

ВПЛИВ ВИКОНАННЯ ПРОСТОРОВИХ ЗВАРНИХ ШВІВ НА ТОЧНІСТЬ РОБОЧИХ РОЗМІРІВ БУРОВИХ ДОЛІТ РІЖУЧЕ–СТИРАЮЧОГО ТИПУ

Л. Я. Роп'як, В. С. Витвицький, Т. О. Пригоровська, О. В. Пригоровський

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: t.pryhorovska@gmail.com

Розглядається проблема забезпечення точності виготовлення доліт ріжуче-стираючої дії. На основі теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання і експериментальних випробувань, обґрунтовано схеми виконання зварних швів для Г-подібних деталей на прикладі приварювання лопатей до корпусу долота. Розроблено рекомендації щодо виконання зварних швів для Г-подібних деталей. На основі пружно-пластичного аналізу теоретично обґрунтовано заходи зі зменшення теплових поздовжніх і поперечних внутрішніх деформацій, спричинених джерелом тепла, яке рухається уздовж зварного шва. Розроблено імітаційні моделі для оцінювання впливу теплової дії та спричинених нею під час виконання зварного шва за різними схемами залишкових деформацій на точність робочого діаметра долота. На основі розроблених моделей показано, що теплові деформації, які виникають під час виконання просторових криволінійних зварних швів, є значними і стосуються переважно лопатей, а не корпусу (тобто менш масивних деталей), мають місце вигини, повороти та перекося лопатей. Скінченно-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 лопаті за схемою виконання шва з місця спряження циліндричної та конічної поверхонь. Результати, отримані за допомогою імітаційних моделей, підтверджено експериментальними даними, що дозволило обґрунтувати раціональну схему приварювання лопатей до корпусу долота ріжуче-стираючої дії, що базується на методі зворотних деформацій, для забезпечення точності виробу загалом. Запропоновано рекомендації щодо послідовності виконання просторових криволінійних зварних швів виробів, технологія виготовлення яких передбачає приварювання декількох елементів, які дозволяють підвищити точність їх виготовлення завдяки мінімізації теплової навантаженості та залишкових теплових деформацій деталей з'єднання.

Ключові слова: PDC долота, скінченно-елементні дослідження, зварювання, зварний шов, напружено-деформований стан, точність.

Рассматривается проблема обеспечения точности изготовления долот режущее-стирающего действия. На основе теоретических исследований, компьютерного моделирования и экспериментальных испытаний, обоснованы схемы выполнения сварочных швов для Г-образных деталей на примере приварки лопастей к корпусу долота. Разработаны рекомендации по выполнению сварочных швов для Г-образных деталей. На основе упруго-пластического анализа теоретически обоснованы меры по уменьшению тепловых продольных и поперечных внутренних деформаций, вызванных источником тепла, которое движется вдоль сварного шва. Разработаны имитационные модели для оценки влияния теплового воздействия и вызванных ним при выполнении сварного шва по различным схемам остаточных деформаций на точность внешнего диаметра долота. На основе разработанных моделей показано, что тепловые деформации, возникающие при выполнении пространственных криволинейных сварочных швов, являются значительными и касаются, в основном лопатей, а не корпуса (т.е. менее массивных деталей), имеют место изгибы, повороты и перекося лопастей. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния заготовки корпуса долота с приваренными лопастями проводилось последовательно в среде ANSYS (академическая лицензия) – Transient Thermal (определение тепловой нагрузки) и Static Structural (определение деформаций и напряжений). Установлено, что минимальные деформации лопасти наблюдаются при выполнении второго сварного шва той же лопасти по схеме с точки сопряжения цилиндрической и конической поверхностей. Результаты, полученные с помощью имитационных моделей, подтверждены экспериментальными данными, что позволило обосновать рациональную схему приваривания лопастей к корпусу долота режущее-стирающего действия, который основан на методе обратных деформаций, для обеспечения точности изделия в целом. Предложены рекомендации относительно последовательности выполнения пространственных криволинейных сварочных швов изделий, технология изготовления которых предусматривает

приваривание нескольких элементов, что позволяют повысить точность их изготовления благодаря минимизации тепловой нагруженности и остаточных тепловых деформаций деталей соединения.

Ключевые слова: PDC долота, конечно-элементные исследования, сварка, сварной шов, напряженно-деформированное состояние, точность.

The article considers the problem of PDC drill bit quality provided during manufacturing. Schemes of welded joint making are theoretically substantiated based on theoretical research, computer modelling and experimental tests for L-shaped details like PDC drill bit blades. The recommendations to provide welded joints for L-shaped details are developed. Based on the elastic-plastic analysis, means to reduce thermal longitudinal and transverse internal deformations caused by a heat source moving along the weld are theoretically substantiated. Simulation models have been developed to assess the influence of welding thermal action and residual deformations on accuracy of drill bit external diameter for different schemes of welding. Based on the developed models, it is shown that the thermal welding deformations of spatial curved welds are significant, and relate mainly to the blades rather than the body (i.e. less massive parts); there are bends, turns and skews of the blades. Finite-element simulation of the bit body – welded blades stress-strain state was performed sequentially in the environment ANSYS (academic license) – Transient Thermal (determination of heat load) and Static Structural (determination of deformations and stresses). It is established that the smallest deformations of the blade are observed for the welding scheme, which envisages making the weld from the point of cylindrical and ellipse surface pairing. The results obtained by simulations were confirmed by experimental data and this made possible substitution for a rational scheme of drill bit body – blade based on the method of reverse deformation, to ensure the accuracy of the product as a whole. Recommendations for weld joint making for spatial curved welds of complex products with requirements to their accuracy allow increasing the accuracy of the technology by minimizing the thermal load and residual thermal deformation of the joints.

Keywords: PDC bits, finite element studies, welding, weld, stress-strain state, accuracy.

