

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким, М.І. Квас

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024,
e-mail: public@nuing.edu.ua

Стаття присвячена підвищенню довговічності штоків бурових насосів шляхом обґрунтованого вибору конструктивно-технологічних чинників з урахуванням комплексу функціональних параметрів. Досліджено вплив різних видів зміцнення на зносостійкість робочих поверхонь штока. Оцінено напружено-деформований стан зміцнених штоків. Отримано математичну модель процесу зміцнення високотемпературним термомеханічним обробленням (ВТМО) заготовки з урахуванням схильності до технологічного спаду, що формує якість деталі. Перевірка можливості використання моделі для прогнозування технологічної спадковості заготовки підтвердилася. Встановлено, що високотемпературна деформація заготовок з високоміцних легированих сталей типу 14ХНЗМА, виготовлених згідно з діючими типовими технічними умовами, забезпечує сприятливий технологічний спадок. Таке оброблення приблизно в два рази знижує схильність до циклічного тріщиноутворення.

Ключові слова: технологічний спадок, тріщиностійкість, високотемпературна деформація, довговічність.

Статья посвящена повышению долговечности штоков буровых насосов путём обоснованного выбора конструкторско-технологических факторов с учётом комплекса функциональных параметров. Исследовано влияние различных видов упрочнения на износостойкость рабочих поверхностей штока. Оценено напряжённо-деформированное состояние упрочнённых штоков. Получена математическая модель процесса упрочнения высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО) заготовки с учётом склонности к технологическому наследству, что формирует качество детали. Проверка возможности использования модели для прогнозирования технологической наследственности заготовки нашла подтверждение. Установлено, что высокотемпературная деформация заготовки с высокопрочных легированных сталей типа 14ХНЗМА, изготовленных согласно с действующими типовыми техническими условиями, обеспечивает положительную технологическую наследственность. Такая обработка приблизительно в два раза снижает склонность к циклическому трещинообразованию.

Ключевые слова: технологическая наследственность, трещиностойкость, высокотемпературная деформация, долговечность

The article deals with problems of durability increase of boring pump rods by the well-founded choice of design-technological factors with taking into account the complex of the functional factors. Kinds and optimal parameters of rod's surface strengthening and choice of the material for production of rods are chosen and based. The mathematical model of the consolidation of high temperature thermo mechanical processing (VTMO) billets considering the propensity to technological heritage that forms the quality of parts. Check possibility of using models for forecasting technological heredity logging confirmed. Found that high-temperature deformation of billets of high alloy steels such as 14ХНЗМА made under current typical specification provides a good technological legacy. Such treatment is about twice lower susceptibility to cyclic cracking.

Keywords: technological heritage, crackmaking, high-temperature deformation, durability

Постановка проблеми

Довговічність і ефективність відповідальних деталей обладнання нафтогазової промисловості залежить не тільки від умов експлуатації, характеру руйнування, матеріалу деталей і способу їх зміцнення, але й від технологічних умов їх виготовлення [1].

Досвід нафтогазового машинобудування свідчить, що основною причиною низької надійності деталей є проблема виготовлення прокату під заготовки. Тому однією з актуальних завдань нафтогазового машинобудування є вдосконалення технології виготовлення заготовок відповідальних деталей обладнання, вирішенню якої і присвячена дана стаття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботі [2] запропоновано виготовити спеціалізований прокат круглого профілю з легированої сталі 28ХГНЗМА із забезпеченням потрібних фізико-механічних властивостей. Значний внесок у розв'язання проблеми якісного вдосконалення оброблення заготовок відповідальних деталей внесли автори робіт [3-5] та інші. Результати цих досліджень дають підстави стверджувати, що отримання заготовок з використанням високотемпературної деформації може ефективно вплинути на експлуатаційні показники відповідальних деталей, причому ефект від високотемпературного термічного оброблення (ВТМО) істотно проявляється у сталях звичайної виплавки [6]. Виходячи з вищесказаного, було висунуто гіпотезу, що на

стадії виготовлення заготовки можливо отримати технологічний спадок, який би сприяв підвищенню довговічності деталей.

