осей ніпеля і корпуса виникає додаткова поперечна сила, яка притискає долото до стінки свердловини. Визначено, що величина притискної сили може набувати суттєвих значень.

Розглянуто особливості контактної взаємодії бурового долота зі стінкою свердловини під час експлуатації в нештатному режимі. Визначено позаштатні напруження та здійснена оцінка міцності лопатей за наявності похибки виготовлення долота.

Проаналізовано вплив механічних властивостей різних матеріалів обважнених бурильних труб на величину позаштатної притискної сили. Встановлено, що найменшу чутливість до геометричної недосконалості виготовлення бурового долота виявляє пружна система колони труб, яка включає калібратор і скомпонована з композитних карбонових бурильних труб. (Drill Pipe Based on Composite Carbon Fiber Material), а найбільшу – зі сталевих бурильних труб. Вибрано такі режими випробування доліт– частота обертання $n=45 \text{ хв}^{-1}$, крутний момент 1,5 – 3,0 кНм.

Результати розділу опубліковано у працях авторки [2], [3], [14].

РОЗДІЛ 3

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДОЛІТ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ВИПРОБУВАНЬ

3.1 Вибір матеріалів і обладнання для виготовлення моделей доліт

3.1.1 Матеріали для виготовлення корпусів моделей доліт

Для виготовлення моделей доліт використовувалися такі матеріали – для корпусу із привареними лопатями використовували сталь 14ХНЗМА-Ш за ТУ 14-1-5425-2001 [52], [53], суцільного литого – 20 ХН за ГОСТ 4543 – 71.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталей 14ХНЗМА-В за ТУ-14-1-4612-89 і 20 ХН за ГОСТ 4543 – 71 (масові %)

Сталь	C	S	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	S	P
14ХНЗМА-Ш	0,12 – 0,16	0,20 – 0,35	0,60 – 0,80	≤0,25	3,1 – 3,4	1,35 – 1,55	0,10 – 0,15	≤0,01 – 5	≤0,02 – 0
20ХН	0,17 – 0,23	0,2 – 0,35	0,40 – 0,70	0,30	1 – 1,4	0,45 – 0,75	–	0,035	0,035

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сталей 14ХНЗМА-Ш за ТУ-14-1-4612-89 і 20 ХН за ГОСТ 4543 – 71

Сталь	Границя текучості, МПа	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, кДж/м ²	НВ
14ХНЗМА-Ш	≥835	≥930	≥10	≥55	≥1080	≤269
20ХН	590	780	14	50	810 – 890	280

3.1.2 Припаювання різців до лопатей

Твердосплавні різці (діаметром 13,5 мм та висотою 3,5 мм) були виготовлені із твердого сплаву ВК8 ГОСТ 4411-79, алмазно-твердосплавна

пластина $13,5^{+0,5}$ мм і товщиною 0,7 – 0,8 мм – із мікропорошків марки АСМ 60/40. Під час припаювання готові різці (АТР) із закріпленими алмазними пластинами фіксували у корпусі долота за допомогою низькотемпературного припою з температурою плавлення нижче 700°C . Перед припаюванням різців до лопатей відповідні поверхні деталей лопаті очищали від бруду, жиру, продуктів корозії. Перевіряли дотримання величини зазорів по діаметру отвору в межах 0,05 – 0,1 мм щодо АТР. Потім наносили флюс марки ПВ-209 ГОСТ 23178-78 (табл. 3.3) в зону паяння у вигляді пасти, виготовленої шляхом змішування флюсу на воді у вигляді кашоподібної суміші при співвідношенні флюсу і води 100:60 (масові %).

Для паяння використовували високочастотне нагрівання до повного розплавлення припою та утворення зовнішніх галтельних ділянок по всьому перерізу АТР з отворами лопаті. При виявленні неповного припаювання АТР з отворами лопаті в зону паяння додатково вводили припій у вигляді дроту діаметром 1,2 – 2,0 мм. Параметр джерела нагріву для здійснення паяння АТР з лопаттю – $I_{\text{анод}} = 1,5 - 2,0 \text{ А}$.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад флюсу марки ПВ-209 ГОСТ 23178-78 (масові %)

В	F	К	О
12,3 – 13,5	26,7 – 28,5	33,5 – 36,4	21,8 – 27,5

Припой ПСР40 та технологічні режими паяння (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Властивості припою ПСр-40

Базова система	Тривалість нагрівання, с	Інтервал плавлення, $^{\circ}\text{C}$	Площа розтікання, мм^2	Зусилля стиску, Р, кг	Міцність на зріз $\tau_{\text{ЗР}}$, МПа
Ag-Cu-Zn-Cd	24	590-610	89,89	3500	245

3.1.3 Приварювання лопатей до корпусу доліт

Для приварювання лопатей до корпусу використовували напівавтоматичне зварювання під захистом у суміші газів (82 % Ar + 18 % CO₂) на апараті «Фроніус». Зварювальний струм становив $I = 180 - 200$ А, напруга становила $U = 18-20$ В. Посилення катетів зварних швів не здійснювали.

Для приварювання сталевих лопатей і сталевих корпусів використовували електроди ЦУ-2-ХМ (табл. 3.5). При цьому здійснювалося попереднє нагрівання деталей та супутнє нагрівання під час зварювання до температури 200 °С. Зварювання здійснювалося максимально короткою дугою за умови зачищених кромки. Електроди прожарювалися до температури 300 – 350 °С протягом години, оскільки вони мали фтористо-кальцієве покриття. Хімічний склад та властивості металу зварного шва представлені в табл. 3.6 та табл. 3.7.

Таблиця 3.5 – Характеристика електродів ЦУ-2-ХМ

Показник	Характеристика
Покриття	Фтористо-кальцієве
Коефіцієнт наплавлення	9,5 г/А·год
Продуктивність наплавлення (для діаметра 4,0 мм)	1,5 кг/год
Витрата електродів на 1 кг наплавленого металу	1,7 кг

Таблиця 3.6 – Типовий хімічний склад наплавленого металу, масові %

С	Mn	Si	Mo	Cr	S	P
0,08	0,7	0,3	0,5	1,0	0,018	0,020

Таблиця 3.7 – Механічні властивості металу шва ЦУ-2ХМ

Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Питома в'язкість, Дж/см ²
490	22	110

3.1.4 Приварювання ніпелю до корпусу долота

Складання бурових доліт ріжуче-стираючої дії передбачало виконання таких технологічних операцій [70, 74]: згвинчування корпусу долота із ніпелем по нарізі; виконання трьох прихоплювальних зварних швів по діаметру з'єднання; виконання зварного шва для з'єднання долота із ніпелем.

В зв'язку з тим, що під час зварювання виникали температурні деформації, які відхиляють вісь осі корпусу в напрямку, протилежному до місця шва, положення нових прихоплювальних швів вибирали компенсуючі зміщення осей деталей, що з'єднуються, отримані на попередніх переходах. З кожним новим прихоплювальним швом здійснювалося послідовне зближення осей деталей, що піддавалися зварюванню.

3.1.5 Виготовлення литих корпусів бурових доліт

Корпуси доліт виливали в ливарному цеху АТ «Івано-Франківський локомотиво-ремонтний завод» за заводською технологією зі сталі 20ХН.

3.2 Скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану заготовок литих корпусів

Для моделювання процесу кристалізації заготовки долота була вибрана програма ProCast (тріальна версія). Першим кроком було створення твердотільної моделі і генерація скінчено-елементної сітки. Процес побудови 3D-моделі в середовищі SolidWorks полягав у створенні об'ємних геометричних елементів і виконанні різних операцій над ними. Твердотільна модель долота показана на рис 3.1.

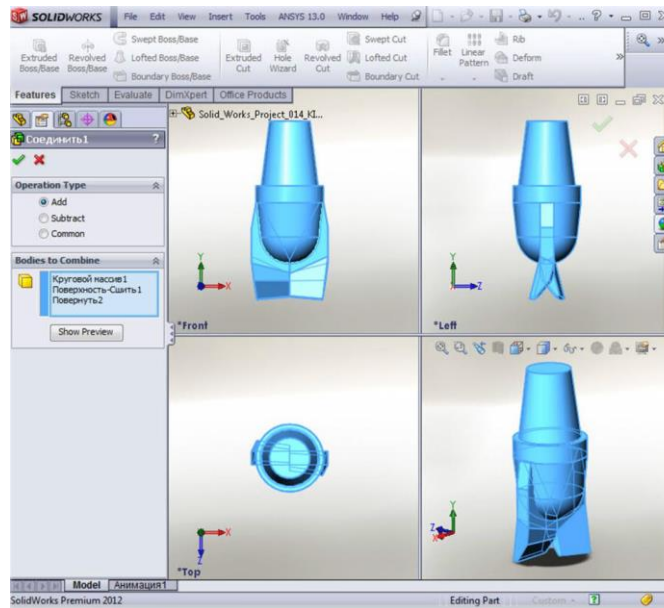


Рисунок 3.1 – Схема створення литої заготовки спрощеної моделі долота

Ливарну форму будували в SolidWorks (рис. 3.2). У результаті всіх побудов отримали 3D-модель вилівка і форми, які експортувалися в програму ProCast. Після генерації кінцево-елементної сітки (рис. 3.3 та рис. 3.4) в програмі виконували присвоєння елементам розрахункової області властивостей (теплових, усадочних, деформаційних та ін.

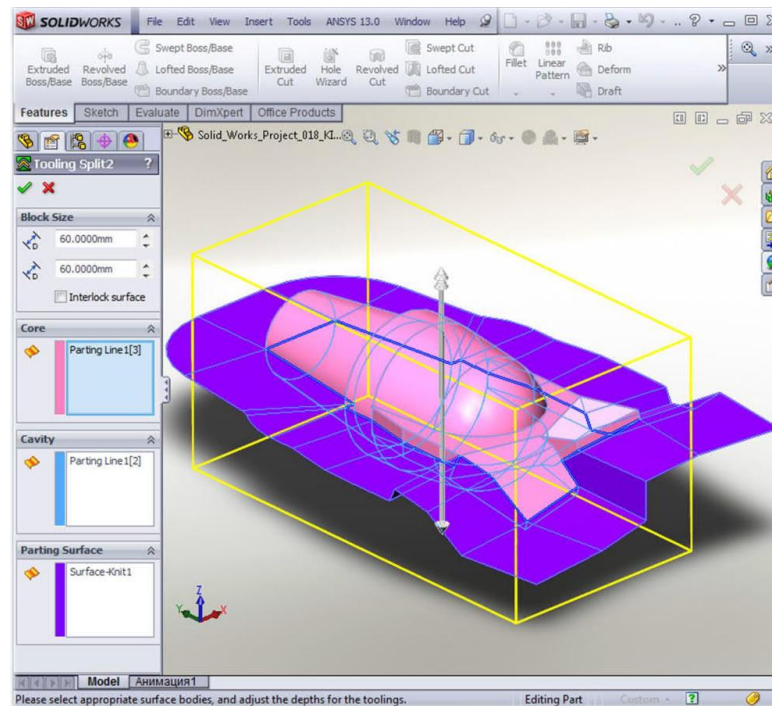


Рисунок 3.2 – Створення ливарної форми долота в системі Pro-Cast:

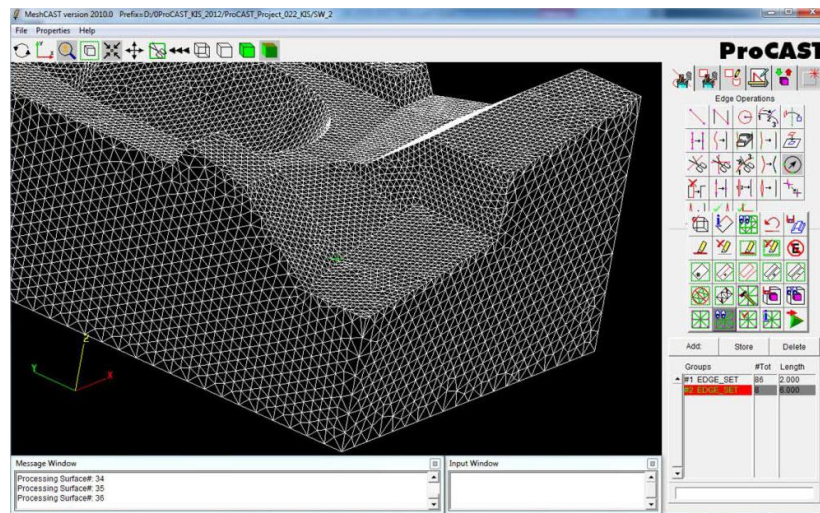


Рисунок 3.3 – Генерація просторової сітки долота і ливарної форми в системі Pro-Cast

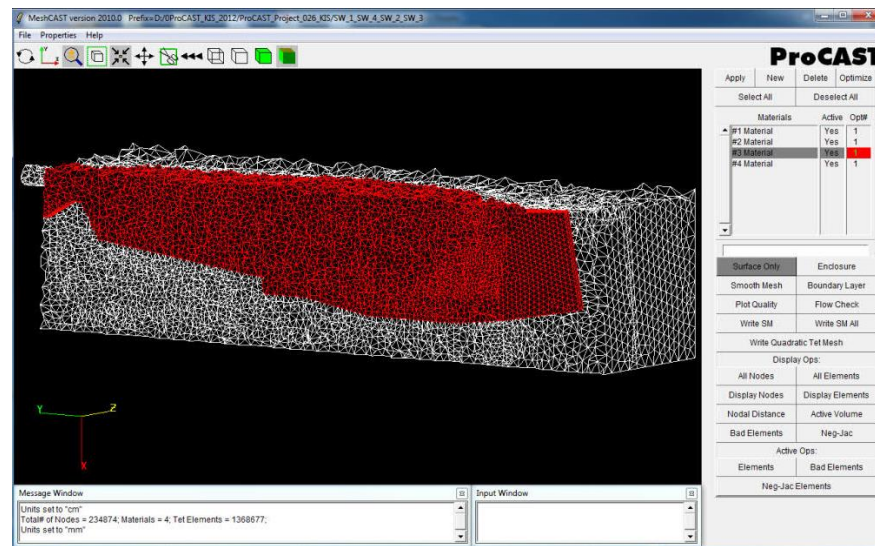


Рисунок 3.4 – Об'ємна сітка завершеної збірки

Наступними кроками моделювання були: вибір матеріалів (табл. 3.8), створення контактних поверхонь між компонентами і призначення їхніх типів, встановлення значення коефіцієнта тепловіддачі для кожної контактної поверхні, встановлення граничних умов (тиск, швидкість, температура, вага).

Додали в базу даних матеріалів ProCAST новий матеріал – сталь 20XH згідно ГОСТ 4543 – 71, механічні властивості якої подано в табл. 3.2, хімічний склад в табл. 3.1. Для заливання розтопленої сталі у форму використали модуль програми Fluids Module. За колірною шкалою в градусах Цельсія (°C),

яка розташована на рисунках зліва контролювали температуру рідкого сплаву. Залишкові напруження розраховували у виливку за пружно-в'язкопластичною моделлю, а ливарну форму (кокіль) для спрощення досліджень задавали як абсолютно жорстке тіло.

3.3 Методика і засоби для контролю поверхонь доліт

Контроль доліт ріжуче-стираючої дії передбачав такі етапи за ISO 10424-2:2007 [83]: контроль нарізі за API; вимірювання зовнішнього діаметру та всіх інших розмірів відповідно до кресленника; візуальний контроль різців та долота в цілому; дослідження званих швів. Особлива увага надавалася відповідності конічної нарізі необхідним параметрам. Для вимірювання шорсткості конічної нарізі були додатково розроблені пристрої, оскільки параметри шорсткості не могли бути проконтрольовані традиційними вимірювальними засобами.

3.3.1 Порядок контролю зовнішньої замкової конічної нарізі

Під час контролю геометричних параметрів деталей нарізевих з'єднань вимірювали: крок нарізі і довжину елементів нарізевого з'єднання паралельно осі нарізі; діаметр елементів нарізевого з'єднання, висоту профілю нарізі і кути нахилу сторін профілю нарізі – перпендикулярно осі нарізі; натяг нарізі і перпендикулярність поверхні упорних елементів – паралельно осі муфтового або ніпельного кінця; площинність поверхні упорних елементів – перпендикулярно осі муфтового або ніпельного кінця.

Крок нарізі вимірювали на ділянці довжиною 25,4 мм між будь-якими двома витками з повним профілем і на всій довжині нарізі з повним профілем (сумарний крок). Перевірка геометричних розмірів і параметрів нарізевих з'єднань здійснювалася за допомогою універсальних вимірювальних засобів та калібрів.

3.3.2 Розроблення пристрою для вимірювання шорсткості нарізевих поверхонь

Шорсткість поверхні нарізі вимірювали на профілограф-профілометрі 201 (рис. 3.5), який призначений для визначення шорсткості і хвилястості поверхонь деталей з будь-яких матеріалів. Прилад складався з двох блоків: електронного вимірювального і записуючого. На стійці були розміщені вимірювальний столик, привід і датчик. Визначення величин і профілю мікронерівностей поверхні проводилося за профілограмою, представленою у прямокутних координатах.

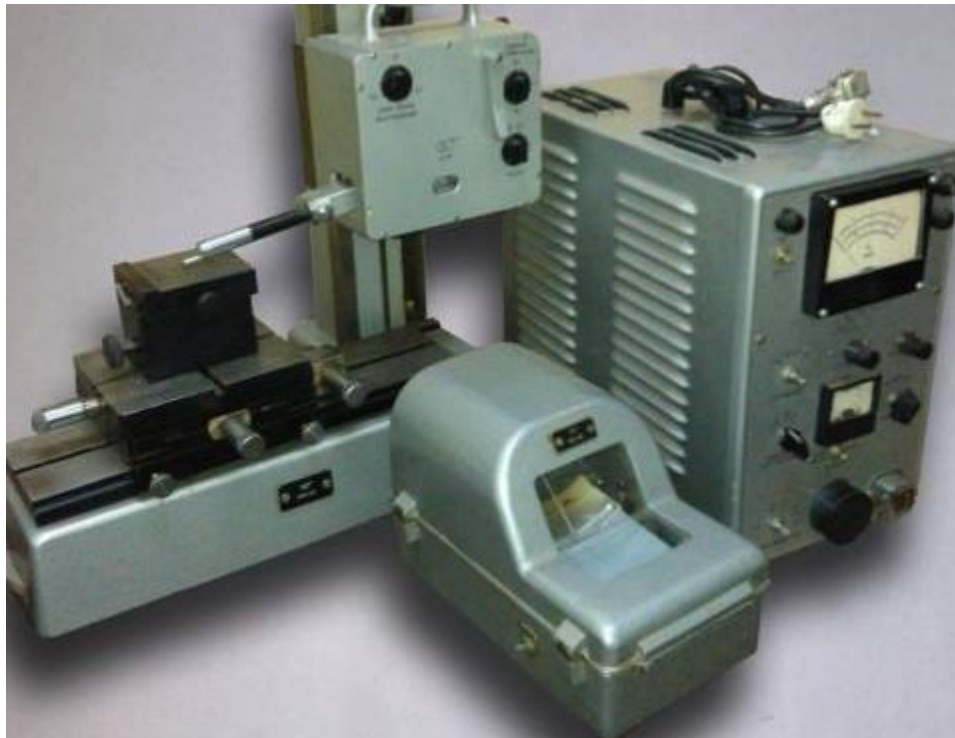


Рисунок 3.5 – Профілограф-профілометр моделі 201 (Джерело: фото з відкритих джерел Інтернет)

Крім цього, для вимірювання профілю нарізі використовували розроблений пристрій для вимірювання віддалі до поверхні, що працює на основі принципу лазерної триангуляції [84–90]. Лазерний промінь, перпендикулярний до базової лінії вимірювання потрапляє на досліджувану

поверхню. Для визначення кута видимості підсвіченої плями на досліджуваній поверхні використовується оптичний приймач, що складався із об'єктиву і матриці світлочувливих елементів встановлених на одній осі і закріпленій на поворотній платформі. Платформа оберталася кроковим двигуном (рис. 3.6). Промінь лазера позначав на досліджуваній поверхні точку. Зображення точки потрапляло через об'єктив на матрицю. Контролер оцінював яскравість зображення і знайшовши точку із найбільшою інтенсивністю скеровував кроковий двигун на поворот оптичного приймача так, щоб найбільш яскрава ділянка потрапила в центр матриці. Такий підхід дозволяв зменшити вплив дисторсійних спотворень геометричних розмірів зображення, які виникають в об'єктиві (рис. 3.6).

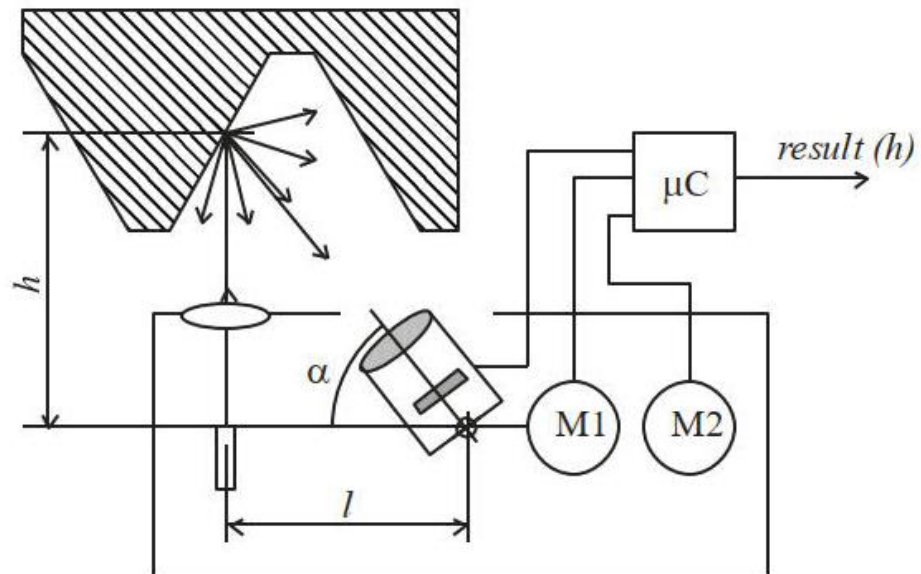


Рисунок 3.6 – Функціональна схема вимірювання відстані до поверхні нарізі оптичним методом

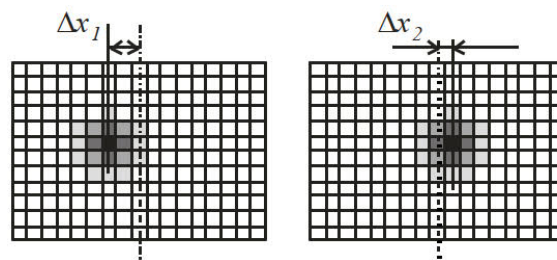


Рисунок 3.7 – Положення яскравої ділянки на дискретній матриці для різних кутів повороту оптичного приймача в околі середини матриці

3.3.3 Розроблення пристрою для вимірювання деформацій в нарізевому конічному з'єднанні

Проблема вимірювання деформацій у нарізевому з'єднанні полягає у тому, що неможливо проконтролювати деформації безпосередньо у контактній зоні. Тому була використана схема вимірювання із застосуванням тензодатчиків (рис. 3.8), загальний підхід до вимірювання описаний у [91] та [92].

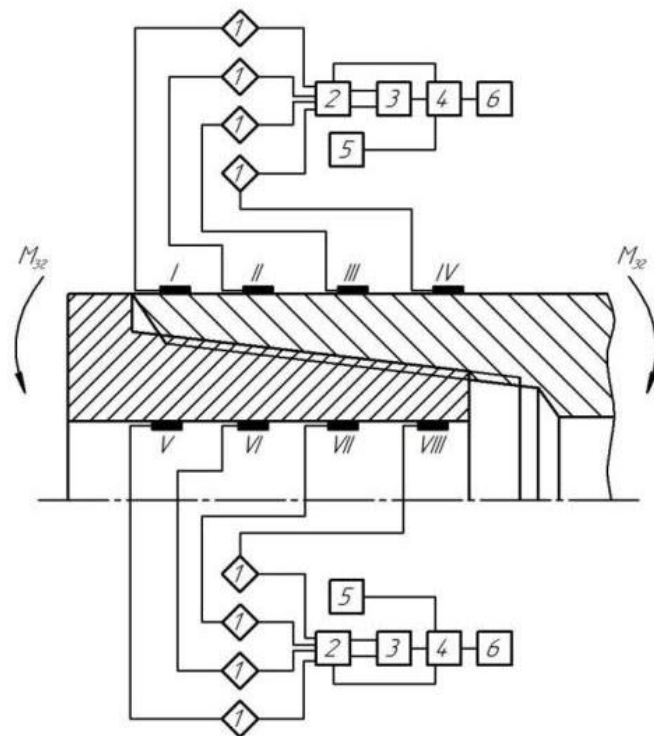


Рисунок 3.8 – Структурна схема установки для визначення деформацій елементів нарізевого з'єднання: 1 – сенсорні групи, 2 – комутатор сигналів,

3 – перетворювач, 4 – мікроконтролер, 5 – джерело живлення, 6 – ПК

Для вимірювання деформацій у конічному нарізевому з'єднанні використали аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) типу НХ711.

3.4 Розроблення технології фрикційного зміцнення замкової конічної нарізі

3.4.1 Удосконалення конструкції інструменту для фрикційного зміцнення конічної замкової нарізі

Для проведення фрикційного зміцнення конічних замкових нарізей був удосконалений інструмент [93], який вирішував задачу зміцнення западин і бокових поверхонь конічних нарізей, оскільки конічні нарізі передбачають різні довжини бокових поверхонь різних витків (рис. 3.9). Щоб отримати вихідні дані для розроблення інструментів для зміцнення западин і бокових поверхонь профілю, було розглянуто конічні нарізі не тільки як гвинтові лінії, але і як поверхні гелікоїдів; визначено, які параметри гелікоїдів роблять нарізь конічною та отримано залежності для розрахунку цих геометричних параметрів.

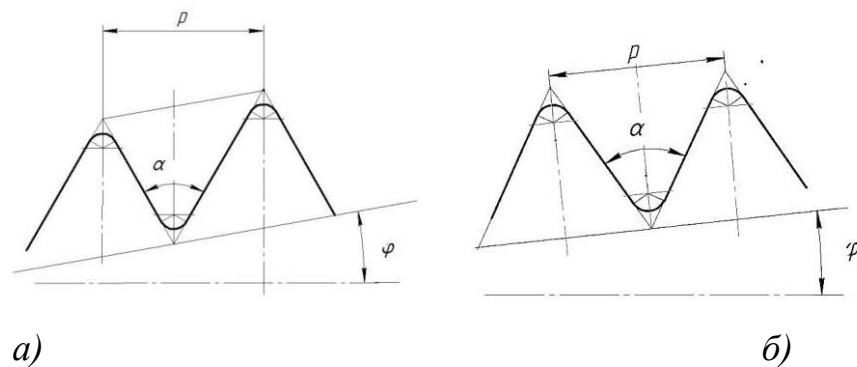


Рисунок 3.9 – Конічні нарізі з трикутним профілем, які різняться нахилом профілю: а – конічна замкова нарізь для елементів бурильних колон за ГОСТ Р 50864–96; б – конічна нарізь за ГОСТ 9909 – 81 (бісектриса кута профілю перпендикулярна до твірної конус)

Відомими параметрами є крок p нарізі, кут нахилу нарізі φ та кут профілю нарізі β , який для конічної замкової нарізі становить 60° (наприклад, за ГОСТ Р 50864–96) або 55° (наприклад, за DIN 2999 BSPT). Бокові поверхні нарізей утворюються двома гелікоїдами, саме їх перетин і дає гвинтову лінію западин і гвинтову лінію виступів. Визначимо за рахунок яких параметрів ці лінії утворюються конічними.

Розглянемо нарізь за ГОСТ Р 50864 – 96 (рис. 3.10). Вона утворена гелікоїдами з твірними (AB) та (BC) , симетрично нахиленими відносно

площини, перпендикулярної до осі обертання поверхонь на кут $\alpha/2$, а значить $-90 + \alpha/2$ та $90 - \alpha/2$.

Гелікоїд, утворений твірною (AB), має крок $|DC|$:

$$|DC| = |CE| + |ED| \quad (3.1)$$

З трикутника AED

$$|ED| = |AE| \cdot \tan(\alpha/2) \quad (3.2)$$

З рисунка видно, що

$$p = |EC| + |EI| + |IC|, |EI| = |AG| = |EC|/ \quad (3.3)$$

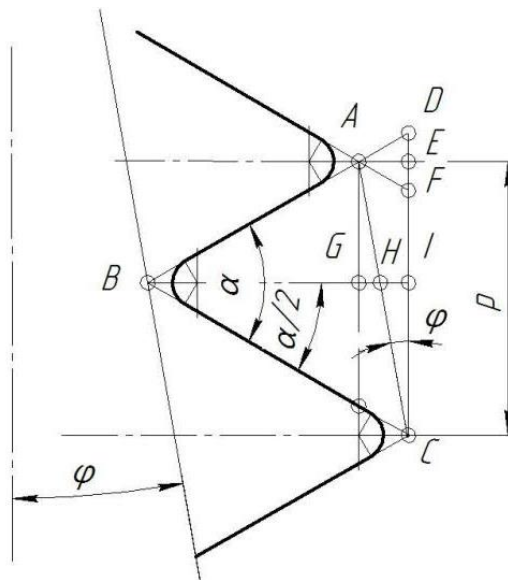


Рисунок 3.10 – Геометричні параметри нарізі нарізі за ГОСТ Р 50864 – 96.

В свою чергу з трикутника CAE

$$|AE| = |CE| \cdot \tan \varphi \quad (3.4)$$

Використавши (3.3), формула (3.4) запишеться

$$|AE| = p \cdot \tan \varphi \quad (3.5)$$

Провівши прості перетворення та, враховуючи (3.3) і (3.5), одержимо

$$|DC| = p \cdot [1 + \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2)] \quad (3.6)$$

А гелікоїд, утворений твірною (BC), має крок $|FC|$ (рис. 3.9). Провівши подібні розрахунки і перетворення одержимо:

$$|FC| = p \cdot [1 - \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2)] \quad (3.7)$$

Формули (3.6) і (3.7) показують різницю між кроками двох утворюючих гелікоїдів конічної нарізі. Саме різниця кроків гелікоїдів і робить конічними

гвинтові лінії виступів і впадин для нарізей, бісектриса кута профілю яких перпендикулярна до осі конуса.

Ще одна особливість конічної нарізі така, що впадина не знаходиться на половині кроку нарізі, тобто точка I не є серединою відрізка $[EC]$. Розглянемо як точка I ділить крок p (рис.3.10).

З трикутника AGB визначимо $|AG|$

$$|AG| = |AB| \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3.8)$$

А з трикутника BCI - $|IC|$

$$|IC| = |BC| \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3.9)$$

З трикутника DBC видно, що

$$|BC| = |AB| + |AP| \quad (3.10)$$

Визначимо $|AD|$. Для цього розглянемо трикутник ADE

$$|AD| = |AE| / \cos(\alpha/2) \quad (3.11)$$

Підставивши (3.4) в (3.11), одержимо

$$|AD| = p \cdot \tan \varphi / \cos(\alpha/2) \quad (3.12)$$

Після підстановки (3.10) та (3.12) в (3.9), одержимо

$$|IC| = [|AB| + p \cdot \tan \varphi / \cos(\alpha/2)] \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3.13)$$

Враховуючи (3.5) та (3.10), (3.13) запишеться

$$p = |AB| \cdot \sin(\alpha/2) + [|AB| + p \cdot \tan \varphi / \cos(\alpha/2)] \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3.14)$$

Після спрощення виразу (3.14) одержимо

$$p = 2 \cdot |AB| \cdot \sin(\alpha/2) + p \cdot \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2) \quad (3.15)$$

З виразу (3.15) визначимо $|AB|$

$$|AB| = p \cdot [1 - \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2)] / [2 \cdot \sin(\alpha/2)] \quad (3.16)$$

Підставивши (3/8) в (3.16) одержимо $|AG|$

$$|AG| = (p/2) \cdot [1 - \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2)] \quad (3.17)$$

Відповідно

$$|IC| = (p/2) \cdot [1 + \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2)] \quad (3.18)$$

З трикутника BCI і простих перетворень одержимо

$$|BC| = p \cdot [1 + \tan \varphi \cdot \tan(\alpha/2)] / [2 \cdot \sin(\alpha/2)] \quad (3.19)$$

Як видно з попередніх формул на довжини бокових поверхонь профіля діаметр нарізі не впливає. Враховуючи формули (3.13) і (3.19) можна розрахувати різниці довжин сторін теоретичного профіля конічної замкової нарізі використовуючи значення параметрів (ГОСТ Р 50864-96). Враховуючи, що $\alpha = 60^\circ$ різниця довжин Δ визначиться за формулою:

$$\Delta = p K \operatorname{tg} 30^\circ \quad (3.20)$$

де K – конусність нарізі. Результати для різних форм профіля зведені в таблицю 3.8.

Розрахунки показали, що дві твірні, які утворюють бічні поверхні впадин нарізі, мають різну довжину, що дається знаки при виготовленні та зміцненні поверхні конічної нарізі такого типу.

Таблиця 3.8 – Різниці довжин сторін профіля для конічних замкових нарізей за ГОСТ Р 50864-96

Параметри і елементи нарізі	Форма профілю					
	I	II	III	IV	V	VI
Число кроків на довжині 25,4 мм	5	4				
P	5,08	6,35				4,233
$K (2\operatorname{tg}\varphi)$	1:4		1:6		1:4	1:8
φ	7°7'30"		4°45'48"		7°7'30"	3°34'35"
Δ , мм	0,733235	0,916546	0,611029		0,916546	0,305490

Поверхня конічної нарізі утворена двома гелікоїдами з твірними (OR) і (OP). З прямокутного трикутника OKM видно, що $\angle KMO = 90 - \varphi$, а значить кут нахилу гелікоїда з твірною (OP) - $\angle KLO = 90 - \varphi + \alpha/2$, для гелікоїда з твірною (OR) - $\angle KNO = 90 - \varphi - \alpha/2$.

Для такого типу нарізей крок p нарізі за стандартом визначається паралельно твірній. Визначимо кроки цих гелікоїдів, початково скориставшись визначенням кроку pI за аналогією з попередньою нарізю. Нагадаємо, що (рис. 3.11)

$$|RP| = p \quad (3.21)$$

Розглянемо нарізь, для якої бісектриса кута профіля перпендикулярна до твірної конуса (рис. 3.11).

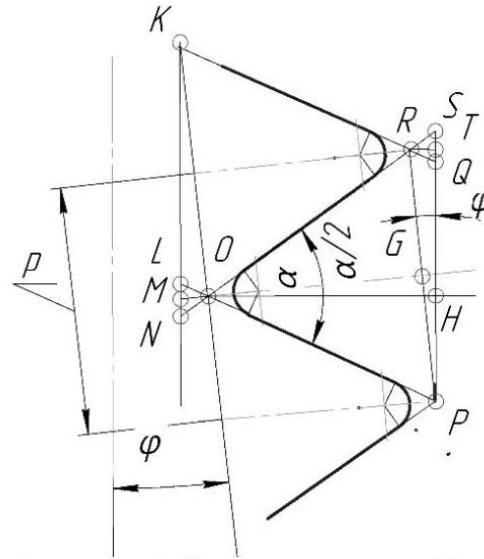


Рисунок 3.11 – Нарізь, для якої бісектриса кута профіля перпендикулярна до твірної конуса

Для гелікоїда з твірною (OR) крок визначиться відрізком SP . Який в свою чергу

$$|SP| = |PT| + |TS| \quad (3.22)$$

З трикутника RPT визначимо

$$|TP| = |RP| \cos \varphi \quad (3.23)$$

$$|RT| = |TP| \tan \varphi \quad (3.24)$$

Підставивши (3.23) в (3.21) та (3.24), одержимо

$$|RT| = p \sin \varphi \quad (3.25)$$

З трикутника RTS визначимо

$$|TS| = |RT| \cot(90 - \varphi - \alpha/2) \quad (3.26)$$

Враховуючи (3.20) та провівши прості перетворення, одержимо

$$|TS| = p \sin \varphi \tan(\alpha/2) \quad (3.34)$$

Одержимо остаточну формулу для кроку гелікоїда з твірною (OR)

$$|PS| = p(\cos \varphi + \sin \varphi \tan(\alpha/2 + \varphi)) \quad (3.27)$$

Для гелікоїда з твірною (OP) крок визначається відрізком PQ (рис.3.10).

Як видно

$$|PQ| = |PT| - |TQ| \quad (3.28)$$

З трикутника RTQ визначимо

$$|TQ| = |RT| \tan(\alpha/2 - \varphi) \quad (3.29)$$

Провівши прості перетворення, з (3.29) одержимо остаточну формулу для кроку гелікоїда з твірною (OP)

$$|PQ| = p(\cos \varphi + \sin \varphi \tan(\alpha/2 - \varphi)) \quad (3.30)$$

Для цього виду нарізі западина знаходиться на середині кроку p .

Таким чином для двох типів конічних нарізей з трикутним профілем – першого, бісектриса кута профілю якого перпендикулярна до осі конуса (рис. 3.9, а), та другого, бісектриса кута профілю якого перпендикулярна до твірної конуса (рис. 3.9, б), було визначено, що, на відміну від циліндричних нарізей, кути нахилу гелікоїдів, які утворюють такі нарізі, відрізняються не тільки знаком кута нахилу до площини, нормальної до їх осей, але і значеннями. Також були встановлені інші особливості геометричних поверхонь конічних нарізей, які можна використати для удосконалення інструментів для нарізання та зміцнення конічних нарізей.

Запропонована конструкція інструменту для фрикційного зміцнення конічних замкових нарізей виконується у вигляді диска із двома конічними боковими поверхнями. Ці поверхні утворюють кут профілю інструмента, рівний куту профілю конічної замкової нарізі. Три деформуючі елементи мають радіус r заокруглення поперечного перерізу рівний радіусу заокруглення западини конічної замкової нарізі, один із яких – периферійний, розміщений на лінії перетину конічних бокових поверхонь – на віддалі радіусу R диска і має форму тора, а два інші – бокові, розміщені на конічних бокових поверхнях диска і мають криволінійну форму. Бокові деформуючі елементи виконані у вигляді кільцевих еліпсоподібних поверхонь, спряжених із периферійним тороподібним деформуючим елементом. Початок радіуса r заокруглення поперечного перерізу бокових деформуючих елементів знаходиться на лінії еліпса з великою віссю a і малою віссю b розташованого на відповідній боковій конічній поверхні диска (рис. 3.12).

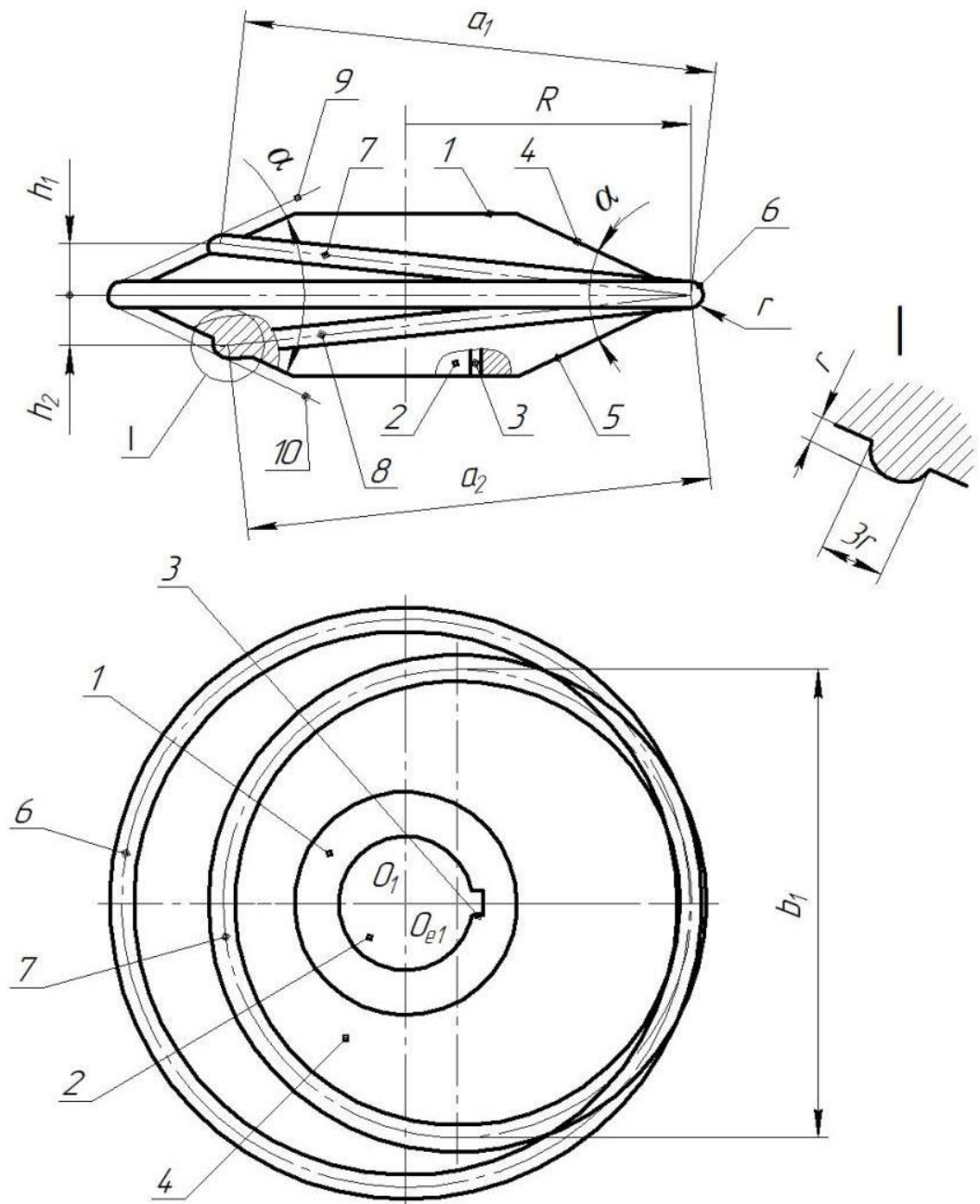


Рисунок 3.12 – Інструмент для фрикційного зміцнення конічних замкових нарізей: 1 – диск, 2 – посадкова поверхня, 3 – повідкова поверхня, 4 і 5 – бокові поверхні диска, 6 – периферійний деформуючий елемент, 7 і 8 – бокові деформуючі елементи, 9 і 10 – дотичні площини

Для конструювання удосконаленого інструменту необхідним є визначення параметрів великої і малої осей еліпса, розташованого на відповідній боковій конічній поверхні диска. Для визначення параметрів

еліпсоподібних деформуючих елементів розглянемо рис. 3.12, на якому зображені горизонтальна і фронтальна проекції теоретичної конічної поверхні інструмента з еліпсоподібним деформуючим елементом.