Вступ

Сучасні технології вимагають використання високоточного інструменту. Особливо актуальним це твердження є щодо буріння і породоруйнівного інструменту (зокрема доліт типу PDC – *polycrystalline diamond compact*), виготовлення яких передбачає використання різномірних матеріалів і складних технологій.

Долота ріжуче-стираючої дії (типу PDC) мають високу вартість, працюють за умов високих навантажень та крутних моментів у агресивних середовищах, тому висувуються високі вимоги до якості їх виготовлення, забезпечення високої довговічності та заданих показників буріння. Якість виготовлення доліт зазначеного типу українських суттєво нижча, ніж провідних світових виробників породоруйнівного інструменту. Саме тому удосконалення технологічних та конструкторських методів забезпечення якості породоруйнівного інструменту є актуальним завданням.

Одним із основних робочих розмірів доліт типу PDC є зовнішній діаметр. Причому втрата долотом точності зовнішнього діаметра вимагає припинення буріння та заміни долота, що збільшує собівартість буріння за рахунок високої вартості спуско-підіймальних робіт. Відповідно до вимог API допуск на зовнішній діаметр доліт від 85,76 до 349,2 мм включно становить 0,794 мм при граничних відхиленнях $e_s = 0$ мм, $e_i = -794$ мкм. Технологія виготовлення вітчизняних доліт типу PDC передбачає приварювання лопатей до корпусу, що викли-

кає деформацію останніх. Особливість зварного шва полягає у необхідності його прокладання прямолінійною горизонтальною ділянкою на передній поверхні долота, у переході до криво-лінійної ділянки на його бічній поверхні, а потім продовженні шва на прямолінійній бічній ділянці долота. Криво-лінійність та просторове розміщення поверхні, по якій здійснюється зварний шов, є додатковим фактором утворення і розвитку деформацій і напружень в зоні термічного впливу. При цьому має значення зона виникнення максимальних теплових деформацій – викривлення Г-подібної лопаті в місці переходу від горизонтальної до вертикальної ділянки. Після охолодження внаслідок залишкової теплової деформації формується таке відхилення зовнішнього діаметру доліт із привареними лопатями, що перевищує допуск і призводить до виникнення браку, для усунення якого необхідно застосовувати додаткові технологічні операції.

У цій роботі розглядається питання технологічного забезпечення виготовлення доліт типу PDC шляхом удосконалення технології проведення зварювальних робіт. Розроблені рекомендації можуть бути використані для удосконалення технології зварювання масивних деталей із криво-лінійними поверхнями. Це особливо актуально для приварювання лопатей з елементами малої товщини порівняно із товстостінним корпусом долота. Обґрунтоване застосування методів запобігання та усунення зварювальних напружень і деформацій дає змогу

суттєво підвищити якість і надійність масивних деталей із привареними криволінійними меншими за товщиною елементами.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Сучасні уявлення про протікання зварювальних процесів, напружено-деформований стан виробів після зварювання формувалися на підставі експериментальних та аналітичних досліджень, проведених для переважно геометрично простих з'єднань або одновимірних зварних конструкцій. Аналітичні дослідження часто бувають наближеними через складність теплових процесів у деталях складної геометричної форми [1].

З метою регулювання та усунення зварювальних деформацій і напружень розроблено багато методів, ефективних в тому чи іншому випадку. Однією з основних принципів можливостей зменшення зварювальних деформацій і напружень є зниження пластичної деформації шляхом зміни довжини або ширини зони її поширення при нагріванні шляхом регулювання термічного впливу при зварюванні. Для цього застосовуються різні режими зварювання із урахуванням зменшення обсягу пластичного вкорочення, загальний або локальний підігрів деталей перед зварюванням та штучне тепловідведення від зони шва [2].

Сьогодні переважна більшість робіт із моделювання напружено-деформованого стану, що виникає під час зварювання, використовує скінченно-елементні дослідження та розглядає нескладні Т-подібні типи з'єднань [3, 4]. Розрахунки базуються на таких припущеннях механізмів та закономірностей формування і розвитку термодеформаційних процесів при зварюванні симетричних щодо осі шва стикових з'єднань [5, 6]:

- залишкові напруження зосереджуються уздовж зварного шва і є симетричними щодо середнього поперечного перерізу по довжині з'єднання;

- залишкові напруження у всіх поперечних перерізах є однаковими, оскільки саме з'єднання є симетричним і простим за геометричною формою;

- повні поздовжні деформації в розрахунковому перерізі на стадії нагрівання і охолодження, а також в будь-якому поперечному перерізі у залишковому стані визначаються відповідно до гіпотези плоских перерізів;

- залишкове поздовжнє укорочення з'єднання однаково по його ширині;

- механічні і теплофізичні властивості металу зварного з'єднання не залежать від температури;

- для зварних конструкцій з багатьма зварними швами на деформації впливає послідовність і напрямок зварювання;

- метал зварного з'єднання відповідає моделі ідеального пружно-пластичного тіла.

Окремі дослідники розглядають певні особливості напружено-деформованого стану виробів складних за конфігурацією та/або масивних чи тонких. Так, встановлено, що для масивних деталей доцільно використовувати різні типи елементів: для матеріалу зварного шва – 3D твердотільні елементи, а для решти складових – оболонкові елементи [7]. Загалом, застосування методу скінченних елементів для моделювання деформацій і усадки Т-подібного зварного шва дає високу узгодженість із експериментальними даними, причому деформаційні параметри доцільно використовувати для визначення поперечної усадки та поперечного вигину, тоді як силові параметри – для визначення поздовжньої усадки та поздовжнього вигину [8].

У роботі [1] досліджувався вплив технології виконання зварного шва (схем виконання зварного шва) на величини деформацій та залишкові напруження у деталях стикового з'єднання, зокрема досліджувалася величина кутового викривлення. Встановлено, що у разі великої довжини зварного шва, зменшення швидкості зварювання або поділу зварного шару на відповідну кількість блоків рівень кутових спотворень зменшується. Також встановлено, що викривлення зварного з'єднання V-пазу визначається параметрами числа проходів і геометрії канавки [3].

