

**М.Є. Чернова<sup>1</sup>, Я.В. Кунцяк**, доктори технічних наук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Карпатська, 15, 76000 Івано-Франківськ, e-mail: miracherril@gmail.com

<sup>2</sup>ПАТ НДІКБ бурового інструменту, пр. Палладіна, 44, 03680 м Київ, Україна, e-mail:  
3312833@ukr.net

## **ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИСОКОМІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ОБВАЖНЕНИХ БУРИЛЬНИХ ТРУБ**

*Основною метою досліджень, наведених у статті, є підвищення ефективності будівництва глибоких похило-скерованих і горизонтальних свердловин.*

*Враховуючи достатньо високу собівартість бурових робіт, а також підвищення цін світового ринку на металопродукт, нами було запропоновано використовувати в якості звичайних обважнених бурильних труб аналогічні труби, але з приварними різьбовими кінцями. Зварні з'єднання самі по собі є концентраторами напружень. Тому є необхідність в досконалій технології зварки бурильних труб, котра зможе забезпечити безаварійність їх експлуатації.*

*Нами розглядається метод визначення фізико-механічних напружень у зварному з'єднанні обважнених бурильних труб з приварними різьбовими кінцями. Залежно від типу зварювання та термічної обробки зварного з'єднання, науковий інтерес представляє картина розподілу таких напружень в зварному шві до та після термічної обробки. Ми використовуємо математичну модель, що здатна розглядати розподіл напружень на стадії охолодження з урахуванням явища пластичної деформації, що супроводжується зміцненням за рахунок підвищення межі текучості.*

*Така використовувана модель дозволяє провести дослідження перебігаючих та залишкових термомеханічних полів, що формуються на етапі охолодження.*

*Таке математичне моделювання процесу термообробки зварного з'єднання обважнених бурильних труб дає можливість за довільних функціональних коефіцієнтів тепловіддачі з навколишнім середовищем (газ, рідина) оцінити, як та від чого залежить рівень перебігаючих і залишкових напружень зварних з'єднань. Тут важливими складовими у процесі відпуску є метод зварювання, фізико-механічні характеристики матеріалів зварного шва, параметри зміцнення й коефіцієнти тепловіддачі матеріалів, що є складовими зварного з'єднання обважнених бурильних труб з приварними різьбовими кінцями.*

*Таки труби, з приварними різьбовими кінцями, забезпечують можливість економії договартованої легованої сталі. Це, в свою чергу, буде сприяти зниженню собівартості бурових робіт.*

**Ключові слова:** напруження, межа текучості, пластична деформація.

Статистичний аналіз аварій, що відбуваються з бурильними колонами за умов буріння свердловин роторним способом, довів, що підвищення швидкості проведення бурових робіт та підвищення техніко-економічних показників є неможливим без розроблення високоміцнісних конструкцій бурильних і обважнених бурильних труб (ОБТ).

За вимогами стандартів ОБТ мусять продукуватися зі сталі 38ХНЗМФА з відповідними механічними властивостями, а саме:  $\sigma_{0,2} = 736$  МПа,  $\psi = 10\%$ ,  $a_n = 0,6$  МПа, твердість 285–341 НВ. За відсутності такої сталі дозволяється продукування ОБТ з марки сталі 40ХН2МА чи інших марок, за умови, що після термічної обробки вони мають наступні механічні властивості:  $\sigma_{0,2} = 736$  МПа,  $\psi = 10\%$ ,  $a_n = 0,5$  МПа, твердість не нижча за 255 НВ.

На теперішній час здебільшого використовуються збалансовані ОБТ, виходячи з того, що ресурс роботи звичайних ОБТ є нижчим, аніж збалансованих. Перенарізування різьб

гарячекатаних ОБТ здійснюють, переважно, через 400 годин експлуатування, а збалансованих – через 2500 годин. Але збалансовані ОБТ мають один недолік, що полягає в їхній довжині, так як довжина їх продукування є меншою за 6 метрів. За довільних умов експлуатації час від часу виникає потреба в перенарізуванні різьб, а після декількох таких операцій довжина труби стає коротшою за 5 метрів. Саме з цієї причини такі труби йдуть у металобрухт, що з економічної точки зору не є вигідним та рентабельним.