Удосконалення інструменту (рис. 3.12) полягало в модифікації бокових деформуючих елементів 7 і 8 шляхом заміни круглого січення на овальне. З проекцій видно, що натуральна величина великої осі відповідає її фронтальній проекції A_2B_2 , малої осі – горизонтальній C_1D_1 .

Як видно з рис. 3.13,

$$\beta = \alpha/2, h = |B_2K_2|, R = |AG|, \quad (3.31)$$

де R – радіус основи конуса, h – висота найвищої точки еліпса відносно основи, β – кут нахилу твірної конуса до його основи.

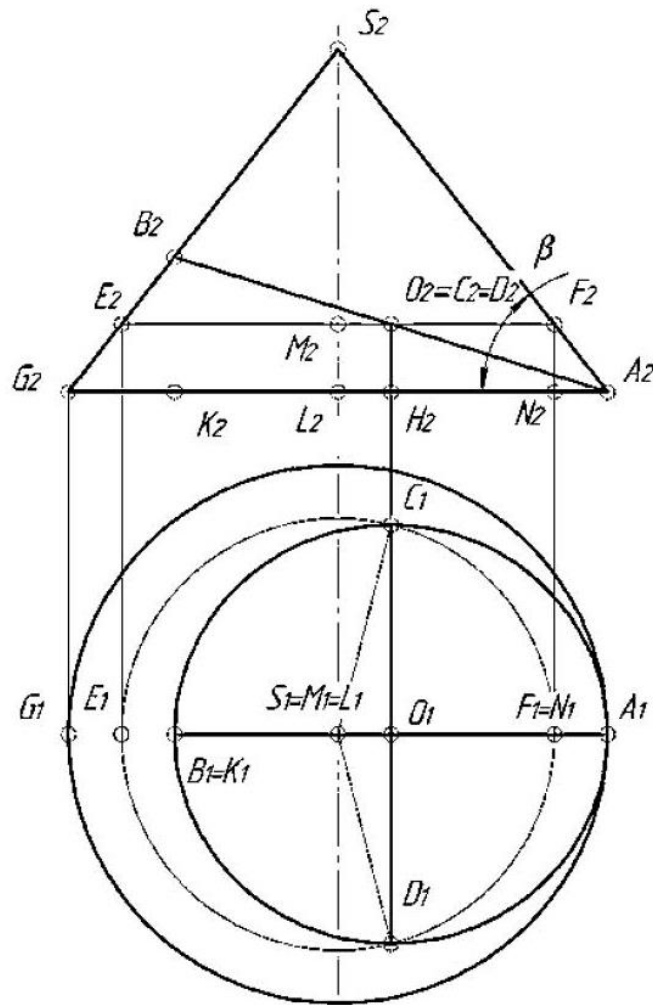


Рисунок 3.13 – Горизонтальна і фронтальна проекції теоретичної конічної поверхні інструмента з еліпсоподібним деформуючим елементом

Велика вісь еліпса:

$$a = |A_2B_2|, \quad (3.32)$$

а мала вісь еліпса -

$$b = |C_1D_1|. \quad (3.33)$$

Велику вісь еліпса знайдемо з фронтальної проекції. З трикутника $G_2B_2K_2$ одержимо залежності

$$|G_2K_2| = |B_2K_2| \cot \beta = h \cot \beta, \quad (3.34)$$

$$|K_2A_2| = |G_2A_2| - |G_2K_2| = 2R - h \cot \beta. \quad (3.35)$$

Остаточний результат для великої осі еліпса одержимо з трикутника $A_2B_2K_2$:

$$|B_2A_2| = \sqrt{|B_2K_2|^2 + |K_2A_2|^2}. \quad (3.36)$$

Підставивши (3.31), (3.32), (3.33) в (3.36) і провівши перетворення, одержимо у позначеннях рисунка 3.12:

$$a = \sqrt{h^2(\csc \alpha/2)^2 + 4R(R - h \cot \alpha/2)}. \quad (3.37)$$

Знаючи, що мала вісь еліпса ділить велику вісь навпіл, знайдемо радіус кола, на якому вола лежить з фронтальної проекції.

$$|M_2F_2| = |L_2A_2| - |N_2A_2|. \quad (3.38)$$

З трикутника $A_2F_2N_2$ визначимо

$$|N_2A_2| = |F_2N_2| \cot \beta. \quad (3.39)$$

З подібності трикутників $K_2B_2A_2$ та $H_2O_2A_2$, підставивши (3.31), одержимо радіус кола малої осі еліпса

$$|M_2F_2| = R - \frac{h}{2} \cot \beta. \quad (3.40)$$

На горизонтальній проекції визначимо величину півхорди O_1C_1 цього кола, що відповідає малій півосі еліпса з трикутника $S_1C_1O_1$.

$$|O_1C_1| = \sqrt{|S_1C_1|^2 - |S_1O_1|^2}. \quad (3.41)$$

Пам'ятаючи, що

$$|S_1C_1| = |M_2F_2|, |S_1O_1| = |M_2O_2|, \quad (3.42)$$

провівши перетворення та підставивши (3.41), одержимо

$$|O_1C_1| = \sqrt{R^2 - Rh \cot \beta}. \quad (3.43)$$

В позначеннях рис. 3.11 мала вісь еліпса

$$b = 2 \sqrt{R^2 - Rh \cot \alpha/2} \quad (3.44)$$

Таким чином, проведені дослідження дають змогу визначити основні конструктивні показники інструменту для фрикційного зміцнення конічних нарізей:

$$\text{- мала вісь еліпса: } a = \sqrt{h^2 (\csc \alpha/2)^2 + 4R(R - h \cot \alpha/2)}. \quad (3.45)$$

$$\text{- велика вісь еліпса: } b = 2 \sqrt{R^2 - Rh \cot \alpha/2} \quad (3.46)$$

де R – радіус периферійного тороподібного деформуючого елемента диска, мм; α – кут профілю конічної замкової нарізі, град; h – відстань від бісектриси кута профілю інструмента, рівного куту профілю конічної замкової нарізі, до точки перетину відповідної великої осі еліпса із конічною боковою поверхнею диска ($i=1$ для h_1 , розташованої від меншої сторони профілю конічної замкової нарізі; $i=2$ для h_2 розташованої від більшої сторони профілю конічної замкової нарізі, мм, причому величину h визначають із співвідношення:

$$h = \frac{P}{2} \left(1 \pm \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - r \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (3.47)$$

де P – крок конічної замкової нарізі, мм; φ – кут ухилу конічної замкової нарізі, град; r – радіус заокруглення западини конічної замкової нарізі, мм, при цьому знак "мінус" приймають для розрахунку h_1 , розташованої від меншої сторони профілю конічної замкової нарізі, а знак плюс" – для h_2 , розташованої від більшої сторони профілю конічної замкової нарізі відповідно.

Для виготовлення інструменту для фрикційного зміцнення використовували твердий сплав ВК6 ГОСТ 3882-74. Матеріал зміцнюваних деталей – сталь 40Х ГОСТ 4543-71.

3.4.2 Технологія фрикційного зміцнення і режими фрикційного зміцнення

Зміцнення зовнішньої конічної нарізі. Конічну замкову нарізь пропонуваним інструментом зміцнюють наступним чином (рис. 3.14 та рис. 3.15). Під час зміцнення деталі 11 (ніпеля або муфти бурового замка або бурильної труби) із зовнішньою конічною замковою наріззю (бісектриса кута профілю нарізі перпендикулярна до осі конуса), яка має западину 12, меншу 13 і більшу 14 сторони профілю, інструмент взаємодіє деформуючими елементами 6, 7 і 8 із западиною 12 та боковими сторонами профілю його конічної замкової нарізі 13, 14 відповідно.

Деталь 11 (елемент бурильної колони або долота) встановлювали і нерухомо закріплювали у патроні токарно-гвинторізного верстата (на рис. 3.13 не показаний) для надання їй повільного руху обертання з частотою з n . На супорті токарно-гвинторізного верстата монтували спеціальний пристрій – фортуну (на рис.3.13 не показана), оснащену електродвигуном, що надає інструменту головний рух – обертання із частотою n_i . Інструмент встановлювали нерухомо на кінці вихідного валу фортуни по посадковій поверхні 2. Крутний момент від валу фортуни передавався інструменту через його повідкову (шпонкову) поверхнею 3. Фортуну із закріпленим на вихідному кінці валу інструментом встановлювали таким чином, щоб площина обертання інструмента, яка проходить по найбільшому радіусу R і через вісь периферійного тороподібного деформуючого елемента 6 інструмента, співпадала з напрямком конічної замкової нарізі деталі 11. Іншими словами – щоб вісь обертання вихідного валу фортуни знаходилась у вертикальній площині, паралельній до осі обертання O_3-O_{31} деталі 11, а інструмент для фрикційного зміцнення був встановлений під кутом, рівним куту пійому нарізі, за рахунок похилого встановлення осі обертання вихідного валу фортуни у вертикальній площині відносно горизонтальної площини, яка паралельна осі деталі 11. Частоту обертання вихідного вала фортуни n_i

вибирали такою, щоб забезпечити лінійну швидкість обертання інструмента порядку 40 – 60 м/с. Інструменту надавали також рух поздовжньої подачі S_o і за допомогою копіра поперечну подачу S_n .

Крім цього, прикладали нормальну силу F для забезпечення притискання інструмента до оброблюваних поверхонь конічної зміцнюваної замкової нарізі деталі 11. Внаслідок такого просторового розміщення та дії сили F між інструментом та зміцнюваними поверхнями 12, 13 і 14 конічної замкової нарізі деталі 11 у загальному випадку утворювалося три ділянки контакту: між западиною нарізі 12 та периферійним тороподібним деформуючим елементом 6; дві – між боковими сторонами профілю нарізі 13 і 14 та боковими деформуючими елементами 7 і 8 відповідно.

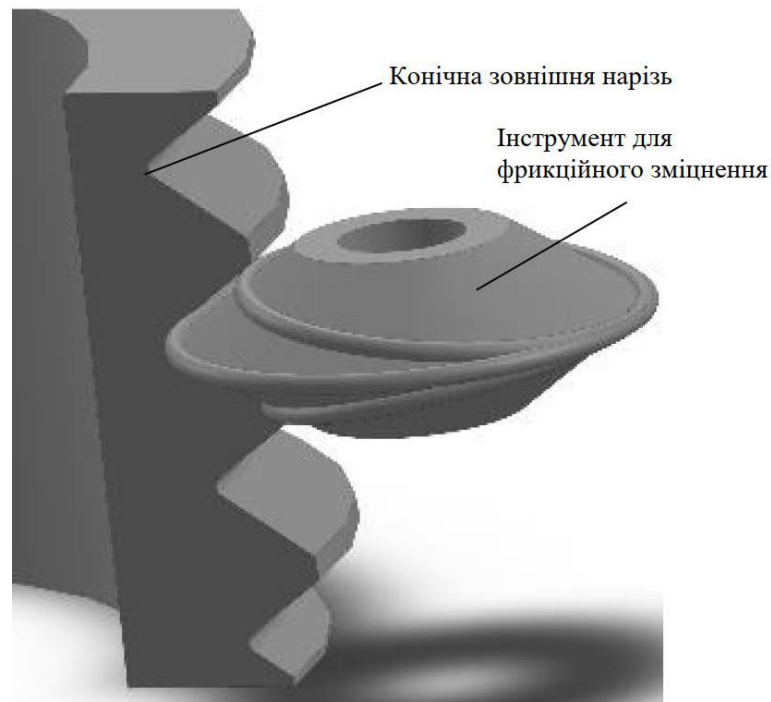


Рисунок 3.14 – 3D-модель удосконаленого інструменту для фрикційного зміцнення нарізей

Система трьох деформуючих елементів 6, 7 і 8 інструмента утворюєвала криволінійні і точкові зони контакту з конічною нарізною поверхнею деталі 11, що у поєднанні із дією сили F та швидкості обертання n забезпечувала виникнення високих контактних напружень і температур у зоні зміцнення. Бокові деформуючі елементи 7 і 8 розміщені на відповідних конічних

поверхнях 4 і 5 диска 1 інструменту, тому вибирали відповідні кутові параметри і геометричні розміри цих елементів, а також таке їх взаємне розміщення, що дотичні до них площини 9 і 10 і утворювали кут α , рівний куту профілю конічної замкової нарізі, при заданих рухах відбувалося динамічне контактування цих деформуючих елементів 6, 7 і 8 із западиною 12 та з боковими сторонами профілю 13, 14 конічної замкової нарізі деталі 11. За рахунок такої взаємодії забезпечувалося одночасне якісне зміцнення всієї робочої поверхні конічної замкової нарізі деталі 11.

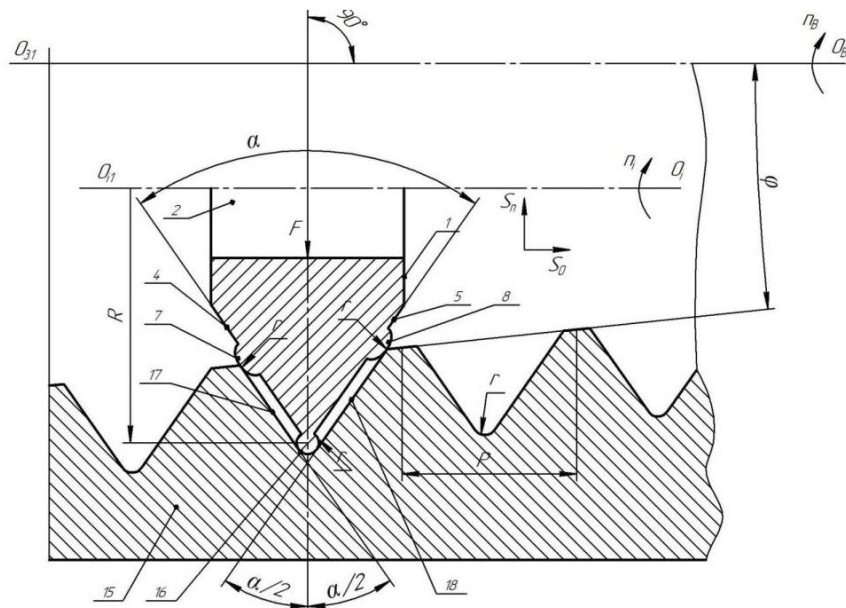


Рисунок 3.15 – Схема зміцнення зовнішньої конічної замкової нарізі [93]

Зміцнення внутрішньої конічної нарізі. Зміцнення внутрішньої конічної замкової нарізі відповідно до рекомендацій [93] (рис. 3.16) деталі 15 здійснювалося як і у випадку зміцнення зовнішньої конічної замкової нарізі. Під час зміцнення деталі 15 (елемента бурильної колони) із внутрішньою конічною замковою наріззю, яка має западину 16, меншу 17 і більшу 18 сторони профілю, інструмент взаємодіяв з деформуючими елементами 6, 7 і 8 із вказаними западиною 16 та боковими сторонами профілю внутрішньої конічної замкової нарізі 17, 18 відповідно до рекомендацій [93] (рис. 3.15).

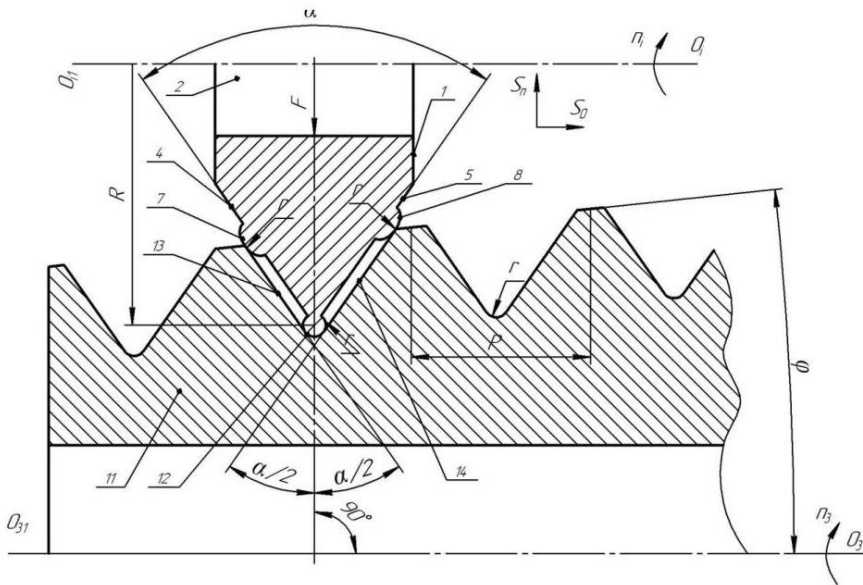


Рисунок 3.16 – Схема зміцнення внутрішньої конічної замкової нарізі

3.4.3 Випробовування зміцнених нарізевих з'єднань на втомну міцність

На заготовках бурових замків нарізалася нарізь за радіальною схемою зрізання припуску нарізеутворення трикутної нарізі при обробці нарізі різцями. Використовували верстат з ЧПК із стандартним циклом нарізання нарізі.

Деталі геологорозвідувального замка 3-50 ГОСТ 7918-75 (рис. 3.17 і рис. 3.18), зміцнювали за допомогою удосконаленого інструменту. Профіль нарізі трубного з'єднання представлено на рис. 3.19.

Процес зміцнення здійснювали на токарно-гвинторізному верстаті 16К20. Для зміцнення деталей бурового замка використовували високошвидкісну шліфувальну головку – фортуну, що кріпиться на супорті токарно-гвинторізного верстата конструкції ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ.

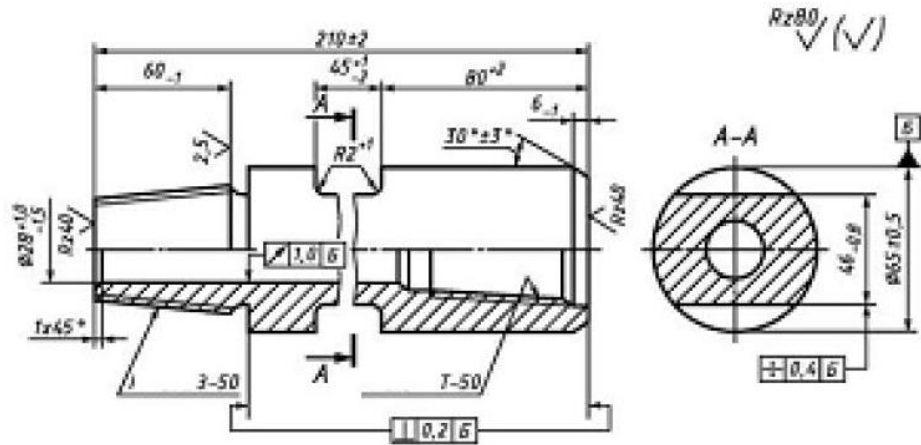


Рисунок 3.17 – Ніпель бурового замка 3-152 ГОСТ 5286-75

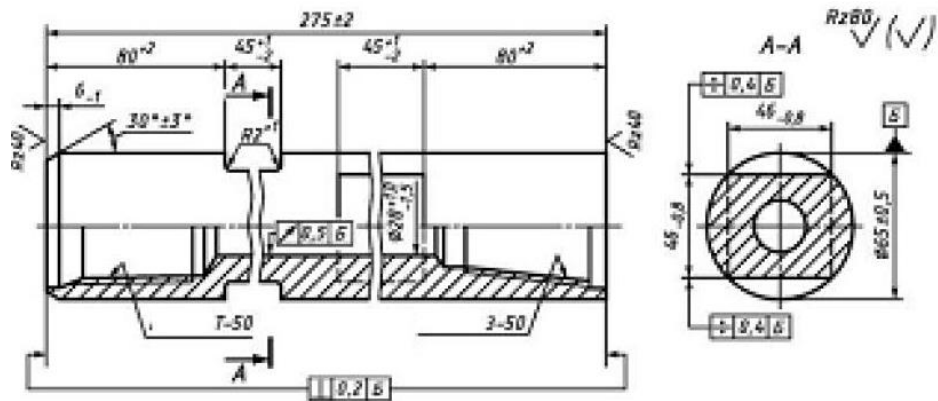


Рисунок 3.18 – Муфта бурового замка 3-152 ГОСТ 5286-75

Режими зміцнення: зміцнюючий інструмент встановлювали на шпинделі фортуни і, обертаючись із швидкістю 60 – 70 м/с, інструмент притискався з постійним зусиллям від 600 Н до 1000 Н до оброблюваної деталі, що обертається з коловою швидкістю від 0,02 м/с до 0,08 м/с.

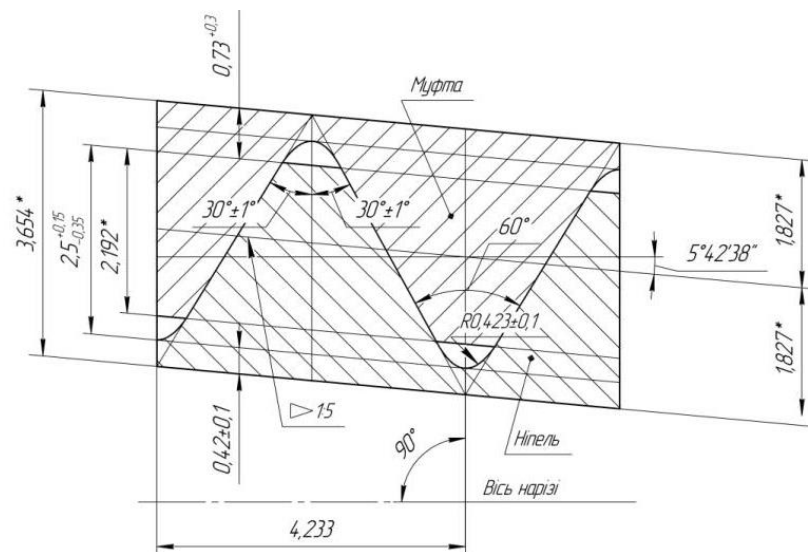


Рисунок 3.19 – Профіль нарізі трубного з'єднання ГОСТ 6211-81

Поздовжня подача інструмента відносно деталі відповідала кроку нарізі 4,235 мм на один оберт. Під час зміцнення в зоні їх контактування відбувався локальний імпульсний нагрів поверхні оброблюваної деталі до температури 1100 – 1300 К. У зону обробки подавали мастильно-охолоджуючу рідину (наприклад, мастило мінеральне И12А).

Під час розроблення методики випробувань деталей на втомну міцність із сталим циклічним симетричним навантаженням був прийнятий спосіб навантаження зразка за схемою чистого згину з обертанням. Елементи нафтопромислового обладнання випробовували на втомну міцність на універсальній навантажувальній машині ИМА-50 (рис. 3.19), яка забезпечувала пружний згин [94]. Машина ИМА-50 дозволяла рівномірно навантажувати робочу частину дослідного зразка постійним згинаючим моментом, який створював у зразку симетричні циклічні напруження згину [94], що давало змогу дослідити явища втоми по всій довжині дослідного зразка, а не лише в одному перерізі.

Під час обертання досліджуваного зразка, закріпленого в шпindelних бабках, реалізовувалася схема навантаження «чистий згин з обертанням», відповідно до якої дія концентрація максимальних навантажень припадала на поверхневу частину зразка. Від двигуна за допомогою муфти обертання передається зразком. Після пуску двигуна до зразка прикладали силу і вмикали лічильник циклів. У разі руйнуванні зразка машина автоматично відключалася. Концентрація максимальних навантажень припадала на поверхневу частину зразка. Метод дослідження відповідав ГОСТ 2860-45 «Метали. Метод визначення границі витривалості (втоми)». Зразки, що досліджувалися, – деталі геологорозвідувального замка 3-50 ГОСТ 7918-75. Схема установки показана на рисунку 3.20. Досліджувалися дві пари зразків – без зміцнення розробленим інструментом та зміцнені.

Конструктивно універсальна машина складалася із наступних деталей. На зварній рамі було встановлено електродвигун і барабани привода та

холостого ходу. Двигун із привідним барабаном були з'єднані еластичною муфтою. Барабани, опираючись на стійки за допомогою цапф, оберталися у вертикальній площині.

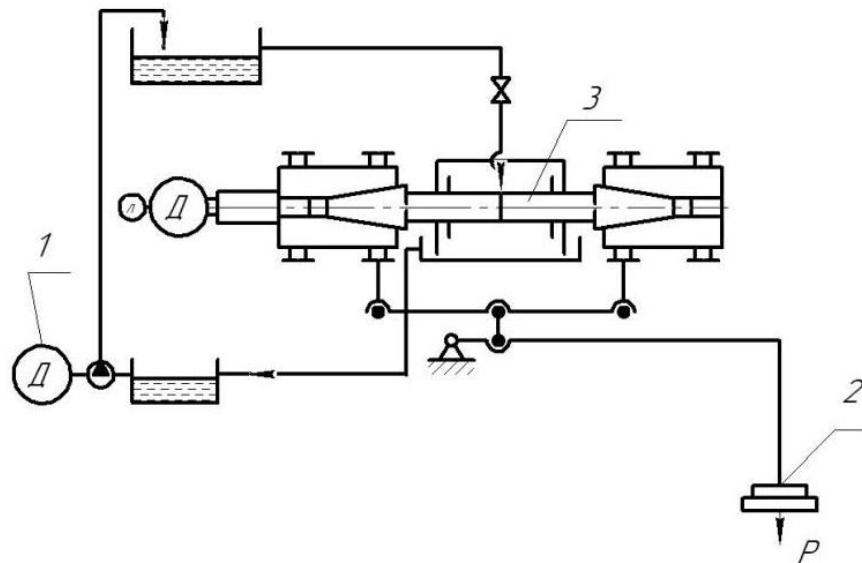


Рисунок 3.20 – Принципова схема установки для випробування на втомну міцність: 1 – електродвигун, 2 – вузол навантаження, 3 – буровий замок

Барабан складався із шпинделя, встановленого у корпусі на двох радіальних шарикопідшипниках. Дослідний зразок встановлювався в шпинделях за конічною посадкою і підтискався сухарями та накидними гайками. Навантаження на зразок передавалося через навантажувальні цапфи барабанів і важільну систему, яка в 16 разів посилювала навантаження зразків. При цьому навантаження не залежало від зміни жорсткості зразку внаслідок розвитку втомних тріщин. Для запобігання биттю шпинделя і вібрацій машини здійснювалося центрування дослідного зразка, що згвинчений за допомогою оптимального крутного моменту. Після складання зразки встановлювали в центрах токарного верстату і проточували до номінального розміру. Частота обертання шпинделя становила 1440 об/хв.

3.5 Дослідження шліфування конічної замкової нарізі

Шліфування конічної нарізевої поверхні ніпелю виконували на нарізешліфувальному верстаті 5822М. Для шліфування нарізей застосовували метод копіювання профілю ріжучої поверхні шліфувального круга, при якому

профіль утвореної поверхні повинен збігатися з формою профілю круга. Для шліфування використовували деталі із жароміцної сталі 25Г2С2Н2МА ГОСТ 5632-72 та твердого сплаву ВК8 ГОСТ 3882-74. Під час дослідження шліфування нарізей використовували ельборовий круг Т20 Д300 ГОСТ 2424-83 для деталей із жароміцної сталі 25Г2С2Н2МА ГОСТ 5632-72 та алмазний круг для деталей із твердого сплаву ВК8 ГОСТ 3882-74 шліфувальні круги Т20 Д300 за ГОСТ 2424-83 при швидкості обертання $V_k = 35$ м/с. Як мастильно-охолоджувальну рідину використовували суміш мінеральних масел: 70 % індустріального масла 12% і 30 % сульфозфрезола.

3.5.1 Планування експерименту під час шліфування конічної замкової нарізі

З метою спрощення математичної моделі, яка описує залежність шорсткості (вихідний параметр – середньоарифметичне відхилення профілю R_a , мкм, тобто середнє значення відхилень точок профілю від середньої лінії профілю в межах ділянки базової довжини) від змінних факторів (режимів обробки) вибрали степеневу функцію у виді:

$$R_a = C_a \cdot t^m \cdot V_d^n \cdot d^p \quad (3.48)$$

де C_a – фізико-механічні властивості матеріалу деталі, характеристики круга і виду мастильно-охолоджуючої рідини (стала постійна величина для конкретних умов обробки); t – глибина шліфування (товщина шару металу, який знімають за подвійний хід стола верстата); V_d – швидкість обертання деталі; d – діаметр оброблюваної нарізі; m, n, p – невідомі показники степені. Діапазон зміни шорсткості приблизно становив в межах 1,6 – 3,2 мкм.

Залежність (3.48) є нелінійною, тому провівши логарифмування лівої та правої частин зведемо її до лінійного вигляду:

$$\ln R_a = \ln C_a + m \ln t + n \ln V_d + p \ln d \quad (3.49)$$

Для спрощення розрахунків введемо такі позначення:

$$\ln R_a = y, \ln C_a = b_0, m = b_1, X_1 = t, n = b_2, p = b_3, X_2 = V_d, X_3 = d$$

підставивши їх у (3.49) отримаємо:

$$y = b_0 + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2 + b_3 \ln X_3. \quad (3.50)$$

Рівняння (3.50) є емпіричною моделлю залежності середньоарифметичного відхилення профілю від режимів різання при круглому алмазному нарізешліфуванні з поздовжньою подачею.

Для визначення невідомих коефіцієнтів рівняння (3.50) використали повнофакторний експеримент 2^k , $k = 3$ – кількість змінних факторів (загальна кількість дослідів $N = 8$), матриця планування якого представлена в табл. 3.9.

Перетворення натуральних величин параметрів режимів різання в безрозмірні кодовані змінні для показниково-степеневого полінома здійснили за формулою:

$$x_i = \frac{2(\ln X_i - \ln X_{i\max})}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}} + 1, \quad (3.51)$$

де X_i – натуральні значення режимів різання при алмазному нарізешліфуванні; $X_{i\min}$, $X_{i\max}$ – мінімальні та максимальні натуральні значення факторів; i – відповідно порядковий номер незалежного фактора.

Таблиця 3.9 – План-матриця повнофакторного експерименту 2^3

Номер дослідів	Значення кодованих факторів				Взаємодія кодованих факторів				Вихідний параметр, Y		Середнє значення вихідного параметра
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Y_{01}	Y_{02}	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_{11}	y_{12}	y_{1c}
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_{21}	y_{22}	y_{2c}
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_{31}	y_{32}	y_{3c}
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_{41}	y_{42}	y_{4c}
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_{51}	y_{52}	y_{5c}
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_{61}	y_{62}	y_{6c}
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_{71}	y_{72}	y_{7c}
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_{81}	y_{82}	y_{8c}

Числові значення режимів різання при круглому алмазному нарізешліфуванні покриття прийняли такими, що вони частково співпадав із тими, що застосовуються на практиці та технологічними можливостями

наріzesлiфувальних верстатiв, зокрема верстата 5822М. Спочатку виконували дослiдження для жаромiцної сталi 25Г2С2Н2МА ГОСТ 5632-72. Рiвнi змiни факторiв зведено в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Рiвнi змiни режимiв круглого алмазного нарizesлiфування

Інтервал варіювання та рівні факторів	Подача на глибину різання s_t , мм/хід		Швидкість різання v , м/хв		Середній діаметр оброблюваної нарізі d , мм	
	X_1	$\ln X_1$	X_2	$\ln X_2$	X_3	$\ln X_3$
Основний рівень, $x_i = 0$	0,045	–	40	–	125	–
Інтервал варіювання, $\Delta x = 1$	0,035	–	15	–	75	–
Верхній рівень, $x_i = +1$	0,08	-2,52573	55	4,007333	200	5,298317
Нижній рівень, $x_i = -1$	0,01	-4,60517	25	3,218876	50	3,912023

Підставивши числові значення із табл. 3.10 в формулу (3.51) отримаємо вирази для кодування факторів:

$$x_1 = \frac{2(\ln s_t + 4,605)}{-4,605 + 5,298} = 0,961797 \ln s_t + 3,429237 \quad ;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln v - 3,912)}{3,912 - 2,303} = 2,536599 \ln v - 9,165 \quad ;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln d - 5,3132)}{5,3132 - 3,912} = 1,442695 \ln d - 6,64386 \quad .$$

Рiвняння з введенням членiв, якi враховують взаємодiю факторiв запишемо в кодованих змiнних

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.52)$$

Де

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коефіцієнти регресії, які характеризують вільний член рівняння, лінійні ефекти та ефекти взаємодії факторів відповідно;

x_1, x_2, x_3 – фактори експерименту (параметри режимів різання).

Порядок проведення експериментів згідно матриці був вибраний із використанням таблиці випадкових чисел для усунення систематичних похибок.

Щоб забезпечити добре відтворювання результатів експерименту кожен дослід повторювали двічі на одному рівні факторів і розраховували середнє значення вихідного параметра в кожному досліді.

$$\bar{Y}_v = \frac{1}{r} \sum_{u=1}^r Y_{ui}.$$

3.6 Розроблення обладнання для моделювання роботи доліт ріжуче-стираючої дії для визначення впливу точності виготовлення на показники роботи

Метою експериментальних досліджень є дослідження впливу точності і якості виготовлення долота (зокрема співвісності складання корпусу долота і ніпелю долота, похибок виготовлення нарізевих поверхонь, величини шорсткості) на його характеристики роботи (на величину відхилення центра центра долота від центра вибою, а також величини нестабільності сил різання, які виникають під час руйнування породи).

Стабільність сил різання як показник якості бурових доліт був нами вибраний тому, що саме цей показник дає змогу пов'язати технологічні параметри доліт та показники його роботи. Значний розкид величин різання має значення, оскільки в цьому разі свердловина буриться в напрямку відмінному від заданого проектом, долото при цьому обертається не тільки відносно своєї осі, а свердловина має діаметр, що перевищує заданий [95]. Співвісність між ніпелем і корпусом долота забезпечує керованість інструменту під час його роботи [74].

Для дослідження впливу точності і якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії був розроблений стенд на базі вертикально-свердлильного верстата, який дозволяв вимірювати керованість бурових доліт в залежності

від показників якості та точності виготовлення доліт. В якості показників, що досліджувалися, були вибрані:

- величина зміщення центру долота від центру вибою, який імітувався блоком бетону;
- величина розкиду відповідних сил, отриманих під час експериментальних досліджень.

Вибір показників керованості як характеристик якості доліт ріжуче-стираючої дії пояснюється тим, що керованість бурового долота умовою досягнення запланованих показників буріння [96], [97], [98]. Втрата долотом керованості викликає неусталеність крутного моменту на долоті, коливання бурової колони, викривлення стовбура свердловини, погіршення характеристик роботи інструменту та прискорюють його вихід з ладу. Науковцями встановлено, що основна причина появи коливань інструменту в горизонтальній площині – незбалансованість самого інструменту та неоднорідність гірських порід [4]. Оскільки уникнути цього явища взагалі неможливо, бо гірські породи є моно- або багатокомпонентним неоднорідним середовищем, то важливе питання має питання збалансованості долота та вимірювання величини несбалансованості для удосконалення технології виготовлення доліт.

3.6.1 Конструкція установки для моделювання роботи доліт ріжуче-стираючої дії

Враховуючи аналогію між процесом буріння свердловин долотами ріжуче-стираючого типу з і процесом свердління, експериментальний стенд був розроблений на базі вертикально-свердлильного верстата 2Г175, містив реєструючий прилад (трикомпонентний динамометр) та блок гірської породи. Схема стенду представлена на рис. 3.19. Загальний вигляд стенду представлено на рис. 3.20. Технічні характеристики верстата представлено в табл. 3.21.

Таблиця 3.11 – Технічні характеристики верстату 2Г175

Параметр	Значення
Максимальний діаметр свердління в сталі 45	70 мм
Найбільша глибина свердління	700 мм
Відстань від торця шпинделя до плити	150..850 мм
Відстань від осі шпинделя до колони (виліт)	400 мм
Частота обертів шпинделя (12 ступенів), об / хв	18 – 800
Подачі свердлильної головки, мм/об	0,018 – 4,5
Потужність електродвигуна	11 кВт
Маса верстата	4,2 т

Для закріплення моделі долота в шпинделі верстата використовували перехідник. Стенд складався з 1 – блоку реєструючих приладів (ПК і трипозиційний динамометр М30-3-6к), 2 – станини, 3 – двигуна, 4 – свердлильної головки, 5 – перемикачів швидкості і подачі, 6 – шпинделя і пінолі, 7 – вузол кріплення моделі долота; 8 – модель долота, 9 – блоку гірської породи, 10 – напрямних, 11 – столу, 12 – важелю ручної подачі, 13 – важелю переміщення столу, 14 – плити.

Установка працює наступним чином: за допомогою вузла кріплення інструменту встановлювали модель долота у шпинделі верстату. Блок гірської породи закріплювали на динамометрі. Надавали обертання моделі долота та вертикальну подачу. Сили різання контролювали за допомогою блоку реєструючих пристроїв.

Для проведення експериментальних досліджень як модельну гірську породу вибрали будівельну суміш з техногенних відходів [25]. Промивання здійснювали водою. Для моделі долота використовували гідромоніторна насадка із хромованою поверхнею. Будівельна сировинна суміш з техногенних відходів, що містить золу теплових електростанцій, відходи карбонатних сполук і полімерні відходи, яка відрізняється тим, що додатково містить шлам із гальванічних ванн для мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів, при наступному співвідношенні компонентів, масові %: зола теплових електростанцій – 30 – 60, відходи карбонатних сполук – 3,97 – 10,99, шлам із гальванічних ванн для мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів–

0,01 – 0,03, полімерні відходи – 40 – 60. Крім цього використовували вапняк дрібнокристалічний. Фільтраційні властивості гірських порід визначали за допомогою пристрою [24]. Розмір блоків становив 400x400x400 мм. Фото блоку показано на рис. 3.22.

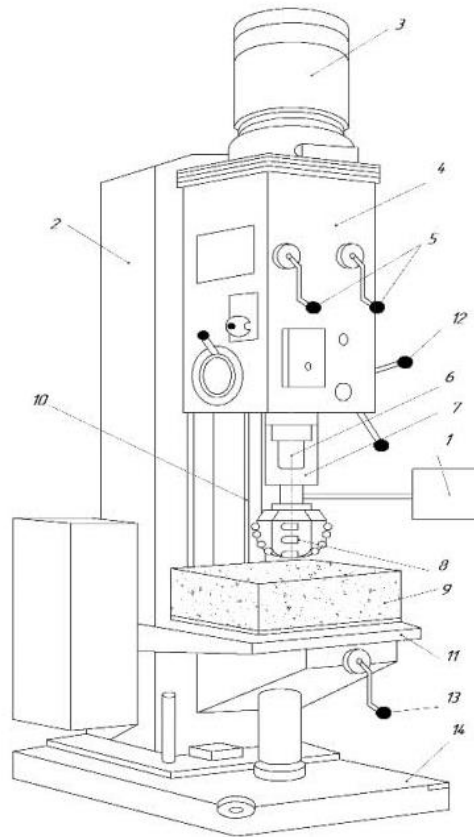


Рисунок 3.19 – Схема установки для моделювання роботи долота ріжуче-стираючої дії

Послідовність виконання робіт на експериментальному стенді:

1. Встановлення на шпинделі стенді досліджуваної моделі долота.
2. Встановлення блоку, що імітує гірську апороду.
3. Встановлення реєструючих пристроїв на “нуль”.
4. Задання навантаження на модель долота.
5. Підведення моделі долота до блоку породи та здійснення різців долота у породу, після 3 – 4 с буріння вимірювали параметри різання.



Рисунок 3.21 – Загальний вигляд експериментального стенду для випробовування бурових доліт: 1 – вертикально-свердильний верстат; 2 – бурове долото, 3 – блок гірської породи



Рисунок 3.22 – Блок бетону, що імітує гірську породу

3.6.2 Методика проведення експериментальних досліджень

Основними керованими параметрами при проведенні випробувань є частота обертання шпинделя верстата, крутний момент та осьове навантаження на модель долота.

Враховуючи прийняті в умовах промислової експлуатації та експериментальних випробувань значення навантаження на долото та швидкості обертання бурових доліт після перерахунку навантаження, що припадає на один вінець, задаємо режими роботи:

- крутний момент M , кНм –	3 кН;
- частота обертання n , об/хв ⁻¹ –	45;
- осьова подача, мм/об	0,05;
- тривалість випробування:	12 с
	усталеного режиму.

Показники сил різання фіксували за допомогою трикомпонентного динамометра та ПК.

3.7 Розроблення пристроїв для контролю нарізі та биття бурового долота

3.7.1 Пристрій для контролю нарізі бурового долота

Для контролю нарізі використовували нарізеві калібри.

3.7.2 Пристрій для контролю биття бурового долота

Для контролю биття бурового долота було розроблено контрольні пристрої [22, 23], схема якого показана на рис. 3.23.

Пристрій для контролю бурового долота містить корпус, в який змонтований на підшипникових опорах вертикальний шпиндель із конічним базовим глухим отвором на передньому кінці, в якому співвісно через нарізевий калібр із внутрішньою конічною наріззю і зовнішньою конічною гладкою поверхнею встановлене своїм хвостовиком бурове долото, та вимірювальну стійку із індикатором.