Поряд із тим, переважна більшість робіт присвячена питанням удосконалення математичних моделей, встановлення залежностей між окремими показниками процесу та параметрами напружено-деформованого стану виробів, тоді як питання технологічного забезпечення точності виробів із криволінійними просторовими зварними швами залишається відкритим.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Відповідно до стандартів IADC та ВНИ-ИБТ основним розміром, який визначає придатність до експлуатації доліт ріжуче-стираючої дії, є зовнішній діаметр [9, 10]. Перед початком буріння заміряють діаметр долота спеціальним калібрувальним кільцем, оскільки втрата точності діаметра долота є однією із причин вихо-

ду його із ладу і припинення буріння [11]. Технологія виготовлення доліт типу PDC передбачає встановлення Г-подібних лопатей із впаяними різцями у пази корпусу, а потім виконують два зварні шви (по обидва боки кожної лопаті). При цьому порядок виконання наступних зварних швів не регламентовано. При цьому в науковій літературі не виявлено робіт, де було обґрунтовано схему виконання зварних швів.

Метою роботи є підвищення точності виготовлення виробів із криволінійними просторовими зварними швами за рахунок мінімізації теплових похибок, які виникають під час зварювання, на прикладі приварювання лопатей до корпусів доліт.

Схема утворення теплових деформацій під час зварювання

Схему долота ріжуче-стираючої дії представлено на рисунку 1, відповідно до якого видно що зварний шов виконується по криволінійній поверхні. У такому випадку 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. Якщо величина напрямку була визначена правильно, то конструкція після зварювання не потребує коригування або буде мати невелике викривлення у допустимих межах.

Технологія виготовлення доліт типу PDC передбачає значні розміри зварних швів, для забезпечення надійного і міцного кріплення лопатей до корпусу. Великі розміри швів викликають значні деформації долота під час приварювання лопатей. Як вже було описано вище, криволінійність поверхні, по якій здійснюється зварний шов, є додатковим фактором утворення і розвитку деформацій та напружень у зоні термічного впливу.

На рисунку 2 показана схема утворення теплових деформацій корпусу долота із привареними лопатями. Під час приварювання лопаті долота двостороннім швом спостерігається укорочення, прогин у і вигин полиць (грибовидність).

Для визначення поздовжніх і поперечних внутрішніх деформацій використано пружно-пластичний аналіз. Аналогічно до підходу, запропонованого у [8], де джерело тепла рухалося уздовж зварного шва, величини залишкових

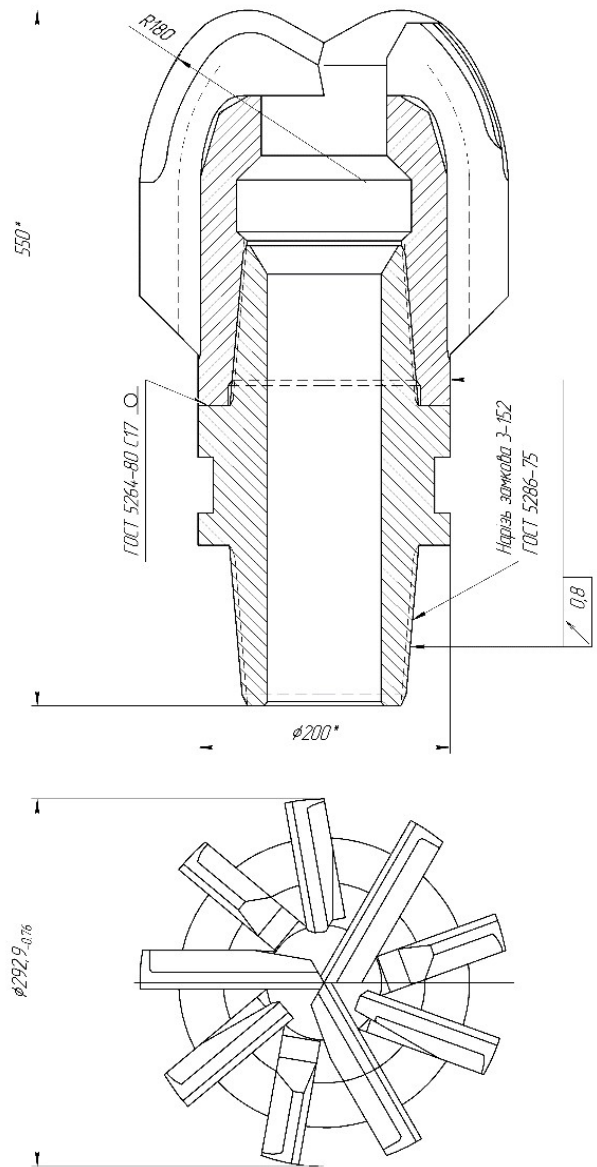
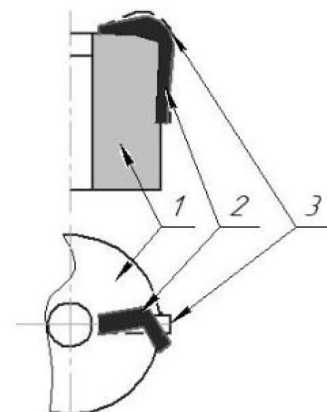


Рисунок 1 – Схема зварного PDC долота



1 – корпус, 2 – деформована лопать, 3 – недеформована лопать

Рисунок 2 – Схема утворення теплової деформації лопаті

внутрішніх відносних деформацій $\varepsilon_{\text{inherent}}$ ви-значалися за формулою

$$\varepsilon_{\text{total}} - \varepsilon_{\text{elastic}} = \varepsilon_{\text{thermal}} + \varepsilon_{\text{creep}} + \varepsilon_{\text{plastic}} = \varepsilon_{\text{inherent}}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{\text{total}}$ – загальні деформації;

$\varepsilon_{\text{elastic}}$ – пружні деформації;

$\varepsilon_{\text{thermal}}$ – деформації, спричинені тепловим потоком;

$\varepsilon_{\text{creep}}$ – деформації повзучості;

$\varepsilon_{\text{plastic}}$ – пластичні деформації.