З метою економії дефіцитних труб та задля підвищення їх експлуатаційних характеристик, а також задля покращення техніко-економічних показників буріння свердловин, нами було запропоновано застосування зварних конструкцій обважнених збалансованих бурильних труб (ОБТСС), довжина яких складає 9–12 метрів.

Загальновідомо, що призначення середньої частини ОБТ полягає переважно у створенні навантаження на породоруйнівний інструмент. Тому, з метою економії дороговартісної дефіцитної легованої сталі, ми запропонували середню частину сталейних збалансованих обважнених бурильних труб (ОБТСС) продукувати з вуглеводневої сталі, а приварні кінці труб, на яких нарізається різьба, виготовляти з легованої сталі (А.с. 1232775 СССР МКІ Е21В17/00. Утяжеленная бурильная труба). Така конструкція дозволяє проводити об'ємну термообробку різьбових кінців, що дає можливість значно підвищити якість сталі, а збільшення довжини ОБТ сприяє підвищенню часу їх експлуатації в 2–3 рази.

Експлуатаційні характеристики ОБТСС залежать, перш за все, від опору втомі їх різьбових з'єднань, тому значний науковий інтерес становлять дослідження, пов'язані з вибором способу продукування таких труб та з визначенням оптимальних режимів зварювання, котрі забезпечили б максимальну міцність зварних швів та високу експлуатаційну надійність зварних конструкцій ОБТ.

Проведення наукових досліджень у цьому напрямку вимагають великої кількості експериментального матеріалу, тому дуже важливим є передування теоретичних досліджень у цьому напрямку. Такі дослідження, на сучасному етапі розвитку цифрових технологій, мусять базуватися на методах математичного моделювання. Це дає можливість проводити експериментальні дослідження, враховуючи наперед визначені характеристики, що описують не тільки напружений стан зварного з'єднання в умовах деформівного впливу, а й наслідки процесу охолодження для механічної поведінки зварної конструкції в цілому.

Відомі різноманітні способи зварювання у техніці. Найбільшого застосування набули такі як газове зварювання, напівавтоматичне та автоматичне дугове зварювання, зварювання обертовою дугою в магнітному полі, контактнo-стикове, ультразвукове, лазерне та інші. В Україні найбільш часто за створення зварних з'єднань застосовують електродугове та контактнo-стикове зварювання. За умов створення зварної конструкції ОБТ, у яких товщина стінок є в межах 35–80 мм, необхідно було обирати такий спосіб зварювання, який міг би забезпечити достатню якість і міцнісні властивості зварного з'єднання. Межа міцності зварних з'єднань, продукованих електродуговим способом зварювання, в середньому становить 40 МПа, у той час як межа міцності різьбових з'єднань становить 75–80 МПа. Основними вимогами, що накладаються на зварні з'єднання ОБТ, є підвищення їх межі міцності в 2-3 рази в порівнянні з межею міцності різьбового з'єднання. Ця умова виключає можливість втомного руйнування ОБТ на зварному шві.

Результати експериментальних досліджень на натурних зразках ОБТ-146 за вимогами ГОСТ 6996-80 довели, що термообробка зварних швів за температур  $T=600-650^{\circ}\text{C}$  сприяє зниженню межі текучості та зникненню внутрішніх напружень у зварних швах.

Високотемпературний відпуск – це поширений вид термообробки конструкцій, метою якого є покращення їх експлуатаційних характеристик шляхом пониження чи ліквідації залишкових напружень. Так як цей процес є не лише трудомістким, але й таким, що підвищує

вартість конструкцій, то доцільність такого процесу мусить базуватися на підставі оцінки очікуваного рівня залишкових напружень.

До недавня були відсутніми ефективні теоретичні моделі опису стадій термічної обробки конструкцій, тому наявність залишкових напружень оцінювалась за результатами експериментальних методів, а це має багато недоліків [1].