Мета роботи

Метою роботи є математичне моделювання процесу зміцнення ВТМО заготовки з урахуванням схильності до технологічного спаду, що формує якість роботи.

Реалізація роботи

Відомо, що в процесі деформування в гарячому стані на механічні властивості деталей впливають, насамперед, хімічний склад, структура, температура, схема напруженого стану, ступінь і швидкість деформування. Відомо, що надмірне нагрівання під кування спричиняє сильний ріст зерен аустеніту, розміри яких зберігаються при наступних термічних операціях, що призводить до підвищеної крихкості загартованих деталей. У випадку, якщо гаряче оброблення закінчується за високих температур, аустенітні зерна подрібнюються недостатньо, що знижує міцність гартованих деталей. При надто низькій температурі викінчування утворюються стрічкові структури, які також знижують міцність деталей.

Сильно знижують зносостійкість та контактну міцність робочих поверхонь напрям волокон сталі, що утворюються при виготовленні заготовки, та текстура (яскраво виражений напрям деформації зерен металу).

Усунути труднощі, пов'язані з описом значених чинників, можна шляхом побудови моделі процесу згідно теорії лінійного програмування, що дає змогу ув'язати вектори впливів (пластичної деформації) і вектори результатів цих впливів (залишкові напруження в металі) на динамічну систему — матеріал заготовки.

Залежність між деформаціями сталі ε і напруженнями σ , що виникають у процесі оброблення пластичним деформуванням, можна подати у такому вигляді:

$$\sigma(t) = A\{\varepsilon(t)\}$$

$$\varepsilon(t) = A^{-1}\{\sigma(t)\}'$$

де: A — оператор, що вказує на характер перетворення вектора дії у вектор наслідку; t — час. Для матеріалу заготовки, нагрітої до температури T , якій відповідає в'язкість сталі μ , є характерним виникнення дотичних напружень $\tau(t)$ при виникненні деформацій зсуву $\gamma(t)$. Оператор A можна подати у вигляді

$$\tau(t) = \mu D\{\gamma(t)\}, \text{ або } \tau(t) = \mu \frac{d\gamma(t)}{dt}.$$

Для такої лінійної динамічної системи існують лінійні оператори. Відомо, що оператор є лінійним, якщо при довільних числах C_1, C_2, \dots, C_n і функціях $\delta_1(t), \dots, x_n(t)$ виконується співвідношення

$$A\left\{\sum_{i=1}^n C_i x(t)\right\} = \sum_{i=1}^n C_i A\{x(t)\}.$$

Результат дії цього оператора на будь-яку лінійну комбінацію заданих функцій є лінійною комбінацією від результатів дії на кожену функцію окремо з тими ж коефіцієнтами, тобто справджується принцип суперпозиції. Таким чином, сформовані в заготовці напруження при ВТМО відповідають сумарній дії системи бойків прокатного стану. При довільному підвищенні тиску без зміни напряму деформаційного впливу напруження так само підвищуватимуться.

Перейшовши від суми до інтеграла, отримали

$$A(t)\left\{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda)x(t, \lambda)d\lambda\right\} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda)A_t\{x(t, \lambda)d\lambda\}, \quad (1)$$

де: A_t — оператор, що діє під функцією аргумента t ,

λ — фіксований параметр.

Ефект одиничного впливу інструмента на заготовку можна подати дельта-функцією

$$x(t) = \int_a^b x(\vartheta)\delta(t - \vartheta)d\vartheta,$$

де ϑ — час дії одного елементарного імпульсу.

Цю функцію можна подати у вигляді суми нескінченного ряду нескінченно малих виду

$$x(\vartheta)\delta(t - \vartheta)d\vartheta.$$

Якщо для довільного ϑ функція $x(\vartheta)$ визначена, то можна вважати, що

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\vartheta)\delta(t - \vartheta)d\vartheta. \quad (2)$$

Для отримання моделі, що враховує технологічний спадок від впливу інструмента, знаходили реакцію лінійної системи з одним входом і одним виходом на довільний вплив $x(t)$. Використавши (2), розклали $x(t)$ на окремі імпульси. Керуючись принципом суперпозиції (1), знаходили реакцію матеріалу заготовки. Для $\lambda=0$ отримали

$$x(t, \lambda) = \delta(t - \vartheta), C(\lambda)d\lambda = x(\vartheta)d\vartheta.$$

Реакція $y(t)$ розглянутої лінійної системи на довільний вплив інструмента матиме вигляд

$$y(t) = A_t x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\vartheta)A_t \delta(t - \vartheta)d\vartheta, \quad (3)$$

де A_t — оператор функції одиничного імпульсу $\delta(t - \vartheta)$.