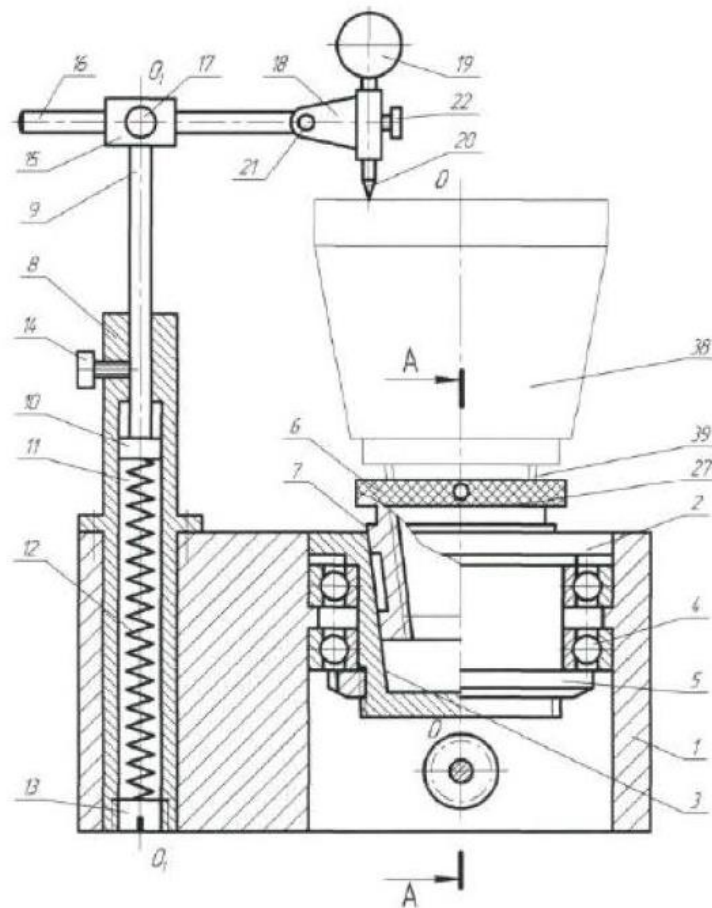


Рисунок 3.23 – Схема пристрою для контролю бурового долота

Пристрій додатково споряджений засобом витягування нарізеного калібру із конічного базового глухого отвору в вертикальному шпинделі, який містить два підпружинені Г-подібні важелі, які встановлені на шарнірних опорах на корпусі, з можливістю діаметральної взаємодії із торцевою плоскою поверхнею бурта нарізеного калібру своїми коротшими плечами, котрі мають на кінцях заокруглення, а на кінцях довших плеч вказаних важелів виконані подовгасті отвори із заокругленими фасками, в яких розташовані втулки із лисками на зовнішній циліндричній поверхні та сферичним випуклим спряженням із буртом, що самовстановлюються, одна з яких має внутрішню циліндричну нарізь та взаємодіють ці втулки своїми сферичними випуклими спряженнями буртів із довшими плечами зазначених важелів через ходовий гвинт, що має на одній ділянці зовнішню циліндричну нарізь, а на іншій ділянці – циліндричну поверхню, квадрат і зовнішню циліндричну нарізь для

нерухомого кріплення ручки, при цьому осі обертання шарнірних опор Г-подібних важелів перпендикулярні до площини, яка проходить через вісь обертання вертикального шпинделя, а ця площина, в свою чергу, перпендикулярна до вертикальної площини, яка проходить через вказану вісь обертання вертикального шпинделя та вертикальну вісь вимірювальної стійки.

Введення в конструкцію пристрою механізованого засобу витягування нарізевго калібру разом із буровим долотом із конічного базового глухого отвору в вертикальному шпинделі вигідно відрізняє запропонований пристрій для контролю бурового долота від прототипу, оскільки розширюються функціональні можливості, зменшуються затрати часу на виконання контрольної операції. В результаті знижується собівартість виготовлення продукції та збільшується продуктивність праці при проведенні контролю бурових доліт, підвищується культура виробництва, а також розширюється сфера використання пристрою.

Пристрій для контролю бурового долота працює таким чином.

Для приведення пристрою у вихідний стан спочатку відкручують гвинт 14, а потім повертають шток 9 навколо вертикальної осі $O_1 - O_1$ вимірювальної стійки 8, і разом із повзуном 16 із поворотним тримачем 18 та індикатором 19 відводять із робочої зони пристрою та після цього закручують гвинт 15.

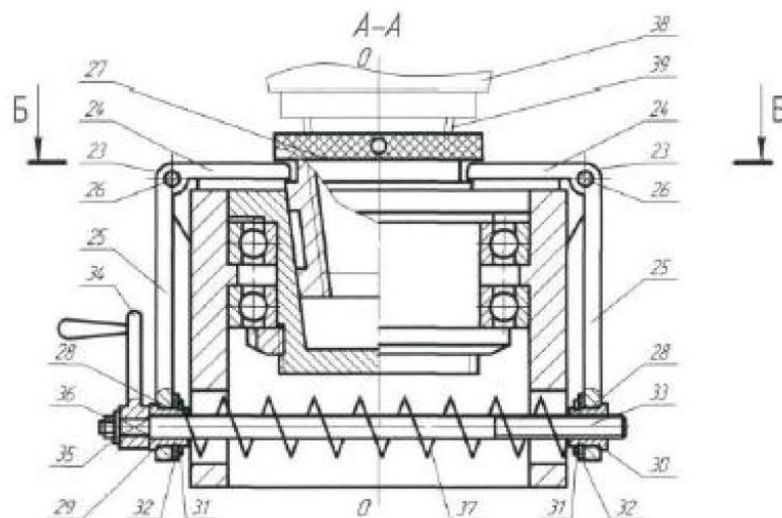


Рисунок 3.24 – Шпиндельний вузол (А-А)

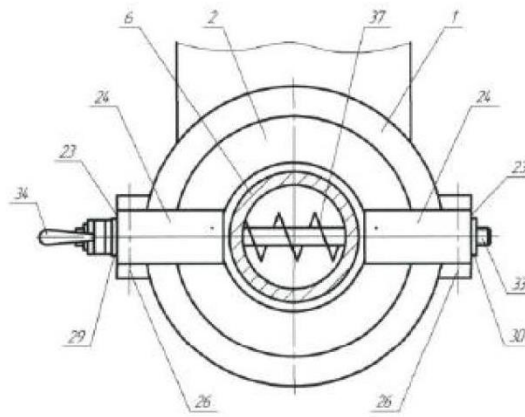


Рисунок 3.25 – Розріз шпindelного вузла (Б-Б)

На першому етапі контролю нарізевий калібр 6 із внутрішньою кінчною нарізкою нагвинчують на нарізевий хвостовик бурового долота 38, яке має зовнішню приєднувальну замкову кінчну нарізь 39. За величиною натягу контролюють (оцінюють) якість зовнішньої приєднувальної замкової кінчної нарізі 39 цього бурового долота 38.

На другому етапі контролю нарізевий калібр 6 разом із буровим долотом 38, яке вгвинчене в нього хвостовиком, своєю зовнішньою кінчною гладкою поверхнею 7 співвісно встановлюють у кінчному базовому глухому отворі 3 виконаному на передньому кінці вертикального шпинделя 2 таким чином, щоб відбулося повне прилягання робочих кінчних поверхонь 7 і 3 відповідно нарізевого калібру 6 і вертикального шпинделя 2 (рис. 3.24 – 3.25).

Після цього відкручують гвинт 14 і повертають шток 9 у протилежному напрямку навколо вертикальної осі $O_1 - O_1$ вимірювальної стійки 8 у робочу зону пристрою таким чином, щоб вісь індикатора 19 із вимірювальним наконечником 20 лежала у вертикальній площині, яка 5 проходить через вісь обертання $O-O$ вертикального шпинделя 2 і вертикальну вісь $O_1 - O_1$ вказаної вимірювальної стійки 8. Здійснюють регулювання вертикального розташування штока 9 та горизонтального розташування повзуна 16 з таким розрахунком, щоби вимірювальний наконечник 20 індикатора 19 прийшов у контакт із контрольованою робочою поверхнею бурового долота 38 та фіксують це положення зазначеного штока 9 і повзуна 16 за допомогою 10 відповідних гвинтів 14 і 17. Потім встановлюють шкалу індикатора 19 на

нульову відмітку. При обертанні вертикального шпинделя 2 навколо його осі $O - O$ разом із нарізевим калібром 6 та встановленим у ньому буровим долотом 38 визначають осьове і радіальне биття контрольованого бурового долота 38, а також осьове і радіальне биття породоруйнівних елементів. Такий контроль особливо актуальний для доліт ріжуче-стираючої дії, а також і для інших типів бурових інструментів з наплавленою робочою поверхнею. Після завершення контрольних вимірювань відкручують гвинт 14, повертають навколо вертикальної осі $O_1 - O_1$ вимірювальної стійки 8 шток 9 разом із повзуном 16, поворотним тримачем 18 та індикатором 19 і відводять їх із робочої зони пристрою в безпечне місце, та закручують вказаний гвинт 15.

Для витягування нарізевого калібру 6 разом із буровим долотом 38 із кінцевого базового глухого отвору 3, виконаного на передньому кінці вертикального шпинделя 2 використовують два підпружинені Г-подібні важелі 23, які встановлені на шарнірних опорах 26 на корпусі 1. Для здійснення повороту Г-подібних важелів 23 обертають за годинниковою стрілкою ходовий гвинт 33 за допомогою ручки 34, яка торцем своєї ступиці впирається у плоский торець втулки 29. Виконання втулок 29 і 30 із лисками на зовнішній циліндричній поверхні та кільцевими проточками на одному краю для фіксуєчих кілець 31 і сферичним випуклим спряженням із буртом на іншому краю та їх розташування в подовгастих отворах 28 із заокругленими фасками, які виконані на кінцях довших плеч 25 Г-подібних важелів 23 забезпечує самовстановлення цих втулок 29 і 30, а також запобігає їх прокручуванню. Вгвинчування зовнішньою циліндричною 30 нарізною ходового гвинта 33 у внутрішню циліндричну нарізь втулки 30 призводить до зменшення віддалі між кінцями довших плеч 25, стискання пружини 37, і як наслідок – забезпечується повертання навколо осей шарнірних опор 26 Г-подібних важелів 23, коротші плечі 24 яких, що мають на кінцях заокруглення, взаємодіють із торцевою плоскою поверхнею 27 бурта нарізевого калібру 6 і переміщують цей нарізевий калібр 6 вгору вздовж осі $O - O$ вертикального шпинделя 2. Після цього легко виймають нарізевий калібр 6 разом із буровим

долотом 38 із конічного базового глухого отвору 3 виконаного на передньому кінці вертикального шпинделя 2, відгвинчують вказаний різьбовий калібр 6, і бурове долото 38, яке пройшло контроль, встановлюють у контейнер для консервації та складування.

Виконання Г-подібних важелів 23 із довгими плечами 25 і коротшими плечами 24 забезпечує зростання зусилля, яке передається від кінематичної пари: ходовий гвинт 33 - втулка 30 із внутрішньою циліндричною наріззю, та діаметральне прикладання цього збільшеного зусилля до торцевої плоскої поверхні 27 бурта нарізевого калібру 6.

Для приведення пристрою для контролю бурового долота 38 у вихідне положення 45 обертають проти годинникової стрілки ходовий гвинт 33 за допомогою ручки 35. В результаті цього відбувається відкручування ходового гвинта 33 із внутрішньої циліндричної нарізі втулки 30, збільшення віддалі між кінцями довгих плеч 25 і повернення пружиною 37 через шайби 32 Г-подібних важелів 23 у вихідне їх положення.

Після цього пристрій готовий для здійснення контролю наступного бурового долота, який виконують згідно вище описаного порядку. Аналогічним чином проводять контроль якості зміцнених деталей бурового замка: ніпеля і муфти, а також інших деталей із приєднувальною конічною наріззю.

Для контролю бурових доліт із внутрішньою приєднувальною замковою конічною наріззю пристрій може містити вертикальний шпиндель із конусною базовою сходинкою, а нарізевий калібр повинен мати зовнішню конічну нарізь та внутрішню конічну гладку поверхню для його встановлення на вказаній конусній базовій сходинці.

Запропонований пристрій забезпечує скорочення часу на проведення контролю якості бурових доліт, підвищення продуктивності праці контролерів, зниження собівартості виготовлення продукції, а також і зручність проведення контролю бурових доліт та інших деталей.

Висновки до розділу 3

У розділі здійснено вибір матеріалів і технологій для виготовлення доліт із суцільним корпусом та із привареними лопатями, які в подальшому використовувалися для проведення експериментальних досліджень впливу похибок виготовлення доліт (неспіввідності між осями корпусу та ніпелю) на величину биття долота. Застосовувалися такі матеріали: корпус із привареними лопатями – сталь 14ХНЗМА-Ш за ТУ 14-1-5425-2001, для суцільного – 20ХН за ГОСТ 4543 – 71; твердосплавні різці (діаметром 13,5 мм та висотою 3,5 мм) – твердий сплав ВК8 ГОСТ 4411-79, пластина діам.13,5^{+0,5} мм товщиною 0,7 – 0,8 мм, мікропорошків марки АСМ 60/40; припой – Ag-Cu-Zn-Cd, тривалість нагрівання 24 с, нагрівання за допомогою генератора ВЧИ4-10У4, потужність 10 кВт: струм сітки $I_{\text{сіт}}=0,1$ А, струм анода $I_{\text{ан}}=0,6 - 0,7$ А; припаювання різців до лопатей – припой – ПСР40, температура паяння – 650-850 °С з постійним регулюванням нагрівання і термоконтролем у процесі паяння; приварювання лопатей - напівавтоматичне зварювання плавлення під захистом у суміші захисних газів (82 % Ar + 18% CO₂) обмідненим дротом марки Св-08Г2С діаметром 1,2 мм на апараті «Фроніус» зварювальний струм $I = 180 \dots 200$ А, напруга $U = 18 \dots 20$ В; шліфування конічної нарізі ніпеля – нарізешліфувальний верстат 5822М, ельборовий шліфувальний круг Т20 Д300 за ГОСТ 2424-83, швидкість обертання $V_k = 35$ м/с, МОР – суміш мінеральних масел: 70 % індустріального масла 12 та 30 % сульфозфрезола; фрикційне зміцнення нарізі – 16К20 за допомогою модернізованого інструменту, який розміщувався на супорті верстата (матеріал – твердий сплав ВК 6 ГОСТ 3882-74). Режими зміцнення: зміцнюючий інструмент встановлювали на шпинделі фортуни і надавали йому обертання із швидкістю 60 – 70 м/с, інструмент притискався з постійним зусиллям від 600 Н до 1000 Н до оброблюваної деталі, що обертається з коловою швидкістю від 0,02 м/с до 0,08 м/с. Поздовжня подача інструмента відносно деталі відповідає кроку нарізі 4,235 мм на один оберт. У зону зміцнювальної обробки подавали мастило мінеральне И12А.

Для отримання математичних моделей процесу алмазного шліфування нарізі проведено повнофакторний експеримент.

Зовнішні конічні нарізі зміцнювали за допомогою розробленого інструменту, втомну міцність досліджували на універсальній навантажувальній машині ИМА-50, яка забезпечувала навантаження зразка за схемою чистого згину з обертанням. Метод дослідження – ГОСТ 2860-75 «Метали. Метод визначення границі витривалості».

Виконували скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану корпусів після отримання заготовки в навчальних версіях програм ProCast (для литих заготовок) та Ansys Workbench (для заготовок корпусів із привареними лопатями) відповідно. Також було отримано вилівок та фрезерований корпус долота, для яких вимірювалася величина відхилень зовнішнього діаметру.

Для вимірювання шорсткості конічної нарізі розроблено контрольний пристрій, що працює на основі принципу лазерної тріангуляції для вимірювання відхилень профілю нарізі. Для контролю биття бурового долота було розроблено контрольний пристрій.

Результати розділу опубліковано у працях авторки [12], [16], [17].

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ ОТРИМАННЯ ЛИТИХ ТА ЗВАРНИХ ЗАГОТОВОК КОРПУСІВ ДОЛІТ РІЖУЧЕ-СТИРАЮЧОЇ ДІЇ

В межах розділу виконано скінченно-елементне та експериментальне дослідження напружено-деформованого стану заготовок корпусів доліт як для суцільних доліт, так і доліт із приварними лопатями з метою розроблення рекомендацій щодо вибору методу отримання заготовки в залежності від конструктивних параметрів доліт. В праці [6] аналітично досліджено теплопровідність простих тіл, оскільки долота є тілами складної форми, то для дослідження теплових процесів використовували комп'ютерне моделювання.

4.1 Скінчено-елементне дослідження напружено-деформованого стану заготовок корпусів доліт, отриманих литтям

Для доліт із суцільними корпусами використовували моделювання напружено-деформованого стану виливків корпусів з використанням навчальної версії програми ProCast. На рис. 4.1 показано перебіг кристалізації виливка в часі для спрощеної моделі долота дволопатевого (2Л-93 МС) зовнішнім діаметром 93 мм, виготовленого із сталі 20ХН. Програмний час охолодження склав 4000 с.

Кристалізація виливка відбувалася нерівномірно: спочатку кристалізувалися ділянки, що мають найменшу товщину: криволінійні поверхні лопатей; серцевина виливка кристалізується найпізніше. У момент часу 45 с рідка частина виливка (його серцевина) виливка становила близько 30 % його об'єму, а мінімальний рівень залишкових ливарних напружень досягався на зовнішньому торці меншої основи конуса замкової нарізі та становив 270 МПа, а проміжне значення напружень досягалося в точці початку спряження лопаті із сферичною частиною виливка і складало

330 МПа. Максимальний рівень залишкових напружень становив 608 МПа в основі паза заготовки між лопатями, який, практично близький до $\sigma_{0,2}=590$ МПа матеріалу вилівка (сталь 20ХН). Такий рівень залишкових ливарних напружень не спричиняв виникнення ливарних тріщин у заготовці.

Перебіг виникнення і зміни напружень вилівка в часі зображено на рис. 4.1 – рис. 4.6. За безрозмірною колірною шкалою, яка розташована справа на рисунках можна визначити долю твердої фази в будь-якій точці вилівка.

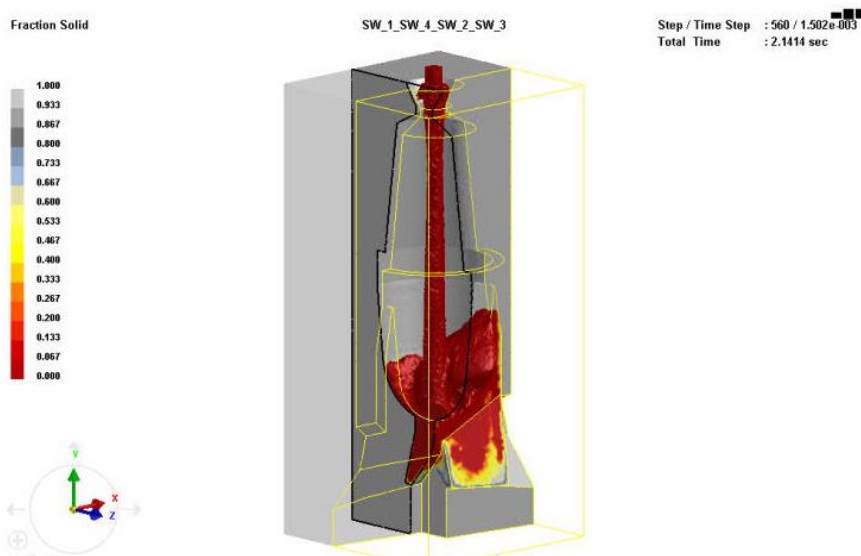


Рисунок 4.1 — Кристалізація вилівка в момент часу 2,141 с.

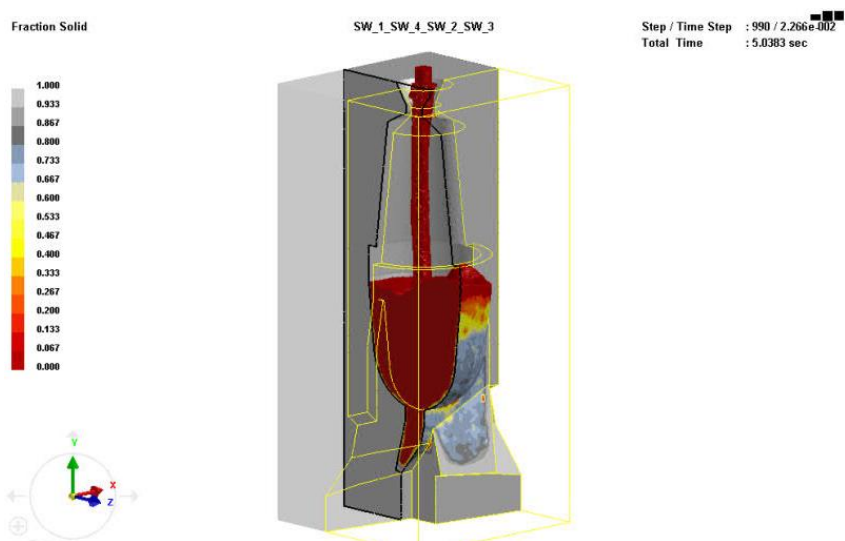


Рисунок 4.2 — Кристалізація вилівка в момент часу 5,038 с.

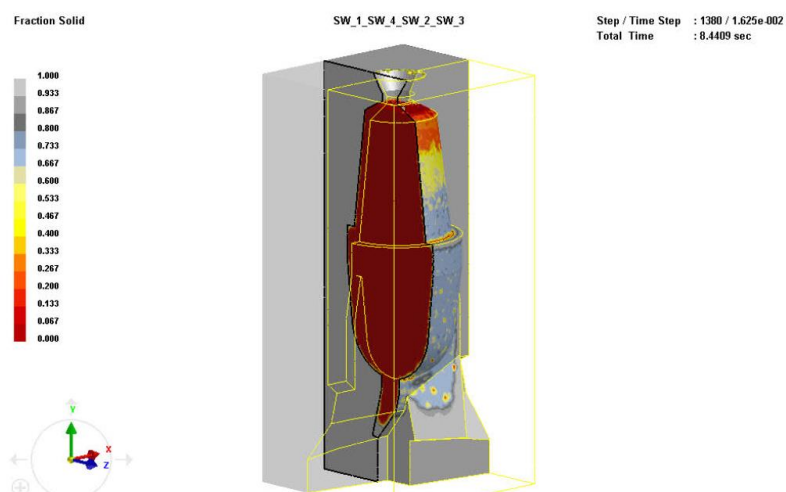


Рисунок 4.3 — Кристалізація вилівка в момент часу 8,441 с

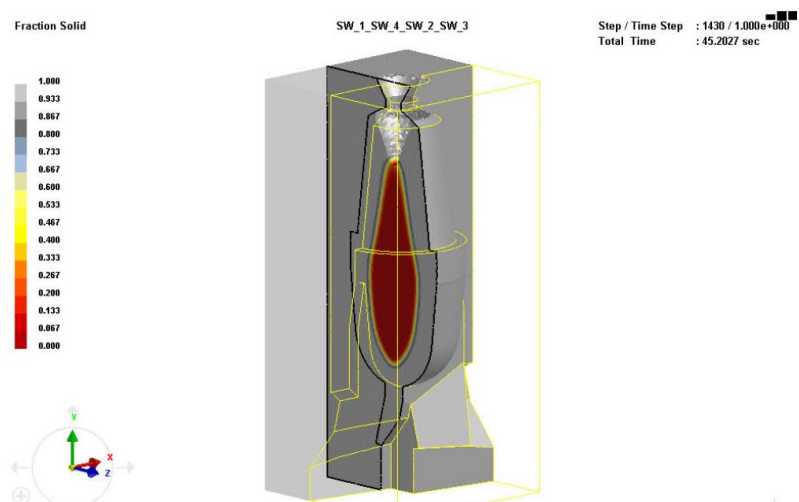


Рисунок 4.4 — Кристалізація вилівка в момент часу 45,203 с

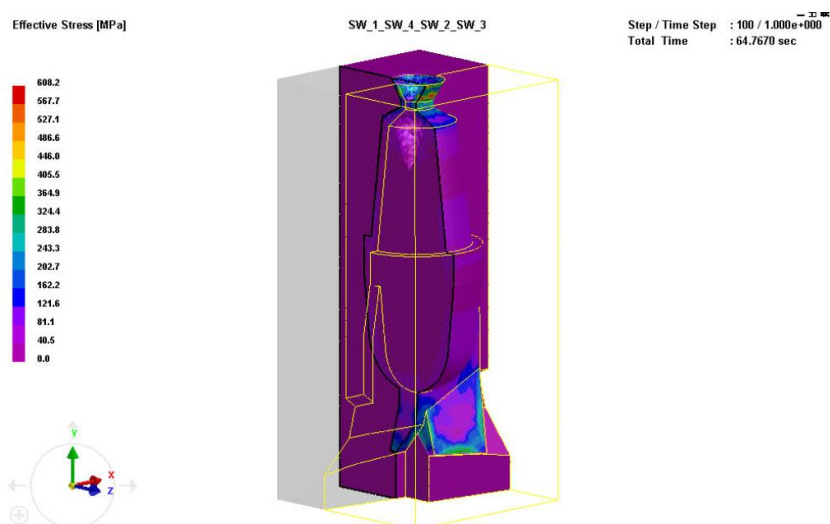


Рисунок 4.5 — Напруження у вилівку в момент часу 64,767 с.

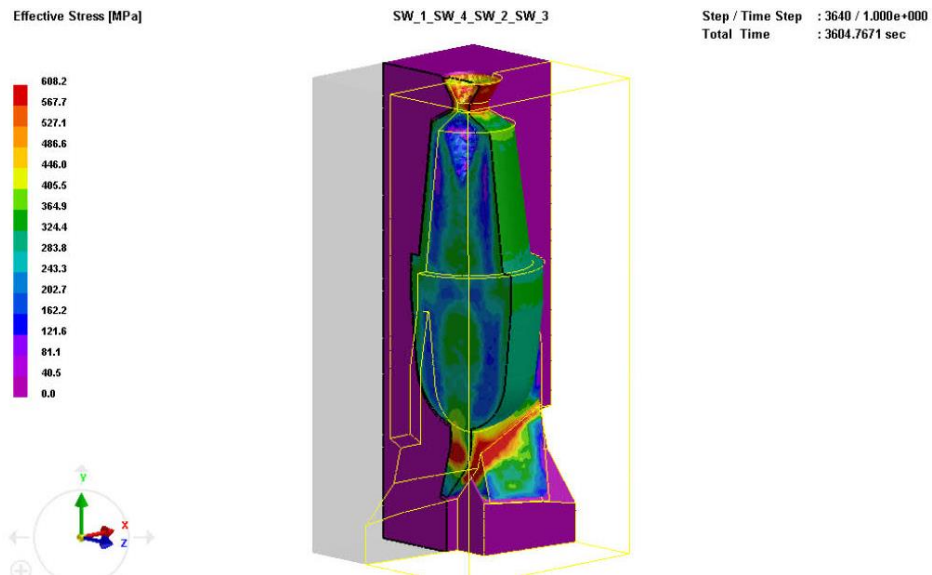


Рисунок 4.6 — Напруження у виливку в момент часу 3604,767 с.

Зміну величини ефективних напружень виливка в часі зображено на рис. 4.7. Із рис. 4.7 видно, що найменший рівень залишкових напружень у виливку виникає на зовнішньому ребрі меншої основи конуса замкової нарізі, середній – на криволінійних ділянках спряження лопаті із циліндричною частиною виливка найменшої товщини, а найбільший рівень цих напружень спостерігається в основі паза між лопатями заготовки.

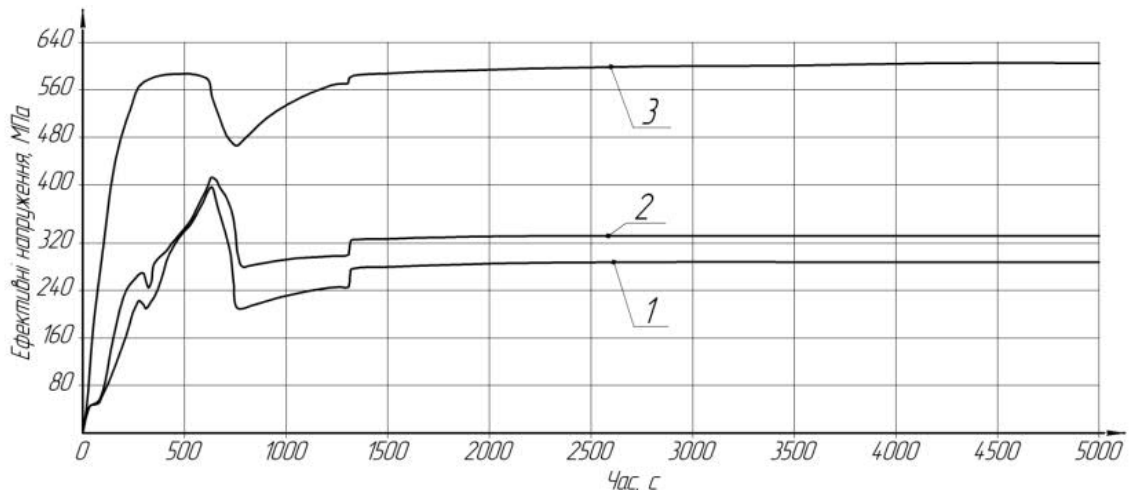


Рисунок 4.7 – Залежність зміни ефективних напружень у найбільш характерних точках тіла виливка від часу: 1 – точка на зовнішньому ребрі меншої основи конуса замкової нарізі; 2 – початок контуру лопаті на корпусі долота; 3 – основа паза між лопатями заготовки

Для усунення залишкових напружень застосовували операцію термічної обробки – відпал, також можливо оптимізувати конфігурацію ливарної форми. Для підвищення ресурсу роботи кокіля та покращення умов кристалізації вилівка на робочій поверхні цього кокіля доцільно сформуванати оксидне покриття, наприклад шляхом напилення алюмінію з подальшим оксидування його верхнього шару в електроліті в режимі мікродугових розрядів. Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 4.7 показав зростання рівня напружень в процесі кристалізації металу вилівка у всіх досліджуваних точках. У початковий момент кристалізації заготовки спостерігалось різке зростання рівня залишкових напружень у всіх точках вилівка приблизно на протязі 500 с, далі рівень напружень дещо спадав – біля 1000 с, і стабілізується при подальшому затвердінні вилівка після 1700 с. Це можна пояснити структурними перетвореннями, які відбуваються у вилівку, в процесі його кристалізації у всьому тілі заготовки.

Для перевірки отриманих значень деформацій під час скінченно-елементного моделювання, отримано вилівок корпусу долота. Лиття здійснювалось у кокіль, розплав заливався за температури 1400 °С. Різниця розрахункового значення і отриманого при використанні програмного продукту ProCAST, склала 5,54 хв. Величина ливарних деформацій, отриманих експериментально, у в точках, розміщених на зовнішній поверхні лопатей (зовнішній діаметр долота) становила 0,428 мм. Різниця величин деформацій, визначених програмно і фактично, пояснюється тим, що охолодження в програмному продукті розраховувалося для вилівка, що твердне в повністю облицьованому кокілі із різною товщиною стінок, тоді як фактично кристалізація відбувалася у кокілі із однаковою товщиною стінок. Для усунення цих залишкових напружень застосовували операцію термічної обробки – відпал.

4.2 Вплив технології виконання зварних швів під час складання на точність виготовлення бурових доліт

Технологія виготовлення доліт передбачає встановлення Г-подібних лопатей із впаяними різцями у пази у корпусі, а потім виконання двох зварних швів (по обох боках кожної лопаті). При цьому порядок здійснення наступних зварних швів не регламентовано. Кресленник долота ріжуче-стираючої дії представлено у додатку Б. Зварний шов здійснювали по криволінійній поверхні. В такому випадку для забезпечення точності виробу в цілому використовували метод зворотних деформацій, суть якого полягає у тому, що приварювання наступної лопаті здійснюється у напрямку протилежному напрямку деформацій, отриманому після охолодження попередньої лопаті. Якщо величина напрямку була визначена правильно, то конструкція після зварювання не потребувала корегування або мала невелике викривлення у допустимих межах.

Технологія виготовлення доліт типу передбачає значні розміри зварних швів, що забезпечує надійне і міцне кріплення та, поряд із тим, викликає значні деформації долота під час його зварювання.

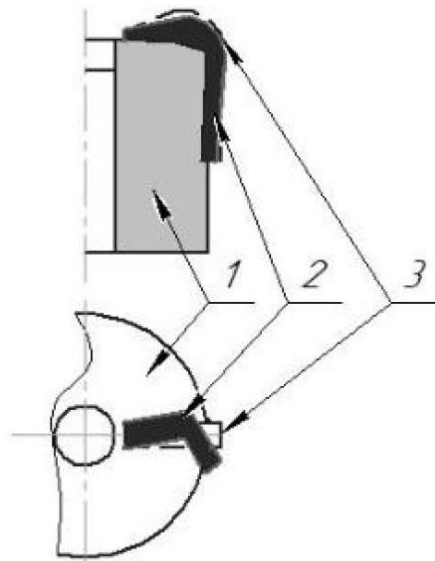


Рисунок 4.8 – Схема утворення теплової деформації лопаті: 1– корпус, 2– деформована лопать, 3 – недеформована лопать

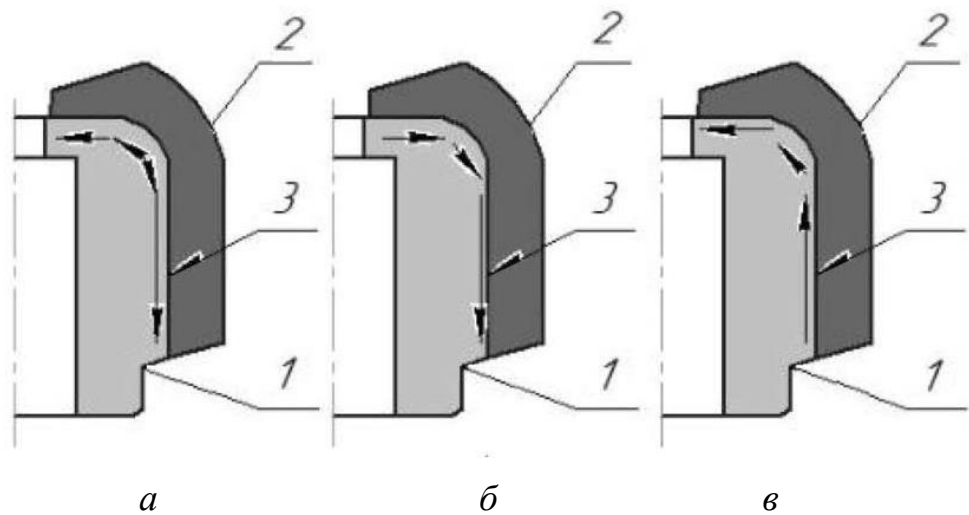


Рисунок 4.9 – Схема формування зварних швів:

1 – корпус долота; 2 – лопать; 3 – зварний шов

Для обґрунтування технології складання заготовки корпусу долота із лопатями зварюванням досліджено наступні схеми виконання зварних швів (рис. 4.9):

а – зварний шов формують, починаючи із місця спряження циліндричної та еліпсоїдної поверхонь корпусу долота і виконують спочатку по еліпсоїдній поверхні до краю коротшої частини лопаті, а потім – вздовж циліндричної поверхні до краю довшої частини лопаті;

б – зварний шов формують, починаючи з точки спряження коротшої частини лопаті із еліпсоїдною поверхнею корпусу долота, а потім по циліндричній поверхні до кінця довшої частини лопаті;

в – зварний шов формують, починаючи з точки спряження довшої частини лопаті із циліндричною поверхнею корпусу долота, а потім по еліптичній поверхні до кінця коротшої частини лопаті.

Скінчено-елементне дослідження впливу послідовності виконання зварних швів на величину деформацій виконували у три етапи:

- на першому етапі досліджено послідовність виконання одного зварного шва і вплив цієї послідовності на величину деформацій однієї лопаті;
- на другому етапі досліджено величини теплових деформацій долота в цілому,

спричинених других зварним швом тієї самої лопаті.

Зварний шов моделювався набором із 50 блоків (по 25 з кожного боку лопаті) (рис. 4.10), при чому перший блок був розмішений на передній ділянці долота, а останній – в кінці зварного шва. Для кожного із блоків послідовно включалася дія джерела тепла. Послідовність виконання зварного шва моделювалася послідовністю прикладання теплових потоків. Шлях прокладання зварного шва моделювали шляхом прикладання теплового потоку до окремих блоків.

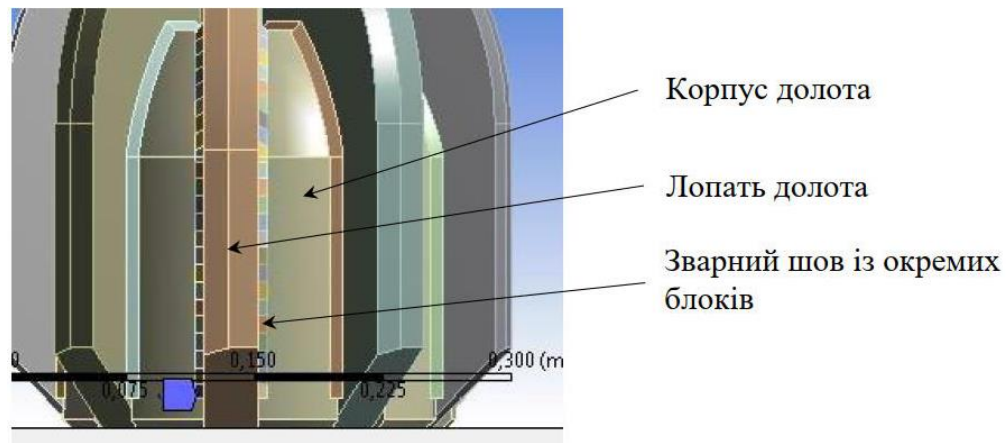


Рисунок 4.10 –3-D модель зварного шва привареної лопаті до корпусу долота

Моделювання проводилося послідовно в середовищі ANSYS (академічна ліцензія), на першому етапі в середовищі Transient Thermal зварний шов моделювався як сукупність окремих елементів, до кожного із яких прикладався тепловий потік у 4000 Вт у кожний окремий момент часу. Після виконання першого шва наступний виконувався через 5 с. До корпусу долота була прикладена конвекція у 50 Вт/м²с. Після виконання зварного шва було здійснено охолодження упродовж 30 с до температури навколишнього середовища у 22 °С. Загальний час дослідження – 80 с. Схема реалізації теплового потоку до елементів зварного шва представлена на рис. 4.11. Теплове навантаження реалізовувалося за допомогою модуля Transient Thermal, а потім результати розрахунків передавалися до Static Structural для визначення деформацій та напружень.

Матеріал корпусу долота і лопатей – сталь нержавіюча хром-нікелева ANSI 310 (матеріал вбудований в Ansys) із таким хімічним складом та параметрами (табл. 4.1 і табл. 4.2). Аналог – сталь 20Х23Н18 ГОСТ 5632-72.

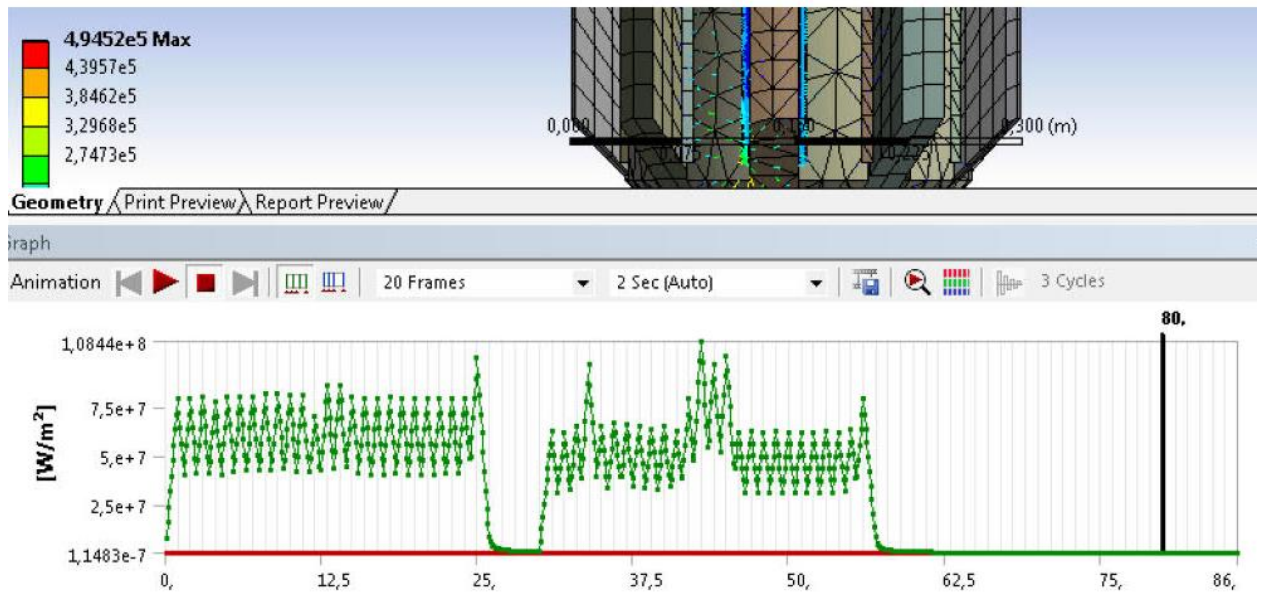


Рисунок 4.11 – Схема моделювання теплового потоку на елементах зварного шва під час приварювання лопатей

Таблиця 4.1 – Хімічний склад сталі ANSI 310, масові %

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
<0,08	<2,0	<0,045	<0,03	<1,5	24,0-26,0	19,0-22,0	решта

Таблиця 4.2 – Механічні властивості

Границя міцності, МПа	Границя текучості, МПа	Твердість по Бріннелю, НВ	Втомна міцність, МПа	Відносне видовження	Густина, г/см ³
515	205	172	260	40	7,84

Основними факторами, що визначалися, були величини деформацій (у тому числі в радіальному напрямку) та напружень, які виникають у долоті під час прикладання теплового навантаження до зварного шва. Визначення деформацій відбувалося після 30 с охолодження виробу. Точки, в яких визначалися значення досліджуваних параметрів, представлено на рис. 4.12.

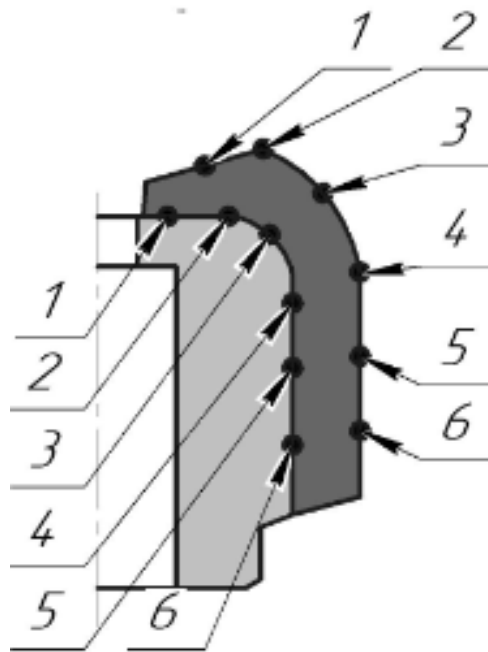


Рисунок 4.12 – Розміщення точок на заготовці долота, де вимірювали деформації (точки на зовнішній поверхні – у деформації у радіальному напрямку, точки на зварному шві – деформації зварного шва)

Таблиці і результатами розрахунку величин напружень і деформацій для кожного блоку під час здійснення зварювання лопаті з корпусом долота представлені у додатку Б. В таблиці В1 додатку В узагальнені дані щодо величин деформацій для кожного блоку під час здійснення зварювання. У табл. В2 та табл. В3 додатку В представлені деформації для розглянутих точок зварного шва та лопаті після охолодження протягом 30 с відповідно.