Термічна обробка ОБТ включає стадію нагріву, витримки (за якої здійснюється головна релаксація напружень) та охолодження до природного стану. Хоча скорочення процесу на стадії охолодження є економічно вигідним для виробництва, це може спричинити пластичну деформацію зварного шва конструкції через наявність значного градієнта температур. Окремі відомі математичні моделі опису термомеханічних процесів за стадії термообробки враховували лише деякі специфічні особливості поведінки конструкції.

В роботах з визначення раціональних режимів термічної обробки ОБТ [2] практично не досліджувались нестационарні теплові процеси. Розглядалися лише теплові режими, що спричинюють пружну деформацію [3]. Чуттєвість характеристик матеріалу за температурних залежностей не враховувалась.

Аналізуючи відомі роботи [4, 5], можна стверджувати, що в існуючих моделях термопластичної поведінки тіл не розглядалися сумісно з нестационарним температурним полем наявність початкових напружень, термосприйнятність, зміцнення матеріалів, складна історія температурного навантаження, що є властивими для процесу відпуску. Наприклад, на стадії нагріву металічних тіл до високих температур та витримки в температурному полі  $T_{вит}$  відбувається пониження або повне зняття напружень, пов'язане, зокрема, з пониженням модуля пружності  $E$  та границі текучості  $\sigma_T$  за підвищення температури. Через те, що процес охолодження може бути джерелом нових напружень, через ріст  $E$  та  $\sigma_T$ , ефективність процесу термообробки в значній мірі залежить від реалізованого теплового режиму охолодження, а напруження, що формуються за цього, стають визначальними для завершення процесу.

Математична модель розглядає процес термічної обробки зварного з'єднання ОБТ на стадії охолодження з урахуванням того, що матеріали термічно сприйнятливі й за час відпуску не відбувається фазових перетворень, а також можлива пластична деформація зі зміцненням через зростання межі текучості  $\sigma_T$ .

Враховується, що відомий розподіл початкових (для охолодження) температур  $T_{витр}$  й напружень  $\{\hat{\sigma}^{(0)} = \hat{\sigma}_{витр}\}$ , зовнішні механічні навантаження  $\{P_n\}$  та умови витримки. З'єднання знаходиться в умовах конвекційного теплообміну з довколишнім середовищем.

Особливості охолодження (термосприйнятність характеристик матеріалу та можливість виникнення пластичної деформації за умов зміцнення) пов'язані з початковими високими максимальними температурами витримки за локального розподілу підвищених температур, для яких є можливими значні градієнти.

Допускаючи квазістатичні деформаційні процеси та можливість пружно-пластичної деформації, придатною до застосування є покрокова математична модель визначення температурного й напружено-деформованого стану тіл, що здатні до пластичної деформації, за умов охолодження по високотемпературній витримці з урахуванням температурної залежності всіх термомеханічних властивостей матеріалу.

На початках нестационарне температурне поле  $T(x, t)$  відносно області  $S_0$ , що зазнаватиме охолодження, обмежується співвідношенням теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_q(T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = C(T) \frac{\partial T}{\partial t}$$

в декартовій системі координат  $(x_1, x_2, x_3)$  для термосприйнятливих тіл з початковими та граничними умовами [6]

$$T(\{x\}, t)|_{t=0} = T_0(\{x\}) = T_{випр}$$

$$-\lambda_q(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{H_0} = \beta(T(\{x\}, t) - T_C)$$

тут  $T_{випр}$  – температура витримки;  $t$  – час;  $\{x\} = \{x_1, x_2, x_3\}'$  – вектор точки в декартових координатах;  $n$  – вектор нормалі до ще недеформованої поверхні  $H_0$ , що обмежує область  $\Omega_0$ ;  $\lambda_q(T)$  – коефіцієнт теплопровідності;  $C(T)$  – питома об'ємна теплоємність;  $\beta$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $T_C$  – термодинамічна температура середовища.