Після охолодження пластичні деформації нівелюються, також нехтуємо деформаціями повзучості та деформаціями, спричиненими тепловим потоком [8]. Тоді отримуємо

$$\varepsilon_{\text{total}} - \varepsilon_{\text{elastic}} = \varepsilon_{\text{plastic}} = \varepsilon_{\text{inherent}}. \quad (2)$$

Координатні осі орієнтовані таким чином: вісь Z спрямована вертикально для всіх ділянок; вісь X спрямована уздовж зварного шва, вісь Y спрямована по товщині зварного шва.

Безпосередньо в елементах зварного з'єднання виникають поздовжні і поперечні залишкові пластичні деформації, що створюють поздовжню і поперечну усадку, а також вигин лопаті. Вважаючи, що кривизна перехідної ділянки є незначною, визначаємо величину абсолютних деформацій для кожної ділянки:

$$\delta z = \int_0^l \varepsilon_z^* \cdot dA, \quad \delta x = \int_0^l \varepsilon_x^* \cdot dA, \quad (3)$$

$$\theta z = \int_0^l \varepsilon_z^* \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) dA, \quad \theta x = \int_0^l \varepsilon_x^* \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) dA,$$

де δz і δx – усадка (укорочення) відповідно до напрямку орієнтації осей (поздовжня і поперечна для горизонтальної ділянки та поперечна і поздовжня для вертикальних (криволінійної і прямолінійної) ділянок відповідно);

θz і θx – вигин у напрямку орієнтації осей (поздовжній і поперечний для горизонтальної ділянки та поперечний і поздовжній для вертикальних (криволінійної і прямолінійної) ділянок відповідно);

ε_z^* і ε_x^* – внутрішні деформації відповідно до напрямку орієнтації осей (поздовжня і поперечна для горизонтальної ділянки та поперечна і поздовжня для вертикальних (криволінійної і прямолінійної) ділянок відповідно);

h – товщина зварного шва;

A – площа поперечного перерізу, перпендикулярного до осі шва;

l – довжина зварного шва.

Приймаючи форму шва, близькою до прямокутного трикутника, отримуємо:

$$\delta z = \int_0^l \varepsilon_z^* \cdot d\left(\frac{l^2}{2}\right) = \int_0^l \varepsilon_z^* \cdot l \cdot dl,$$

$$\delta x = \int_0^l \varepsilon_x^* \cdot d\left(\frac{l^2}{2}\right) = \int_0^l \varepsilon_x^* \cdot l \cdot dl,$$

$$\theta z = \int_0^l \varepsilon_z^* \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) d\left(\frac{l^2}{2}\right) = \int_0^l \varepsilon_z^* \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) \cdot l \cdot dl,$$

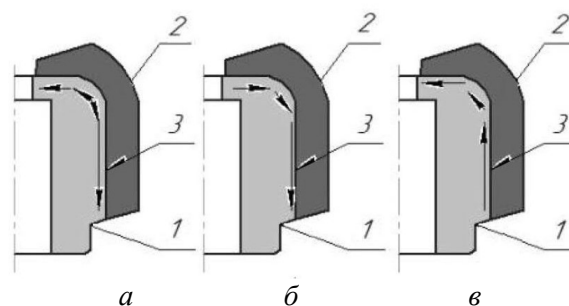
$$\theta x = \int_0^l \varepsilon_x^* \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) dA = d\left(\frac{l^2}{2}\right). \quad (4)$$

Відповідно, величина деформації зовнішнього діаметра долота в радіальному напрямку становить

$$\delta \rho = \sqrt{(\delta z^*)^2 + (\delta x^*)^2}. \quad (5)$$

Таким чином, зменшення деформації зовнішнього діаметра можливо досягти шляхом вибору оптимальної точки початку зварювання. Задача може бути вирішена за рахунок вирівнювання напружень та зменшення величини деформацій лопатей у небезпечних перерізах.

Для обґрунтування технології складання заготовки корпусу долота із лопатями зварюванням досліджено наступні схеми виконання зварних швів (рис. 3):



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

Рисунок 3 – Схеми формування зварних швів

1 – зварний шов формують, починаючи із місця спрєження 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 («зсередини») (рис. 3 а);

2 – зварний шов формують, починаючи з точки спрєження коротшої частини лопаті із еліпсоїдною поверхнею корпусу долота, а потім по циліндричній поверхні до кінця довшої частини лопаті («згори-вниз») (рис. 3 б);