На рис. 4.13 показано розподіл напружень шва за розміром шва після виконання двох зварювань згідно схеми б. На рис. 4.14 показані загальні деформації зварного шва після виконання двох зварних швів згідно схеми б. На рис. 4.15 показані радіальні деформації зварного шва після виконання двох зварних швів згідно схеми б. На рис. 4.16 показані загальні деформації в розглянутих точках лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей зварювання. На рис. 4.17 показані напруження у розглянутих точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей

зварювання. На рис. 4.18 показані радіальні деформації в розглянутих точках лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей зварювання.

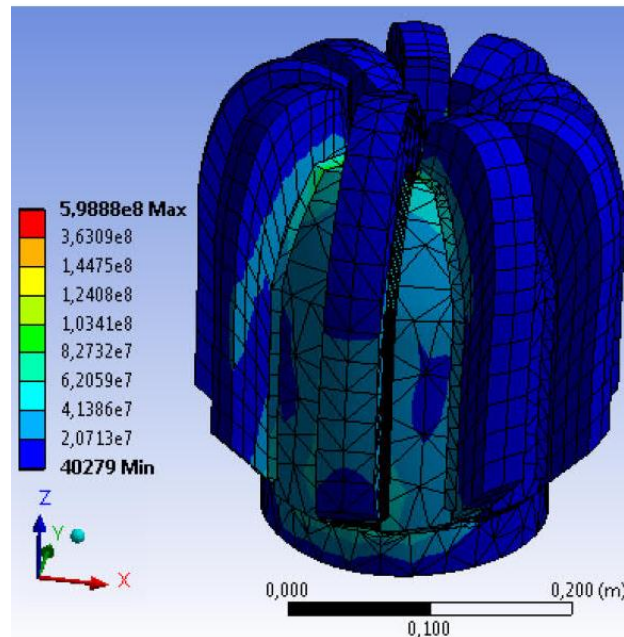


Рисунок 4.13 – Розподіл напружень у зварному шві після виконання двох зварювань згідно схеми б

За результатами моделювання встановлено, що після виконання першого зварного шва для однієї довільно вибраної лопаті за першою схемою спостерігаються мінімальні значення деформацій та напружень в небезпечному перерізі (точка 2). Максимальні значення напружень і деформацій спостерігаються в точці 3 (нижній кінець лопаті). Для другої схеми мінімальні напруження і деформації спостерігаються в точці 1. Напруження і деформації в точці 3 приблизно в 1,5 рази більші за аналогічні показники в точці 2. Для третьої схеми мінімальні напруження і деформації спостерігаються у точці 3. Напруження і деформації у точці 1 приблизно в 1,5 рази більші за аналогічні показники в точці 2.

Другий етап досліджень був виконаний на базі результатів, отриманих для першої схеми виконання зварного шву, оскільки саме така схема здійснення зварного шва дає мінімальні деформації (тобто мінімальний внесок до величини допуску) у точці 2. В цьому випадку аналогічним чином прикладався тепловий потік і визначалися деформації і напруження лопатей.

Встановлено, що при здійсненні другого зварного шва тієї самої лопаті за схемою *б* максимальна деформація в напрямку горизонтальної осі становила $2,50 \cdot 10^{-5}$ м, що становить 4 % від загального допуску на діаметр долота. Найбільші залишкові напруження становили 56,1 МПа і спостерігалися в області, прилеглій до точки *б*.

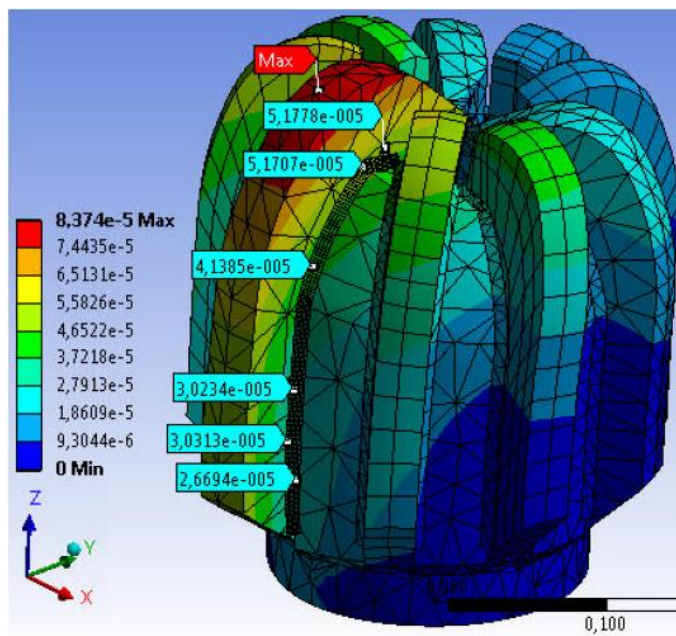


Рисунок 4.14 – Загальні деформації зварного шва після виконання двох зварних швів згідно схеми *б*

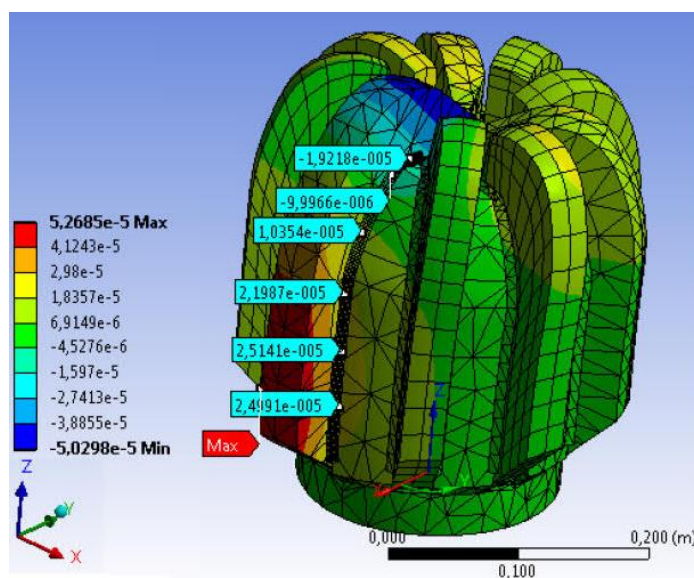


Рисунок 4.15 – Радіальні деформації зварного шва після виконання двох зварних швів згідно схеми *б*

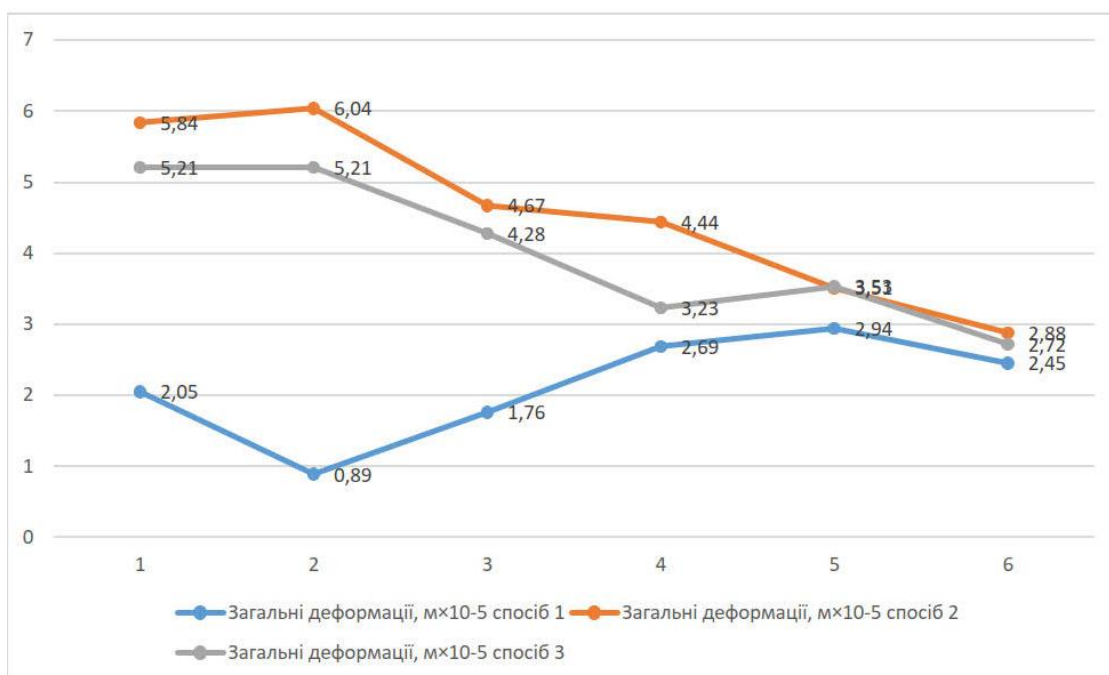


Рисунок 4.16 – Загальні деформації у точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для різних схем виконання зварних швів

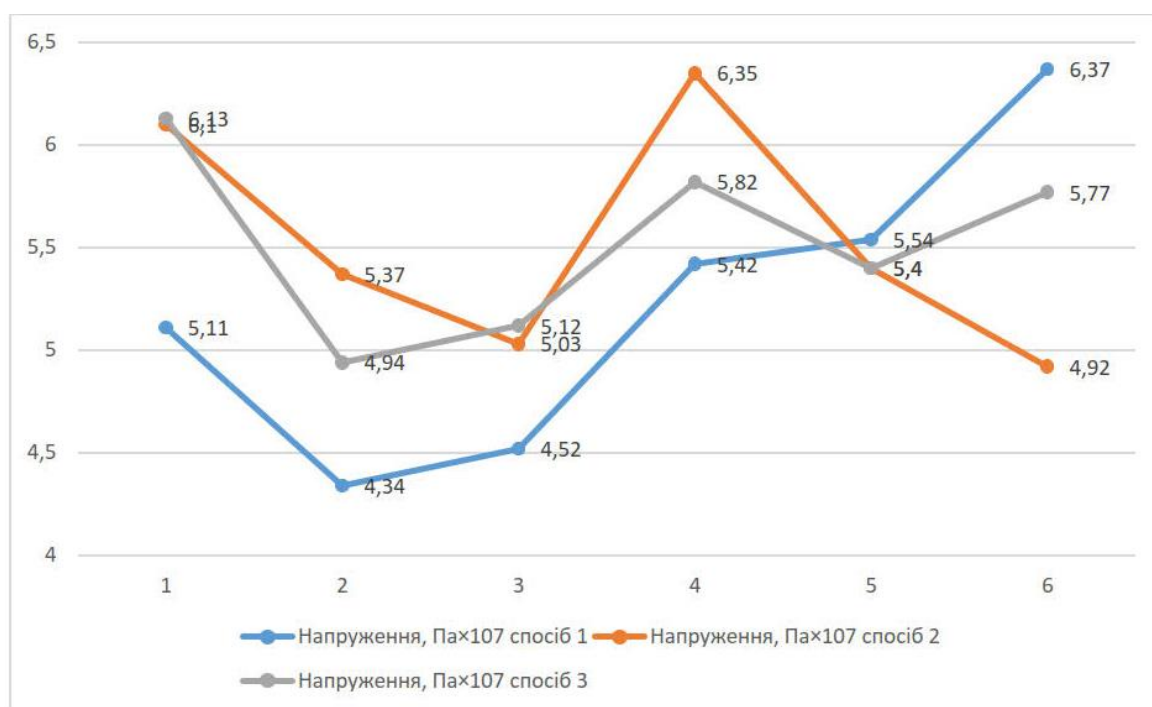


Рисунок 4.17 – Напруження у точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для різних схем виконання зварних швів

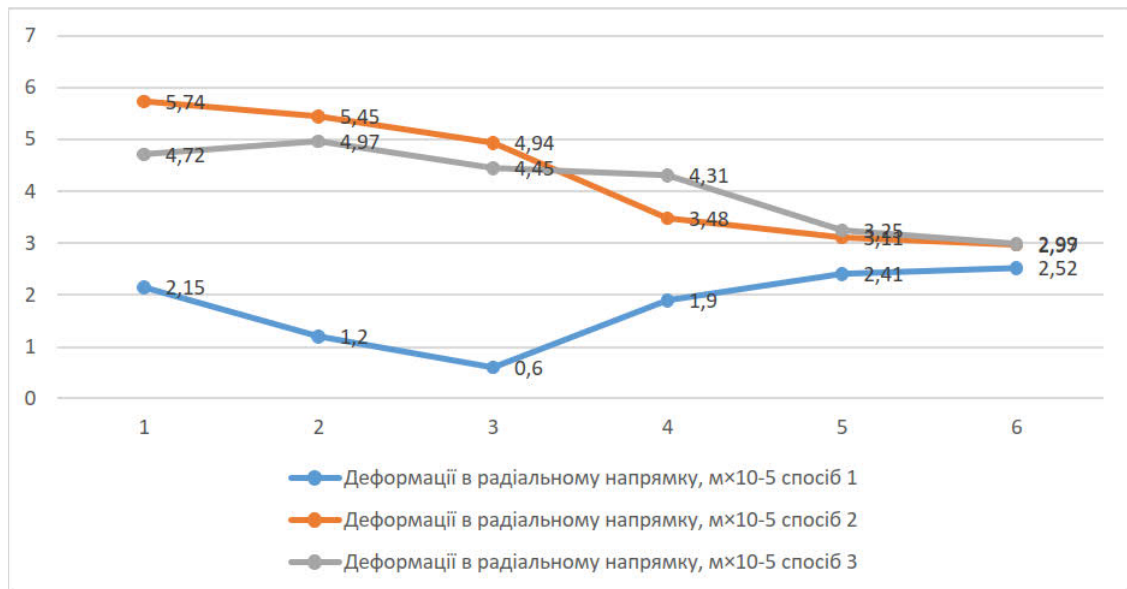


Рисунок 4.19 – Радіальні деформації у точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для різних схем виконання зварних швів

Результати моделювання показали, що відразу після виконання зварного шва виникає відхилення лопаті в напрямку, протилежному до місця шва, обумовлене локальним тепловим розширенням матеріалів деталей в нагрітій зоні, що з'єднуються. В подальшому для забезпечення необхідного допуску зовнішнього діаметру було виконано приварювання протилежної до попередньо привареної лопаті. Для забезпечення компенсації відхилення зовнішнього діаметру вибиралася для приварювання лопать, що була максимально віддалена від попередньо привареної.

В результаті проведених досліджень встановлено, що:

1. Теплові деформації, які виникають під час виконання просторових криволінійних зварних швів, є значними, і стосуються, переважно, лопатей, а не корпусу (тобто менш масивних деталей) – тобто мають місце вигини, повороти, перекося лопатей.
2. Здійснення зварного шва по просторовій криволінійній поверхні необхідно починати із точки максимально наближеної перерізу, точність якого має бути забезпечена;
3. Для забезпечення точності виробу в цілому використовується метод зворотних деформацій, суть якого полягає у тому, що приварювання наступної

лопаті здійснюється у напрямку протилежному напрямку деформацій, отриманому після охолодження попередньої лопаті.

4. з метою зменшення деформацій і напружень під час зварювання за можливості необхідно збільшувати розміри приварюваних деталей (або, принаймні, намагатися конструювати їх співрозмірними), щоби вони зазнавали менших деформацій та/або їхні деформації були співрозмірними.

5. для забезпечення компенсації відхилення зовнішнього діаметру вибиралася для приварювання лопать, що була максимально віддалена від попередньо привареної.

Таким чином, для здійснення зварювання криволінійних просторових зварних швів розроблено такі рекомендації:

- здійснення зварного шва просторової форми необхідно починати із точки максимально наближеної перерізу, точність якого має бути забезпечена;

- з метою зменшення деформацій і напружень під час зварювання за можливості необхідно збільшувати розміри приварюваних деталей (або, принаймні, намагатися конструювати їх співрозмірними), щоби вони зазнавали менших деформацій та/або їхні деформації були співрозмірними;

- для забезпечення компенсації відхилення зовнішнього діаметру вибиралася для приварювання лопать, що була максимально віддалена від попередньо привареної.

4.3 Експериментальні дослідження впливу послідовності виконання зварних швів на точність виготовлення бурових доліт

Результати-скінченно-елементного моделювання були підтвержені експериментально під час виконання зварних швів за наведеними вище схемами. Так було виготовлено 30 моделей корпусів досліт із привареними лопатями, приарювання лопатей до корпусів виконувалося за наведеними вище схемами (по 10 корпусів для кожної схеми). Для всіх трьох схем застосовувався метод одноступінчастого проектування [100], який передбачає

корегування на кожній технологічній стадії складання [101, 102]. Номінальний діаметр корпусу із привареними лопатями становив діаметр становив – 292,9 мм, допуск: (0...+0,794 мм). В табл. 4.3 представлено результати вимірювання зовнішнього діаметра для корпусів доліт, отриманих за різними схемами.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання фактичних діаметрів корпусів доліт, отриманих за різними схемами

Схема 1									
293,259	293,169	293,346	293,266	293,206	293,157	293,223	293,097	293,304	293,163
Схема 2									
293,655	293,723	293,731	293,615	293,591	293,678	293,778	293,655	293,786	293,688
Схема 3									
293,595	293,592	293,772	293,681	293,747	293,728	293,658	293,693	293,630	293,665

За результатами вимірювання зовнішній діаметрів встановлено, що:

- для схеми *а*: середній фактичний діаметр становив 293,219 мм, максимальне фактичне відхилення становило 0,446 мм, мінімальне – 0,259 мм, середня величина відхилення – 0,319 мм, перевищення допуску не спостерігалось;
- для схеми *б*: середній фактичний діаметр становив 293,69 мм, максимальне фактичне відхилення становило 0,886 мм, мінімальне – 0,691 мм, середня величина відхилення – 0,79 мм; перевищення допуску спостерігалось у 4 з 10 випадків;
- для схеми *в*: середній фактичний діаметр становив 293,676 мм, максимальне фактичне відхилення становило 0,872 мм, мінімальне – 0,692 мм, середня величина відхилення – 0,776 мм; перевищення допуску спостерігалось у 3 з 10 випадків.

Величини отриманих значень діаметрів дають змогу зробити висновок про те, що схема *б* (зварний шов формують, починаючи із місця спряження циліндричної та еліпсоїдної поверхонь корпусу долота і виконують спочатку по еліпсоїдній поверхні до краю коротшої частини лопаті, а потім – вздовж

циліндричної поверхні до краю довшої частини лопаті) дає змогу отримати менші величини зовнішнього діаметру долота.

Для визначення величини фактичного діаметра долота було виконане звинчування корпусу із ніпелем та подальше приварювання. Були визначені напрямки і величини деформацій, які виникли після попередньої операції. Для цього визначено зміну положення осей з'єднувальних деталей, і здійснювати його за рахунок кожного складального впливу. Таким чином, окремі дії перестають бути взаємно незалежними і вибудовуються в упорядковану систему. Попереднє згвинчування нарізі дає змогу регулювати величину відхилень співвісності між ніпелем та корпусом із привареними осями [75], а саме збільшення моменту згвинчування дає змогу зменшити величину відхилення. В науково-технічній літературі не виявлено залежності між величиною відхилення співвісності та моментом затяжки.

Під час виконання операції згвинчування ніпеля і корпусу долота із привареними лопатями встановлено, що збільшення моменту згвинчування викликає зменшення неспіввісності, проте, аналогічно до результатів [75], не було встановлено чіткої залежності між величиною моменту згвинчування та величиною відхилення. Загалом спостерігається випадковий характер відхилень співвісності (табл. 4.4). Для вимірювання моменту використовувався динамометричний ключ КД 100-10. Співвісність оцінювалася за показниками радіального биття за допомогою контрольного пристрою, описаного в розділі 3.

Тому, як технологічне рішення запропоновано вибрати величину прикладеного моменту згвинчування в залежності від необхідної величини відхилення від співвісності, тобто більше за мінімальну величину моменту, але індивідуально до кожного долота у такий спосіб, щоби сумарна величина відхилення була мінімальна, а реальний розмір максимально наближався до номінального зовнішнього діаметра долота.

Таблиця 4.4 – Середні величини відхилення від співвісності в залежності від прикладеного моменту під час згвинчування ніпеля і корпусу долота із привареними лопатями

Момент	М, кНм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Похибка	$(\Delta_{\Sigma}^{12})_x$, мм	0,74±0, 241	0,71±0, 281	0,68±0, 215	0,62±0, 191	0,57±0, 251	0,51±0, 217	0,45±0, 187	0,41±0, 157	0,45±0, 114

Наступним кроком було виконання зварювання. Розглядали 10 доліт, для яких лопати приварені до корпусу за схемою б. Аналогічно до методу, запропонованого у [75], виконувалися прихоплювальні зварювальні шви, внаслідок чого приварений корпус відхилявся від осі, а після охолодження корпус нахилився щодо ніпеля в сторону прихоплювального шва. При чому після виконання кожного прихоплювального шва оцінювали величину відхилення зовнішнього діаметра долота. Після виконання зварювання не спостерігалось доліт, зовнішній діаметр яких виходив би за межі встановленого допуску, тоді як під час застосування традиційної технології (яка не передбачає приварювання лопаті до корпусу починаючи із спряження циліндричної та еліпсоїдної поверхонь долота; контролю величини биття на кожній операції; індивідуального підбору моментів згвинчування та індивідуального виконання прихоплювальних швів) спостерігається до 30 % браку [75].

4.4 Розроблення рекомендацій із вибору методу отримання заготовки

В роботі розглядався випадок моделювання одного долота діаметром 292,9 мм, тому були проведені скінчено-елементні дослідження напружено-деформованого стану заготовок доліт різних діаметрів, виготовлених литтям та зварюванням. Діаметр долота (разом із лопатями) вибирався таким: 171,45

мм, 228,6 мм, 349,25 мм та 444,5 мм (відповідно до стандартних розмірів). Співвідношення між діаметром корпусу і долота із лопатями вибиралося в таким: $d_{\text{корпуса}} / d_{\text{долота}} = 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9$. Встановлено, що при співвідношенні $d_{\text{корпуса}} / d_{\text{долота}} \geq 0,75$ менші напруження і деформації спостерігаються для литих заготовок, а в протилежному випадку – для корпусів із привареними лопатями. Відповідно, запропоновано здійснювати вибір методу отримання заготовки в залежності від співвідношення зовнішнього діаметру долота і зовнішнього діаметра корпусу без лопатей – для $d_{\text{корпуса}} / d_{\text{долота}} \geq 0,75$ доцільно виготовляти корпуси доліт лиття, в іншому випадку – із привареними лопатями.

Висновки до розділу 4

Було виконано скінченно-елементне моделювання та експериментальне дослідження напружено-деформованого стану заготовки корпусів доліт, отриманих шляхом лиття (навчальна версія програми ProCast) та зварювання (академічна ліцензія ANSYS). Результати таких досліджень підтверджено шляхом виготовлення дослідних зразків.

Під час скінчено-елементного моделювання лиття встановлено, що кристалізація виливка відбувається нерівномірно: спочатку кристалізуються ті ділянки, що мають найменшу товщину: криволінійні поверхні лопатей; серцевина виливка кристалізується найпізніше. Максимальний рівень залишкових напружень – 608 МПа в основі паза заготовки між лопатями, що не спричиняє виникнення ливарних тріщин у заготовці.

Для литих корпусів максимальна величина ливарних деформацій спостерігалася у точках, розміщених на зовнішній поверхні лопатей (зовнішній діаметр долота) і становила 0,541 мм для скінчено-аналітичного моделювання та 0,428 мм для виливка. Різниця деформацій пояснюється тим, що охолодження в програмному продукті розраховувалося для виливка, що твердне в повністю облицьованому кокілі із різною товщиною стінок, тоді як

фактично кристалізація відбувалася у кокілі із однаковою товщиною стінок. Для усунення цих залишкових напружень застосовували відпал.

Скінчено-елементне моделювання напружено-деформованого стану заготовки корпусу долота із привареними лопатями проводилося послідовно в середовищі ANSYS (академічна ліцензія) – Transient Thermal (визначення теплового навантаження) та Static Structural (визначення деформацій та напружень). Встановлено, що найменші деформації лопаті спостерігаються під час виконання другого зварного шва тієї ж самої лопаті за схемою а (з місця спряження). Результати моделювання були підтверджені експериментально, проте експериментальні значення деформацій були, в середньому, на 15-20% більшими за розрахункові. Доведено, що виконання зварного шва по просторовій криволінійній поверхні необхідно починати із точки максимально наближеної перерізу, точність якого має бути забезпечена. Для забезпечення точності корпусу в цілому використовується метод зворотних деформацій, суть якого полягає у тому, що приварювання наступної лопаті здійснюють у напрямку протилежному напрямку деформацій, отриманому після охолодження попередньої лопаті.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану суцільних литих доліт і доліт із зварними лопатями, встановлено, що деформації корпусу після зварювання є меншими, ніж для литих корпусів. Запропоновано здійснювати вибір методу отримання заготовки в залежності від співвідношення зовнішнього діаметру долота і зовнішнього діаметра корпусу без лопатей – для $d_{\text{корпуса}}/d_{\text{долота}} \geq 0,75$ доцільно виготовляти корпуси доліт лиття, в іншому випадку – із привареними лопатями.

Результати розділу опубліковано у працях авторки [5], [6], [7], [11], [13].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ БУРОВИХ ДОЛІТ

5.1 Визначення розподілу навантажень між витками конічного нарізевого з'єднання аналітичним методом

Залежно від якості і точності виготовлення деталей нарізевого з'єднання дослідили розподіл навантажень між витками конічного нарізевого з'єднання аналітичним методом; визначили напруження і деформації в конічному нарізевому з'єднанні методом скінчених елементів; експериментально визначили деформації у нарізевому конічному з'єднанні та визначили момент згинчування під час складання корпусу долота із ніпелем та долота із буровою колоною.

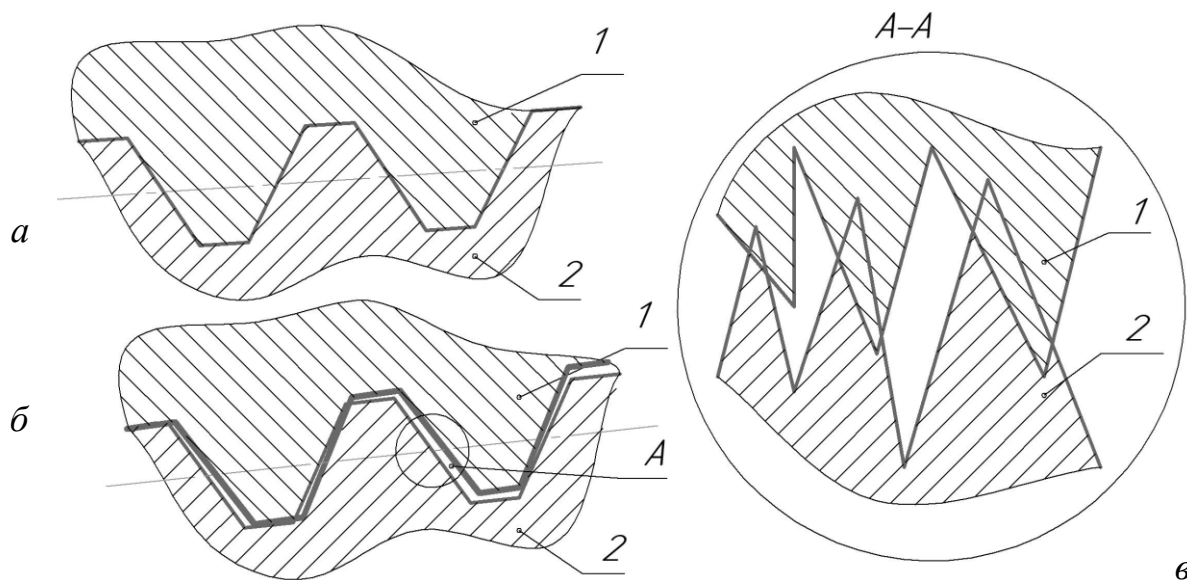


Рисунок 5.1 – Схема взаємодії бічних поверхонь елементів конічного нарізевого з'єднання: *а* – випадок ідеально точних та гладких нарізевих поверхонь, *б* – випадок ідеально гладких нарізевих поверхонь з похибками виготовлення за кроком і кутом профілю; *в* – випадок шорстких поверхонь.

1 – муфта, 2 – ніпель

Розглядалися такі випадки: ідеально точні та гладкі нарізеві поверхні; ідеально гладкі нарізеві поверхні з похибками виготовлення за кроком і кутом профілю; шорсткі нарізеві поверхні з похибками виготовлення за кроком і кутом профілю. Схема взаємодії бічних поверхонь елементів конічного нарізевого з'єднання, показана на рис. 5.1.

Схематичне зображення моделі для оцінки розподілу зусиль у витках конічного нарізевого з'єднання подане на рис. 5.2. Конічна втулка з осьовим циліндричним отвором (ніпель) 1 вперта в жорстку перепону. До неї коаксіально приєднана циліндрична втулка з осьовим конічним отвором (муфта) 2. На верхній торець втулки 2 діє вертикальне рівномірно розподілене навантаження P . Втулки 1 і 2 з'єднані між собою n з'єднувальними елементами 3, які схематизують N контактних пар витків нарізі. Прагнучи аналітично оцінити і врахувати найбільш суттєві параметри сформульованої задачі і при цьому одержати просту і компактну методику отримання результату, дослідження проводитимемо на основі одновимірних моделей втулок та з'єднувальних елементів.

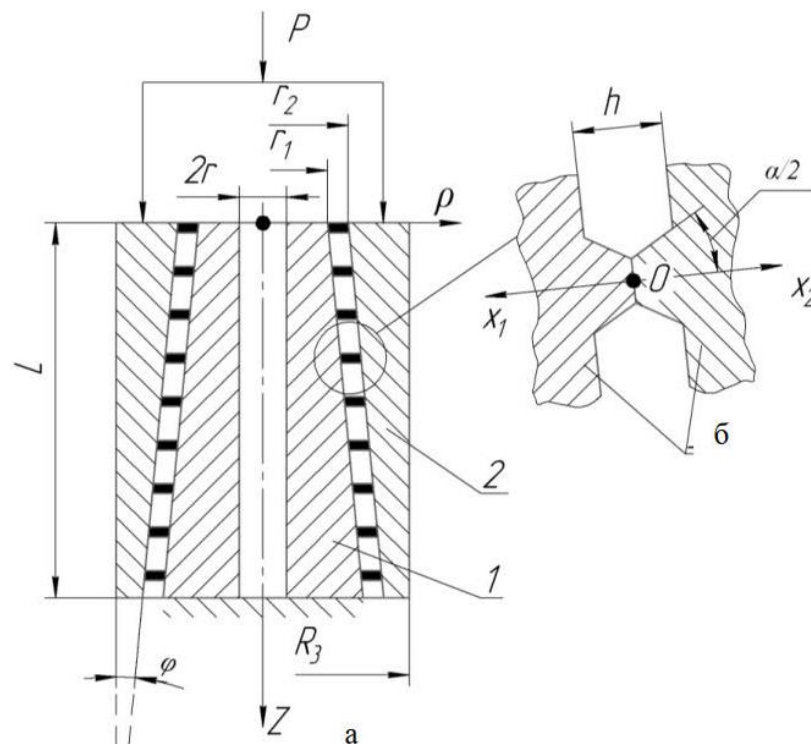


Рисунок 5.2 – Схема конічного нарізевого з'єднання (а) та модель з'єднувального елемента (б): 1 – ніпель; 2 – муфта

Таким чином, за однакового зовнішнього навантаження величини абсолютного зсуву Δ контактної пари “виток нарізі ніпеля – виток нарізі муфти” (рис. 5.2, *a*) і модельного з’єднувального елемента (рис. 5.2, *б*) будуть однаковими. Механічні властивості втулок 1 та 2 повністю характеризуються їх модулями Юнга E_1 та E_2 , а механічні властивості з’єднувальних елементів – модулями зсуву G_1 і G_2 . Необхідно визначити, як розподілиться зусилля P між витками нарізі. Дослідження проводимо в геометрично та фізично лінійній постановці. Модель з’єднувального елемента базується на гіпотезі про те, що під дією зовнішнього навантаження витки нарізі контактують в середніх точках витків (рис. 5.2).

Площі поперечного перерізу втулок 1, 2 (ніпеля та муфти):

$$F_1(z) = \frac{\pi}{4} [(r_1 + z \operatorname{tg} \varphi)^2 - r^2]; \quad F_2(z) = \frac{\pi}{4} [R^2 - (r_2 + z \operatorname{tg} \varphi)^2] \quad (5.1)$$

Площі зсуву n -го з’єднувального елемента:

$$A_{1n}(x_1) = 2\pi \left(\rho(\zeta n) + \frac{h}{2} - x_1 \right) \left(\frac{s}{2} + 2x_1 \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)$$

$$A_{2n}(x_1) = 2\pi \left(\rho(\zeta n) + \frac{h}{2} - x_2 \right) \left(\frac{s}{2} + 2x_2 \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right), \quad (5.2)$$

де $\rho(z) = r_1 + z \operatorname{tg} \varphi$, а $\rho(\zeta n) = r_1 + \zeta n \operatorname{tg} \varphi$ – радіус ніпеля по западинах нарізі на рівні n -го витка, $\zeta = L/N$, N – кількість витків у з’єднанні.

Запишемо систему з $N-1$ рівнянь сумісності деформацій при навантаженні розглянутої моделі (рис. 5.3):

$$B\bar{Q} + \bar{\Delta}_p = 0, \quad (5.3)$$

$$\text{де } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1,N-1} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2,N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{N-1,1} & \delta_{N-1,2} & \dots & \delta_{N-1,N-1} \end{bmatrix}, \quad \bar{\Delta}_p = \begin{bmatrix} \Delta_{1p} \\ \Delta_{2p} \\ \dots \\ \Delta_{N-1,p} \end{bmatrix}, \quad \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{N-1} \end{bmatrix}, \quad \text{де } B - \text{ матриця}$$

податливості, складена з коефіцієнтів δ_{ik} – переміщень i -го елемента від k -ої

одиночної сили; $\vec{\Delta}_p$ – вектор вантажних переміщень; \vec{Q} – вектор шуканих зусиль у витках нарізі.

Головні та побічні коефіцієнти системи (5.3) з урахуванням фізичних співвідношень такі:

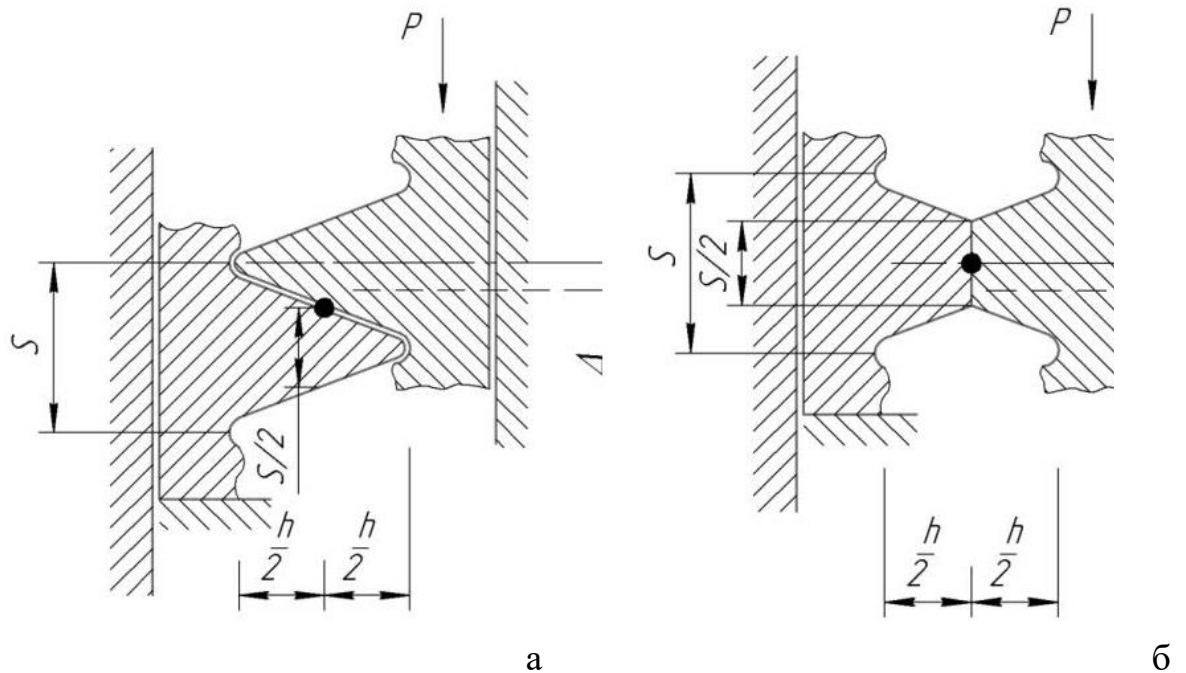


Рисунок 5.3 – Схематизація контактної взаємодії двох витків нарізі:

а – контактна пара «виток нарізі ніпеля – виток нарізі муфти»;

б – модель з'єднувального елемента

$$\delta_{mn} = \int_{\zeta_n}^{\zeta_{n+1}} \left[\frac{1}{E_1 F_1(z)} + \frac{1}{E_2 F_2(z)} \right] dz + \frac{1}{G_1} \int_0^{h/2} \left[\frac{1}{A_{1n}(x_1)} + \frac{1}{A_{1N}(x_1)} \right] dx_1 + \frac{1}{G_2} \int_0^{h/2} \left[\frac{1}{A_{2n}(x_2)} + \frac{1}{A_{2N}(x_2)} \right] dx_2, \quad n \in [1, N-1]; \quad (5.4)$$

$$\delta_{mn} = \int_{\zeta_n}^{\zeta_{n+1}} \left[\frac{1}{E_1 F_1(z)} + \frac{1}{E_2 F_2(z)} \right] dz + \frac{1}{G_1} \int_0^{h/2} \frac{dx_1}{A_{1N}(x_1)} + \frac{1}{G_2} \int_0^{h/2} \frac{dx_2}{A_{2N}(x_2)}, \quad m \in [1, N-1], n > m. \quad (5.5)$$

Якщо у виразі (5.5) $n > m$, то у першому інтегралі слід замінити нижню межу інтегрування $\zeta \cdot n$ на $\zeta \cdot m$.

Вільні члени системи (5.3)

$$\Delta_{np} = -P \left[\frac{1}{E_2} \int_{\zeta_n}^{\zeta_{n+1}} \frac{dz}{F_2(z)} + \frac{1}{G_1} \int_0^{h/2} \frac{dx_1}{A_{1N}(x_1)} + \frac{1}{G_2} \int_0^{h/2} \frac{dx_2}{A_{2N}(x_2)} \right], \quad n \in [1, N-1] \quad (5.6)$$

Крім того, слід додатково залучити дискретний аналог рівняння глобальної рівноваги конструкції

$$\sum_{i=1}^N Q_i - P = 0 \quad (5.7)$$

Розв'язуючи задачу (5.3), (5.7) знайдемо зусилля в усіх витках нарізі

$$\vec{Q} = -B^{-1} \vec{\Delta}_p = 0, \quad Q_N = P - \sum_{i=1}^{N-1} Q_i \quad (5.8)$$

Наріземим з'єднанням, що досліджується з'єднання елементів бурового обладнання, що з'єднуються за допомогою замкової нарізі, а саме долота і бурового замка. Схема конічної замкової нарізі за ГОСТ 24787-90 показана на рис. 5.4.

Досліджувалися з'єднання в виді ніпеля і муфти. Муфта була закріплена по торцевій та бічній поверхнях, до торця ніпеля було прикладене навантаження $M=3$ кНм. Такий вибір навантаження теоретично обґрунтовано у розділі 2.

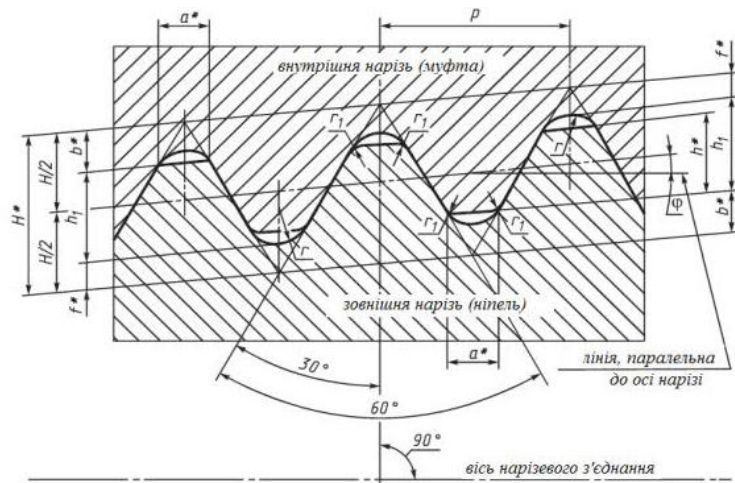


Рисунок 5.4 – Профіль і основні розміри конічної замкової нарізі: P – крок нарізі, K – конусність нарізі, φ – кут нахилу нарізі, H – висота вихідного трикутника нарізі, h_1 – висота профіля нарізі, h – робоча висота профіля нарізі, b – зріз вершини нарізі, f – зріз западини нарізі, a – ширина площадки нарізі, r – радіус заокруглення ширини нарізі, r_1 – радіус заокруглення вершин профіля нарізі

Вибрали з'єднання 3-152, параметри якого представлено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні параметри замкової нарізі 3-152 за ГОСТ 28487–90, мм [103]

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Форма профілю	III	d _{cp}	146,248
φ, град	4°45/48//	H	5,487
P	6,35	K	1:6
h1	3,755	h	3,293
b	1,097	f	0,635
a	1,270	r/r1	0,635/0,38

Граничні відхилення параметрів замкової нарізі, які моделюються, не повинні перевищувати за ГОСТ 28487–90: кроку на всій довжині нарізі – $\pm 0,11$ мм, кута нахилу бічної сторони профілю – $30^\circ \pm 30\%$, конусності на довжині конуса 100 мм – $+0,25$ мм, відхилення висоти профіля нарізі – $0,18$ мм.