Наступний крок розглядає квазістатичну обмежену задачу зі змінними Лагранжа з визначення невідомих переміщень  $u$ , деформацій  $\hat{\varepsilon}$  та напружень  $\hat{\sigma}$  термосприйнятливого тіла з початковими врівноваженими напруженнями  $\{\hat{\sigma}^{(0)}\}$ , що задовольняють вираз:

$$[B]' \{\hat{\sigma}^{(0)}\} = 0,$$

$$[n]' \{\hat{\sigma}^{(0)}\} \Big|_{H_{0\sigma}} = 0,$$

задані масовими силами  $\{F\}$ , поверхневими напруженнями  $\{P_n\}$  в області  $H_{0\sigma} \subset H_0$ , переміщеннями  $\{u'\}$  в області  $H_{0\sigma} \subset H_0$  ( $H_{0\sigma} \cup H_{0u} = H_0$ ,  $H_{0\sigma} \cap H_{0u} = \emptyset$ ) за відомого розв'язку задачі теплопровідності в температурному полі, рівняння рівноваги, геометричне лінійне співвідношення, рівняння стану що мають вигляд:

$$[B]' (\{\hat{\sigma}^{(0)}\} + \{\hat{\sigma}\}) + \{F\} = 0,$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\},$$

$$\{d\sigma\} = \begin{cases} [D]\{d\varepsilon\}, & \text{за умови } \Phi < \mathbb{K}^2 \\ [D^{ep}]^{t+dt} (\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^T\}) + \\ + [dD^{ep}] \times (\{\varepsilon\}^t - \{\varepsilon^p\}^t - \{\varepsilon^T\}^t) + \\ + \{\Psi\}^{t+dt} dT, & \text{за умови } \Phi = \mathbb{K}^2 \end{cases}$$

та відповідні граничні умови

$$[n]' (\{\hat{\sigma}^{(0)}\} + \{\hat{\sigma}\}) \Big|_{H_{0\sigma}} = \{P_n\},$$

$$\{u\} \Big|_{H_{0\sigma}} = \{u^*\}.$$

тут  $[B]$  – матриця диференціальних операторів геометричних співвідношень у системі координат  $\{x\}$ ;  $\{\hat{\sigma}^{(0)}\}$ ,  $\{\hat{\sigma}\}$  – вектори Піолі-Кирхгофа першого роду початкових та невідомих напружень, відповідно;

$\{\varepsilon\}$  – вектор деформації Гріна;  $\{F\} = \{F_1, F_2, F_3\}'$  – вектор масових сил;  $[n]$  – матриця напрямних косинусів зовнішньої нормалі  $\{n\}$  до поверхні  $H_0$ ;  $[D]$  – матриця ізотермічних пружних модулів для ізотропного матеріалу;  $[D^{ep}]^{t+dt}$ ,  $[dD^{ep}]$ ,  $\{\Psi\}^{t+dt}$  – матрично-векторні величини, що є в рівнянні стану, і є функцією ізотермічних пружних модулів;  $[dD]$  – приріст ізотермічних пружних модулів, пов'язаних зі зміною температури та інших параметрів стану;  $\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma}\right\}'$  – похідна лівої частини функції текучості  $\Phi$ ;  $\{\varepsilon^p\}$ ,  $\{\varepsilon^T\}$  – пластичні та температурні складові повної деформації  $\{\varepsilon\}$ ;  $K^2$  – права частина умови текучості, визначає поверхню течії в просторі напружень;  $t, t + dt$  – індекси, що ідентифікують значення величин моментів деформації.

Для анізотропного зміцнюваного термосприйнятного матеріалу функція текучості має вигляд:

$$F(\{\sigma\}^t - \{\gamma\}^t) = K^2 \left( \int d\bar{\varepsilon}_i^p, T^t \right),$$

що описує матеріали за ізотропно-кінематичного зміцнення, через зсув поверхні текучості в просторі напружень, що відбувається через відповідне зміщення її центру  $\{\gamma\}^t$  й ізотропного розширення, що описується правою частиною рівняння, тут інтеграл

$$\int d\bar{\varepsilon}_i^p = \int \frac{d\bar{\varepsilon}_i^p}{dt} dt$$

є параметр Одквіста, де величина

$$d\bar{\varepsilon}_i^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ji}^p}$$

визначає інтенсивність приросту пластичної деформації (що не є рівна приросту інтенсивності деформації) [7].