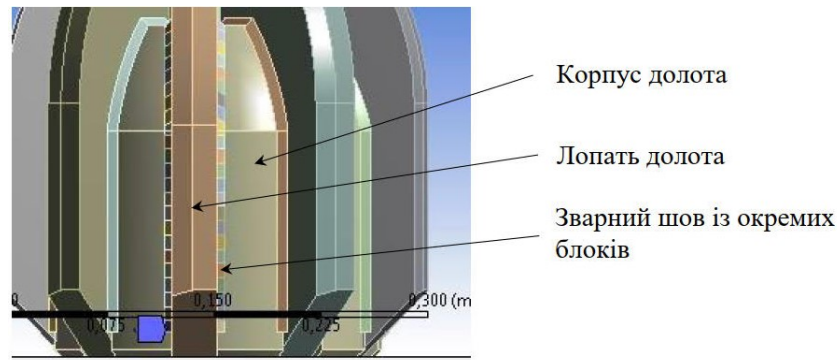


Рисунок 4 – Схема моделювання зварних швів приварювання лопаті до корпусу долота

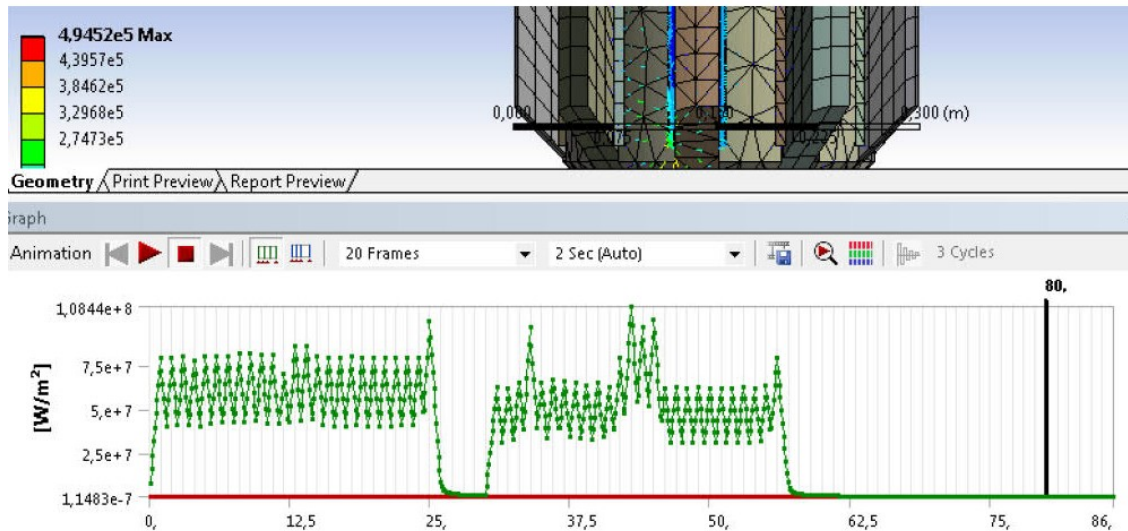


Рисунок 5 – Схема моделювання теплового потоку на елементах зварного шва під час приварювання лопатей

3 – 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 («знизу-вгору») (рис. 3 в).

Дослідження здійснювались в чотири 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 другим зварним швом тієї самої лопаті;
- на третьому етапі було проведено експериментальні дослідження впливу послідовності виконання зварних швів на точність виготовлення бурових доліт та порівняння із скінченно-елементними даними;
- на четвертому етапі розроблено рекомендації щодо послідовності здійснення просторових криволінійних зварних швів для виробів, технологія виготовлення яких передбачає приварювання декількох елементів.

Скінченно-елементне дослідження впливу послідовності виконання зварних швів на величину деформацій

Для моделювання зварного шва використано набір із 50 блоків (по 25 з кожного боку лопаті), причому перший блок був розмішений на передній ділянці долота, а останній – в кінці зварного шва (рис. 4). Виконання зварного шва змодельовано послідовністю дії джерела тепла на відповідний його блок.

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 $50 \text{ Вт/м}^2\text{с}$. Після виконання зварного шва було здійснено охолодження упродовж 30 с до температури навколишнього середовища у 22°C . Схема реалізації теплового потоку до елементів зварного шва представлена на рис. 5. У середовищі

Таблиця 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 2 – Механічні властивості сталі ANSI 310

Границя міцності, МПа	Границя плинності, МПа	Твердість за Бріннелем, НВ	Втомна міцність, МПа	Відносне видовження	Густина, г/см ³
515	205	172	260	40	7,84

модуля Transient Thermal аналізували розподіл температури у тілі долота та лопатей, а також теплові потоки, спричинені її дією під час зварювання. У подальшому результати розрахунків розподілу температури передавалися до модуля 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. 1 і табл. 2). Аналог – сталь 20Х23Н18 ГОСТ 5632-72.

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. 6.

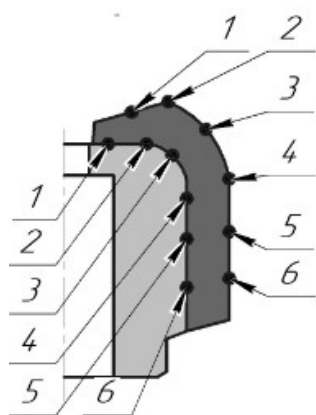


Рисунок 6 – Розміщення точок на заготовці долота, де вимірювали деформації (точки на зовнішній поверхні – у деформації у радіальному напрямку, точки на зварному шві – деформації зварного шва)

Результати моделювання зварного шва після виконання двох зварювань за схемою 1 показані на рисунках 7-9.

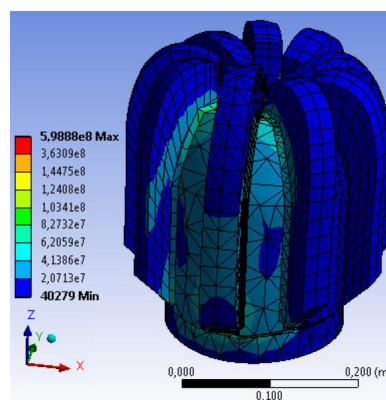


Рисунок 7 – Розподіл напружень у зварному шві після виконання двох зварних швів за схемою 1

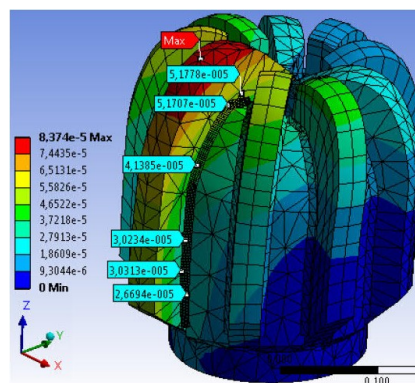


Рисунок 8 – Загальні деформації зварного шва після виконання двох зварних швів за схемою 1