Розглянули кілька комбінацій матеріалів ніпеля та муфти: ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – сталь; ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – алюміній; ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – титан.

Ці комбінації матеріалів вибрані з метою повноти досліджень, певні комбінації матеріалів можуть не застосовуватися в бурінні, проте застосовуються в інших в інших галузях [105].

Параметри матеріалів (Модулі Юнга та модулі зсуву), які використовувалися в розрахунках, були такими: сталь $E_{CT}=200$ ГПа, $G_{CT}=80$ ГПа; твердий сплав $E_{HARD}=600$ ГПа, $G_{HARD}=220$ ГПа; алюміній $E_{AL}=70$ ГПа, $G_{AL}=25,5$ ГПа; титан $E_{Ti}=112$ ГПа, $G_{Ti}=41$ ГПа.

В табл. 5.2 представлено результати визначення розподілу зусиль у витках конічного нарізевого з'єднання для всіх аналізованих комбінацій матеріалів, а також результати розрахунків впливу похибок виготовлення на розподіл навантаження між витками нарізі. Результати розрахунків для випадків деталей з'єднання без похибок використали формули (5.1)–(5.6). Для

виконання розрахунків було використано середовище MathCad, при чому в розрахунках величини відхилень задавалися за допомогою вбудованої функції генератора випадкових чисел, заданих за рівномірним розподілом у певних межах. Результати розрахунків представлено у табл. 5.2. На рис. 5.5 та рис. 5.6 подані результати визначення розподілу зусиль у витках конічного нарізеного з'єднання для всіх зазначених вище комбінацій матеріалів.

Результати досліджень показали, що для всіх випадків наявність похибок виготовлення деталей викликає збільшення навантаження на першій та останній витки нарізі, а також збільшення неоднорідності розподілу навантажень. Результати розрахунків впливу похибок виготовлення на розподіл навантаження між витками конічної замкової нарізі наведені в табл. 5.2. При чому, у середньому, наявність похибки по кроку збільшувало навантаження на перші два витки на 1%, наявність похибки за кутом – на 2%.

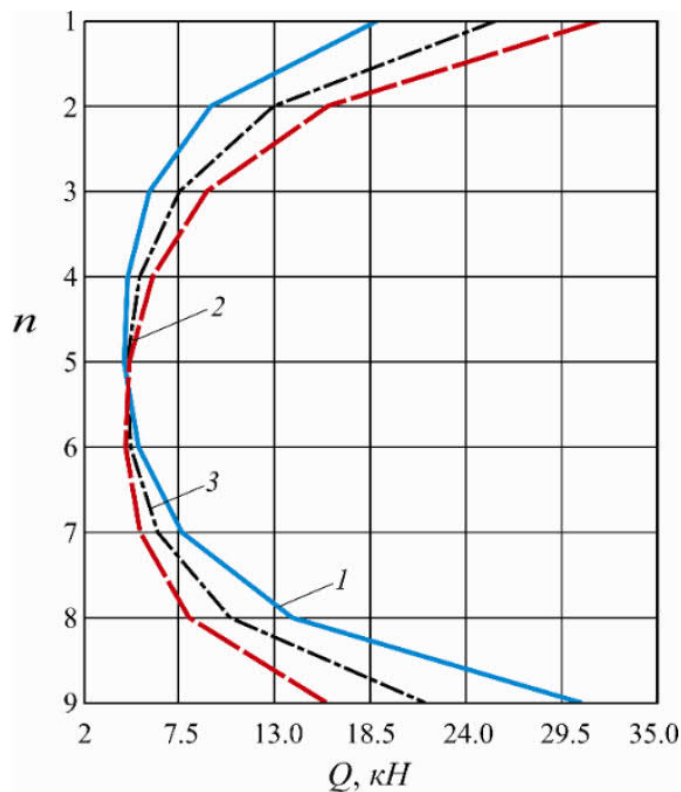


Рисунок 5.5 – Розподіл зусиль у витках конічного нарізеного з'єднання (сталевий ніпель): 1 – сталевий ніпель та сталева муфта; 2 – сталевий ніпель та алюмінієва муфта; 3 – сталевий ніпель та титанова муфта

Найбільш вагомий вплив здійснювало спільне поєднання похибок по кроку та за кутом: спостерігалось збільшення до 5% навантаження на першій та останній витки. Розподіл навантажень для випадків, коли ніпель був виготовлений із сталі суттєво відрізнявся для випадку, коли ніпель був виготовлений із твердого сплаву для всіх матеріалів муфт (сталь, алюміній, титан).

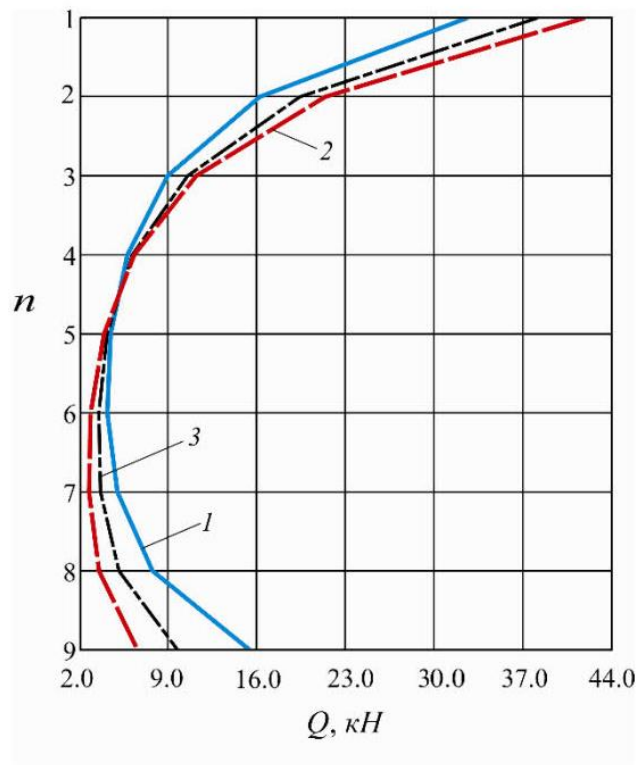


Рисунок 5.6 – Розподіл зусиль у витках конічного нарізеного з'єднання (ніпель із твердого сплаву): 1 – ніпель із твердого сплаву та сталева муфта; 2 – ніпель із твердого сплаву та алюмінієва муфта; 3 – ніпель із твердого сплаву та титанова муфта

Так, для випадку, коли ніпель був виготовлений із сталі, спостерігалось приблизно симетричний розподіл навантаження відносно центрального витка; при чому найбільше навантаження спостерігалось на останній виток лише для випадку ніпель-сталь, муфта-сталь, для інших комбінацій матеріалів найбільше навантаження припадало на перші витки.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунків впливу похибок виготовлення на розподіл навантаження між витками конічної замкової нарізі, %

Номер витка	Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – сталь				Номер витка	Ніпель (долото) – твердий сплав, муфта (буровий замок) – сталь			
	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кроком	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кутом нарізі	Сумісна дія випадкових факторів (випадкового відхилення по кроку та за кутом нарізі)	Навантаження на виток у випадку ідеального профіля		Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кроком	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кутом нарізі	Сумісна дія випадкових факторів (випадкового відхилення по кроку та за кутом нарізі)	Навантаження на виток у випадку ідеального профіля
1	21,419	21,363	21,483	21,549	1	38,696	38,553	38,774	38,803
2	7,007	7,0353	7,0675	7,035	2	13,186	13,244	13,251	13,239
3	3,436	3,456	3,4943	3,473	3	5,6175	5,667	5,673	5,6635
4	2,591	2,601	2,6496	2,639	4	3,351	3,376	3,401	3,396
5	2,532	2,504	2,5899	2,580	5	2,709	2,722	2,752	2,749
6	3,032	3,084	3,085	3,066	6	2,746	2,761	2,779	2,776
7	5,047	5,083	5,080	5,0376	7	3,710	3,735	3,717	3,712
8	12,726	12,782	12,677	12,612	8	7,613	7,647	7,547	7,540
9	42,207	42,09	41,872	42,007	9	22,368	22,294	22,104	22,119
1	20,946	20,955	20,997	21,006	1	25,581	25,614	25,617	25,65
2	14,517	14,519	14,568	14,57	2	18,337	18,349	18,372	18,384
3	10,532	10,531	10,577	10,576	3	13,306	13,305	13,334	13,334
4	8,189	8,185	8,223	8,208	4	9,8708	9,842	9,888	9,832
5	7,038	7,038	7,058	7,052	5	7,614	7,692	7,657	7,616
6	6,888	6,885	6,889	6,885	6	6,294	6,277	6,233	6,236
7	7,773	7,770	7,741	7,745	7	5,754	5,765	5,738	5,749
8	9,977	9,977	9,913	9,919	8	6,014	6,007	5,979	5,971
9	14,138	14,142	14,027	14,031	9	7,225	7,223	7,163	7,137

Продовження таблиці 5.2

Номер витка	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кроком	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кутом	Сумісна дія випадкових факторів (випадкового відхилення по кроку та за кутом нарізі)	Навантаження на виток у випадку ідеального профіля	Номер витка	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кроком	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кутом	Сумісна дія випадкових факторів (випадкового відхилення по кроку та за кутом нарізі)	Навантаження на виток у випадку ідеального профіля
	Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – титан					Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – титан			
1	18,052	18,12	18,106	18,157	1	24,017	24,003	24,06	24,142
2	12,143	12,149	12,197	12,202	2	17,027	17,023	17,069	17,093
3	8,785	8,769	8,821	8,868	3	12,35	12,351	12,385	12,379
4	7,084	7,024	7,106	7,073	4	9,269	9,303	9,319	9,021
5	6,567	6,425	6,555	6,594	5	7,438	7,493	7,4467	7,424
6	7,095	7,037	7,076	7,022	6	6,598	6,543	6,555	6,498
7	8,871	8,849	8,843	8,886	7	6,499	6,437	6,454	6,424
8	12,484	12,486	12,411	12,413	8	7,367	7,32	7,304	7,373
9	19,014	19,08	18,874	18,923	9	9,515	9,541	9,467	9,419

Для випадку, коли ніпель був виготовлений із твердого сплаву, розподіл навантаження не мав симетричного характеру, на перші витки припадало, практично, вдвічі більше навантаження, ніж на останні. Найбільш однорідний розподіл по витках конічної нарізі спостерігався для випадку «долото – сталь, замок – сталь». Найбільша неоднорідність в розподілі навантаження між витками спостерігалася для випадку «Долото – твердий сплав, замок – сталь». При цьому наявність похибок виготовлення викликає зменшення навантаження на другий виток, таким чином підвищується неоднорідність навантаження.

5.2 Дослідження впливу конструктивних і технологічних факторів на розподіл напружень і деформацій у конічних нарізевих з'єднаннях із різних матеріалів

Просторова модель з'єднання, що досліджувалося, показано на рис. 5.7 f, а розрахункова схема для дослідження напружено-деформованого стану конічної нарізі – на рис. 5.8.

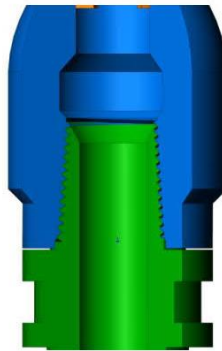


Рисунок 5.7 – Просторова модель нарізевого з'єднання

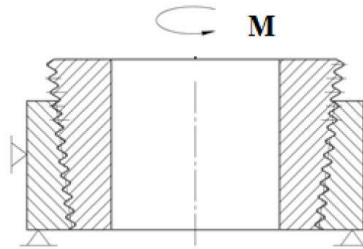


Рисунок 5.8 – Схема скінчено-елементного дослідження конічної замкової нарізі

Досліджували з'єднання ніпеля і муфти. Муфта була закріплена по торцевій та бічній поверхнях, до торця ніпеля був прикладений момент $M=3\text{к Нм}$. Такий вибір навантаження і моментів відповідає реальним умовам складання з'єднання, описаного в [104].

Для дослідження були вибрані нарізі 3–203 із наступними параметрами за ГОСТ 28487–90: $d_{cp}=196,621\text{мм}$, конусність $K1:4$, довжина нарізі 165 мм, кут нахилу бічної сторони профілю нарізі 30° , крок нарізей P і, відповідно, граничні відхилення профілю нарізі $\Delta h/2$ становлять: 4,233 (–0,060) мм;

5,080 (−0,120) мм та 6,390 (−0,180) мм. Поле допуску кута нахилу бічної сторони профілю становить $\alpha/2=27/30'$

Побудова реального профілю нарізі відбувалася за допомогою розробленої програми [26, 27]. Для побудови реального профілю конічної замкової нарізі (із врахуванням допуску) використовували генератор випадкових чисел і реальний профіль будувався із кромом із похибкою, яка задавалася випадковим чином в межах допуску. Були побудовані профілі ідеальної нарізі без похибок, нарізі із похибками за кроком, нарізі із похибками за кутом підйому та нарізі із поєднанням обох зазначених видів похибок.

Для моделювання деталей були використані вбудовані аналоги матеріалів – табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Фізико-механічні властивості та хімічний склад аналогів матеріалів, які використовувалися для моделювання елементів нарізі

Показник \ Матеріал	Твердий сплав ВК8	Сталь 36Г2С	Алюмінієвий сплав Д16Т	Титановий сплав ОТ-4-0
Склад, масові %	8% Со, решта –W	C: 0.32 – 0.4; Mn: 1.5 – 1.8; Si: 0.4 – 0.7; Ni: до 0.4; S: до 0,045; P: до 0,04; Cr: до 0,03	Al: 90.9–95.7; Cu: 3.8–5.9; Mg: 1.2–1.8; Fe <0.5; Si <0.5; Cr <0.1; Ti <0.15 Zn <0.25.	Ti: 96.13 – 98.8; Al: 0.4 – 1.4; Mn: 0.5 – 1.3; N: <0.05; Fe: <0.3; C: <0.1; Si: <0.12; O: <0.15.
Границя міцності при згині σ_{zg} , МПа	1666	–	–	–
Границя міцності σ_b , МПа	–	686–862	390–420	490–637
Границя текучості σ_t , МПа	–	490–755	255–275	–
Відносне видовження при розтязі, %	–	11–12	10–12	15
Твердість HRA	Не менше 88	–	–	–

На рис. 5.9 показано результати моделювання елементів конічного нарізевого з'єднання. Напружений стан оцінювали за Мізесом. На рис. 5.10 показано результати моделювання деформацій, які виникають у з'єднанні для

випадку ідеального профілю, матеріали «сталь – сталь». Результати скінченно-елементних досліджень представлено в табл. 5.4.

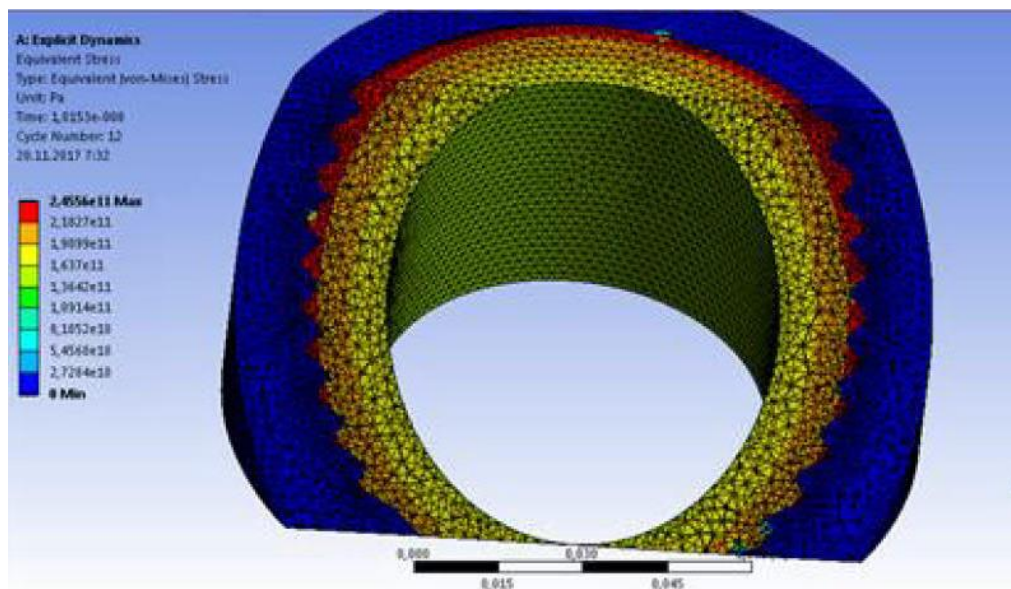


Рисунок 5.9 – Результати моделювання напружень за Мізесом, які виникають у нарізевому з’єднанні для випадку ідеального профілю, матеріали «сталь – сталь» (косий переріз)

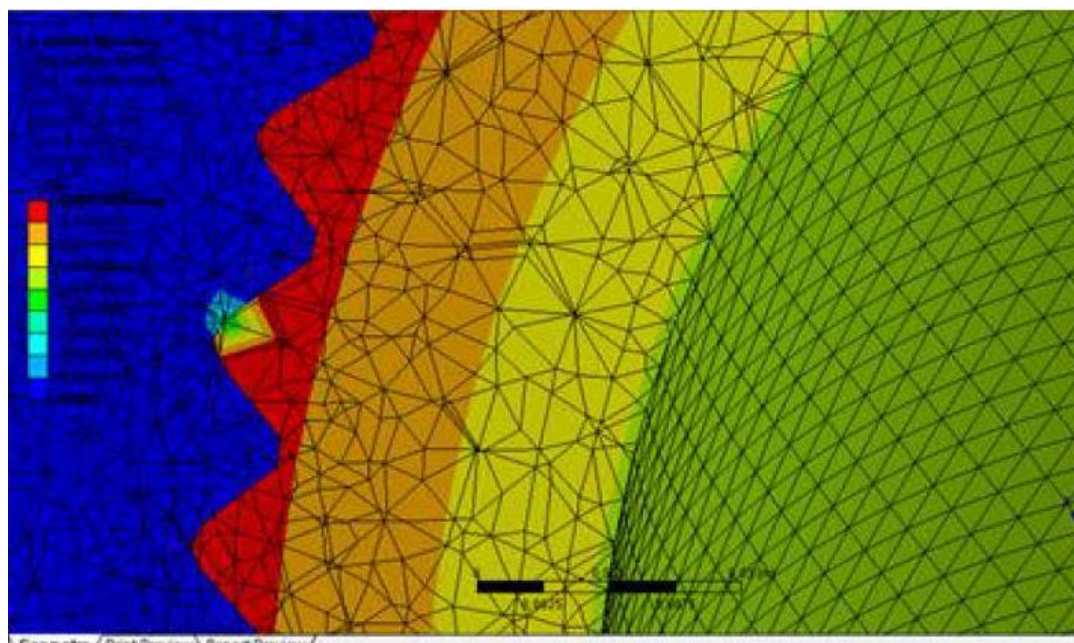


Рисунок 5.10 – Результати моделювання деформацій, які виникають у нарізевому з’єднанні для випадку ідеального профілю, матеріали «сталь – сталь»

Таблиця 5.4 – Результати скінчено-елементного дослідження напружень і деформацій в елементах конічної нарізі З–203 для різних комбінацій матеріалів

Крок нарізі Р, мм	Відхилення $\frac{\Delta h}{2}$, мм	Максимальне напруження, $\times 10^{-8}$ Па	Середнє напруження, $\times 10^{-8}$ Па	Максимальна деформація, $\times 10^{-5}$ м	Середня деформація, $\times 10^{-5}$ м
Нарізь із ідеальним профілем (дослідження 1)					
<i>Ніпель – сталь, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	9,701	6,402	8,011	6,77
5,080	-0,120	8,151	5,621	7,031	5,187
6,390	-0,180	7,012	4,698	6,413	4,187
<i>Ніпель – твердий сплав, муфта – сталь</i>					
4,233	4,233	4,233	4,233	4,233	4,233
5,080	5,080	5,080	5,080	5,080	5,080
6,390	6,390	6,390	6,390	6,390	6,390
<i>Ніпель – сталь, муфта – алюмінієвий сплав</i>					
4,233	-0,060	5,957	3,203	6,848	5,957
5,080	-0,120	5,289	4,427	4,729	5,289
6,390	-0,180	6,374	3,462	4,136	6,374
<i>Ніпель – сталь, муфта – титановий сплав</i>					
4,233	-0,060	6,083	3,271	6,992	6,083
5,080	-0,120	5,400	4,520	4,829	5,400
6,390	-0,180	6,508	3,535	4,223	6,508
Нарізь із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною нарізі дослідження 2)					
<i>Ніпель – сталь, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	8,034	4,248	9,348	6,867
5,080	-0,120	6,106	5,257	6,495	7,225
6,390	-0,180	9,135	4,351	5,747	7,446
<i>Ніпель – твердий сплав, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	6,902	3,875	8,475	6,594
5,080	-0,120	5,997	4,832	5,812	6,214
6,390	-0,180	7,895	3,662	4,996	6,739
<i>Ніпель – сталь, муфта – алюмінієвий сплав</i>					
4,233	-0,060	6,557	3,681	8,051	6,264
5,080	-0,120	5,697	4,590	5,521	5,903
6,390	-0,180	7,500	3,479	4,746	6,402
<i>Ніпель – сталь, муфта – титановий сплав</i>					
4,233	-0,060	6,695	3,759	8,221	6,396
5,080	-0,120	5,817	4,687	5,638	6,028
6,390	-0,180	7,658	3,552	4,846	6,537
Нарізь із профілем із випадковими відхиленнями кута нахилу профілю за довжиною нарізі дослідження 3)					
<i>Ніпель – сталь, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	8,28	4,375	9,628	7,07
5,080	-0,120	6,29	5,415	6,69	7,44
6,390	-0,180	9,41	4,482	5,919	7,67
<i>Ніпель – твердий сплав, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	7,11	3,991	8,729	6,79

Продовження таблиці 5.4.

Крок нарізі Р, мм	Відхилення $\frac{\Delta h}{2}$, мм	Максимальне напруження, $\times 10^{-8}$ Па	Середнє напруження, $\times 10^{-8}$ Па	Максимальна деформація, $\times 10^{-5}$ м	Середня деформація, $\times 10^{-5}$ м
5,080	-0,120	6,18	4,977	5,986	6,4
6,390	-0,180	8,13	3,772	5,146	6,94
<i>Ніпель – сталь, муфта – алюмінієвий сплав</i>					
4,233	-0,060	7,861	4,157	9,147	6,719
5,080	-0,120	5,975	5,144	6,355	7,070
6,390	-0,180	8,939	4,257	5,623	7,286
<i>Ніпель – сталь, муфта – титановий сплав</i>					
4,233	-0,060	8,027	4,244	9,340	6,861
5,080	-0,120	6,101	5,252	6,489	7,218
6,390	-0,180	9,127	4,347	5,742	7,439
Нарізь із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною нарізі та та кута нахилу (дослідження 4)					
<i>Ніпель – сталь, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	8,826	4,979	9,088	8,295
5,080	-0,120	8,567	8,08	6,985	7,515
6,390	-0,180	7,513	6,17	5,495	9,366
<i>Ніпель – твердий сплав, муфта – сталь</i>					
4,233	-0,060	8,015	4,026	9,027	7,483
5,080	-0,120	6,91	6,469	5,7	6,932
6,390	-0,180	7,196	5,019	4,72	8,284
<i>Ніпель – сталь, муфта – алюмінієвий сплав</i>					
4,233	-0,060	8,385	4,730	8,634	7,880
5,080	-0,120	8,139	7,676	6,636	7,139
6,390	-0,180	7,137	5,862	5,220	8,898
<i>Ніпель – сталь, муфта – титановий сплав</i>					
4,233	-0,060	8,561	4,830	8,815	8,046
5,080	-0,120	8,310	7,838	6,775	7,290
6,390	-0,180	7,288	5,985	5,330	9,085

Результати досліджень показали, що для всіх випадків нарізей, де ніпель був виготовлений з твердого сплаву, а муфта – сталевая, спостерігалися більші значення напружень та деформацій, не залежно від кроку нарізі. Відповідно, найменші напруження і деформації спостерігалися для з'єднання «Ніпель – сталь, муфта – алюмінієвий сплав». Так, максимальні напруження були в 1,5 рази вищі для випадку «сталь – сталь», ніж для випадку «твердий сплав–сталь». Середні напруження були, в середньому в 1,35 рази вищі для випадку «сталь – сталь», ніж для випадку «твердий сплав – сталь» для однакових геометричних значень нарізей. Максимальні деформації були, в

середньому, в 1,25 рази вищі, а середні – в 1,2 рази для для випадку «сталь–сталь», ніж для випадку «твердий сплав – сталь».

Зростання кроку нарізі викликало зменшення напружень та деформацій для всіх випадків. Так, максимальні напруження спостерігалися для кроку нарізі 4,233 мм і були, в середньому, в 1,15 разів менші, ніж для кроку 5,080 мм і в 1,27 менші, ніж для кроку 6,390 мм. Середні напруження спостерігалися для кроку нарізі 4,233 мм і були, в середньому, в 1,17 разів менші, ніж для кроку 5,080 мм і в 1,26 менші, ніж для кроку 6,390 мм. Аналогічно, максимальні та середні деформації були найменшими для найбільшого кроку, а найбільшими – для найменшого кроку для всіх матеріалів. Ця тенденція була характерною для всіх типів матеріалів. Точність розмірів суттєво впливала на розподіл напружень і деформацій. Так, найменші напруження і деформації спостерігалися для ідеального профілю.

В табл. 5.5 представлено результати порівняння напружень (максимальних і середніх) та деформацій (максимальних та середніх) для досліджень 2, 3 і 4 із результатами напружень і деформацій для випадку ідеального профілю. Бачимо, що максимальні напруження були, в середньому, в 1,1 (випадок «твердий сплав – сталь») і в 1,13 (випадок «сталь – сталь») разів вищими для нарізі із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною порівняно із ідеальним профілем. Наявність сумісної дії похибок викликала збільшення максимальних напружень. Так, максимальні напруження були, в середньому, в 1,22 (випадок «твердий сплав – сталь») і в 1,23 (випадок «сталь – сталь») разів вищими для нарізі із профілем із комбінованою дією похибок порівняно із ідеальним профілем. Для випадку «сталь – алюмінієвий сплав» максимальні напруження були, в середньому, в 1,16, а для випадку «сталь – титановий сплав» в 1,14 разів вищими за для нарізі із профілем профілем із сумісною дією похибок порівняно порівняно із ідеальним профілем.

Таблиця 5.5 – Порівняння величин напружень (максимальних і середніх) та деформацій (максимальних та середніх) для конічної нарізі із похибками виготовлення порівняно із ідеальним профілем

Крок нарізі Р, мм	Збільшення параметру для нарізі із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною порівняно із ідеальним профілем				Збільшення параметру для нарізі із сумісною дією похибок порівняно із ідеальним профілем			
	Максимальне напруження	Середнє напруження	Максимальна деформація	Середня деформація	Максимальне напруження	Середнє напруження	Максимальна деформація	Середня деформація
<i>Ніпель – твердий сплав, муфта – сталь</i>								
4,233	1,101	1,149	1,176	1,052	1,357	1,194	1,252	1,193
5,080	1,077	1,037	1,168	1,116	1,241	1,388	1,145	1,245
6,390	1,177	1,005	1,147	1,004	1,073	1,377	1,084	1,235
<i>Ніпель – сталь, муфта – сталь</i>								
4,233	1,112	1,161	1,188	1,062	1,371	1,206	1,265	1,205
5,080	1,088	1,047	1,179	1,127	1,254	1,402	1,156	1,258
6,390	1,189	1,015	1,159	1,015	1,083	1,391	1,095	1,247
<i>Ніпель – сталь, муфта – алюмінієвий сплав</i>								
4,233	1,159	1,209	1,238	1,107	1,428	1,257	1,318	1,256
5,080	1,134	1,092	1,229	1,175	1,306	1,461	1,205	1,311
6,390	1,239	1,058	1,207	1,057	1,129	1,449	1,141	1,300
<i>Ніпель – сталь, муфта – титановий сплав</i>								
4,233	1,135	1,185	1,212	1,085	1,399	1,231	1,291	1,230
5,080	1,110	1,069	1,204	1,151	1,279	1,431	1,180	1,284
6,390	1,213	1,036	1,182	1,035	1,106	1,420	1,118	1,273

Середні напруження були, в середньому, в 1,06 (випадок «твердий сплав – сталь») і в 1,07 (випадок «сталь – сталь») разів вищими для нарізі із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною порівняно із ідеальним профілем. Наявність обидвох видів похибок викликала збільшення середніх напружень. Так, середні напруження були, в середньому, в 1,32 (випадок «твердий сплав – сталь») і 1,33 (випадок «сталь–сталь») разів вищими для нарізі із профілем із сумісною дією похибок порівняно порівняно із ідеальним профілем. Для випадку «сталь – алюмінієвий сплав» середні напруження були, в середньому, в 1,18, а для випадку «сталь – титановий

сплав» в 1,2 рази вищими за для нарізі із сумісною дією похибок порівняно із ідеальним профілем.

Максимальні деформації були, в середньому, в 1,16 (випадок «твердий сплав – сталь») і в 1,17 (випадок «сталь – сталь») разів вищими для нарізі із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною порівняно із ідеальним профілем. Наявність сумісної дії похибок викликала збільшення максимальних деформацій. Так, максимальні деформації були, в середньому, в 1,16 (випадок «твердий сплав – сталь») і в 1,17 (випадок «сталь – сталь») разів вищими для нарізі із сумісною дією похибок порівняно із ідеальним профілем.

Середній рівень деформацій був, у середньому, в 1,175 (випадок «твердий сплав–сталь») і в 1,172 (випадок «сталь–сталь») разів вищими для нарізі із профілем із випадковими відхиленнями висоти профілю за довжиною порівняно із ідеальним профілем. Наявність сумісної дії похибок викликала збільшення максимальних деформацій. Так, середні деформації були, в середньому, в 1,22 (випадок «твердий сплав – сталь») і в 1,23 (випадок «сталь – сталь») разів вищими для таких нарізей порівняно із ідеальним профілем.

5.3 Експериментальне визначення деформацій деталей нарізевого конічного з'єднання

Експериментальне визначення деформацій у нарізеому з'єднанні виконували за допомогою пристрою для вимірювання для визначення деформацій елементів конічного нарізевого з'єднання (розділ 3).

Досліджували такі комбінації матеріалів: ніпель – сталь 20ХН, муфта – сталь 20ХН. Досліджувалися замки із такими величинами кроку $p=4,233$ мм, $p=5,080$ мм, $p=6,390$ мм. Розглядалися випадки нарізей бурового замка 3-203 із такими параметрами шорсткості: $Ra=0,63$ мкм, $Ra=1,6$ мкм, $Ra=3,2$ мкм. Інші параметри елементів конічного з'єднання відповідали ГОСТ 28487 – 90.

Всього було встановлено 8 сенсорних груп: 1–4 – зовнішні, 5–8 – внутрішні. Групи були встановлено відповідно до таких витків нарізі: сенсорні

групи 1 та 5 – витки 1-2; сенсорні групи 2 і 6 – витки 3-4; сенсорні групи 3 і 7 – витки 5-6; сенсорні групи 4 і 8 – витки 7-8. Прикладався крутий момент у 3кНм . Результати вимірювань у порівнянні із величинами деформацій, отриманих скінчено-елементно, представлено у таблиці додаток В, а графічна ілюстрація – на рис. 5.11.

За результатами експериментальних досліджень бачимо, що характер розподілу деформацій між витками нарізі відповідає даним аналітичних та скінчено-елементних розрахунків. Наявність шорсткості викликає збільшення середніх деформацій, проте збільшення кроку нарізі асоціюється із зменшенням середніх деформацій. Також наявність похибок виготовлення нарізі викликає зменшення навантаження на другий виток, таким чином підвищується неоднорідність навантаження. Максимальні деформації були, в середньому, в 1,2 раз вищими для нарізі із шорсткістю $R_a=3,2\text{ мкм}$, ніж для нарізі із шорсткістю $R_a=0,63\text{ мкм}$. Наявність шорсткості поверхні викликала збільшення деформацій. Відхилення від аналітичних та скінчено-елементних даних становить, в середньому, біля 10%.

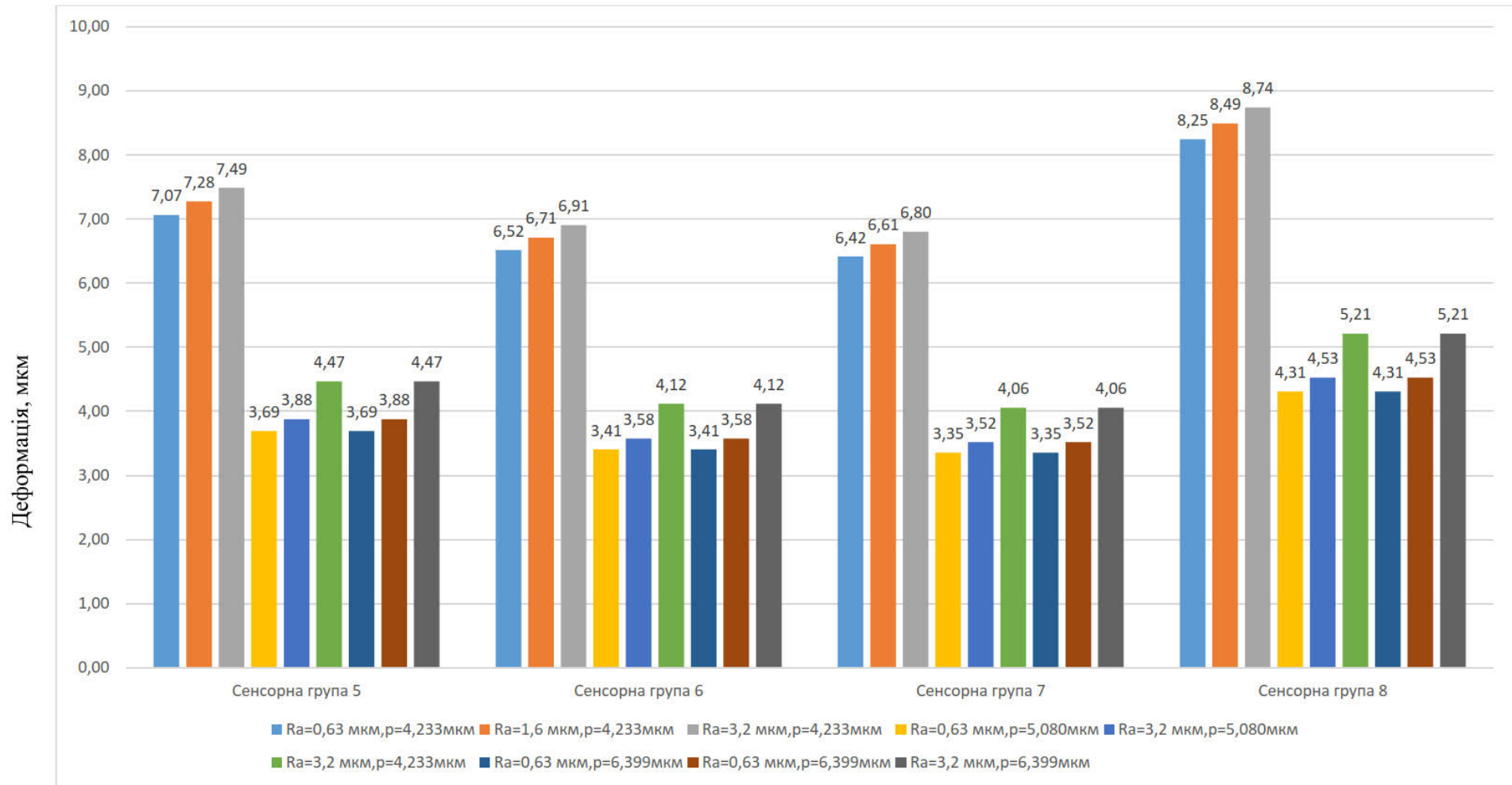


Рисунок 5.11 – Експериментальні значення деформацій у нарізевому з'єднанні для різних значень шорсткості та кроку

5.4 Визначення моменту згвинчування під час складання корпусу долота із ніпелем та долота із буровою колоною

Розглядали складання за наріззю в двох випадках:

- Складання корпусу долота із ніпелем по нарізі;
- Складання за наріззю долота із буровою колоною.

Основні ознаки, яка дали змогу об'єднати ці два типи нарізевих з'єднань, і розглядати їх із спільних позицій, полягає у тому, що для згвинчування обох з'єднань прикладаються моменти згвинчування, а у подальшому нарізеві з'єднання зазнають впливу теплового навантаження. Так, при згвинчуванні корпусу долота із ніпелем в подальшому відбувається зварювання по діаметру з'єднання, а з'єднання долота і бурової колони у подальшому працює у привибійній зоні, де спостерігаються значні температури.

В нашій роботі пропонується визначити момент згвинчування, який би у подальшому після виконання зварного шва забезпечував би необхідну величину співвідношення. Сьогодні величина моменту згвинчування такого з'єднання не регламентована [74], вона становить від 10 до 40 кНм і вибирається вручну під час здійснення складання виходячи із умови:

$$\rho_{\text{співвідношення_корпус_ніпель}} = f(M_{\text{згвинчування}})$$

де $\rho_{\text{співвідношення_корпус_ніпель}}$ – співвідношення корпусу долота і ніпеля, мм;

$M_{\text{згвинчування}}$ – момент згвинчування, кН.

Емпірична залежність величини співвідношення між корпусом долота і ніпелем має вигляд [91]:

$$\rho_{\text{співвідношення_корпус_ніпель}} = 0,0006M_{\text{згвинчування}}^2 - 0,0436M_{\text{згвинчування}} + 1,29 \quad (5.9)$$

Для необхідної величини прикладеної сили згвинчування відома формула [106], яка визначає величину співвідношення у виді:

$$\rho_{\text{співвідношення_корпус_ніпель}} = \frac{e^{2\theta}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\left[\frac{-C_p \cdot C_T}{C_p + C_T} + \sqrt{\left(\frac{Q}{R} \right)^2 + \left(\frac{Q \sin 30^\circ}{2r} \right)^2} \right] \cdot V}{J} \right)^2}} \quad (5.10)$$

де θ – полярний кут повороту рухомої деталі, град; C_p, C_t – жорсткість відповідного нарізевго і торцьового з'єднання, Н/мм; Q – колова сила згвинчування, Н; J – момент інерції деталі, кг·мм²; R – радіус торцьової поверхні, мм; r – крок нарізи, мм; V – об'єм зазору в торцьовому спряженні, мм³.

Визначимо необхідну величину сили згвинчування із врахуванням подальших теплових деформацій під час зварювання [91]:

$$Q = \frac{\left[\left(1 - \frac{e^{4\theta}}{\rho_{\text{співвісність_корпус_ніпель}}^2} \right) \cdot \frac{J}{V} + \frac{C_p \cdot C_t}{C_p + C_t} \right]}{\left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R^2 \cdot \alpha_i \cdot \Delta t} \right)^2 + \frac{\sin^2 \alpha_0}{2(r^2 \cdot \alpha_j \cdot \Delta t)^2}}} \right)} \quad (5.11)$$

Де $\alpha, \Delta t$ – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу деталі, зміна її температури, Індокси i та j відповідають охоплюваним (стисненим) та охоплюючим (розтягнутим) деталям відповідно.

5.4.1 Складання долота із буровою колоною

Сьогодні для складання нарізевго з'єднання «долото – бурова колона» передбачені моменти згвинчування в широкому діапазоні в залежності від геометричних розмірів нарізи [106], [107], [108] від 8,1 кНм до 54,2 кНм. Оптимальний момент згвинчування дозволяє рівномірно розподілити навантаження між ніпелем і муфтою, знизити розмахи напружень в небезпечному перерізі при циклічних навантаженнях. У рекомендаціях з розрахунку нарізевих з'єднань бурильних колон відсутні методики визначення оптимального моменту згвинчування. Рекомендований момент згвинчування розраховується за гранично допустимим напруженням в небезпечних перетинах деталей [109], [110], [111].

При цьому рекомендації даються для згвинчування долота і бурової колони за умов навколишнього середовища (нормальний тиск і температура в діапазоні від –20 до +40 °С. Як зазначають науковці [112], для нарізей нафтогазового сортаменту це є особливо актуальним, оскільки такі нарізи експлуатуватимуться за умов

високих температурах, і неврахування температури під час складання та при експлуатації може призвести до зламу ніпелів труб (рис. 5.12).



Рисунок 5.12 – Злам ніпелю бурильної труби, яка складалася за умов низьких температур (фото авторки)

Відповідно, може відбутися зміна навантаження між витками нарізевого з'єднання, що може викликати його руйнування [113]. Нарізеве з'єднання працює за умов ударного та вібраційного навантаження [3], і за тривалої експлуатації таких з'єднань відбувається часткове відкручування, зазор в з'єднанні збільшується і з'єднання послаблюється, тобто умова самогальмування під час динамічного навантаження не дотримується. Врахування нерівномірності розподілу осьового навантаження за витками нарізі [9] дає змогу зробити висновок про те, що неможливо одночасно знизити коефіцієнти тертя у всіх витках нарізі [114], оскільки різнонавантажені витки мають різний ступені деформації, тому зниження коефіцієнта тертя в одних витках призводить до зростання в інших.

$$\text{З рівняння } T_{згв} = 0,5 \cdot F \cdot \sum_{i=1}^n (D_{спi} \cdot f + d_{2,i} \cdot \text{tg}(\psi + \varphi_{p,kp})) \quad (5.12)$$

де $T_{згв}$ – момент згвинчування, кНм;

F – осьова сила, що діє на долото, кН;

$d_{2,i}$ – середній діаметр кожного витку нарізі, мм;

$D_{cp,i}$ – приведений діаметр сил тертя на опорному торці попереднього витка, мм; де приведений діаметр сил тертя на опорному торці попереднього витку визначимо за формулою:

$$D_{cp,i} = \frac{D_{1,i} + d_{i+1}}{2} \quad (5.13)$$

$D_{1,i}$ – зовнішній діаметр витка нарізі, мм;

d_{i+1} – внутрішній діаметр попереднього витка нарізі, мм;

f – коефіцієнт тертя матеріалів у конічному нарізевому з'єднанні;

ψ – кут підйому конічної нарізі;

$$\varphi_{pkr} – \text{приведений кут тертя в нарізі, де } \varphi_{pkr} \approx 1,15 \cdot \arctg f_{PP} \quad (5.14),$$

де f_{PP} – коефіцієнт тертя для аналогічного прямокутного з'єднання.