Критерієм початку виникнення пластичних деформацій є умова Мізеса:

$$\sqrt{\frac{3}{2} \{\bar{s}\}' \{\bar{s}\}'} = \sigma_T + \beta^* b (\varepsilon_i^p)^m \quad (0 \leq \beta^* \leq 1)$$

модифікована на випадок ізотропно-кінематичного зміщення [6], тут  $\varepsilon_i^p$  – інтенсивність пластичних деформацій;  $b, m$  – параметри зміцнення матеріалу.

Частковими випадками цього рівняння є ізотропне зміцнення ( $\{\gamma\}^t = 0; 0 < \beta^* \leq 1$ ), кінематичне зміщення ( $\{\gamma\}^t \neq 0 (t > 0, \beta^* = 0)$ ), ідеальний матеріал ( $\{\gamma\}^t = 0, \beta^* = 0$ ).

Зміщення центра поверхні описано за правилом Циглера [7]

$$\{d\gamma\} = d\mu \left( \{\sigma\}^t - \{\gamma\}^t \right)$$

$$\text{тут } d\mu = \frac{\left( \left\{ \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma} \right\}' \{d\sigma\} - 2K \frac{\partial K}{\partial \bar{\varepsilon}_i^p} d\bar{\varepsilon}_i^p - 2K \frac{\partial K}{\partial T} dT \right)}{\left\{ \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma} \right\}' (\{\sigma\}^t - \{\gamma\}^t)}$$

За покроковою апроксимацією рівняння реалізуються за допомогою розрахункових алгоритмів методом кінцевих елементів. Критерієм збіжності ітераційного процесу є умова:

$$\delta_0 \geq \frac{\{\Delta q\}_N^j \{\Delta q\}_N^j}{\left( \sum_{i=1}^j \{\Delta q\}_N^{ij} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^j \{\Delta q\}_N^i \right)},$$

тут  $\delta_0$  – точність розрахунків у ітераційному процесі.

За використання довільного типу зварювання у зварному з'єднанні завжди утворюються залишкові напруження, що понижують міцнісні характеристики зварного шва. Саме тому вибір технології процесу зварювання, підігріву, відпуску має значний вплив на зростання межі міцності зварного з'єднання. Зокрема, попередній нагрів знижує нерівномірність розподілу температур і разом з тим зменшує дію основного фактору, що й сприяє зварним напруженням і деформації. За високого відпуску після зварювання зварні напруження ліквідовуються за рахунок того, що під час нагріву межа текучості матеріалу суттєво знижується й у певному діапазоні стає наближеною до нуля, тому матеріал не виявляє опору пластичним деформаціям, завдяки чому внутрішні напруження зникають [8].

Застосування пропонованого методу отримання картини залишкових напружень у зварних швах ОБТ за різних методів відпуску дозволяє робити висновок про те, яким саме способом варто реалізувати процес, у якому конкретному середовищі (газове, рідке й за якого складу) реалізовувати термовідпуск, у якому діапазоні температур та за якого градієнту.

### Висновки

Пропонована технологія, що передбачає застосування математичної моделі термомеханічних процесів, які відбуваються під час термообробки зварного з'єднання ОБТ на етапі охолодження, з визначенням механічних та температурних полів методом кінцевих елементів, дає можливість розв'язати задачу термопластичності з урахуванням зміни параметрів пружності й додаткових навантажень. Це дає змогу провести дослідження поточних та залишкових термомеханічних полів, які формуються на етапі охолодження.

Це дозволяє отримати картину закономірностей:

- термомеханічної поведінки зварного шва ОБТ залежно від коефіцієнтів тепловіддачі  $\beta$  складових з'єднання;
- впливу міцнісних властивостей матеріалу на ріст (зниження) рівня напружень;
- впливу сповільнення процесу охолодження на ріст (зниження) рівня напружень.