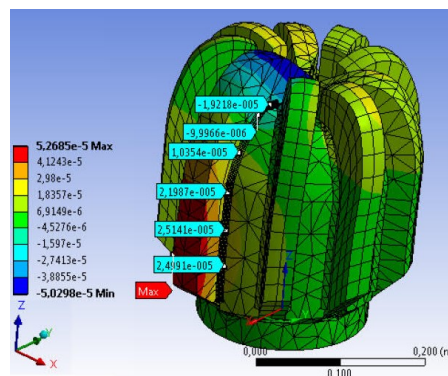


Рисунок 9 – Радіальні деформації зварного шва після виконання двох зварних швів за схемою 1

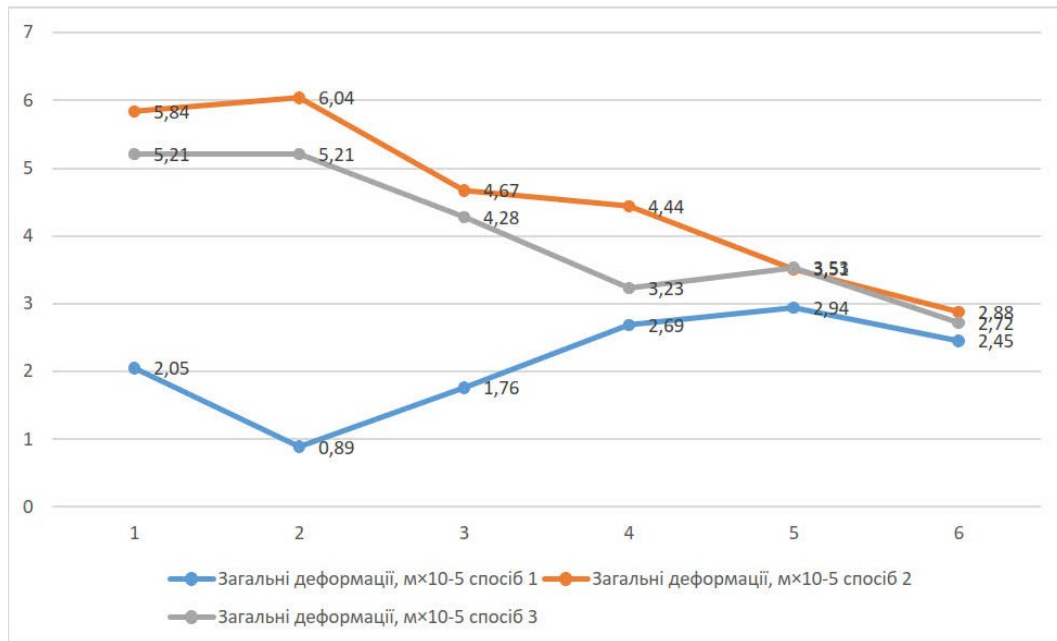


Рисунок 10 – Загальні деформації у точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для різних схем виконання зварних швів

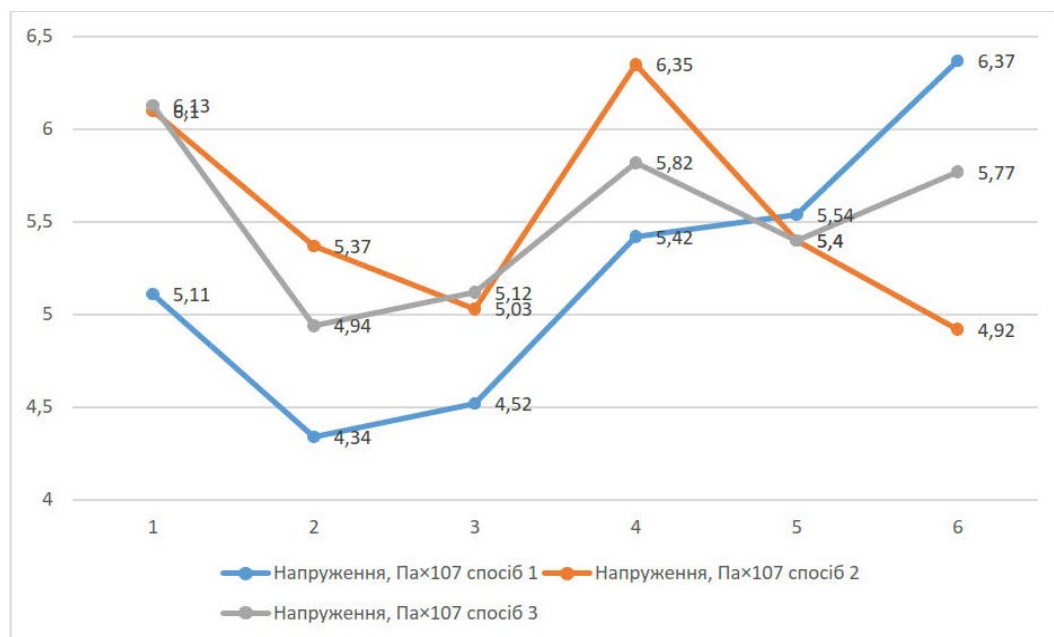


Рисунок 11 – Напруження у точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для різних схем виконання зварних швів

На рисунку 10 показано загальні деформації в розглянутих точках лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей зварювання. На рис. 11 показані напруження у розглянутих точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей зварювання.