Бачимо, що саме зміна навантаження може викликати збільшення саморозгвинчуваного моменту, тобто такий стан з'єднання, коли воно не буде у затягнутому стані.

Формула (5.12) розрахована за нормальних умов. Враховуючи зміну температури під час складання, отримаємо зміну сили згвинчування у з'єднанні [113], а саме:

$$\Delta T_{33a}^{темп, тиск} = \frac{\alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i - \alpha_j \cdot \Delta t_j \cdot l_{ij}}{\lambda_i + \lambda_{ij}} \quad (5.15)$$

Де $\Delta T_{33a}^{темп, тиск}$ – зміна зусилля, необхідного для згвинчування через зміну температури і тиску;

$\alpha, \Delta t, l$ – відповідно коефіцієнт лінійного розширення матеріалу деталі, зміна її температури, зміна його температури і розрахункова довжина з'єднання.

Індекси i та j відповідають охоплюваним (стисненим) та охоплюючим (розтягнутим) деталям відповідно.

Враховуючи наявність мікронерівностей, із емпіричної формули податливості за [113]:

$$\lambda_M = 1,06 \cdot 10^{-(12+0,09/Rz)} Rz^{0,62} (0,764 - 2,64/Rz) (\Delta T_{33a}^{шорст} \cdot 10^6)^{-(0,63+0,09/Rz)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n A_i^{(0,63-1+0,09/Rz)}}{n} \quad (5.16)$$

де Rz – висота мікронерівностей поверхні деталей, мкм;

A – площа перерізу, м²;

$\Delta T_{33a}^{шорст}$ – додаткове зусилля, необхідне для згинчування з'єднання «долото – труба», спричинене наявністю шорсткості деталей;

λ_M – податливість мікронерівностей (величина обернена до жорсткості).

Визначимо додаткове зусилля згинчування для шорстких деталей [113]:

$$\ln(\Delta T_{33a}^{ш} \cdot 10^6) = \frac{\ln \left[\frac{\lambda_M}{1,06 \cdot 10^{-(12+0,09/Rz)} Rz^{0,62} (0,764 - 2,64/Rz) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n A_i^{(0,63-1+0,09/Rz)}}{n} \right)} \right]}{-(0,63 + 0,09/Rz)} \quad (5.17)$$

Таблиця 5.7 – Розрахунок моментів згвинчування для конічних замкових нарізей, виготовлених із різних матеріалів та з'єднаних за температури 200 °С

Момент згвинчування для нормальних умов		Зміна моменту згвинчування, кНм	
Матеріали деталей з'єднання	Момент згвинчування, кНм	для ідеально гладких деталей	для шорстких деталей
Нарізь 3-76			
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>	8,81	0	-0,04
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>	8,43	-0,23	-0,05
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>	8,94	-0,11	-0,03
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>	8,95	-0,31	-0,02
Нарізь 3 –88			
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>	10,8	0	-0,3
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>	10,33	-0,187	-0,04
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>	10,96	-0,089	-0,035
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>	10,73	-0,258	-0,028
Нарізь 3-117			
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>	18,5	0	-0,05
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>	17,7	-0,109	-0,04
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>	18,77	-0,052	-0,03
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>	18,37	-0,151	-0,035
Нарізь 3- 152			
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>	40,2	0	-0,07
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>	38,47	-0,050	-0,08
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>	40,79	-0,0241	-0,06
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>	39,93	-0,069	-0,05
Нарізь 3-177			
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>	48,23	0	-0,04
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>	51,14	-0,305	-0,04
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>	50,06	-0,135	-0,03
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>	48,23	-0,374	-0,04
Нарізь 3-203			
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>	63,8	0	0
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>	61,05	-0,192	-0,02
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>	64,74	-0,085	-0,01
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>	63,37	-0,235	-0,04

5.4.2 Скінчене-елементне дослідження впливу фактичних розмірів нарізі на момент згвинчування

Для моделювання величини натягів у нарізевому з'єднанні корпусу долота та ніпеля, а також долота і бурової колони, які виникають для різних матеріалів з'єднання за нормальної та високої температури, була використана та сама скінчено-елементна модель, що і в п. 5.2. В середовищі AnsysExplicit (академічна ліцензія) здійснювали моделювання складання шляхом прикладання розрахованого моменту згвинчування (тобто провертання долота в трубі) та визначали напруження у з'єднанні за нормальної температури, температури у 200⁰С та для деталей з'єднання, що виготовлені без похибок та із ними. Розрахунок виконувався для різних груп матеріалів. Для дослідження була вибрана нарізь 3–152 за ГОСТ 28487–90. Напружений стан оцінювали за Мізесом. Результати скінчено-елементних дослідження представлено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Результати скінчено-елементних дослідження величин моменту згвинчування та величин відхилень співвісності: середні величини відхилення від співвісності в залежності від прикладеного моменту згвинчування після прикладання температури

М _{кр} , кНм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>									
Випадок ідеально гладких поверхонь без похибок виготовлення	0,74	0,71	0,68	0,62	0,57	0,51	0,45	0,41	0,45
Випадок наявності похибок за кроком	0,84	0,81	0,75	0,74	0,58	0,59	0,51	0,48	0,47
Випадок наявності похибок за кроком та за кутом профілю	0,8	0,85	0,9	0,7	0,7	0,65	0,46	0,5	0,51
Випадок сумісної дії похибок	1	0,79	0,74	0,82	0,71	0,69	0,56	0,55	0,62

Продовження таблиці 5.8

$M_{кр}$, кНм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
<i>Долото – сталь, труба – сталь</i>									
Випадок ідеально гладких поверхонь без похибок виготовлення	0,74	0,71	0,68	0,62	0,57	0,51	0,45	0,41	0,45
Випадок наявності похибок за кроком	0,84	0,81	0,75	0,74	0,58	0,59	0,51	0,48	0,47
Випадок наявності похибок за кроком та за кутом профілю	0,8	0,85	0,9	0,7	0,7	0,65	0,46	0,5	0,51
Випадок сумісної дії похибок	1	0,79	0,74	0,82	0,71	0,69	0,56	0,55	0,62
<i>Долото – твердий сплав, труба – сталь</i>									
Випадок ідеально гладких поверхонь без похибок виготовлення	1,22	1,10	0,90	0,95	0,86	0,83	0,65	0,67	0,74
Випадок наявності похибок за кроком	1,16	0,87	0,85	0,90	0,82	0,79	0,62	0,64	0,70
Випадок наявності похибок за кроком та за кутом профілю	1,10	0,83	0,81	0,86	0,78	0,75	0,59	0,61	0,67
Випадок сумісної дії похибок	1,05	0,79	0,77	0,82	0,75	0,72	0,56	0,58	0,64
<i>Долото – сталь, труба – алюмінієвий сплав</i>									
Випадок ідеально гладких поверхонь без похибок виготовлення	1,22	1,10	0,87	1,02	0,89	0,84	0,68	0,70	0,79
Випадок наявності похибок за кроком	1,16	0,92	0,83	0,97	0,85	0,80	0,64	0,66	0,75
Випадок наявності похибок за кроком та за кутом профілю	1,10	0,88	0,79	0,93	0,81	0,76	0,61	0,63	0,72
Випадок сумісної дії похибок	1,05	0,84	0,75	0,88	0,77	0,73	0,58	0,60	0,68
<i>Долото – сталь, труба – титановий сплав</i>									
Випадок ідеально гладких поверхонь без похибок виготовлення	1,22	1,10	0,94	0,97	0,89	0,80	0,67	0,67	0,78
Випадок наявності похибок за кроком	1,16	0,88	0,89	0,92	0,85	0,77	0,64	0,64	0,74
Випадок наявності похибок за кроком та за кутом профілю	1,10	0,84	0,85	0,88	0,81	0,73	0,61	0,61	0,71
Випадок сумісної дії похибок	1,05	0,80	0,81	0,84	0,77	0,69	0,58	0,58	0,67

Для отриманих результаті були побудовані регресійні залежності (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Регресійні залежності величини неспіввісності в кіничному нарізевому з'єднанні (долото – сталь, труба – сталь) від прикладеного моменту згвинчування

Матеріал	Регресійна залежність
Випадок ідеально гладких поверхонь без похибок виготовлення	$y = -0,0088x + 0,7903, R^2 = 0,952$
Випадок наявності похибок за кроком	$y = -0,0103x + 0,8994, R^2 = 0,9506$
Випадок наявності похибок за кроком та за кутом профілю	$y = -0,0105x + 0,9361, R^2 = 0,8102$
Випадок наявності похибок виготовлення (за кроком та кутом) та шорсткості поверхонь	$y = -0,0091x + 0,9475, R^2 = 0,7802$

5.5 Оптимізація режимів різання під час шліфування нарізєвої поверхні

Одним з найбільш розповсюджених процесів одержання точної нарізи на загартованих деталях є шліфування. Процес шліфування нарізи здійснюється на спеціальних верстатах. При шліфуванні застосовують абразивні та алмазні круги. Обробка ведеться також при знятті шару малої товщини. Для покращення умов різання застосовують мастильно-охолоджувальні рідини. При високій твердості матеріалу використовують алмазні круги на бакелітовій зв'язці для отримання високої чистоти поверхні ($R_a < 0,32$ мкм), тому що круги на металевій зв'язці мають низьку продуктивність та забезпечують отримання більш високої шорсткості поверхні [115, 116, 117, 118].

Традиційно для побудови емпіричної залежності величини шорсткості від режимів різання використовується залежність у виді $R_a = f(C_a, t, V_d, V_k, s)$, де R_a – величина шорсткості обробленої поверхні. Шорсткість залежить від C_a – фізико-механічних властивостей матеріалу деталі, характеристик круга і виду мастильно-охолоджуючої рідини (стала постійна величина для конкретних умов обробки), t – глибини різання (товщина шару металу, який знімають за подвійний хід стола

верстата), V_d – швидкості обертання деталі, V_k – швидкості обертання круга, s – величини поздовжньої подачі.

Для виконання операції шліфування параметри «швидкість обертання деталі» та «подача стола» є взаємопов'язаними, а саме подача на один крок здійснюється за один оберт деталі, тому не можуть бути незалежними змінними у регресійній моделі. Тому для реалізації поставленої задачі були вибрані такі параметри:

- фізико-механічні властивості матеріалу деталі, характеристики круга і виду мастильно-охолоджуючої рідини (стала постійна величина для конкретних умов обробки);
- глибина шліфування (товщина шару металу, який знімають);
- швидкість обертання деталі;
- швидкість обертання круга;
- діаметр оброблюваної нарізі.

Для призначення режимів різання із паспорту універсального нарізешліфувального верстату 5822М вибирали діапазон рекомендованих значень швидкостей обертання круга і комбінуючи число обертів шпинделя з діаметром круга, щоб забезпечити попадання отриманої швидкості обертання круга в цей діапазон.

Для шліфування нарізі застосовуються шліфувальні круги з білого електрокорунду і монокорунду, рідше – з зеленого карбїду кремнію. Їх виготовляють на керамічній зв'язці зернистістю від 12 до 20, на бакелітовій зв'язці зернистістю від 16 до 8 і на зв'язці СКН (В2) зернистістю 4. Для шліфування нарізі з кроком 0,2 – 0,7 мм застосовують круги на зв'язці СКН зернистістю 4. В даний час для нарізешліфування широко застосовуються круги з ельбору, як однопрофільного, так і багатпрофільного. Однопрофільне нарізешліфування кругами з ельбору здійснюється з невеликою швидкістю обертання заготовки (0,16 – 0,30 м/хв) і великою подачі на глибину (0,4 – 0,5 мм/прохід). Таке шліфування забезпечує високу точність нарізі за профілем і кроком за повної відсутності структурних перетворень поверхневого шару сталі.

Для нашого дослідження нарізешліфування проводили шліфувальним кругом Т20 Д30 за ГОСТ 2424-83 за швидкості обертання $V_k = 35$ м/с, як мастильно-охолоджувальну рідину використовували суміш мінеральних масел: 70 % індустріального масла 12 і 30 % сульфозрезола.

Результати проведених дослідів представлені в табл. 5.10.

Таблиця 5.10 – Результати дослідів з визначення шорсткості поверхні нарізі після нарізешліфування

Номер дослідів	Значення кодованих факторів				Вихідний параметр, Y				Середнє значення вихідного параметра		Дисперсія в досліді s_v^2
					повторюваність дослідів						
	x_0	x_1	x_2	x_3	Y_{u1}	$\ln Y_{u1}$	Y_{u2}	$\ln Y_{u2}$	\bar{Y}_v	$\ln \bar{Y}_v$	
1	+1	-1	-1	-1	1,4	0,336	1,6	0,47	1,5	0,405	0,009
2	+1	+1	-1	-1	1,7	0,531	1,5	0,405	1,6	0,47	0,0079
3	+1	-1	+1	-1	1,2	0,182	1,4	0,336	1,3	0,262	0,0119
4	+1	+1	+1	-1	1,3	0,262	1,5	0,405	1,4	0,336	0,0102
5	+1	-1	-1	+1	3	1,099	3,2	1,163	3,1	1,131	0,002
6	+1	+1	-1	+1	4,1	1,411	3,5	1,253	3,8	1,335	0,0125
7	+1	-1	+1	+1	2,4	0,875	2,8	1,03	2,6	0,956	0,012
8	+1	+1	+1	+1	3,1	1,131	3,1	1,131	3,1	1,131	0

Отримані результати експерименту піддали статистичному аналізу. Для цього визначають:

– порядкові дисперсії

$$s_u^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{v=1}^N (Y_{uv} - \bar{Y})^2 ; \quad (5.23)$$

– дисперсії відтворення дослідів

$$s^2(Y) = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N s_v^2 . \quad (5.24)$$

Після цього перевіряють однорідність дисперсій за критерієм Кохрена (відношення максимальної порядкової дисперсії до суми всіх дисперсій експерименту)

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{v=1}^N s_v^2} . \quad (5.25)$$

Із довідкових таблиць знайшли значення критерію Кохрена $G_{\text{табл}}$ для ступенів вільності $f_{u\text{max}} = r - 1 = 2 - 1 = 1$; $f_v = N = 8$ та рівня значущості $\alpha = 0,05$ і порівнюють з розрахунковим G . Коли $G_{\text{рабл}} > G$ гіпотеза про однорідність дисперсій регресійної моделі приймається.

В нашому випадку $G_{\text{табл}} = 0,6798 > 0,1908$, отже умова відтворюваності дослідів задовольняється.

Повнофакторний експеримент відноситься до ортогональних планів і він дозволяє значно спростити розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії:

$$b_0 = \frac{\sum_{v=1}^N \bar{Y}_v}{N}, \quad (5.26)$$

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^N x_{iv} \cdot \bar{Y}_v}{N}, \quad (5.27)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{v=1}^N x_{iv} \cdot x_{jv} \cdot \bar{Y}_v}{N}, \quad i \neq j \quad (5.28)$$

$$b_{ijw} = \frac{\sum_{v=1}^N x_{iv} \cdot x_{jv} \cdot x_{wv} \cdot \bar{Y}_v}{N}, \quad i \neq j \neq w \quad (5.29)$$

де $i = 0, 1, 2, 3$ – номер фактора.

Коефіцієнти рівняння регресії, визначені за формулами (5.26) – (5.29) зведені в табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Коефіцієнти рівняння регресії

Коефіцієнт	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
Значення коефіцієнта	0,7533	0,3850	-0,0820	0,0648	-0,0128	0,0300	-0,0025	-0,0048

Отриману модель піддають статистичному аналізу.

Значущість коефіцієнтів перевіряли за t -критерієм Стюдента. Для цього розраховали дисперсію коефіцієнтів регресії

$$S^2(b_i) = \frac{1}{Nr} S^2(Y) \quad (5.30)$$

Із довідкових таблиць знайшли критичне значення критерія Стюдента $t_{кр}$ для степенів вільності $f_E = N(r-1) = 8(2-1) = 8$ та рівня значущості $\alpha = 0,05$ $t_{\alpha} = 2,306$ і по ньому побудували половину довжини довірчого інтервалу

$$\Delta b_i = t_{\alpha} S(b_i), \quad (5.31)$$

де $S(b_i)$ – похибки коефіцієнта.

Дисперсію коефіцієнтів регресії, розраховували за формулою (5.30), і вона становить 0,000512. Тоді згідно (5.31) $\Delta b_i = 2,306 \cdot 0,02262 = 0,05216$. Коефіцієнт рівняння регресії вважають значущим, якщо $|b_i| \geq \Delta b_i$ (тут під b_i розуміють $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijw}$).

Статистично незначимі коефіцієнти відкидають і уточнюють рівняння регресії:

$$Y = 0,75325 + 0,385 \cdot x_1 - 0,082 \cdot x_2 + 0,06475 \cdot x_3 \quad (5.32)$$

Адекватність моделі перевіряли за F -критерієм Фішера

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2(Y)} \quad (5.33)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності моделі.

Величину дисперсій адекватності моделі розраховували за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2}{N - \lambda}, \quad (5.34)$$

де λ – число значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії;

\hat{Y}_v – розрахункові значення вихідного параметра, отримані після підстановки в уточнене рівняння регресії (16) рівнів факторів (-1 та +1) згідно матриці планування повнофакторного експерименту.

Для перевірки адекватності отриманої математичної моделі (5.34) розраховуємо значення шорсткості, які заносимо в табл. 5.12.

Таблиця 5.12 – Розрахункові значення параметра шорсткості нарізевої поверхні

Номер досліджу		1	2	3	4	5	6	7	8
Розрахункове значення параметра шорсткості	$\ln R_a$	0,3855	0,5150	0,2215	0,3510	1,1555	1,2850	0,9915	1,1210
	R_a , МКМ	1,4703	1,6736	1,2479	1,4205	3,1756	3,6147	2,6953	3,0679

Дисперсія адекватності, обчислена за формулою (5.34) становить $S_{ad}^2 = 0,00873$. Розрахункове значення F порівнюють із $F_{ст}$, вибраним із довідкової таблиці, відповідно для ступенів свободи $f_{ad} = N - \lambda = 8 - 4 = 4$ і $f_A = N(r - 1) = 8(2 - 1) = 8$ та рівня значущості $\alpha = 0,05$. При виконанні умови $F < F_{ст}$ модель вважають адекватною.

Математичний опис моделі адекватний, так як $F = 0,53 < 3,84$.

Крім цього розраховували коефіцієнт множинної кореляції

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2}{\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \bar{Y})^2}}, \quad (5.35)$$

де \bar{Y} – середнє значення \bar{Y}_v .

Величина R лежить в межах $0 \leq R \leq 1$. Якщо: $R = 0$, то коефіцієнти регресії не мають внеску в залежність, що вивчають; $R = 1$ то рівняння регресії повною мірою описує результати експерименту.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнта множинної кореляції зведені в табл. 5.16.

$$\text{Тоді } R = \sqrt{1 - \frac{0,00873}{1,28186}} = 0,99659$$

Таким чином, рівняння регресії (5.34) практично повністю описує результати експерименту.

Провівши перекодування змінних у рівнянні регресії (5.30) отримаємо:

$$\ln Ra = 2,39485 + 0,37029 \ln s_t - 0,208 \ln v + 0,09342 \ln d \quad (5.36)$$

Потенціюючи рівняння регресії (5.30) отримаємо:

$$Ra = 10,967 \frac{s_t^{0,37} \cdot d^{0,093}}{v^{0,208}} \quad (5.37)$$

Згідно одержаної степеневій залежності (5.36) побудували поверхні відгуку (рис. 5.13).

Таблиця 5.13 – Числові значення для розрахунку коефіцієнта множинної кореляції

Номер досліджу	Середнє значення вихідного параметра \bar{Y}_v	Розрахункове значення вихідного параметра \hat{Y}_v	$(\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2$	$(\bar{Y}_v - \bar{Y})^2$
1	0,4050	0,3855	0,00038	0,12128
2	0,4700	0,5150	0,00203	0,08023
3	0,2620	0,2215	0,00164	0,24133
4	0,3360	0,3510	0,00022	0,17410
5	1,1310	1,1555	0,00060	0,14270
6	1,3350	1,2850	0,00250	0,33843
7	0,9560	0,9915	0,00126	0,04111
8	1,1310	1,1210	0,00010	0,14270
Разом	$\bar{Y} = 0,75325$	–	0,00873	1,28186

Аналогічним чином були отримані залежності для шліфування твердого сплаву ВК 8 ГОСТ 3882– 74.

$$Ra = 9,606 \frac{s_t^{0,331} \cdot d^{0,086}}{v^{0,173}} \quad (5.38)$$

Згідно одержаної степеневій залежності (5.38) побудували поверхні відгуку (рис. 5.13 і 5.14).

Аналіз поверхонь відгуку залежності шорсткості Ra внутрішньої нарізаної поверхні від режимів різання під час круглого алмазного шліфування показав (рис. 5.13 і 5.14), що найбільш суттєвий вплив на її величину має швидкість обертання деталі v та поздовжня подача стола верстата s . Значно менше шорсткість залежить від глибини різання t . При цьому зростання шорсткості при змінній величині швидкості обертання деталі та постійній глибині різання є значно більш вагомим ніж отримана при постійній швидкості та змінній величині глибини різання (рис. 5.13 і 5.14, а).

Аналогічно розглядаючи поверхню відгуку на рис.5.13 і 5.14, в можемо відмітити значно більший вплив зміни поздовжньої подачі стола на значення параметра шорсткості Ra при постійній глибині різання ніж вплив зміни останньої на величину Ra при постійній подачі.

Аналізуючи графічні дані на рис. 5.13 і 5.14, бачимо, що зміна швидкості обертання деталі при постійній подачі значно суттєвіше впливає на величину шорсткості поверхні ніж у випадку зміни подачі при постійній швидкості обертання.

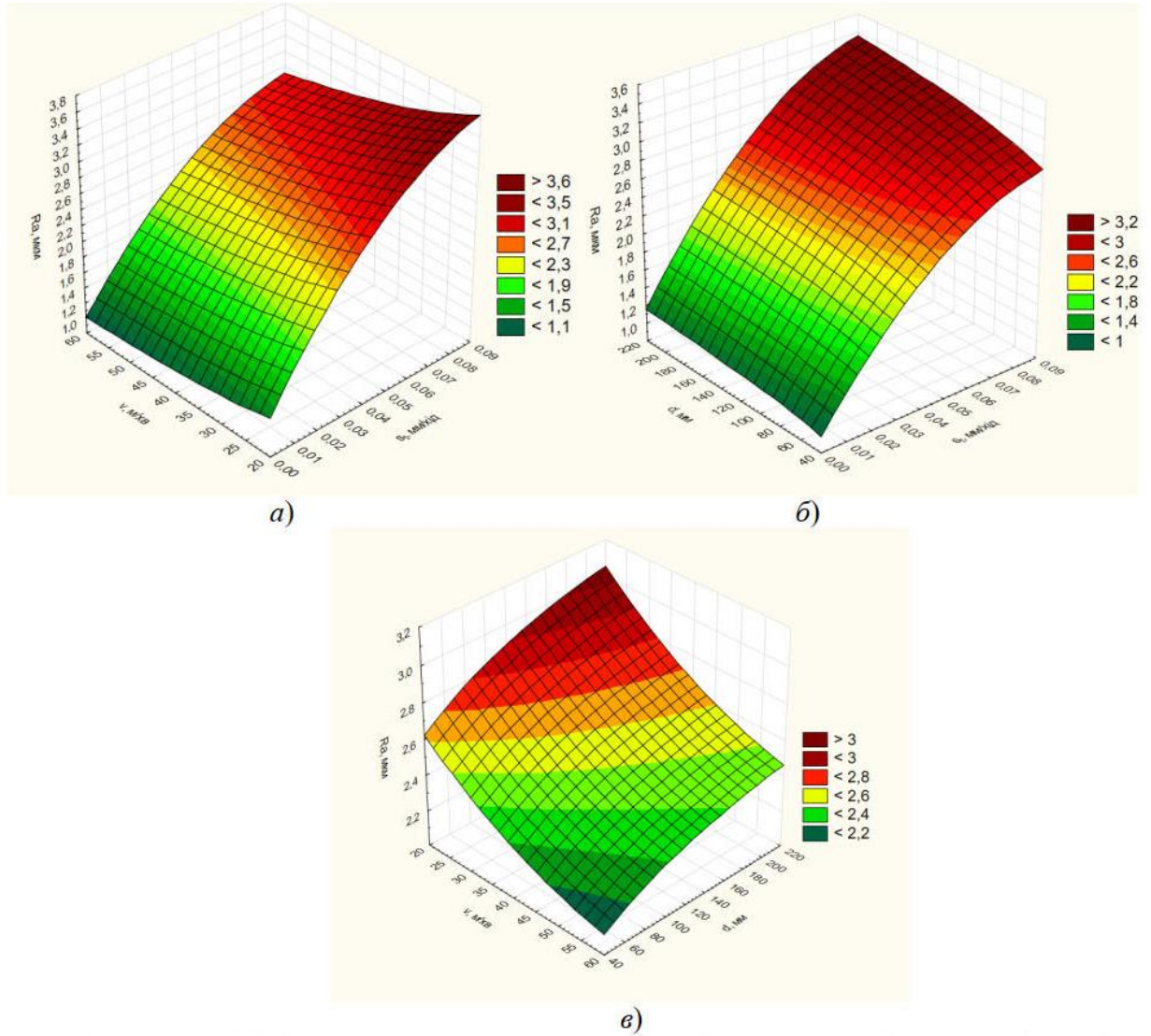


Рисунок 5.13 – Поверхні відгуку залежності шорсткості поверхні нарізі від режимів різання під час шліфування деталей із сталі

а – $s_t, v, d = 125$ мм; б – $s_t, d, v, = 40$ м/хв; в – $v, d, s_t, = 0,045$ мм/хід

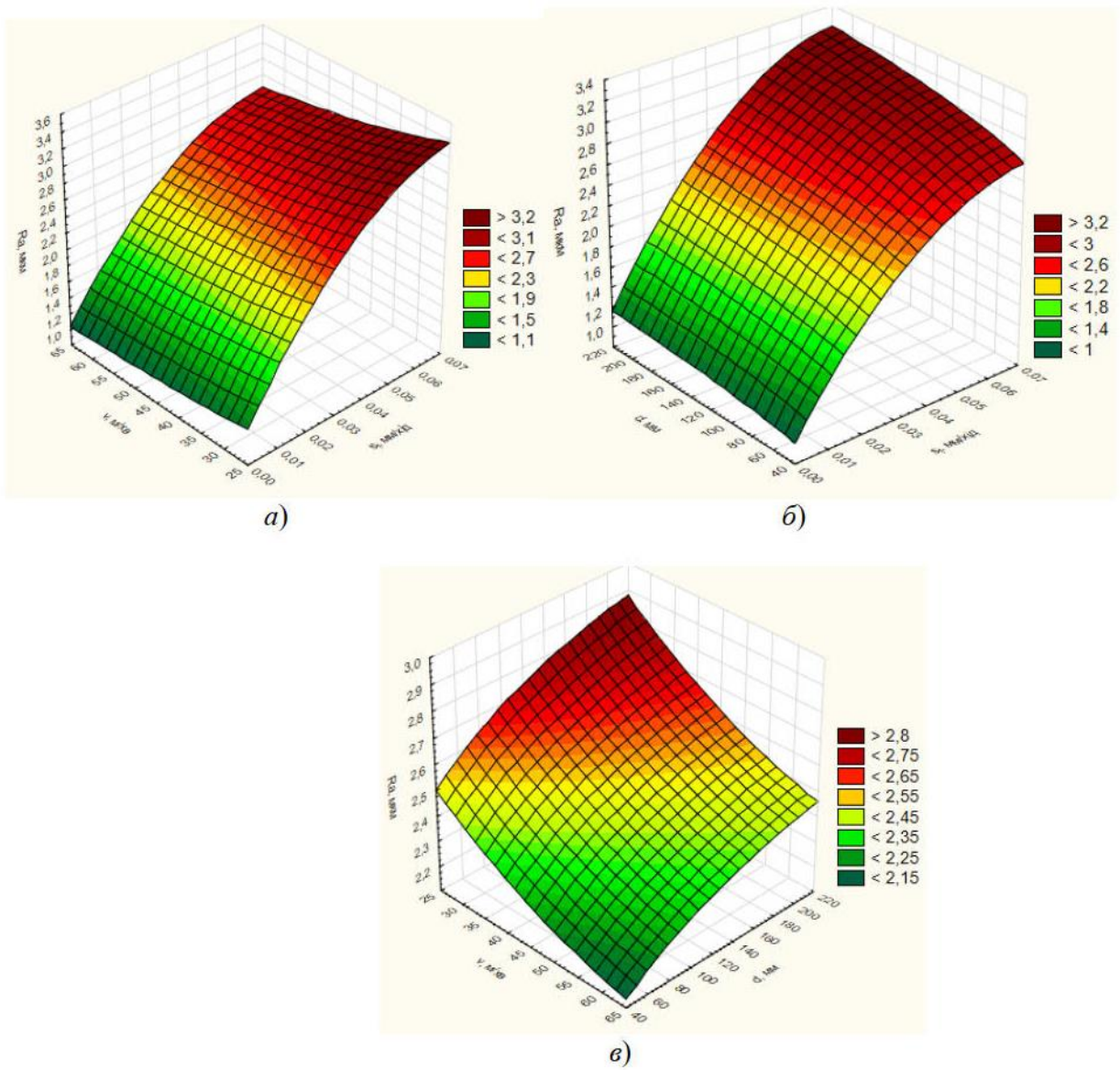


Рисунок 5.14 – Поверхні відгуку залежності шорсткості поверхні нарізі від режимів різання під час шліфування деталей із твердого сплаву
 а – $s_t, v, d = 125$ мм; б – $s_t, d, v, = 45$ м/хв; в – $v, d, s_t, = 0,035$ мм/хід

5.6 Експериментальні дослідження на втомну міцність зміцнених нарізових з'єднань

З метою порівняння втомної міцності деталей, зміцнених за допомогою модернізованого інструменту (розділ 3), та деталей без зміцнення було здійснено випробування на втомну міцність. Розробленим інструментом було зміцнено деталі геологорозвідувального замка 3-50, виготовлених зі сталі 40Х (рис. 5.15).



а

б

Рисунок 5.15 – Загальний вигляд зміцненої муфти (а) та ніпеля (б) бурового замка 3-50

Завдяки високій швидкості обертання інструмента та відповідним контактним напруженням у місцях контакту інструмента із западиною та із боковими сторонами профілю конічної замкової нарізі деталі створюються сприятливі умови для формування на сталі білих шарів із покращеними фізико-механічними властивостями та сприятливим розподілом залишкових внутрішніх напружень стискання. Такі поверхневі структури мають високу зносостійкість та корозійну стійкість і забезпечують підвищення умовної границі корозійної втоми, що важливо для забезпечення довговічності нарізевих замкових з'єднань бурильних труб, на які діють циклічні навантаження в процесі буріння свердловин. Крім того, обробка заявленим інструментом за описаною технологією зменшує шорсткість зміцненого шару конічної замкової нарізі до величини $Ra=0,4\dots0,5$ мкм, що важливо у аспекті забезпечення надійної герметизації конічних нарізевих замкових з'єднань бурильних труб при їх збиранні у колону та підвищення експлуатаційних властивостей.

Результати випробувань на втомну міцність бурових замків деталей відображено на рис.5.16. Встановлено, що зазвичай тріщина виникає у області першого витка, де концентрація навантаження, що передається нарізю, є найбільшою. Для зміцнених деталей спостерігається ефект гальмування розвитку

втомної тріщини в результаті зміцнення зони матеріалу у западині нарізі, де, зазвичай, зароджуються тріщини.

За результатами випробування встановлено, що втомна міцність зміцнених деталей, виготовлених із сталі 40ХН, була у 1,15 – 1,2 рази вищою за втомну міцність незміцнених деталей із того самого матеріалу.

За одержаними даними побудовано регресійні залежності для замків:

- зміцнені деталі: $\sigma, \text{кгс/мм}^2 = -3,278 \ln(N \cdot 10^6) + 16,169, R^2 = 0,9224$
- незміцнені деталі: $\sigma, \text{кгс/мм}^2 = -2,634 \ln(N \cdot 10^6) + 13,732, R^2 = 0,9236$

Це пояснюється тим, що у поверхневих шарах утворюється зміцнений шар товщиною 50-65 мкм з мікротвердістю на 35 % більшою за мікротвердість основного металу у 2,17 ГПа і розміром зерен у 50 – 70 нм [119], [120].

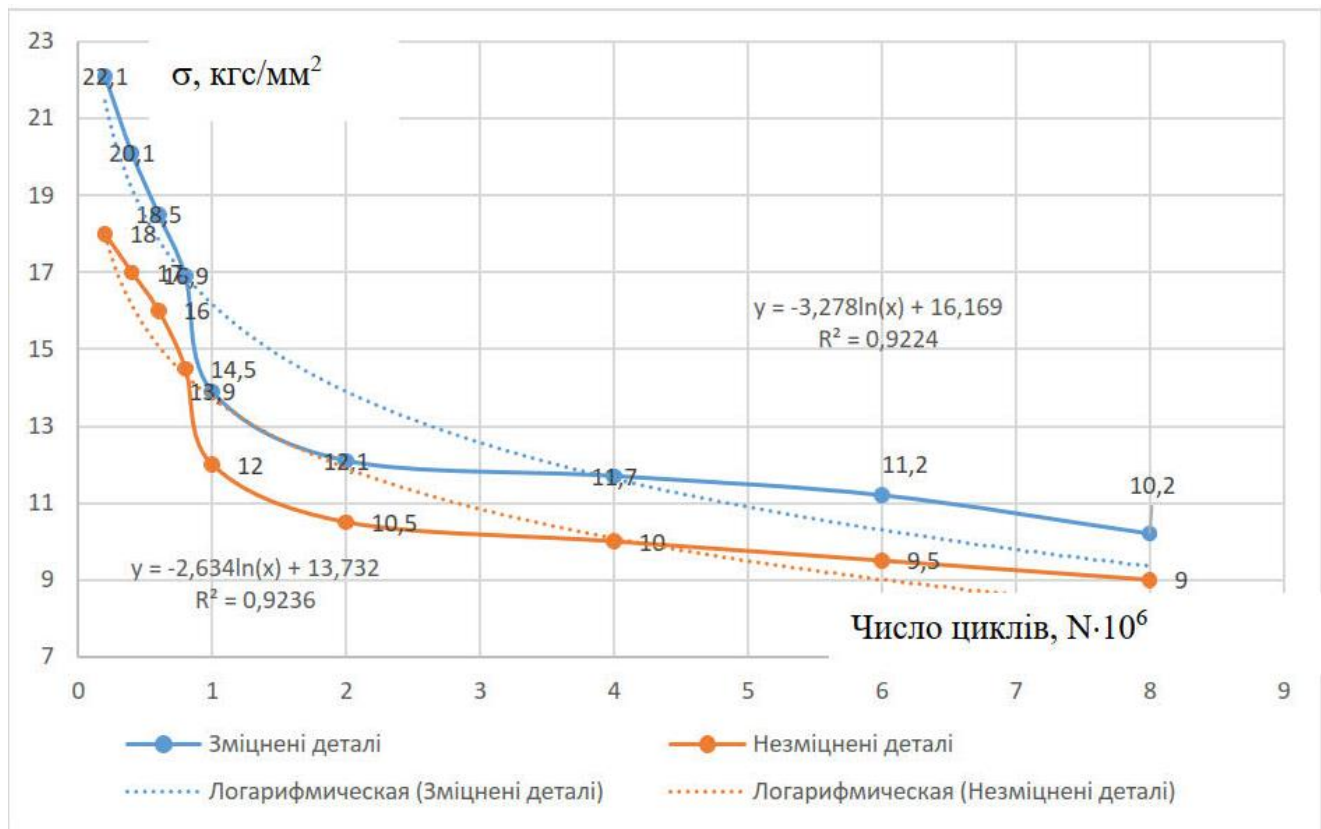


Рисунок 5.16 – Результати випробування на втомну міцність деталей геологорозвідувальних замків 3-50

Факторами зменшення втомної міцності нарізеного з'єднання, на нашу думку, є концентратори напружень, які викликані нарізанням нарізі. Так, для

нарізаної нарізі западини нарізі є концентраторами напружень, тоді як для зміцненої нарізі не має місця зняття матеріалу. Різниця у технології виготовлення викликає різницю у макроструктурі матеріалу. Внаслідок зміцнення металу вплив шорсткості поверхні зменшується. Шари зміцненої нарізі викривлені як на поверхні, так і біля западин витка та мають волокнисту структуру білих шарів [110, 121].

Окрім зазначених факторів циклічна міцність нарізей зменшується внаслідок асиметрії навантаження та фреттинг процесів, які виникають під дією циклічного тертя у з'єднанні. Поряд із тим, під час складання нарізевих конічних з'єднань потребується момент згвинчування, який також підвищує напруження у з'єднанні та створює асиметричних навантажень. За певної величини моменту згвинчування нарізеве з'єднання має найбільший опір втомі.

5.7 Результати експериментального вимірювання биття моделі долота в залежності від величини неспіввісності ніпеля і корпусу

Метою експериментальних досліджень є визначення того, в якій мірі неспіввісність ніпеля і корпусу долота впливає на його експлуатаційні показники, зокрема на величину нестабільності сил різання, які виникають під час руйнування породи. Стабільність сил різання, як показник якості бурових доліт, був нами вибраний тому, що саме цей показник дає змогу пов'язати технологічні параметри виготовлення доліт та показники його роботи. Значний розкид величин сил різання має значення, оскільки в цьому разі свердловина буриться в напрямку відмінному від заданого проектом, долото при цьому обертається не тільки відносно своєї осі, а свердловина має діаметр, що перевищує заданий [122], [123]. Випробування доліт здійснювали на установці, яка була розроблена на базі вертикально-свердлильного верстату (розділ 3) з використанням гірських порід. Результати вимірювання наведено у табл. 5.14.

Таблиця 5.14 – Результати вимірювання сил для різних величин

Величина неспіввідності , мм	Подача мм/об	Величини складових сил різання, кН				Рівнодійна R, кН	
		P_z		P_y		max	середнє
		min - max	середнє	min - max	середнє		
0,33-0,45	0,25	0,37-0,76	0,53	0,102-204	0,156	0,218	0,165
	0,50	0,68-1,61	0,99	0,162-330	0,248	0,367	0,267
	1,00	0,97-208	0,145	0,192-402	0,326	0,453	0,357
0,45-0,55	0,25	0,55-174	0,99	0,120-336	0,228	0,378	0,249
	0,50	0,76-226	0,160	0,90-336	0,279	0,405	0,322
	1,00	0,124-300	0,205	0,132-420	0,310	0,516	0,372
0,5-0,68	0,25	0,68-205	0,133	0,72-282	0,201	0,349	0,241
	0,50	0,137-271	0,220	0,144-414	0,316	0,495	0,385
	1,00	0,111-379	0,269	0,84-528	0,332	0,650	0,427

Отримані результати не можуть бути безпосередньо використані для моделювання величини сил різання під час буріння, оскільки установка не відтворює всіх умов здійснення буріння. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що збільшення неспіввідності доліт підвищує дисбаланс роботи цих доліт, тобто величину розкиду сил різання.

5.8 Розроблення моделі забезпечення технологічного забезпечення точності та якості виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії для підвищення експлуатаційних показників

Надійність і довговічність нафтопромислового і бурового обладнання визначається багатьма чинниками, основними із яких є технологічні. Раціональний вибір матеріалів, якість і надійність породоруйнівного інструменту визначається на кожному з технологічних етапів їх виготовлення. Формування якості бурових доліт починається на стадії проектування, коли закладаються всі основні показники якості бурового долота. Конструкція бурового долота є агрегатом взаємозв'язаних вузлів, деталей, елементів і матеріалів, що функціонують у складних умовах експлуатації.

Для забезпечення точності зовнішнього діаметру долота ріжуче-стираючої дії, як основного розміру, пропонується застосовувати метод впорядкованого

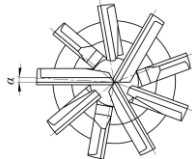
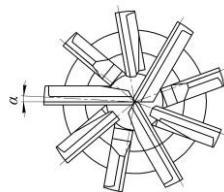
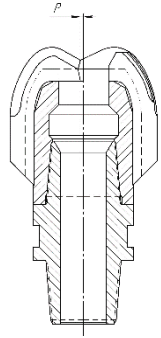
складання, тобто виконання кожної наступної операції визначається в залежності від величини відхилень, отриманих на попередній операції. Відповідно, перед виконанням кожної операції необхідно здійснювати вимірювання дійсного розміру зовнішнього діаметру долота.

Для мінімізації похибки неспіввісності ніпеля і корпусу долота із привареними лопатями визначають ділянку із найбільшою величиною радіального биття, і здійснюють згвинчування із таким крутним моментом, щоби загальне відхилення неспіввісності було мінімальним. Надалі вимірюють величину радіального биття і в протилежному напрямку виконують перший прихоплювальний зварний шов. Після вимірювання радіального биття, аналогічно виконують наступний прихоплювальний шов.

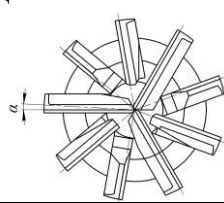
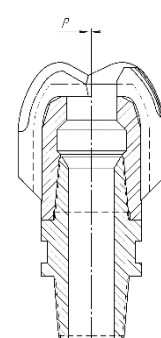
Цей технологічний захід змінює величину і напрямок результуючого вектору пружно-пластичної деформації зварного з'єднання таким чином, що вісь симетрії корпусу зміщується в бік осі симетрії ніпеля, забезпечуючи співвісність деталей нарізеного з'єднання. Місце початку зварного шва є діаметрально-протилежним максимальному радіальному відхиленню. Напрямок обходу зварним швом вибирається з урахуванням значення радіальних биття сусідніх лопатей, із сусідніх значень вибирається максимальне відхилення [124 – 139].

Нижче представлена розроблена схема забезпечення точності зовнішнього діаметра долота ріжуче-стираючої дії (табл. 5.15).