Математичне моделювання процесу термообробки зварного з'єднання ОБТ дає можливість за різноманітних функціональних коефіцієнтів тепловіддачі з навколишнім середовищем (газ, рідина) оцінити залежність рівнів поточних та залишкових напружень зварних з'єднань під час процесу відпуску залежно від способу зварювання, фізико-механічних характеристик матеріалів шва, параметрів зміцнення й коефіцієнтів тепловіддачі складових зварного з'єднання ОБТ.

**М. Ye. Chernova<sup>1</sup>, Ya. V. Kuntsiak<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine*

<sup>2</sup>*PJSC SRIDB drilling tool, Kyiv, Ukraine*

### **PHYSICAL AND MECHANICAL FEATURES OF IMPLEMENTATION OF HIGH STRENGTH PROPERTIES OF THE WELDED JOINTS OF OVERLOADED DRILL PIPES**

*The main purpose of the research presented in the article is to increase the efficiency of construction of deeply directional and horizontal wells.*

*Taking into account the high cost of drilling operations, as well as the increase in prices on the world market for rolled metal products, we proposed using similar pipes, but with welded threaded ends, as ordinary heavy-weight drill pipes. Welded joints are stress concentrators in themselves. Therefore, a perfect technology for welding drill pipes is needed, which can ensure trouble-free operation.*

*Herein we consider the method of determination of stress in the connection weld of heavy-weight drill pipe with welded field ends. Depending on the type of welding and thermal processing of the connection weld, the pattern of stress distribution before and after thermal processing is of science interest. We use the mathematical model that*

*enables consideration of stress distribution on the stage of cooling taking into account the possible phenomenon of plastic deformation along with strengthening accompanied by increase of limit of liquidity.*

*This model used makes it possible to study the currents and residual thermo-mechanical fields formed during the cooling stage.*

*Such mathematical modeling of the process of heat treatment of a welded joint of heavy-duty drill pipes makes it possible, at various functional coefficients of heat transfer with the environment (gas, liquid), to evaluate how and on what the level the depended of flow and residual stresses of welded joints. Here, the important components for the tempering process are the welding method, the physical and mechanical characteristics of the seam materials, the hardening parameters and the heat transfer coefficients of the materials that make up the welded joint of the drill collars.*

*Such pipes, with welded threaded ends, make it possible to save expensive alloy steel. This, in turn, will help to reduce the cost of drilling operations.*

**Key words:** *straining, limit of strength, plastic deformation.*

**М.Е. Чернова<sup>1</sup>, Я.В. Кунцяк<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Івано-Франковський національний технічний університет нафти і газу

<sup>2</sup>ЧАО НІІКБ бурового інструмента

### **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УТЯЖЕЛЕННЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ**

*Основной целью исследований, представленных в статье, есть повышение эффективности строительства глубоких наклонно-направленных и горизонтальных скважин.*

*Учитывая высокую себестоимость буровых работ, а также повышение цен мирового рынка на металлопрокат, нами было предложено использовать в качестве обычных утяжеленных буровых труб аналогичные трубы, но с приварными резьбовыми концами. Сварные соединения сами по себе являются концентраторами напряжений. Поэтому необходима совершенная технология сварки буровых труб, которая сможет обеспечить безаварийность их эксплуатации.*

*Рассматривается метод определения физико-механических напряжений в сварном соединении утяжеленных буровых труб с приварными резьбовыми концами. В зависимости от типа сварки и термической обработки сварного соединения научный интерес представляет картина распределения этих напряжений в сварном шве до и после термической обработки. Используется математическая модель, рассматривающая распределение напряжений на стадии охлаждения с учетом явления пластической деформации, сопровождаемая упрочнением за счет повышения предела текучести.*

*Эта используемая модель позволяет провести исследование текущих и остаточных термомеханических полей, формирующихся на этапе охлаждения.*