На рис. 12 показані радіальні деформації в розглянутих точках лопаті після охолодження протягом 30 с для послідовностей зварювання. За результатами моделювання встановлено, що після виконання першого зварного шва для од-

нієї довільно вибраної лопаті за першою схемою спостерігаються мінімальні значення деформацій та напружень у небезпечному перерізі (точка 2). Максимальні значення напружень і деформацій спостерігаються в точці 3 (нижній кінець лопаті). Для другої схеми мінімальні напруження і деформації спостерігаються у 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 точ-

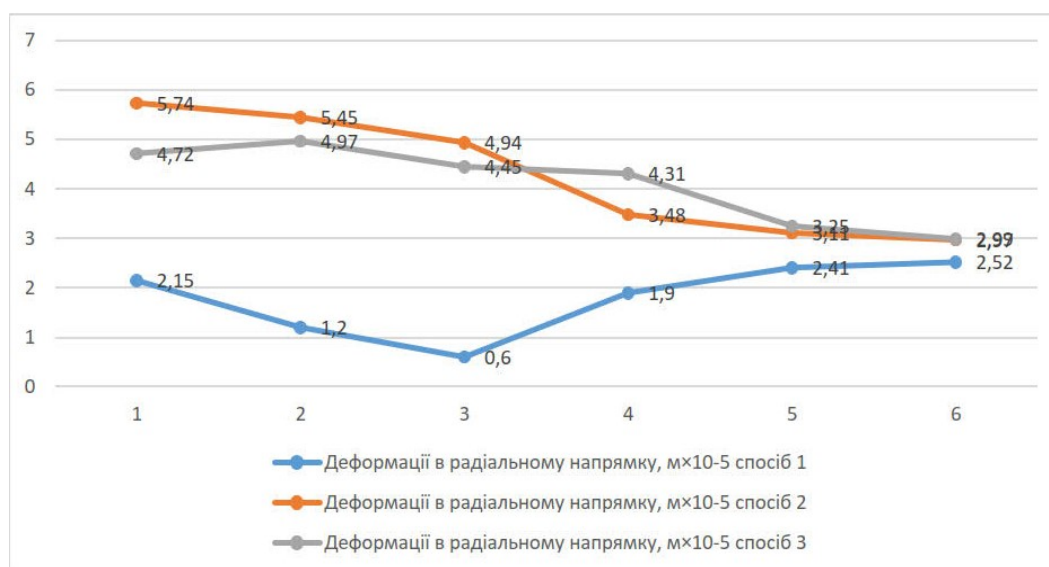


Рисунок 12 – Радіальні деформації у точках на лопаті після охолодження протягом 30 с для різних схем виконання зварних швів

ці 3. Напруження і деформації у точці 1 приблизно в 1,5 рази вищі за аналогічні показники в точці 2.

Другий етап досліджень був виконаний на базі результатів, отриманих для першої схеми виконання зварного шва, оскільки саме така схема забезпечує мінімальні деформації (тобто мінімальний внесок до величини допуску) у точці 2. В цьому випадку аналогічним чином прикладали теплове навантаження і визначали деформації та напруження лопатей. Встановлено, що при виконанні другого зварного шва тієї самої лопаті 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, прилеглої до точки 6.

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

Результати скінченно-елементного моделювання були підтвержені експериментально під час виконання зварних швів за наведеними вище схемами. Для всіх трьох схем застосовувався метод одноступінчастого проектування [14],

який передбачає корегування на кожній технологічній стадії складання [15, 16]. В якості прототипу було вибрано долото моделі ИСМ 14.4764.1001. Номінальний діаметр корпусу із привареними лопатями становив 292,9 мм, допуск – $0 \dots +0,794$ мм.

За результатами вимірювання зовнішніх діаметрів встановлено, що:

- для схеми 1: середній фактичний діаметр становив 293,219 мм, максимальне фактичне відхилення – 0,446 мм, мінімальне – 0,259 мм, середня величина відхилення – 0,319 мм, перевищення допуску не спостерігалось;

- для схеми 2: середній фактичний діаметр становив 293,69 мм, максимальне фактичне відхилення – 0,886 мм, мінімальне – 0,691 мм, середня величина відхилення – 0,79 мм; перевищення допуску спостерігалось у 4 з 10 випадків;

- для схеми 3: середній фактичний діаметр становив 293,676 мм, максимальне фактичне відхилення – 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 підстави зробити висновок про те, що схема 1 (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 деформацій зовнішнього діаметру долота.

Таким чином, за результатами досліджень, для зварювання криволінійних просторових зварних швів розроблено такі рекомендації:

– виконання зварного шва просторової форми необхідно починати із точки максимально наближеної до перерізу, точність якого має бути забезпечена;

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

– для забезпечення компенсації відхилення зовнішнього діаметра вибирати для приварювання лопать, що максимально віддалена від попередньо привареної.

Висновки

Досліджено та удосконалено технологію складання корпусу долота ріжуче-стираючої дії із лопатями зварюванням. Визначено схему виконання зварних швів, яка б забезпечувала найменші деформації лопатей долота.

Встановлено, що найменші деформації в перерізі, точність якого має бути забезпечена, спостерігаються для такої схеми виконання зварного шва: 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 («з середини»). Експериментально підтверджено, що така схема виконання зварного шва дає змогу отримати вищу точність зовнішнього діаметра долота. Приварювання решти лопатей запропоновано здійснювати за методом зворотних деформацій.