Таблиця 5.15 – Схема забезпечення якості бурових доліт ріжуче-стирачого типу

Технологічна операція	Метод складання	Розмір, що контролюється / Параметр, що регулює	Похибка	Контрольний пристрій
Приварювання лопатей до корпусу долота				
Приварювання лопатей до корпусу долота	–	Зовнішній діаметр долота	Похибка розміру зовнішнього діаметру долота 	Розроблений контрольний пристрій для контролю биття долота [22, 23]
Контрольна операція				
Контроль биття зовнішнього діаметру долота	–	Зовнішній діаметр долота	Похибка розміру зовнішнього діаметру долота 	Розроблений контрольний пристрій для контролю биття долота [22, 23]
Згвинчування ніпелю і корпусу із привареними лопатями				
Визначають ділянку із найбільшою величиною радіального биття, і здійснюють згвинчуванняз таким крутним моментом, щоби загальне відхилення неспіввідності було мінімальним	Метод впорядкованого складання	Величина неспіввідності ніпеля і корпусу Прикладений момент	Похибка співвідності між ніпелем і корпусом 	Розроблений контрольний пристрій для контролю биття долота [22, 23]

Закінчення таблиці 5.15

Контрольна операція				
Контроль биття зовнішнього діаметру долота	–	Зовнішній діаметр долота	Похибка розміру зовнішнього діаметру долота 	Розроблений контрольний пристрій для контролю биття долота [22, 23]
Виконання першого прихоплювального зварного шва				
Вимірюють величину радіального биття і в протилежному напрямку виконують перший прихоплювальний зварний шов	Метод впорядкованого складання	Зовнішній діаметр долота Ділянка із найбільшою величиною радіального биття	Похибка співвісності між ніпелем і корпусом 	Розроблений контрольний пристрій для контролю биття долота [22, 23]

За таких умов якість окремих елементів складеної конструкції здійснює вирішальний вплив на ефективність функціонування бурового долота в цілому. Тому важливим є не тільки пошук досконалої технології виготовлення елементів і долота в цілому, а й обґрунтований вибір матеріалів, що забезпечують технологічні, експлуатаційні та економічні показники його роботи.

До основних технологічних етапів, на яких формується якість долота, належать: виробництво заготовок, чорнова і напівчистова механічна обробка різанням, хіміко-термічна обробка, покриття корпусу, викінчувальна механічна обробка різанням, припаювання різців до лопатей, складання долота в цілому, контроль якості. Зауважимо, що важливим аспектом у долотобудуванні є забезпечення якості та економії матеріалів на етапах життєвого циклу доліт. Якість доліт є комплексним показником, яка визначається як матеріалами, так і технологією виготовлення окремих елементів доліт.

На підставі аналізу основних технологічних рішень, що використовуються для виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії, були розроблено моделі забезпечення якості окремих складових долота та інструменту в цілому (рис. 5.16, рис. 5.17).

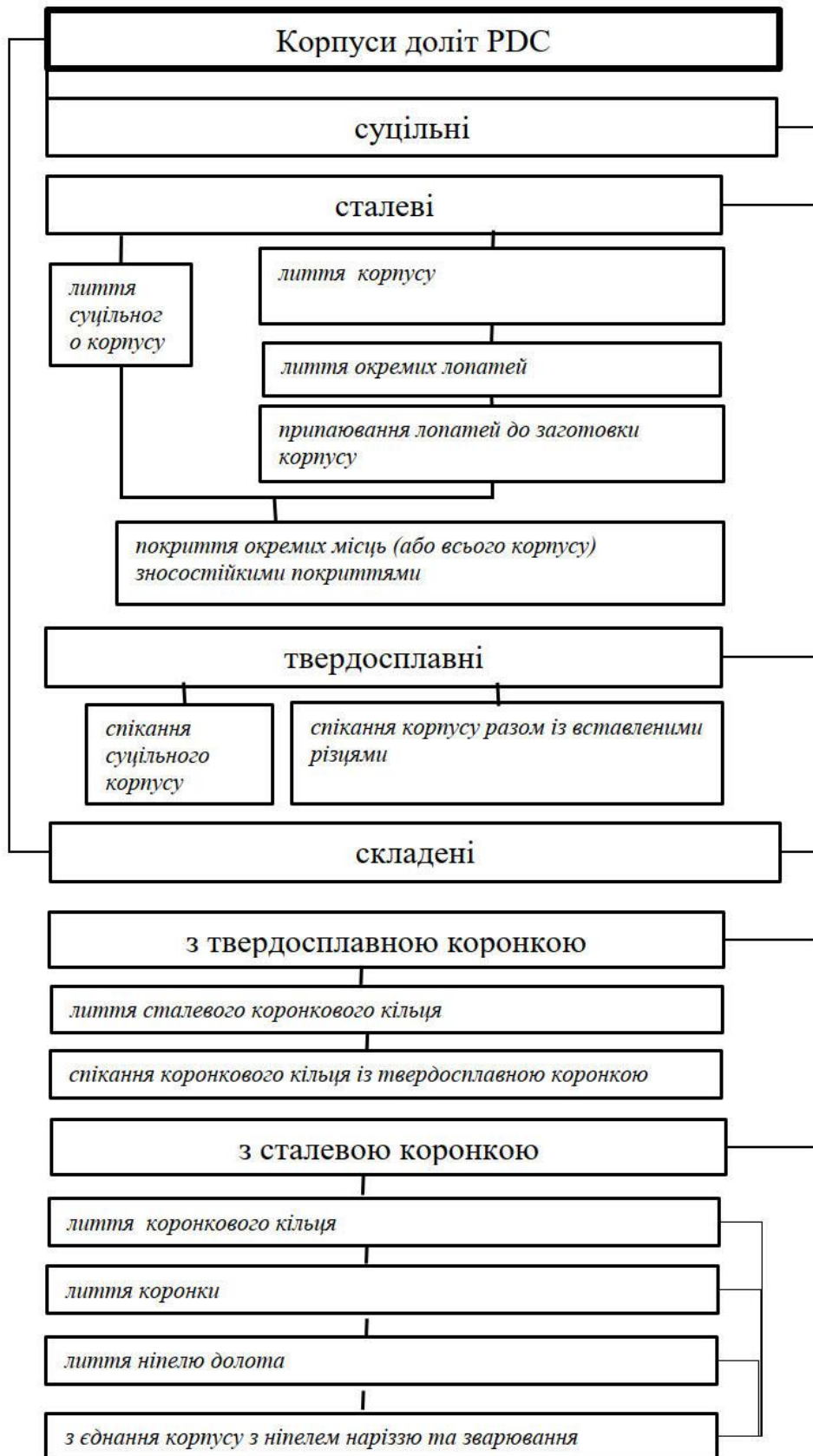


Рисунок 5.16 – Узагальнена технологія виготовлення корпусів доліт типу PDC (Джерело: розробка авторки)



Рисунок 5.17 – Модель забезпечення якості інструменту (Джерело: розробка авторки)

5.9 Практичне застосування результатів досліджень

Технологічний процес виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії ИСМ впроваджено у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Інтербур», м. Івано-Франківськ. Зміст впровадження: технологічний процес виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії; контрольні пристрої для вимірювання биття долота; модернізований інструмент для фрикційного зміцнення конічної замкової нарізі.

Технологія виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії дає змогу підвищити якість бурових доліт. Економічний ефект від впровадження у виробництво нового алмазного долота моделі ИСМ забезпечується за рахунок більшого ресурсу роботи вказаного бурового долота порівно із серійними, а також зниження експлуатаційних затрат споживачем на виконання спуско-піднімальних робіт під час буріння свердловин на нафту, газ та воду. Річний економічний ефект становить 881752,9 грн.

Результати дисертаційного дослідження також використовуються в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу на кафедрах «Комп'ютеризованого машинобудування» та «Зварювання» під час підготовки бакалаврів, магістрів та докторів філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка при вивченні дисциплін: «Чисельні методи обробки експериментальних даних», «Технологія машинобудування», «Методи оцінки і технології керування якістю виробів», «Основи математичного моделювання» та «Технології зміцнення та відновлення деталей і конструкцій». Впровадження результатів досліджень у навчальний процес сприяє ширшому ознайомленню студентів та аспірантів із сучасними технологічними процесами зміцнення деталей машин та складання виробів, що забезпечує підвищення теоретичного та практичного рівня їх підготовки.

Висновки до розділу 5

Під час скінчено-елементного дослідження встановлено, що для конічного нарізевого з'єднання характерний параболічний характер розподілу навантаження (максимальне навантаження припадає на перші і останні витки) із нерівномірним розподілом навантаження між витками. Сумісна дія похибок виготовлення викликає збільшення неоднорідності розподілу навантаження: зростає навантаження на перший виток, не суттєво знижуючись для всіх решти витків.

Дані аналітичних та скінчено-елементних досліджень були підтверджено експериментальним дослідженням визначення деформацій під час згвинчування у нарізевому конічному з'єднанні. Встановлено, що наявність шорсткості викликає збільшення середніх деформацій, проте збільшення кроку нарізі асоціюється із зменшенням середніх деформацій під час згвинчування. Також наявність похибок виготовлення викликає зменшення навантаження на другий виток, таким чином підвищується неоднорідність навантаження. Відхилення результатів від аналітичних та скінчено-елементних даних становить, в середньому, 10 %.

Виконане аналітичне і скінченно-елементне дослідження моментів згвинчування для конічних замкових нарізей, виготовлених із різних матеріалів та з'єднаних за температури навколишнього середовища та нагрітих до температури 200 °С, характерних під час експлуатації. Визначено зусилля, яке необхідне для згвинчування шорстких деталей. Були побудовані регресійні залежності впливу неспіввісності в конічному нарізевому з'єднанні від прикладеного моменту згвинчування для різних матеріалів для гладких і шорстких поверхонь.

Було виконано оптимізацію режимів різання під час шліфуванні конічної нарізі шляхом проведення проведення повнофакторного експерименту, а саме побудовано математичну модель впливу глибини різання, швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі під час шліфування конічної замкової нарізеві поверхні на показники якості поверхні (шорсткість) для сталі і твердого сплаву.

Було виконане фрикційне зміцнення деталей конічної замкової нарізі, виготовлених із сталі 40ХН, та перевірка цих деталей на втомну міцність.

Встановлено, що втомна міцність зміцнених деталей була у 1,15-1,2 рази вищою за втомну міцність незміцнених деталей із того самого матеріалу. Проведено експериментальні дослідження для дослідження впливу показників якості виготовлення долота на його експлуатаційні характеристики, які підтвердили результати аналітичних розрахунків. За одержаними даними були побудовані регресійні залежності для зміцнених і незміцнених деталей.

Експериментально визначено вплив величини неспіввісності між осями ніпелю і корпусу після складання на величину биття долота. Як показники, що досліджувалися, були вибрані: величина зміщення осі долота від осі вибою, який імітував гірську породу блоком будівельної суміші (400x400x400мм); та величини сил різання, отриманих під час експериментальних досліджень. Збільшення неспіввісності доліт підвищує величину вібрацій, що виникають під час роботи доліт, а також знижує керованість долота у свердловині.

Для контролю биття бурового долота було розроблено контрольний пристрій.

Результати розділу опубліковано у працях авторки [9], [10], [15], [18], [19], [20], [21], [22-29].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано умови роботи бурових доліт ріжуче-стираючої дії, характер їх руйнування, матеріали для виготовлення заготовок корпусів, конструкції, технологічні процеси механічної обробки конічних замкових нарізей доліт та складання і обґрунтовано перспективність застосування таких доліт у зв'язку із відсутністю у них рухомих підшипникових вузлів.

2. Проведено математичне моделювання процесу взаємодії з гірською породою долота, яке має похибки виготовлення, для визначення силових параметрів взаємодії та рівня напружень в елементах долота. Встановлено, що внаслідок неспіввісності осей ніпеля і корпусу долота в діапазоні від 0,2 мм до 1,0 мм виникає додаткова поперечна притискна сила, яка збільшує навантаження на лопаті у 1,2–1,9 разів. На основі проведених теоретичних досліджень вибрано режими випробування бурових доліт: частота обертання – $n=45 \text{ хв}^{-1}$, крутний момент від 1,5 кНм до 3,0 кНм.

3. Обґрунтовано способи отримання заготовок корпусів доліт, технологічні режими литва та зварювання, а також схеми виконання зварних швів для підвищення точності складання доліт. Встановлено, що у литій заготовці долота виникають максимальні напруження в основі паза між лопатями заготовки, для усунення цих залишкових напружень запропоновано термічну обробку – відпал. Встановлено, що мінімальні деформації лопатей долота ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$) виникають під час зварювання лопаті із корпусом за схемою, що передбачає формування зварного шва, починаючи із місця спряження циліндричної та еліпсоїдної поверхонь корпусу долота, і який виконують спочатку по еліпсоїдній поверхні до краю коротшої частини лопаті, а потім – вздовж циліндричної поверхні до краю довшої частини лопаті. Вказані деформації становлять 4 % від загального допуску на діаметр долота. Максимальні деформації лопаті долота ($6,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}$) виникають під час зварювання лопаті із корпусом за схемою, що передбачає формування зварного шва, починаючи із точки спряження коротшої частини лопаті із еліпсоїдною поверхнею корпусу долота, а потім по циліндричній поверхні до кінця довшої частини лопаті.

4. Досліджено вплив технологічних режимів нарізання та зміцнення конічних нарізей та методів складання на показники якості бурових доліт. Встановлено, що для конічного нарізевого з'єднання характерний параболічний характер розподілу навантаження (максимальне навантаження припадає на перші і останні витки), а для циліндричної нарізі характерним є гіперболічний. При чому, для конічної нарізі є більша нерівномірність розподілу: збільшення навантаження на останні витки досягається за рахунок зменшення навантаження на середні витки. Встановлено, що похибки виготовлення нарізей та шорсткість нарізевої поверхні викликає збільшення неоднорідності розподілу навантаження між витками нарізі. Побудовано математичні моделі, які описують вплив технологічних режимів різання, швидкості обертання деталі та подачі при шліфуванні конічної замкової нарізевої поверхні на показники якості поверхні (шорсткість): для сталі 25Г2С2Н2МА та для твердого сплаву ВК8. Встановлено, що складові режимів різання за впливом на параметр шорсткості чинять такий вплив у порядку зростання: глибина шліфування, швидкість обертання та діаметр деталі. При цьому, шорсткість нарізових поверхонь деталей із твердого сплаву на 3–12 % менша від шорсткості на деталях зі сталі. Удосконалено конструкцію інструмента для фрикційного зміцнення нарізей, тороїдний деформуючий елемент якого має радіус заокруглення, рівний радіусу заокруглення западини нарізі, а бокові деформуючі елементи – мають еліпсоподібну форму поперечного перерізу, що забезпечує одночасне зміцнення западини та бічних поверхонь профілю конічної нарізі. Встановлено, що фрикційне зміцнення забезпечує підвищення втомної міцності нарізових конічних з'єднань у 1,15–1,20 рази порівняно із серійними.

5. Розроблено пристрої для контролю конічних замкових нарізей та геометричних параметрів доліт ріжучо-стираючої дії, а також обладнання для стендових випробовувань доліт. Проведено стендові випробування доліт ріжуче-стираючого типу. Результати досліджень впроваджено у виробництво в ТзОВ «Інтербур». Виготовлення дослідних доліт згідно розробленої технології дозволило знизити похибки їх виготовлення та збільшити ресурс роботи в 1,27 рази порівняно із серійними та підвищити проходку, що забезпечує одержання

економічного ефекту у сумі 881,753 тис. грн. Крім цього, результати досліджень впроваджено у навчальний процес підготовки студентів, які навчаються за освітньо-кваліфікаційною програмою підготовки бакалаврів та магістрів у ІФНТУНГ за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pryhorovska T. O. Probabilistic estimate of PCD drill bit wear rate / T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* – 2014. – Вип. 5. – С. 39 – 45. (Scopus)
2. Pryhorovska T.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits / T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy, I. O. Kudriavtsev // *Petroleum Exploration and Development.* – 2015. – Vol. 42. – Iss. 6. – P. 888 – 892. (Scopus)
3. Pryhorovska T. O. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement / T. O. Pryhorovska // *Machining Science and Technology.* – 2017. – Vol. 27. – Iss. 1. – P. 37– 66.
4. Pryhorovska T. Rock heterogeneity numerical simulation as a factor of drill bit instability / T. Pryhorovska // *Engineering Solid Mechanics.* – 2018. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 315–330. (Scopus)
5. Pryhorovska T. Analytical estimation of tooth strength, restored by direct or indirect restorations / O. Bulbuk, A. Velychkovych, V. Mazurenko, L. Ropyak, T. Pryhorovska // *Engineering Solid Mechanics.* – 2019. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 193–204. (Scopus)
6. Pryhorovska T.O. Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric form made of different materials / R. M. Tatsiy, O. Y. Pazen, S. Y. Vovk, L. Y. Ropyak, T. O. Pryhorovska // *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics.* – 2019. –Vol. 13. – Iss. 2. – P.36–55. (Scopus)
7. Pryhorovska T. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas / A. Velychkovych, A. Andrusyak A., T. Pryhorovska, L. Ropyak // *Oil & Gas Science and Technology.* – 2019. –Vol. 74. – Art. No. 65. – P.9. (Scopus)
8. Pryhorovska T.O. Analysis of Materials and Modern Technologies for PDC Drill Bit Manufacturing / L. Y. Ropyak, T. O. Pryhorovska, K. H. Levchuk // *Progress in Physics of Metals.* – 2020. – Vol. 21. – Iss. 2. – P. 274–301. (Scopus)
9. Pryhorovska T. Machining Error Influence on Stress State of Conical Thread Joint Details / T. Pryhorovska, L. Ropyak // *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL): 06–08 September 2019 : proceedings.– Sozopol (Bolgaria).* – 2019. – P. 493–497. (Scopus)

10. Pryhorovska T.O. Study on grinding mode effect on external conical thread quality / L. Ya. Ropyak, V.S. Vytvytskyi, A.S. Velychkovych, T.O. Pryhorovska, M.V. Shovkoplias // Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies ICAMaT 2020: 29–30 October 2020. – – Bucharest (Romania).– 2020. – P. 12. (Scopus)
11. Пригоровська Т.О. Дослідження напруженого стану литої заготовки лопатевого долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, І.С. Когут, В.Г. Панчук, Л.О. Борушак, І.О. Шуляр // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2017. – Вип. 2 (2). – С. 135 – 141.
12. Пригоровська Т.О. Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників / Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як, П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак // Міжвузівський збірник «Наукові Нотатки». – Луцьк. – 2018. – Вип. 63. – № 1. – С. 177 – 182.
13. Пригоровська Т.О. Дослідження впливу точності виготовлення деталей на розподіл навантаження між витками конічного з'єднання / Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, Л.Я. Роп'як // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2019. – Вип. 114 (1). – С. 81–90.
14. Пригоровська Т.О. Вивчення форми ріжучої частини долота типу PDC з метою оптимізації конструкції: дослідження кута нахилу лопатей / Т.О. Пригоровська, О.В. Пригоровський // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2019.– Вип. 47 (2). – С. 32-41..
15. Пригоровська Т.О. Дослідження геометричних особливостей конічних нарізей / І.П. Тарас, Т.О. Пригоровська// Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2020. – Вип. 48 (1). – С.16–22.
16. Pryhorovska T. Finite-element simulation of PDC drill bit's operational stress-strain state / T. Pryhorovska, O. Pryhorovskyi // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2020. – Вип. 1. – №– 97. – С. 45—56.
17. Pryhorovska T.O. Simulation of drilling equipment structural elements [Electronic resource] / L.Ya. Ropyak, T.O. Pryhorovska – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 93 p. (ISBN-13: 978-620-0-45802-5). Mode of access: <https://www.lap->

[publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-620-0-45802-5/simulation-of-drilling-equipment-structural-elements](https://www.publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-620-0-45802-5/simulation-of-drilling-equipment-structural-elements). (viewed on June 01, 2020). – Title from the screen.

18. Пригоровська Т. О. Дослідження процесу різьбошліфування / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»: 01 – 03 листопада 2017 р. – Краматорськ: Донбаська машинобудівна академія, 2017. – С. 200–201.

19. Пригоровська Т.О. Вплив похибок виготовлення деталей на напружено-деформований стан конічного нарізевого з'єднання / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах»: 30 листопада – 2 грудня 2017 р. – Київ: «Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. – С. 325–328..

20. Пригоровська Т. О. Дослідження впливу похибок виготовлення бурового долота і бурильної труби на роботу долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як // Матеріали VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні»: 6 – 10 лютого 2018. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. – С. 130–132.

21. Пригоровська Т. О. Оптимізація режимів різання при різьбошліфуванні нарізеві поверхні / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: 10 – 12 травня 2018 р. – Чернігів, Чернігівський національний технологічний університет, 2018. – С.200–201.

22. Пат. на корисну модель № 106084. Україна, МПК (2016.01) G01B 5/14. Пристрій для контролю биття бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201804522 ; заявл. 24.04.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16..

23. Пат. на корисну модель № 129444. Україна, МПК (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Пристрій для контролю параметрів бурового долота /

Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201805867; заявл. 25.05.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. 20.

24. Пат. на корисну модель № 131571. Україна, МПК (2016.01) E21B 21/06. Пристрій для дослідження фільтрації бурових технологічних рідин через зразки гірських порід / І.І. Чудик, А.Р. Юрич, А.І. Різничук, Т.О. Пригоровська, О.С. Малишевська, Л.Я. Роп'як – № u201806981 . заявл. 21.06.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2.

25. Пат. на корисну модель № 140283. Україна, МПК (2016.01) C04B 18/04, C04B 18/06, C04B 18/20. Будівельна сировинна суміш з техногенних відходів / В.Л. Челядин, Л.І. Челядин, М.М. Богославець, Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович – № u201908295 ; заявл. 16.07.2019 ; 10.02.2020, Бюл. № 3.

26. Програма для дослідження впливу похибок виготовлення деталей на розподіл еквівалентних напружень у нарізевому конічному трубному з'єднанні «PipeThread» / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79153; дата реєстрації 18.05.2018, Бюл. № 49-2018.

27. Програма для дослідження впливу похибок виготовлення деталей різьбового замкового з'єднання на розподіл еквівалентних напружень, які виникають при з'єднанні деталей «ToolJoint» / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79154; дата реєстрації 18.05.2018, Бюл. № 49-2018.

28. Комп'ютерна програма. «Моделювання процесу мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів» («PEO-Andromeda (Plasma electrolytic oxidation)») / Г.В. Григорчук, А.П. Олійник, Л.І. Григорчук, В.С. Витвицький, Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, О.В. Корнута // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 92700. Дата реєстрації 08.10.2019, Бюл. № 55-2019.

29. Комп'ютерна програма. «Розрахунок на жорсткість проміжних валів» («ZhVK») / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як, В.С. Витвицький, Т.О. Пригоровська // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 9539. Дата реєстрації 17.01.2020. Бюл. № 57-2020.

30. ГОСТ 4.335-85 СПКП. Инструмент породоразрушающий. Номенклатура показателей. [Чинний від 1985-11-27]. Москва, 1985. 6 с.
31. Мосеев Д. Ю. Управление качеством изготовления буровых шарошечных долот статистическими методами : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.23 “Стандартизация и управление качеством продукции”/ Сам. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева – Самара, 2004. 157 с.
32. Барвинок В.А. Проблематика управления качеством бурового породоразрушающего инструмента / В. А. Барвинок, И. В. Безбородова, Р.В. Буткевич // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. –№ 4(4), т. 12. – С. 865 – 872.
33. Безбородова И. В. Повышение эффективности эксплуатации бурового породоразрушающего инструмента на основе обобщенной модели качества продукции : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.23 “Стандартизация и управление качеством продукции” / Сам. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева Самара, 2011. 133 с.
34. Яким Р.С. Оцінка надійності та критерії підвищення якості тришарошкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.– 2014. – № 4 (53). – С. 43–51.
35. Мясников Я.В. Руководство по оценке износа долот типа PDC в промышленных условиях / Я.В. Мясников, А.В. Ионенко, С.Г. Гаджиев, А.А. Липатников, Е.Г. Леонов // Специализированный журнал «Бурение и нефть». – 2014. – № 3.
36. Хорунов В. Ф. Особенности износа и критерии ремонтпригодности буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами / В. Ф. Хорунов, Б. В. Стефанив, О. М. Сабадаш, В. В. Воронов // Автоматическая сварка. – 2012. – № 10. – С.43-47.
37. API Standards For Rock Bits And PDC Bits. URL: <https://kcbits.com/drill-bit-education/api-standards/> (дата звернення: 20.06.2020).
38. Сулейманов А.А. Кольца–шаблоны Round Ring™ как средство контроля экономической эффективности // Бурение и Нефть. – 2015. – № 6.
39. Яким Р.С. Забезпечення якості тришарошкових бурових доліт на етапах їх життєвого циклу / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким // Прогресивні технології і

системи машинобудування : матер. міжнародного зб. наукових праць. Вип. 1,2. – № 43. – Донецьк. ДонНТУ, 2012. – С. 338 – 342.

40. Пригоровская Т.А. Статистический анализ обработки долот типа PDC и прогнозирование их стойкости //Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 41-56. URL: <http://ogbus.ru/article/view/statisticheskij-analiz-otrabotki-dolot-tipa-pdc-i-prognozirovanie-ix-stojkosti> (дата звернення: 20.06.2020).

41. Майстренко А. Л. Формирование структуры композиционных алмазосодержащих материалов в технологических процессах / А. Л. Майстренко; под ред. Н. В. Новикова. – К.: Наукова думка, 2014. – 343 с.

42. СТП 90.502.–85. Связки металлические марок М6-14(МЖ), М6-15(МЗ), М6-14(МОЗ). – К.: ИСМ НАН України, 1985.

43. Хорунов В. Ф. Влияние палладия на структуру и технологические свойства припоев системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn / В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова, Б. В. Стефанив // Автоматическая сварка. – 2012. – № 9 (173). – С.23–28.

44. СТП 28.5 05417377 100 2003. Метод оценки износостойкости алмазно-твердосплавных пластин. Киев : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2003. 10 с. (Стандарт підприємства).

45. Пат. РФ № 2541241. Российская Федерация, МПК В24D 3/00, В22F 7/02, В32В 5/16. Алмазно-твердосплавная пластина / Е. Е. Ашкинази, В.Г. Ральченко, В.И. Конов, Н.В. Новиков, А.А. Шульженко, В.Г. Гаргин, А.Н. Соколов, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.С. Осипов. заявник і патентовласники – винахідники. – № 2012148773/02; заявл. 19.11.2012 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.

46. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов / ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Киев, 2018. Вып. 21. 483 с.

47. Пат. РФ № 2541241. Российская Федерация, МПК С04В 35/528, В24D 3/04. Алмазный поликристаллический композиционный материал с армирующей алмазной компонентой / Е. Е. Ашкинази, В.Г. Ральченко, В.И. Конов,

- А.П. Большаков, С.П. Рыжков, С.С. Соболев. – заявник і патентовласники – винахідники. – № 2013133609/03, заявл. 19.07.2013 ; опубл. 10.01.2015 Бюл. № 1.
48. Пат. на корисну модель UA № 83326 (13) Україна, МПК В22F 7/04, В22F 3/15, В24D 3/04, В32В 5/16, С23С 24/00. Алмазно-твердосплавна пластина / М.В. Новіков, О.О. Шульженко, В.Г. Гаргін, О.М. Соколов, Р.К. Богданок, А.П. Загора, О.С. Осіпов, Є.Є. Ашкіназі, В.Г. Ральченко, В.І. Конов – заявник і патентовласники – винахідники. – № u 2012 11865, заявл. 15.10.2012, опубл. 10.09.2013, Бюл.№ 17.
49. Пат. РФ № 2541241. Российская Федерация, МПК В24D 3/00, В22F 7/02, В32В 5/16. Алмазно-твердосплавная пластина : Е. Е. Ашкинази, В.Г. Ральченко, В.И. Конов, Н.В. Новиков, А.А. Шульженко, В.Г. Гаргин, А.Н. Соколов, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.С. Осипов. – заявник і патентовласники – винахідники– № 2012148773/02, заявл. 19.11.2012, опубл. 10.02.2015 Бюл. № 4.
50. Патент WO № WO 2011/012708 A1, МПК С04В 35/52, E21В 10/00, С04В 37/00. Polycrystalline diamond compact / D.E. Scott, K.K. Schmitz, C.D. van der Riet, A. Can. – заявник і патентовласники – винахідники – № PCT/EP20 10/06 1144, заявл. 30.07.2010, опубл. 03.02.2011.
51. Заявка на патент США № US 2008/0073126, США, МПК E21В 10/46, В01 3/06, С0В 3L/06. Polycrystalline diamond composites / Y. Shen, Y. Zhang, S. Huang, M.Keshavan. заявник і патентовласники – винахідники. – № 11/858,817, заявл. 20.09.2007, опубл. 27.03.2008.
52. Долотная сталь : монография / А.П. Амосов, А.Г. Ищук, Т.М. Пугачева. – Москва: Машиностроение. 2008. 291 с.
53. Богаченко А. Г. Новые экономно-легированные литые стали для корпусов буровых коронок. / А. Г. Богаченко, Ю. П. Линенко-Мельников, В. И. Мельник // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент. Техника и технология его применения : Сб.научн.трудов. Вып. 19. 2010. С. 69–78.
54. Майсурадзе М.В. Ударная вязкость буровых долот из высокопрочной стали 25Г2С2Н2МА / М.В. Майсурадзе, М.А. Рыжков, Ю.В. Юдин // XV международная

научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Сборник научных трудов. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. С. 325-326.

55. Майсурадзе М.В. Исследование высокопрочной конструкционной стали 25Г2С2Н2МА / М.В. Майсурадзе, М.А. Рыжков, Ю.В.Юдин // XV международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Сборник научных трудов. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 216–218.

56. Захаров Д.А. О буровых твердых сплавах на основе высокотемпературных карбидов вольфрама / Д.А. Захаров, А.П. Амосов, А.В. Сальников, М.А. Сальников // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2014. – № 1. URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2014-1-29-34> (дата звернения: 04.06.2020).

57. ГОСТ 3882-74 Сплавы твердые спеченные [Чинний від 1976-01-01]. Москва, 1976. 13 с.

58. Саленко А.Ф. Методы получения и обработки износостойких покрытий для буровых долот / А.Ф. Саленко, А.Н. Федотьев, Л.П. Федотьева, А.М. Мана // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 6. – С.48–54.

59. Стефанив Б. В. Исследование износостойкости защитных покрытий в условиях гидроабразивного изнашивания // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9. – С. 29–32.

60. Пат. РФ № RU2588532С2, МПК E21B 10/54. Алмазное буровое долото / А.М. Гринев, В.В. Ремнев, К.С. Серых, А.А. Харымов, А.А. Старыгин; заявник і патентовласник – авторы. –№ 2014139861/03 ; заявл. 01.10.2014 ; опубл. 27.06.2016 Бюл. № 18. – 4 с.

61. Бугаков В.И. Технология изготовления буровых долот при высоких давлениях и температурах с применением новых алмазных материалов / В.И. Бугаков, А.И. Лаптев // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. – 2017. – №60(1). – С. 36–42. URL: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-1-36-42> (дата звернения: 20.06.2020).

62. Колмыков В.И. Повышение эксплуатационной надежности бурового инструмента и деталей горных машин химико-термической обработкой:

монография. – Тверь: Тверской государственный технический университет. 2016. – 188 с.

63. Стефанив Б. Ф. Особенности индукционной пайки алмазно-твердосплавных резцов с лопастью корпуса составного бурового долота // Автоматическая сварка. – 2013. – № 08 (724). – С. 50–54.

64. Стефанив Б. Ф. Разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов // Автоматическая сварка. – 2013. – № 2. – С. 38–42.

65. Патент РФ №2477780. МПК E21B 10/573, E21C 35/197. Способ крепления породоразрушающих вставок бурового инструмента и рабочих органов проходческих машин / В. Т. Дмитриев, Г. А. Боярских, Д. С. Дмитриев, И. Г. Боярских, В. В. Мурашов; заявник и патентовладелец – авторы. – № 2013118855/03, заявл. 23.04.2013; опубл. 27.12.2014 Бюл. № 36.

66. Патент РФ № RU 2536901. МПК E21C35/197, E21B10/573. Алмазное долото с механическим креплением резцов / Р.М. Богомолов, А.В. Киняев, С.М. Крылов, А.М. Гринев, Д.Р. Яманаев, А.И. Старыгин; заявник и патентовладелец – авторы. – № 2013118855/03, опубл. 23.04.2013, заявл. 27.10.2014 Бюл. № 30.

67. Патент РФ № 2412326. МПК E21B10/00, B22F7/06. Буровое долото для роторного бурения и способ его изготовления / Д.А. Оксфорд, Д.У. Изон, Р.Х. Смит, Л.Дж. Лайонс; заявник и патентовладелец – авторы. – №2008123050/03; заявл. 10.11.2006; опубл. 20.02.2011; Бюл. № 5.

68. Журавлев А. Н. Оценка качества структурно упорядоченной сборки под сварку резьбовых соединений / А. Н. Журавлев, М. А. Борисов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2007. – Т. 311, № 2 : Математика и механика. Физика. – С. 27–30.

69. Журавлев А.Н. Влияние тепловых деформаций на качество сборки под сварку резьбовых соединений / А. Н. Журавлев, М. А. Борисов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 1(21). – С. 126–132.

70. Журавлев А.Н. Моделирование процесса сборки под сварку резьбового соединения бурового алмазного долота / А. Н. Журавлев, М. А. Борисов // Наука и

образование–2007 : Мат. межд. науч.-техн. конф. Мурманск : – Информрегистр 0320700491. – С. 131–134.

71. Хостикоев М.З. Изготовление буровых долот на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах с резбонакатным инструментом / М.З. Хостикоев, А.Н. Махненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 4. – С. 322–323.

72. Островский М.С. Программирование обработки деталей горных машин на станках с ЧПУ: Учебное пособие / М.С. Островский, В.У. Мнацаканян, В.А. Тимирязев. – Москва, 2009. – 227 с.

73. Богомолов Р.М. Совершенствование технологии и сборки буровых шарошечных долот / Р.М. Богомолов, Н.В. Насов, С.М. Крылов, В.И. Кремлев. – М.: Машиностроение, 2014. – 228 с.

74. Борисов М. А. Обеспечение соосности резбосварных соединений буровых алмазных долот на основе структурно упорядоченной сборки : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / М.А. Борисов. – Самара, 2009. – 24 с.

75. Журавлев А.Н. Разработка теоретических основ и реализация структурно упорядоченной сборки буровых долот : автореф. дисс. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / А.Н. Журавлев.– Самара, 2009. – 48 с.

76. Jiang K. Lightweight Drill Pipe Based on Composite Carbon Fiber Material / K. Jiang, R. Xie, H. Yun // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020 – Vol. 1549. – art. no. 032113. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1549/3/032113>

77. Benyahia H. Prediction of notched strength for cylindrical composites pipes under tensile loading conditions / H. Benyahia, M. Tarfaoui, A.El Moumen, D. Ouinas. // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 150. – С. 104–114.

78. Kopei B.V. Fatigue Strength of Hybrid Pump Rods / B.V. Kopei, A.B. Stefanyshyn, T.P. Venhrynyuk // Materials Science. – 2019. – Vol. 54(5). – С.739 – 742.

79. O'Connor H.J. Low-pressure additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites / H.J. O'Connor, D.P. Dowling // *Polymer Composites*. – 2019. – Vol. 40(11). – С. 4329–4339.
80. Leslie J.C. Composite Drill Pipe for Extended-Reach and Deep Water Applications / J.C. Leslie, S. Williamson, R. Long, J. Jean, L. Truong, H. Nuebert, and J. Leslie II // *Offshore Technology Conference*. – 2002. – Houston, Texas. – May 2002. – Paper No. 14266.
Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 2002.
81. Naranjo-Lozada J. Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing / J. Naranjo-Lozada, H. Ahuett-Garza, P. Orta-Castañón, W.M.H. Verbeeten, D. Sáiz-González // *Additive Manufacturing*, – 2019. – Vol. 26. – С. 227–241.
82. Залого В. А. Имитационная модель прямоугольного свободного резания / В. А. Залого, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // *Вісник Сумського державного університету. Серія, Технічні науки : науковий журнал*. – 2005. – № 11. – С. 55 – 66.
83. ISO 10424-2:2007 Petroleum and natural gas industries. [Чинний від 11.2007]. ISO, 2007. 99 с. (Rotary drilling equipment – Part 2: Threading and gauging of rotary shouldered thread connections).
84. Youngquist R. C. Comparison of Three Methods for Measuring Distortion in Optical Windows // NASA. – TM–2015–218822. – April 2015.
85. Youngquist R. C. Optical Distortion Evaluation in Large Area Windows using Interferometry / R. C. Youngquist, M. Skow, M.A. Nurge // *14th Int. Symp. on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM 2015)*. – 2015. – Art. No. 9.
86. Kai L. Lens distortion elimination for improving measurement accuracy offringe projection profilometry / L. Kai, B. Jingjie, Z. Dongsheng // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2016. – Vol. 85. – С. 53–64. doi:10.1016/j.optlaseng.2016.04.009.
87. Плотников С. В. Разработка и исследование лазерных триангуляционных приборов для промышленного размерного контроля : автореф. дисс. на соискание

уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы” / С.В. Плотников. – Новосибирск, 2000. – 48 с.

88. А.с. № 1529038 СССР, МКИ G01 В 11/24. Устройство для измерения сложной поверхности / Р.М. Ахметдинов, Р.М. Галиулин, № 4185516 ; заявл. 15.11.88 ; опубл. 15.12.89, Бюл. № 46.

89. Ильченко В.Н. Оптимальный контроль геометрических параметров изделий сложной формы с помощью оптических измерительных систем // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9(35) – С. 70–74.

90. Галиулин Р.М. Оптоэлектронные системы для размерного контроля изделий сложной формы // Автометрия. – 2004. – № 5 (40). – С. 26–37.

91. Цхай Э.Б. Измерение перемещений при исследовании жесткости и демпфирующих свойств резьбовых соединений // Доклады Томского государственного Университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т. 2. – С. 65–68.

92. Саруев Л.А. Анализ работы резьбового соединения бурильных труб закрытого типа в процессе ударно-вращательного бурения / Л.А. Саруев, А.В. Шадрин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1.

93. Пат. на винахід № 116950. Україна, МПК (2016.01) В21Н 3/04. Інструмент для фрикційного зміцнення конічних замкових різьб / О.В. Рогаль, М.Й. Бурда, Л.Я. Роп'як, І.П. Тарас – № а201613592 . заявл. 25.05.2018 ; опубл. 25.08.2018, Бюл. № 10.

94. Северинчик Н. А. Долговечность и надежность геологоразведочных бурильных труб / Н. А. Северинчик, Б. В. Копей. – М.: «Недра», 1979. 176 с.

95. Алексеев Л.А. К вопросу о двойном вращении породоразрушающего инструмента / Л.А. Алексеев, Х.И. Исонкин // Породоруйнівний і металообробний інструмент – техніка і технологія його виготовлення і застосування : матеріали 5-ої міжнародної конференції. 28-30 вересня 2010, Крим, Судак. – Судак, 2010. – Т. 9. – С. 29-30.

96. Левчук К.Г. Удосконалення наукових основ моделювання динамічних процесів ліквідації прихоплень бурильного інструмента: автореф. дис. на здобуття

вч.ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.12 «Машини нафтової і газової промисловості» / К.Г. Левчук. – Івано-Франківськ, 2019. 40 с.

97. Кунцяк Я. В. Визначення оцінки впливу сил опору на величину осьового навантаження на долото в похилоспрямованій свердловині / Я. В. Кунцяк, Р. Я. Кунцяк, О. М. Лев // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 4. – С.48–52.

98. Чудик І. І., Лівінський А. М. Вивчення технологічних можливостей орієнтованих опорних компонок низу бурильної колони / І. І. Чудик, А. М. Лівінський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 3 (64). – С.59–68.

99. Борисов А.А. Разработка методов и средств обоснования состава инструментальной системы для повышения производительности изготовления сложнопрофильных деталей: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / А.А. Борисов. М.: МГТУ «Станкин», 2013. – 18 с.

100. Польский, Е.А. Модель комплексного анализа размерных связей для одноступенчатого технологического обеспечения точности сборочных соединений Текст. / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2008. – Орел: ОрелГТУ. – № 3-6/271 (546). – 2008 – С. 92–99.

101. Сычев Ю.И. Повышение точности и качества многопозиционной обработки выбором структуры и параметров агрегатированных технологических систем: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 – «Технология машиностроения» / Ю.И. Сычев. Харьков, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2006. – 24 с.

102. Модель обеспечения качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей / В.Б. Ильицкий, Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Справочник. Инженерный журнал. – 2010. – № 4 (157). – С. 51–56.

103. ГОСТ 28487–90. Межгосударственный стандарт. Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль. Размеры. Допуски [Текст]. Разработан

и внесен Министерством нефтяной и газовой промышленности СССР, Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 27.03.90 № 614. Введен впервые. Издание с изменением № 1, утвержденным в июле 1992 г. (ИУС 10–92). – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2006. – 10 с.

104. Биргер, И. А. Резьбовые и фланцевые соединения [Текст] / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич – М. : Машиностроение, 1990. – 368 с.

105. Онисько О. Р. Методи забезпечення точності виготовлення різьбових кінців труб нафтогазового сортаменту // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – № 3(52). – С. 107–115.

106. Цхай Э.Б. Влияние радиальной деформации тела гайки, шероховатости поверхности витков и опорного изгибающего момента на жесткость и демпфирующие свойства резьбовых соединений : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин» / Э.Б. Цхай. – Томск, 2013. – 24 с.

107. Halliburton. Drill bits and Services. Каталог технических решений: веб-сайт. URL: <https://www.halliburton.com/content/dam/halliburton-ru/public/pubsdata/books-and-catalogs/60-945-DBS-V2.PDF> (дата звернення: 27.05.2020).

108. ВБМ-груп. Каталог буровые долота, калибраторы, центраторы: веб-сайт. URL: https://www.gubkin.ru/personal_sites/balabavi/metodicheskie/Katalog%20VBM-grup.pdf (дата звернення: 27.05.2020).

109. Иванов В.А. Теоретическое исследование влияния фактических размеров резьбы на зависимость момента затяжки от угла поворота / В.А. Иванов, О.А. Халтурин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–1. – С. 44–52. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20401> (дата звернення: 27.05.2020).

110. Копей Б. В. Вплив технології виготовлення на міцність різьби насосної штанги / Б. В. Копей, В. В. Михайлюк, О. Р. Мартинець, Ю. Я. Бублінський // Нафтогазова енергетика. – 2014. – № 2. – С. 14–20.