*Такое математическое моделирование процесса термообработки сварного соединения утяжеленных буровых труб дает возможность при различных функциональных коэффициентах теплопередачи с окружающей средой (газ, жидкость) оценить, как и от чего зависит уровень поточных и остаточных напряжений сварных соединений. Здесь важными составляющими для процесса отпуска есть метод сварки, физико-механические характеристики материалов шва, параметры упрочнения и коэффициенты теплопередачи материалов, составляющих сварное соединение утяжеленных буровых труб.*

*Такие трубы, с приварными резьбовыми концами, дают возможность экономии дорогостоящей легированной стали. Это, в свою очередь, будет способствовать снижению себестоимости буровых работ.*

**Ключевые слова:** *напряжения, предел текучести, пластическая деформация.*

#### **Литература**

1. Кушнір Р.М., Дмитрах І.М. Теорія і методи розрахунку напруженого стану та міцності твердих деформівних тіл з концентраторами напружень // Вісн. НАН

- України. – 2013. – № 1. – С. 59–70; doi <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/42952>.
2. Emre H.E., Kacar R. Effect of Post Weld Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of Friction Welded Dissimilar Drill Pipe // *Materials Research*. – 2015. – V. 18, N 3. – P. 503–508.
  3. Гачкевич О.Р., Михайлишин В.С. Математичне моделювання і дослідження напруженого стану тіл у процесі охолодження при високотемпературному відпалі // *Математичні методи та фізико–механічні поля*. – 2019. – Т. 47, № 3, – С. 186–198.
  4. Liu P., Sun S., Xu S., Cao M., Feng K. Influence of holding time of annealing treatment on microstructure and properties of TIG welded joint for P91 heat-resistant steel tube // *Kovove Mater.* – 2018. – N 56. – P. 245–252.
  5. Xu T, Jin Z, Feng Y, Song S, Wang D. Study on the static and dynamic fracture mechanism of different casing–drilling steel grades // *Materials Characterization*. – 2012. – V. 67–P. 1–9; doi 10.1016/j.matchar.2012.02.016.
  6. Михайлишин В. С. Математична модель термопружно–пластичних процесів при технологічному зварюванні // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. – 2019.– № 30. – С.135–154; doi:10.15421/4219034.
  7. Михайлишин В. С. Розв’язання задачі термопластичності для шаруватої сфери методом скінченних елементів // *Фізико–хімічна механіка матеріалів*. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 32–38; doi: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/134428>.
  8. Федосов О. В., Карпович О. В., Перерва В. О. Застосування електронного променя для відпалу зварних з’єднань титанового сплаву ВТ23 // *Авиационно–космическая техника и технология*. – 2015. – № 6(123). – С. 52–57.

Надійшла 22.06.21

## References

1. Kushnir, R.M., & Dmytrah, I.M. (2013). Teoriia i metody rozrahunku napruzhenoho stanu ta mitsnosti tverdyh deformivnyh til z kontsentratoramy napruzhen. *Visnyk NAN Ukrainy*, 59–70.
2. Emre, H.E., & Kacar R. (2015). Effect of Post Weld Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of Friction Welded Dissimilar Drill Pipe. *Materials Research*, 18, 3, 503–508.
3. Gachkevych, O.R., Myhailyshyn V. S. (2019). Matematychnе modeliuвання i doslidzhennia napryzhenoho stanu til v protsesi oholodzhennia pry vysokotemperaturnomu vidpali. *Mathematychni metody ta fizyko–mehanichni polia Mathematical modeling and study of the stress state of bodies in the cooling process during high–temperature annealing*, 47, 3, 186–198.
4. Liu, P., Sun, S., Xu, S., et al. (2018). Influence of holding time of annealing treatment on microstructure and properties of TIG welded joint for P91 heat-resistant steel tube. *Kovove Mater.*, 56, 245–252.
5. Xu, T, Jin, Z, Feng, Y, et al. (2012). Study on the static and dynamic fracture mechanism of different casing–drilling steel grades. *Materials Characterization*, 67,1–9.
6. Myhailyshyn, V. S. (2019). Matemaychna model termopryzhno–plastychnykh protsesiv pry tehnologichnomu zvariuvanni. [Mathematical model of thermoelastic–plastic processes in technological welding]. *Problemy obchysluvalnoii mehaniky i mizhnosti konstrukzhii – Problems of computational mechanics and strength of structures*, 30, 135–154.
7. Myhailyshyn, V. S. (2014). Rozhviazhuvannia zadachi termoplastychnosti dlia sharuvatoi sfery metodom skinchenykh elementiv [Solving the problem of thermoplasticity for a