Література

- Zhu J., Khurshid M., Barsoum Z. Accuracy of computational welding mechanics methods for estimation of angular distortion and residual stresses. *Weld World*. 2019. No. 63, P. 1391–1405 <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00746-9>.
- Chunbiao Wu, Kim Jae-Woong. Review on Mitigation of Welding-Induced Distortion Based on FEM Analysis. *Journal of Welding and Joining*. 2020. 38. 10.5781/JWJ.2020.38.1.6.
- Seong W. J. Prediction and Characteristics of Angular Distortion in Multi-Layer Butt Welding. *Materials* (Basel, Switzerland). 2019. No. 12(9). P. 1435. <https://doi.org/10.3390/ma12091435>.
- Tikhomirov D., Rietman B., Kose K., Makkink M. Computing Welding Distortion: Comparison of Different Industrially Applicable Methods. *Advanced Materials Research*. 2005. No 6–8. P. 195–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.195>.
- Islam M., Buijk A., Rais-Rohani M., Motoyama K. Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2014. Vol 84. P. 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.02.003>.
- Yang X, Yan G, Xiu Y. et al. Welding Temperature Distribution and Residual Stresses in Thick Welded Plates of SA738Gr.B Through Experimental Measurements and Finite Element Analysis. *Materials* (Basel, Switzerland). 2019. Jul;12(15). DOI: 10.3390/ma12152436.
- Barsoum Z., Ghanadi M., Balaw S. Managing Welding Induced Distortion – Comparison of different computational approaches. *Ist International Conference on Structural Integrity Procedia Engineering*. 2015. Vol. 114. P. 70–77.
- Farajpour Mehdi, Ranjbarnodeh Eslam. Finite Element Simulation of Welding Distortion in Dissimilar Joint by Inherent Deformation Method. *Soldagem & Inspeção*. 2018. No 23. P. 60-72. DOI: 10.1590/0104-9224/si2301.07.
- SPE/IADC 16145 Application of the new IADC dull grading system for fixed cutter bits. 1987.
- Мясников Я. В., Ионенко А. В., Гаджиев С. Г., Липатников А. А., Леонов Е. Г. Руководство по оценке износа долот типа PDC в промышленных условиях. *Бурение и нефть*. 2004. № 3. С. 14-18. URL: <http://iscpetro.ru/upload/iblock/73d/73d73e289674c34015eafda2195968ca.pdf> (дата звернення: 20.06.2020).
- РД 39-2-51-78. Коды износа долот по методике ВНИИБТ.
- Польский Е. А., Филькин Д. М. Модель комплексного анализа размерных связей для одноступенчатого технологического обеспечения точности сборочных соединений. *Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*. 2008. № 3-6/271 (546). С. 92–99.
- 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». Харьков, Национальный технический универ-

ситет «Харьковский политехнический институт», 2006. 24 с.

14. Ильицкий В. Б., Польский Е. А., Филькин Д. М. Модель обеспечения качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей: Справочник. *Инженерный журнал*. 2010. № 4 (157). С. 51–56.

References

1. Zhu J., Khurshid M., Barsoum Z. Accuracy of computational welding mechanics methods for estimation of angular distortion and residual stresses. *Weld World*. 2019. No. 63, P. 1391–1405 <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00746-9>.

2. Chunbiao Wu, Kim Jae-Woong. Review on Mitigation of Welding-Induced Distortion Based on FEM Analysis. *Journal of Welding and Joining*. 2020. 38. 10.5781/JWJ.2020.38.1.6.

3. Seong W. J. Prediction and Characteristics of Angular Distortion in Multi-Layer Butt Welding. *Materials* (Basel, Switzerland). 2019. No. 12(9). P. 1435. <https://doi.org/10.3390/ma12091435>.

4. Tikhomirov D., Rietman B., Kose K., Makkink M. Computing Welding Distortion: Comparison of Different Industrially Applicable Methods. *Advanced Materials Research*. 2005. No 6–8. P. 195–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.195>.

5. Islam M., Buijk A., Rais-Rohani M., Motoyama K. Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2014. Vol 84. P. 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.02.003>.

6. Yang X, Yan G, Xiu Y. et al. Welding Temperature Distribution and Residual Stresses in Thick Welded Plates of SA738Gr.B Through Experimental Measurements and Finite Element Analysis. *Materials* (Basel, Switzerland). 2019. Jul;12(15). DOI: 10.3390/ma12152436.

7. Barsoum Z., Ghanadi M., Balaw S. Managing Welding Induced Distortion – Comparison of different computational approaches. *1st International Conference on Structural Integrity Procedia Engineering*. 2015. Vol. 114. P. 70–77.

8. Farajpour Mehdi, Ranjbarnodeh Eslam. Finite Element Simulation of Welding Distortion in Dissimilar Joint by Inherent Deformation Method. *Soldagem & Inspeção*. 2018. No 23. P. 60-72. DOI: 10.1590/0104-9224/si2301.07.

9. SPE/IADC 16145 Application of the new IADC dull grading system for fixed cutter bits. 1987.

10. Myasnikov Ya. V., Ionenko A. V., Gadzhiev S. G., Lipatnikov A. A., Leonov E. G. Rukovodstvo po otsenke iznosa dolot tipa PDC v promyislovyih usloviyah. *Burenie i nefi*. 2004. No 3. P. 14-18. URL: <http://iscpetro.ru/upload/iblock/73d/73d73e289674c34015eafda2195968ca.pdf> (data zvernennya: 20.06.2020). [in Russian]

11. RD 39-2-51-78. Kodyi iznosa dolot po metodike VNIIBT. [in Russian]

12. Polskiy E. A., Filkin D. M. Model kompleksnogo analiza razmernykh svyazey dlya odnostupenchatogo tehnologicheskogo obespecheniya tochnosti sborochnykh soedineniy. *Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi tehniki i tehnologii»*. 2008. No 3-6/271 (546). P. 92–99. [in Russian]

13. Syichev Yu. I. Povyishenie tochnosti i kachestva mnogopozitsionnoy obrabotki vyiborom strukturyi i parametrov agregatirovannykh tehnologicheskikh sistem: avtoref. diss. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.02.08 – «Tehnologiya mashinostroeniya». Harkov, Natsionalnyiy tehnichestkiy universitet «Harkovskiy politehnicheskii institut», 2006. 24 p. [in Russian]

14. Ilitskiy V. B., Polskiy E. A., Filkin D. M. Model obespecheniya kachestva sborochnykh edynits na osnove analiza razmernykh svyazey: *Spravochnik. Inzhenernyiy zhurnal*. 2010. No 4 (157). P. 51–56. [in Russian]