111. Копей Б. В. Огляд конструкцій бурових ключів та методик визначення моментів згинчування замкових різьбових з'єднань / Б. В. Копей, В. В. Михайлюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – № 1. – С.73–83.
112. Корчагин А.П. Разрушение ниппелей бурильных труб в процессе эксплуатации / А.П. Корчагин, В.В. Климов, Н.В. Барина, А.О. Мурашов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 11. – С. 28–32.
113. Продан В.Д. Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2012. – 280 с.
114. Рудь Ю.С. Новая математическая модель самоотвинчивания резьбовых соединений горных машин при вибрациях и ударных нагрузках / Ю.С. Рудь, В.Ю. Белоножко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2006. – № 1. – С. 296–302.
115. Логанин П.В. Повышение эффективности профильного алмазного шлифования путем совершенствования технологии правки круга : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : 05.02.08 «Технология машиностроения» / П.В. Логанин. – Пенза, 2008. – 20 с.
116. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
117. Клименко С. А. Обработка деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец, А. М. Пилипенко, Ю. А. Мельничук, В. В. Бурькин. Под общ. ред. С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
118. Кащук В. А. Справочник шлифовщика / В.А. Кащук, А.Б. Верещагин –М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
119. Гурей І.В. Вплив нанокристалічного зміцненого поверхневого шару на зносостійкість сірого чавуну при терті з граничним мащенням / І. В. Гурей, В. І. Гурей, П. Р. Дмитерко // Сучасні технології в машинобудуванні – 2014. – Вип. 9. – С. 23–32.

120. Швец В. В. Фазовый состав белых слоев на сталях 40X и 50XФА полученных фрикционным упрочнением / В. В. Швец, Е. Ф. Макар, Э. В. Яковлева // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1985. – № 3. – С. 75–78.
121. Шевченко С.В., Стеценко Н.Н. Наноструктурные состояния в металлах сплавах и интерметаллических соединениях: методы получения, структура, свойства // Успехи физ. мет., 2004. – Т. 5. – С. 219–255.
122. Синев С. В. Модели процесса бурения [Текст] / С. В. Синев // Нефтегазовое дело. – 2009. – Т. 2. – Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/Sinev/Sinev_1.pdf
123. Alkaragoolee M. A hybrid model for a drilling process for hydrocarbon well-boring operations [Text] / M. Alkaragoolee, K. Ebrahimi, R. Whalley // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. – 2017. – Vol. 231, Iss. 4. – P. 726-738.
124. Яким Р. С. Теорія і практика забезпечення якості та експлуатаційних показників цементованих деталей шарошкових бурових доліт: монографія / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина. – Івано-Франківськ: Видавництво ІФНТУНГ, 2011. – 189 с.
125. Яким Р. С. Підвищення якісних показників тришарошкових бурових доліт з герметизованими опорами ковзання, вдосконаленням технології їх створення / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 2 (47). – С. 30– 41.
126. Неупокоев В. Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот / В. Г. Неупокоев – Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. – 376 с.
127. Каинов Д. А. Проблемы построения критериев качества при производстве деталей / Д.А. Каинов // Вестник Национального технического университета Украины „Киевский политехнический институт”. Машиностроение – К.: НТУУ „КПИ”. – 2008. – Вып. 54. – С. 108–113.

128. Богомолов Р.М. Буровой инструмент / Р.М. Богомолов, Н.В. Носов // Энциклопедия изобретений, в двух частях. – М., Инновационное машиностроение, 2015. –827 с.
129. Бочковський О. М. Аналітичне дослідження енергоємності руйнування породи під час обертового буріння // Нафтова і газова промисловість.–1999. – № 6. – С. 14–17.
130. Бочковский А. М. Разрушение горных пород вставками бурового инструмента // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – К: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006, – С. 107–113.
131. Бочковский А. М. Применение долот режущего типа в меловых отложениях Западной Сибири // Нефтяная и газовая промышленность.–1990. – № 4. – С. 22–25.
132. Ненашев М. В. Технические средства и методики входного контроля качества РДС зубков алмазных буровых долот / М. В. Ненашев, И. Д. Ибатуллин, А. Н. Журавлев, С. И. Косулин // Известия Самарского НЦ РАН. 2011. – Т. 13. – № 4 (3). – С. 835–838.
133. Лаптев А.И., Атабиев Р.Х., Полушин Н.И. и др. Прочность алмазов при изготовлении алмазного бурового инструмента // Материаловедение. 2013. – № 7. – С. 40–43.
134. Системи управління якістю. Вимоги: ДСТУ ISO 9001–2001. [Чинний від 2001–01–01]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 23 с. (Національний стандарт України).
135. Яким Р.С. Формування якості та експлуатаційних показників тришарошкових бурових доліт на усіх етапах їх створення / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний зб. наукових праць. – 2011. – Вип. 42. – С. 309–314.
136. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // ГИАБ. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
137. Вовчановский И.Ф. Породоразрушающий инструмент на основе «Славутича» для бурения глубоких скважин. – Киев: Наукова думка, 1979. 66 с.

138. Арцимович Г.В. Механо-физические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. – Новосибирск: Наука, 1985. – 129 с.

139. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин: справочник / Н. И. Корнилов, В .С. Травкин, Л. К. Берестень, Д. И. Коган. – М.: Недра, 1979. – 359 с.

ДОДАТКИ

Список публікацій здобувачки

1. Pryhorovska T. O. Probabilistic estimate of PCD drill bit wear rate / T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2014. – Вип. 5. – С. 39 – 45. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження та узагальнено висновки)*.
2. Pryhorovska T.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits / T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy, I. O. Kudriavtsev // *Petroleum Exploration and Development*. – 2015. – Vol. 42. – Iss. 6. – P. 888 – 892. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження)*.
3. Pryhorovska T. O. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement / T. O. Pryhorovska // *Machining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. – Iss. 1. – P. 37– 66. *(Виконано одноосібно)*.
4. Pryhorovska T. Rock heterogeneity numerical simulation as a factor of drill bit instability / T. Pryhorovska // *Engineering Solid Mechanics*. – 2018. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 315–330. *(Виконано одноосібно)*.
5. Pryhorovska T. Analytical estimation of tooth strength, restored by direct or indirect restorations / O. Bulbuk, A. Velychkovych, V. Mazurenko, L. Ropyak, T. Pryhorovska // *Engineering Solid Mechanics*. – 2019. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 193–204. *(Здобувачкою запропоновано дослідження напруженого стану шаруватих конструкцій)*.
6. Pryhorovska T.O. Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric form made of different materials / R. M. Tatsiy, O. Y. Pazen, S. Y. Vovk, L. Y. Ropyak, T. O. Pryhorovska // *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. – 2019. –Vol. 13. – Iss. 2. – P.36–55. *(Здобувачкою запропоновано дослідження напруженого стану шаруватих конструкцій)*.
7. Pryhorovska T. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas / A. Velychkovych, A. Andrusyak A., T. Pryhorovska, L. Ropyak // *Oil & Gas Science and Technology*. – 2019. –Vol. 74. – Art. No. 65. – P.9. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження)*.
8. Pryhorovska T.O. Analysis of Materials and Modern Technologies for PDC Drill Bit Manufacturing / L. Y. Ropyak, T. O. Pryhorovska, K. H. Levchuk // *Progress in Physics of Metals*. – 2020. – Vol. 21. – Iss. 2. – P. 274–301. *(Здобувачкою здійснено аналіз технологічних процесів та матеріалів для виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії та узагальнено результати досліджень)*.

9. Pryhorovska T. Machining Error Influence on Stress State of Conical Thread Joint Details / T. Pryhorovska, L. Ropyak // IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL): 06–08 September 2019 : proceedings.– Sozopol (Bulgaria). – 2019. – P. 493–497. *(Здобувачкою виконані розрахунки впливу похибок виготовлення на розподіл напружень і деформацій в елементах нарізеного з'єднання).*
10. Pryhorovska T.O. Study on grinding mode effect on external conical thread quality / L. Ya. Ropyak, V.S. Vytvytskyi, A.S. Velychkovych, T.O. Pryhorovska, M.V. Shovkopliash // Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies ICAMaT 2020: 29–30 October 2020. – Bucharest (Romania). – 2020. – P. 12. *(Здобувачкою розроблено математичну модель проведення досліджень, проведено розрахунки)*
11. Пригоровська Т.О. Дослідження напруженого стану литої заготовки лопатевого долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, І.С. Когут, В.Г. Панчук, Л.О. Борушак, І.О. Шуляр // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2017. – Вип. 2 (2). – С. 135 – 141. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження, виконані числові дослідження).*
12. Пригоровська Т.О. Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників / Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як, П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак // Міжвузівський збірник «Наукові Нотатки». – Луцьк. – 2018. – Вип. 63. – № 1. – С. 177 – 182. *(Здобувачкою здійснено розроблення конструкторсько-технологічного забезпечення, обґрунтовано розташування та технологію виготовлення озброєння PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників).*
13. Пригоровська Т.О. Дослідження впливу точності виготовлення деталей на розподіл навантаження між витками конічного з'єднання / Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, Л.Я. Роп'як // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2019. – Вип. 114 (1). – С. 81–90. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження, запропоновано математичну модель, виконано розрахунки та узагальнено висновки).*
14. Пригоровська Т.О. Вивчення форми ріжучої частини долота типу PDC з метою оптимізації конструкції: дослідження кута нахилу лопатей / Т.О. Пригоровська, О.В. Пригоровський // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2019.– Вип. 47 (2). – С. 32-41. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, зроблено постановку задачі дослідження, виконано*

- комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану долота ріжуче-стираючої дії та узагальнено висновки).*
15. Пригоровська Т.О. Дослідження геометричних особливостей конічних нарізей / І.П. Тарас, Т.О. Пригоровська // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2020. – Вип. 48 (1). – С.16-22. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, поставлено задачі дослідження).*
 16. Pryhorovska T. Finite-element simulation of PDC drill bit's operational stress-strain state / T. Pryhorovska, O. Pryhorovskyi // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2020. – Вип. 1. – №– 97. – С. 45—56 *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею дослідження, зроблено постановку задачі дослідження, виконано комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану долота ріжуче-стираючої дії та узагальнено висновки).*
 17. Pryhorovska T.O. Simulation of drilling equipment structural elements [Electronic resource] / L.Ya. Ropyak, T.O. Pryhorovska – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 93 p. (ISBN-13: 978-620-0-45802-5). Mode of access: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-620-0-45802-5/simulation-of-drilling-equipment-structural-elements>. (viewed on June 01, 2020). – Title from the screen *(Здобувачкою поставлено задачі дослідження та узагальнено результати досліджень).*
 18. Пригоровська Т. О. Оптимізація режимів різання при різьбошліфуванні нарізаної поверхні / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»: 01 – 03 листопада 2017 р. – Краматорськ: Донбаська машинобудівна академія, 2017. – С. 200–201. *(Здобувачкою поставлено задачі, виконано дослідження режимів різання при нарізешліфуванні нарізаної поверхні).*
 19. Пригоровська Т.О. Вплив похибок виготовлення деталей на напружено-деформований стан конічного нарізаної з'єднання / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах»: 30 листопада – 2 грудня 2017 р. – Київ: «Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. – С. 325–328. *Здобувачкою проведено моделювання напружено-деформованого стану конічного нарізаної з'єднання).*
 20. Пригоровська Т. О. Дослідження впливу похибок виготовлення бурового долота і бурильної труби на роботу долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як // Матеріали VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні»: 6 – 10 лютого 2018. – Львів:

- Національний університет «Львівська політехніка», 2018. – С. 130–132. *(Здобувачкою виконано дослідження впливу похибок виготовлення бурового інструменту на працездатність).*
21. Пригоровська Т. О. Оптимізація режимів різання при різьбошліфуванні нарізаної поверхні / Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: 10–12 травня 2018 р. – Чернігів, Чернігівський національний технологічний університет, 2018. – С.200–201. *(Здобувачкою оптимізовано режими різання).*
22. Пат. на корисну модель № 106084. Україна, МПК (2016.01) G01B 5/14. Пристрій для контролю биття бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201804522 ; заявл. 24.04.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею створення корисної моделі).*
23. Пат. на корисну модель № 129444. Україна, МПК (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Пристрій для контролю параметрів бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201805867; заявл. 25.05.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. 20. *(Здобувачкою запропоновано введення до складу пристрою засобу для витягування нарізаної калібру).*
24. Пат. на корисну модель № 131571. Україна, МПК (2016.01) E21B 21/06. Пристрій для дослідження фільтрації бурових технологічних рідин через зразки гірських порід / І.І. Чудик, А.Р. Юрич, А.І. Різничук, Т.О. Пригоровська, О.С. Малишевська, Л.Я. Роп'як – № u201806981 . заявл. 21.06.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2. *(Здобувачкою запропоновано введення до складу пристрою фільтраційного стакану із зовнішніми нарізами на кінцях та використання пристрою для вибору промивних рідин під час випробовувань PDC-доліт).*
25. Пат. на корисну модель № 140283. Україна, МПК (2016.01) C04B 18/04, C04B 18/06, C04B 18/20. Будівельна сировинна суміш з техногенних відходів / В.Л. Челядин, Л.І. Челядин, М.М. Богославець, Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович – № u201908295 ; заявл. 16.07.2019 ; 10.02.2020, Бюл. № 3. *(Здобувачкою запропоновано введення до складу суміші шламу із гальванічних ванн і використання запропонованої суміші для випробовування доліт).*
26. Програма для дослідження впливу похибок виготовлення деталей на розподіл еквівалентних напружень у нарізованому конічному трубному з'єднанні «PipeThread» / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79153; дата

реєстрації 18.05.2018, Бюл. № 49-2018. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею створення комп'ютерної програми, розроблено інструкцію користувача).*

27. Програма для дослідження впливу похибок виготовлення деталей різьбового замкового з'єднання на розподіл еквівалентних напружень, які виникають при з'єднанні деталей «ToolJoint» / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79154; дата реєстрації 18.05.2018, Бюл. № 49-2018. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею створення комп'ютерної програми, розроблено інструкцію користувача).*
28. Комп'ютерна програма. «Моделювання процесу мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів» («PEO-Andromeda (Plasma electrolytic oxidation)») / Г.В. Григорчук, А.П. Олійник, Л.І. Григорчук, В.С. Витвицький, Л.Я. Роп'як, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, О.В. Корнута // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 92700. Дата реєстрації 08.10.2019, Бюл. № 55-2019. *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею створення комп'ютерної програми, розроблено інструкцію користувача).*
29. Комп'ютерна програма. «Розрахунок на жорсткість проміжних валів» («ZhVK») / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як, В.С. Витвицький, Т.О. Пригоровська // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 9539. Дата реєстрації 17.01.2020. Бюл. № 57-2020 *(Здобувачкою запропоновано загальну ідею створення комп'ютерної програми, розроблено інструкцію користувача).*

Кресленики бурового долота

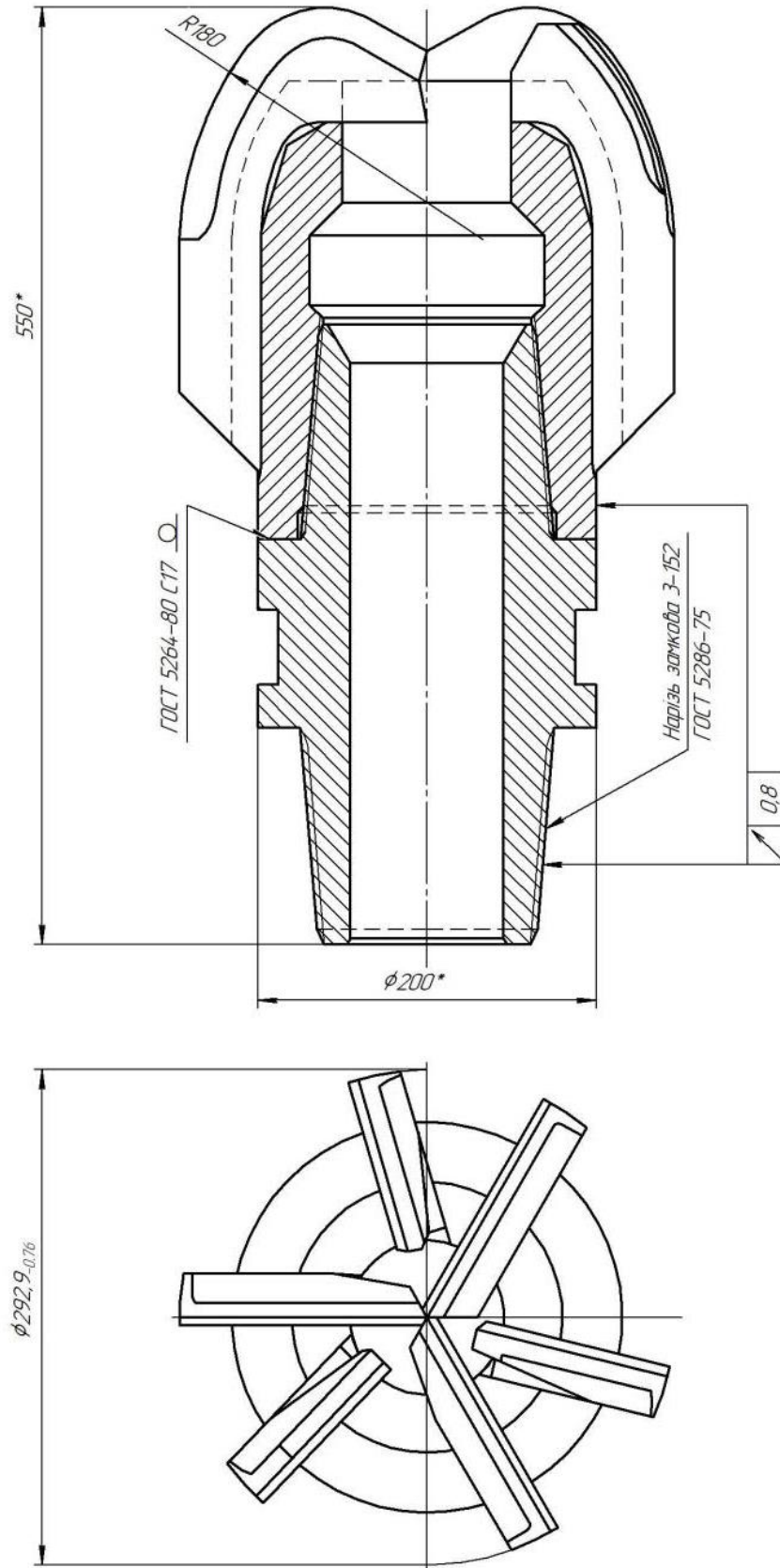


Рисунок Б.1 – Кресленик бурового долота ИСМ 14.4764.1001 (у зборі)

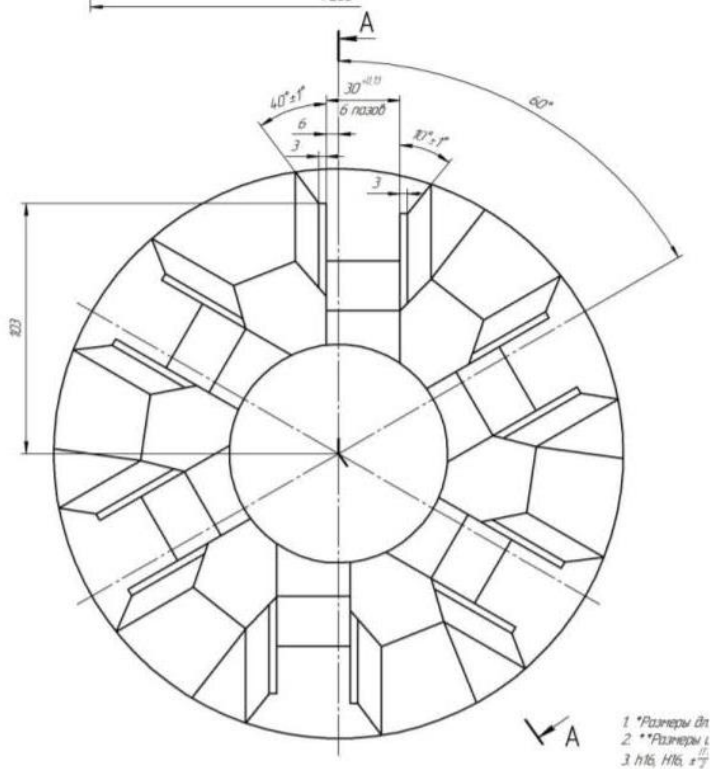
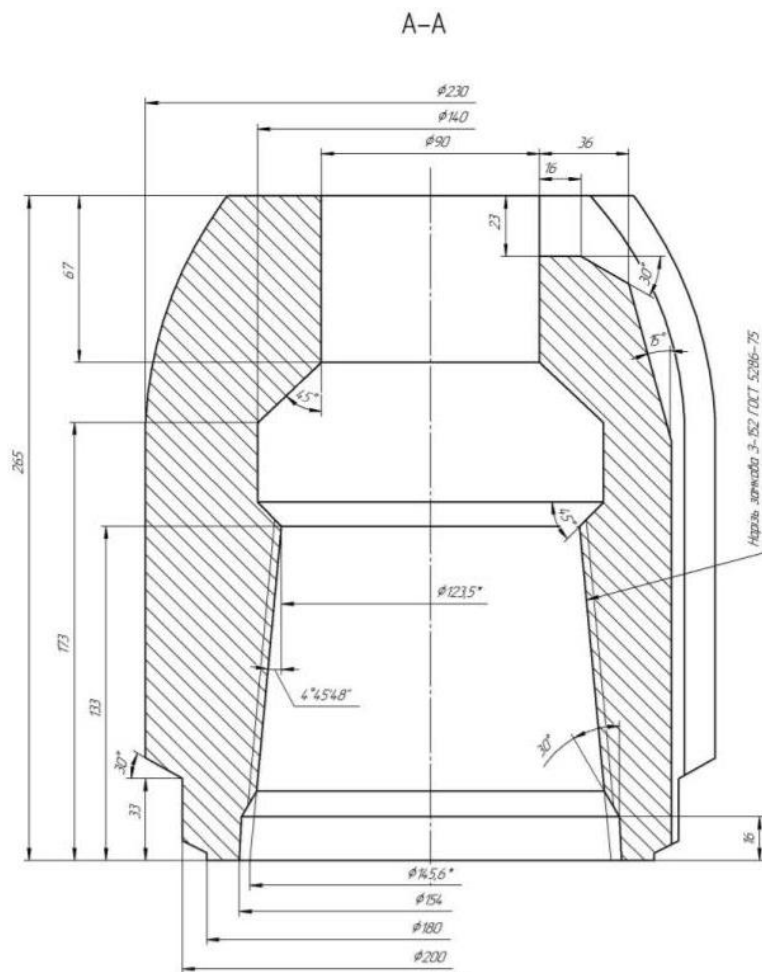


Рисунок Б.2 – Кресленик корпуса і лопаті бурового долота ИСМ 14.4764.1001

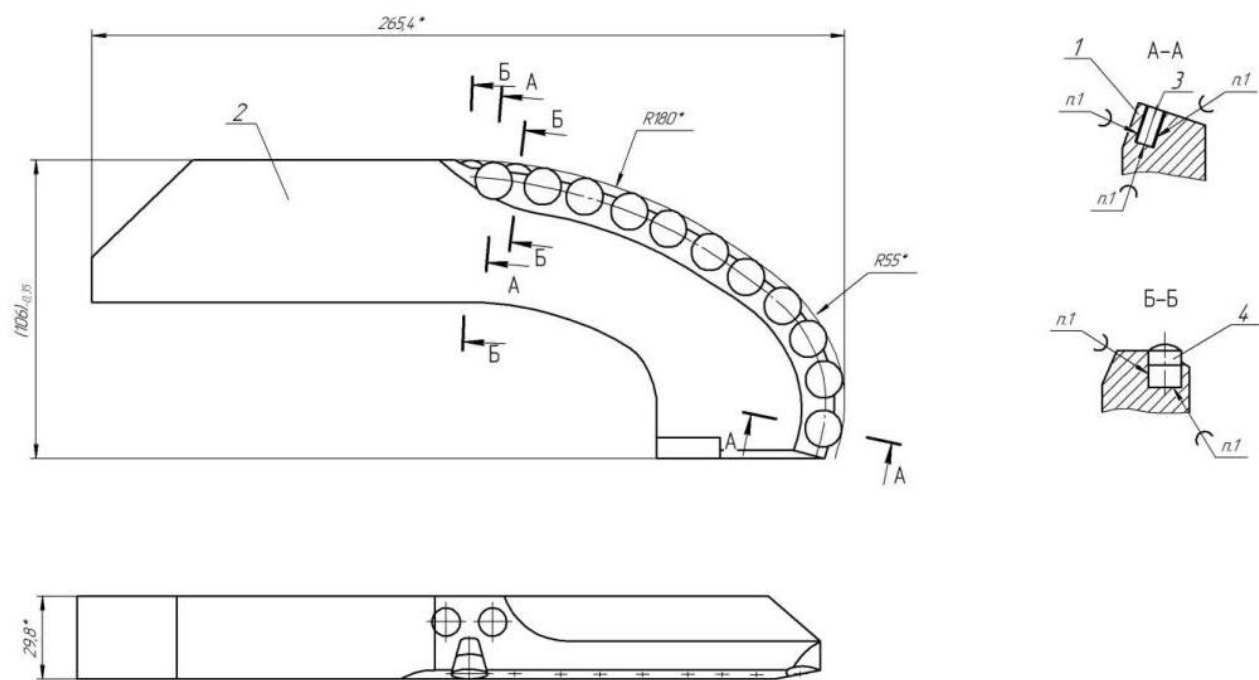


Рисунок Б.3 – Кресленики лопатей бурового долота ИСМ 14.4764.1001

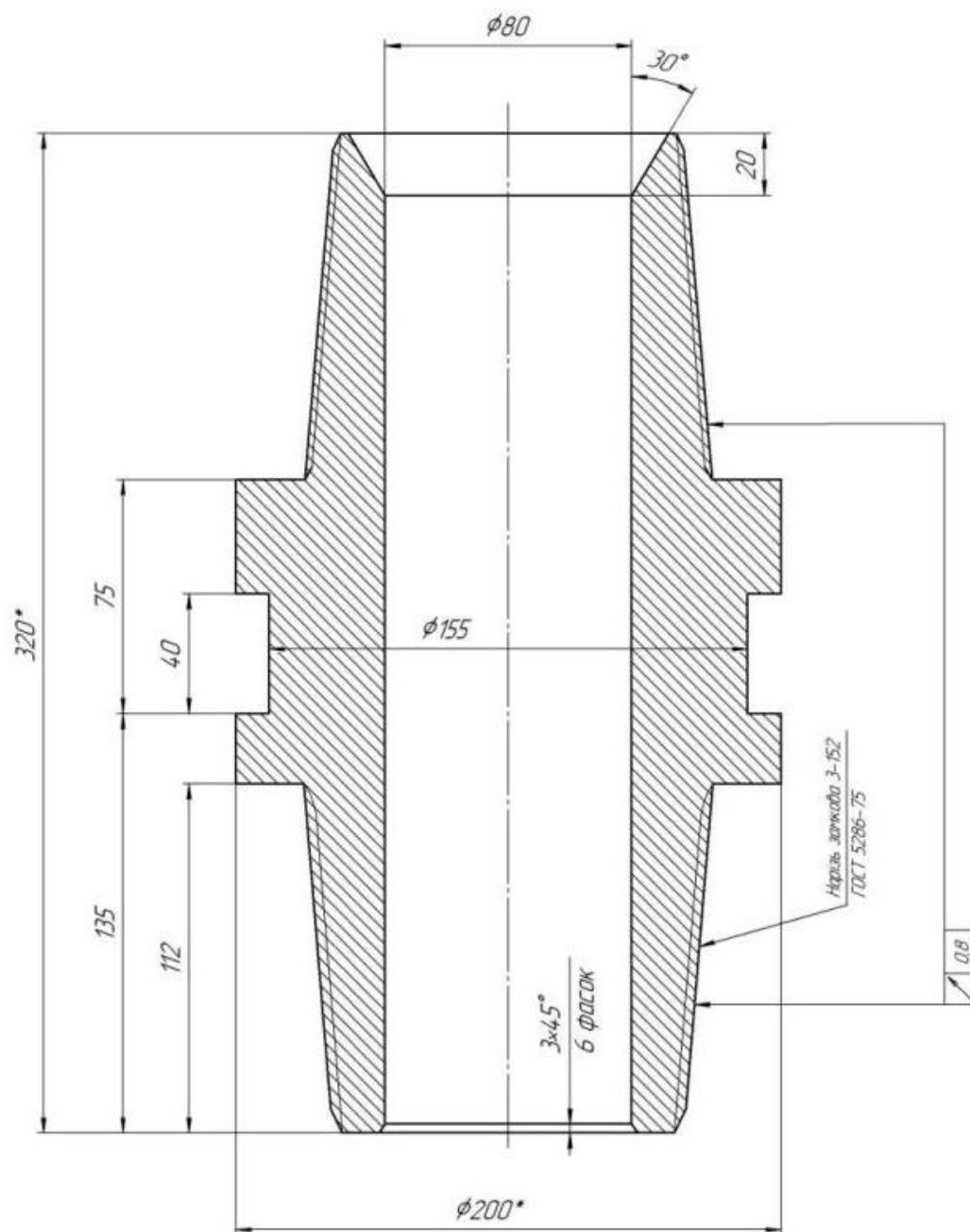


Рисунок Б.4 – Кресленик бурового долота ИСМ 14.4764.1001

Додаток В

Результати моделювання напружено-деформованого стану долота

Таблиця В.1 – Узагальнені дані щодо величин напружень і деформацій для кожного блоку під час здійснення зварювання

Блок	Загальні деформації, $m \cdot 10^{-4}$			Напруження, $Pa \cdot 10^9$			Деформації у радіальному напрямку, $m \cdot 10^{-4}$		
	Спосіб 1	Спосіб 2	Спосіб 3	Спосіб 1	Спосіб 2	Спосіб 3	Спосіб 1	Спосіб 2	Спосіб 3
Перший шов									
1	0.50577	0.949	0.875	4.047	4.51	4.24	0.42147	0.6045	0.344
5	1.1622	1.20	1.64	4.2894	4.17	4.53	0.76096	0.943	0.834
10	1.5675	1.25	1.46	4.2958	4.16	4.33	0.83196	0.859	0.841
15	1.752	1.32	1.40	3.9918	4.14	4.33	0.73224	0.814	0.898
20	1.1691	1.50	1.24	4.3648	4.66	4.36	0.8208	0.765	0.844
25	1.4837	1.98	1.49	5.6135	4.32	5.64	1.1617	0.666	0.117
Другий шов									
30	0.77485	1.01	0.775	2.9709	3.555	3.1	0.64818	0.435	0.645
35	1.1165	1.36	1.13	4.0003	4.03	3.85	0.89455	0.836	0.102
40	1.4679	1.46	1.20	3.9172	4.04	3.92	0.81733	1.11	0.975
45	1.1203	1.40	1.37	6.9122	3.93	4.79	0.76949	1.01	1.00
50	1.2812	1.26	1.54	3.9141	3.90	4.14	0.92652	0.967	0.869

Таблиця Б.2– Напруження та деформації у розглянутих точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей зварювання

Точка на лопаті	Загальні деформації, $\text{м}\cdot 10^{-4}$			Напруження, $\text{Па}\cdot 10^9$			Деформації у радіальному напрямку, $\text{м}\cdot 10^{-4}$		
	Спосіб 1	Спосіб 2	Спосіб 3	Спосіб 1	Спосіб 2	Спосіб 3	Спосіб 1	Спосіб 2	Спосіб 3
1	1.99	4.82	5.175	4.8	5.54	5.16	2.11	5.17	4.61
2	0.81	5.14	4.75	4.1	5.03	4.26	0.05	4.75	4.91
3	1.53	4.56	4.14	4.3	4.69	4.75	1.2	4.14	4.4
4	2.41	4.03	3.02	5.1	5.58	5.29	2.28	3.02	4
5	2.6	3.37	3.015	4.8	4.8	5	2.52	3.01	3.15
6	2.4	2.8	2.67	5.4	4.7	5.6	2.5	2.67	2.8

Таблиця В.3 – Напруження та деформації у розглянутих точках зварного шва після охолодження протягом 30 с

Точка на зварному шві	Загальні деформації, $\text{м} \cdot 10^{-4}$			Напруження, $\text{Па} \cdot 10^9$			Деформації у радіальному напрямку, $\text{м} \cdot 10^{-4}$		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
1	2.05	5.84	5.21	5.11	6.10	6.13	2.15	5.74	4.72
2	0.89	6.04	5.21	4.34	5.37	4.94	1.2	5.45	4.97
3	1.76	4.67	4.28	4.52	5.03	5.12	0.6	4.94	4.45
4	2.69	4.44	3.23	5.42	6.35	5.82	1.9	3.48	4.31
5	2.94	3.51	3.53	5.54	5.40	5.40	2.41	3.11	3.25
6	2.45	2.88	2.72	6.37	4.92	5.77	2.52	2.97	2.99

Результати вимірювань деформацій деталей у конічному нарізевому з'єднанні

Таблиця Д.1 – Результати вимірювань деформацій деталей у конічному нарізевому з'єднанні

Крок нарізі / Шорсткість	Ra=0,63 мкм	Ra=1,6 мкм	Ra=3,2 мкм	Величина середніх деформацій, отримана засобами СЕ-моделювання для нарізі із Ra=3,2 мкм, $\times 10^{-5}$ мм	Відношення результатів експерименту до результатів моделювання
p=4,233 мм					
Сенсорна група 1	1,413	1,455	1,497		
Сенсорна група 2	1,303	1,342	1,381		
Сенсорна група 3	1,283	1,321	1,360		
Сенсорна група 4	1,649	1,698	1,748		
Сенсорна група 5	7,065	7,277	7,489	6,77	1,106
Сенсорна група 6	6,516	6,715	6,907	6,77	1,020
Сенсорна група 7	6,4167	6,601	6,801	6,77	1,004
Сенсорна група 8	8,246	8,493	8,741	6,77	1,291
p=5,080 мм					
Сенсорна група 1	0,008	0,008	0,009		
Сенсорна група 2	0,038	0,040	0,043		
Сенсорна група 3	0,190	0,200	0,217		
Сенсорна група 4	0,951	0,998	1,084		
Сенсорна група 5	4,755	4,992	5,420	5,187	1,045
Сенсорна група 6	4,385	4,604	4,999	5,187	0,964
Сенсорна група 7	4,318	4,534	4,923	5,187	0,949
Сенсорна група 8	5,549	5,827	6,326	5,187	1,220
p=6,390 мм					
Сенсорна група 1	0,739	0,775	0,894		
Сенсорна група 2	0,681	0,715	0,824		
Сенсорна група 3	0,671	0,704	0,812		
Сенсорна група 4	0,862	0,905	1,043		
Сенсорна група 5	3,693	3,877	4,468	4,187	1,067
Сенсорна група 6	3,406	3,576	4,121	4,187	0,984
Сенсорна група 7	3,354	3,521	4,058	4,187	0,969
Сенсорна група 8	4,310	4,525	5,215	4,187	1,246

Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ТзОВ НТФ «Інтербур» ЛТД



М. С. Білецький

«07» травня 2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
Пригоровської Тетяни Олексіївни, представленої
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

1. Детальна назва заходу, який впроваджується. Технологічний процес виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії ИСМ.
2. Тема, завдання, наукове дослідження, результатом яких є розроблений захід. Дисертаційна робота Пригоровської Т.О. «Технологічні основи забезпечення якості бурових доліт ріжуче-стираючої дії».
3. Назва підприємства, де зроблено впровадження. Товариство з обмеженою відповідальністю «Інтербур», м. Івано-Франківськ.
4. Зміст впровадження.
 - 4.1. Технологічний процес виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії:
 - 4.2. Контрольні пристрої для вимірювання биття долота.
 - 4.3. Модернізований інструмент для фрикційного зміцнення конічної замкової нарізі.
5. Основні результати впровадження. Технологія виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії дає змогу підвищити якість бурових доліт. Економічний ефект від впровадження у виробництво нового алмазного долота моделі ИСМ забезпечується за рахунок більшого ресурсу роботи вказаного бурового долота порівно із серійними, а також зниження експлуатаційних затрат споживачем на виконання спуско-піднімальних робіт під час буріння свердловин на нафту, газ та воду. Річний економічний ефект становить 881752,9 грн.

Здобувачка

Пригоровська Т. О.

Науковий керівник

Роп'як Л. Я.

Додаток К

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТЗОВ НТФ «Інтербур» ЛТД



М. С. Білецький

« 07 » травня 2020 р.

Річний економічний ефект у сумі 881752,9 грн

РОЗРАХУНОК

економічного ефекту від впровадження
результатів дисертаційного дослідження
Пригоровської Тетяни Олексіївни

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ
БУРОВИХ ДОЛІТ РІЖУЧЕ-СТИРАЮЧОЇ ДІЇ**

05.02.08—технологія машинобудування

Розрахунок річного економічного ефекту від заміни серійного бурового долота моделі ИСМ 214,3 на нове бурове долото, виготовлене за розробленою технологією, з покращеними технічними характеристиками проводили згідно рекомендацій:

1. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: ВНИИПИ, 1986. – 52 с.

2. Визначення прибутку від використання об'єктів промислової власності: методичні рекомендації. – К., 1997. – 24 с.

Економічний ефект від впровадження у виробництво нового алмазного долота моделі забезпечується за рахунок підвищення точності виготовлення, а також більшого ресурсу роботи вказаного бурового долота порівняно із серійними, а також зниження експлуатаційних затрат споживачем на виконання спуско-піднімальних робіт під час буріння свердловин новим долотом.

Приведені затрати на виготовлення базового і нового виробу (представляють собою суму собівартості та нормативного прибутку) визначають за формулою:

$$З = C + E_n K, \quad (1)$$

де C – собівартість виготовлення виробу, грн.;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, дорівнює 0,15;

K – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди, грн.

Розрахунок річного економічного ефекту від виробництва та використання нових або вдосконалених предметів праці (матеріали, сировина, паливо, запасні частини), а також засоби праці з терміном служби менше одного року проводять за формулою

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{Y_1}{Y_2} + \frac{(I_1' - I_2') - E_n (K_2' - K_1')}{Y_2} - 3_2 \right] A_2, \quad (2)$$

де 3_1 і 3_2 – приведені затрати одиниці відповідно базового і нового бурового долота, грн;

Y_1 і Y_2 – питомі витрати відповідно для бурового долота в розрахунку на одиницю продукції (роботи), яку виробляє споживач, в натуральних одиницях;

I_1 і I_2 – затрати на одиницю продукції (роботи), яку виробляє споживач при використанні базового і нового предмету праці без урахування їх вартості, грн;

K_1' і K_2' – супутні капітальні вкладення споживача при використанні ним базового і нового предмету праці в розрахунку на одиницю продукції (роботи), яку виробляють із застосуванням нового предмета праці, грн;

A_2 – річний обсяг виробництва нового предмета праці в розрахунковому році, в натуральних одиницях, шт.

Індекси 1 і 2 відносять до базового і нового варіанту виготовлення виробів, відповідно.

Враховуючи, що супутні капітальні вкладення під час буріння свердловин новим буровим долотом відсутні, то формула (2) набуде вигляду

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{Y_1}{Y_2} + \frac{(I'_1 - I'_2)}{Y_2} - 3_2 \right] A_2. \quad (3)$$

Вихідні дані для розрахунку річного економічного ефекту наведені в таблиці.

Таблиця

Вихідні дані для розрахунку річного економічного ефекту від впровадження нового бурового долота

Назва показників	Одиниця вимірювання	Порівнювані варіанти бурового долота	
		базовий	новий
Річний випуск продукції	шт	200	200
Собівартість виготовлення	грн	12460	12900
Питомі капітальні вкладення	грн	5100	10200
Ресурс роботи	м	228	290
Затрати на одиницю продукції, яку виробляє споживач	грн/м	2470	2468

Із порівнювальних даних, які наведені в таблиці, видно, що впровадження нового бурового долота, дозволяє збільшити його ресурс роботи у 1,27 рази порівняно із серійною.

Підставивши числові значення із таблиці у формулу (1) отримаємо:

$$3_1 = C_1 + E_{\text{н}} K_1 = 12460 + 0,15 \cdot 5100 = 13225 \text{ грн};$$

$$3_2 = C_2 + E_{\text{н}} K_2 = 12900 + 0,15 \cdot 10200 = 14430 \text{ грн};$$

Умовні питомі витрати бурового долота базового Y_1 та нового бурового долота Y_2 на одиницю роботи відповідно становлять:

$$Y_1 = \frac{1}{t_1} = \frac{1}{228} \quad Y_2 = \frac{1}{t_2} = \frac{1}{290}$$

Підставивши наведені вище числові дані у формулу (3) отримаємо величину річного економічного ефекту від впровадження нового бурового долота

$$\mathcal{E} = \left[13225 \cdot \frac{\frac{1}{228}}{\frac{1}{290}} + \frac{2470 - 2468}{\frac{1}{290}} - 14430 \right] \cdot 300 = 881752,9 \text{ грн.}$$

Таким чином, за рахунок підвищення ресурсу роботи бурового долота очікуваний річний економічний ефект становить 881752,9 грн.

Здобувачка



Пригоровська Т.О.

Додаток Л

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,
д.т.н., проф.

І. І. Чудик



«09» червня 2020 р.

АКТ

про використання результатів науково-дослідницьких робіт

Результати дисертаційного дослідження Пригоровської Тетяни Олексіївни на тему «Технологічне забезпечення якості виготовлення бурових доліт ріжуче-стираючої дії» використовуються в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу на кафедрах «Комп'ютеризованого машинобудування» та «Зварювання» під час підготовки бакалаврів, магістрів та докторів філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка при вивченні дисциплін: «Чисельні методи обробки експериментальних даних», «Технологія машинобудування», «Методи оцінки і технології керування якістю виробів», «Основи математичного моделювання» та «Технології зміцнення та відновлення деталей і конструкцій». Впровадження результатів досліджень у навчальний процес сприяє ширшому ознайомленню студентів та аспірантів із сучасними технологічними процесами зміцнення деталей машин та складання виробів, що забезпечує підвищення теоретичного та практичного рівня їх підготовки.

Завідувач кафедри
комп'ютеризованого
машинобудування

Панчук В. Г.

Завідувач кафедри
зварювання

Шлапак Л. С.

Професор кафедри
комп'ютеризованого
машинобудування

Роп'як Л. Я.

Здобувачка

Пригоровська Т. О.