layered sphere by the finite element method]. *Fizyko-khimichna mehanika materialiv – Physico-chemical mechanics of materials*, 50, 1, 32–38.

8. Fedosov, O. V., Karpovych, O. V., & Pererva, V. O. (2015). Zastosuvannia elektronnoho promenia dlia vidpalu zvarnyh ziednan tytanovoho splavu BT23. [Application of electron beam for firing of welded joints of titanium alloy BT23]. *Aviatsionno-kosmicheskaia tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace engineering and technology*, 6(123), 52–57.

УДК 621.921.34, 622.24.051

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-45-56

**О.М. Ісонкін, О.С. Осіпов, О.О. Матвійчук**, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
04074 м. Київ, вул. Автозаводська, 2, e-mail: alm343@ukr.net*

### **ПАРАМЕТРИ ШЛАМУ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ ПРИ ЇЇ РУЙНУВАННІ АЛМАЗНИМ ПОРОДОРУЙНІВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ**

*Мета роботи, результати якої відображено в цій статті, полягала в зіставленні гранулометричного складу і виду частинок шламу гірської породи з параметрами ріжучої здатності робочої поверхні алмазного породоруйнівного інструменту, що характеризують ефективність його роботи при різній інтенсивності руйнування з підтриманням постійної механічної швидкості буріння. Для досягнення поставленої мети при бурінні алмазними імпрегнованими коронками та точінні різцями з алмазних композиційних матеріалів різного складу граніту Коростишівського родовища X категорії буримості відбирали проби шламу, які в подальшому піддавали аналізу гранулометричного складу з використанням сучасного аналізатора моделі Microtrac Sync 3000.*

*Зіставлення ступеня зносу зразків композиту з даними аналізу гранулометричного складу шламу показало, що чим менше ступінь зносу ріжучої кромки породоруйнівного елемента, тим крупніше за розмірами утворюється шлам. При однакових умовах випробувань це свідчить про більш ефективне використання енергії, що підводиться до забою та йде більшою мірою на руйнування гірської породи і в меншому ступені на тертя і знос. Отримані нами результати дозволили уточнити характер впливу співвідношення швидкості обертання і осьового навантаження на енергоємність руйнування гірської породи і зміну фракційного складу частинок шламу, що утворюються при цьому.*

**Ключові слова:** шлам гірської породи, синтетичні алмази, енергоємність руйнування, зносостійкість, бурові коронки.

Механічне руйнування гірської породи як фізичний процес характеризується утворенням частинок шламу, які згідно з принципом П. Кюрі мають два види енергії – об'єма і поверхні, та підкоряються закону, який відображає співвідношення лінійних розмірів з питомими витратами енергії на руйнування. [1]

Одними з основних показників, що характеризують ефективність руйнування гірської породи, є гранулометричний склад її шламу і питома поверхня його частинок. Гранулометричний склад продуктів руйнування гірської породи як похідний показник швидкості буріння і величини витрат енергії на 1 м проходки представляє великий інтерес для теорії та практики оптимізації параметрів режиму буріння. Крім цього, без урахування гранулометричного складу бурових шламів практично неможлива розробка ефективних способів очищення свердловин, а також точних і зручних в практичному сенсі методів їх розрахунку [2].

Згідно з енергетичними уявленнями, при усіх видах механічного руйнування твердих тіл, в тому числі гірських порід при бурінні, фізична природа тіла залишається незмінною, а змінюється тільки площа його поверхні в залежності від гранулометричного складу частинок