Тоді реакцію на одиничний імпульс можна розглядати як імпульсну функцію

$$A_t \delta(t - \vartheta) = \mathfrak{Z}(t - \vartheta) = \mathfrak{Z}(t, \vartheta).$$

Отже, (3) набуде вигляду

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\vartheta)\mathfrak{Z}(t - \vartheta)d\vartheta. \quad (4)$$

Означена імпульсна функція показує, який вплив на функцію $y(t)$ здійснює $\mathfrak{Z}(t - \vartheta)$ за весь час технологічного впливу. Отже, ця функція дає змогу оцінити міру технологічного спаду за проміжок часу $0 \geq t \geq \vartheta$:

$$y(t) = \int_0^t x(\vartheta) \mathfrak{Z}(t - \vartheta) d\vartheta.$$

Іншим аспектом моделювання розглянутої системи є функція реакції системи на зовнішній вплив $\Psi(t)$, що має форму стрибка. Така функція має зв'язок з мірою технологічного спадку $\mathfrak{Z}(t)$ у вигляді

$$\mathfrak{Z}(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}.$$

Тоді реакцію системи $y(t)$ можна знайти шляхом розв'язання задачі Коші за принципом Дюамеля [9]:

$$y(t) = \psi(0)x(t) + \int_0^t x(\vartheta) \frac{d\psi(t - \vartheta)}{dt} d\vartheta. \quad (5)$$

Для отримання рівняння деформацій і пластичності матеріалу заготовки слід розв'язати загальну задачу деформування матеріалу при тривісному напруженому стані. Припустимо, що матеріал є ізотропним та не змінює своєї густини при деформації. Тоді згідно з [10] зв'язок між напруженням і деформацією можна виразити за допомогою операторів, які ставлять у відповідність девіатору тензора деформацій $\mathfrak{R}(t)$ девіатор тензора напружень $\mathfrak{x}(t)$.

Девіатор тензора деформацій $\mathfrak{R}(t)$ можна подати інтегральною сумою елементарних імпульсів:

$$\mathfrak{R}(t) = \int_0^\infty \mathfrak{R}(\vartheta) \delta(t - \vartheta) d\vartheta. \quad (6)$$

Згідно з принципом суперпозиції в інтегральній формі і (6), реакція металу заготовки

$$\mathfrak{x}(t) = \int_0^t \mathfrak{R}(\vartheta) \psi(t - \vartheta) d\vartheta,$$

або, враховуючи $\psi(t - \vartheta)$ і (5), вираз девіатора напружень набуде вигляду

$$\mathfrak{x}(t) = \psi(0)\mathfrak{R}(t) + \int_0^t \mathfrak{R}(\vartheta) \frac{d\psi(t - \vartheta)}{dt} d\vartheta. \quad (7)$$

Отримана залежність свідчить, що значення девіатора тензора напружень у момент часу t визначається миттєвим значенням девіатора деформації з коефіцієнтом $\psi(0)$, а також сумарним значенням всієї попередньої деформації від моменту ϑ до моменту t з коефіцієнтом $\frac{d\psi(t - \vartheta)}{dt}$.

З отриманої моделі також впливає твердження про те, що для забезпечення необхідної сприятливої технологічної спадковості у процесі виготовлення заготовок слід враховувати здатність матеріалу до «запам'ятовування» сформованих напружень і збереження їх протягом всього ланцюга технологічного оброблення.

Відомо [5], що деформація не тільки підвищує загальну густину дислокацій аустеніту, але й формує упорядковану дислокаційну субструктуру, яка має вигляд фрагментів, розмежованих дислокаційними сітками. Утворювана фрагментна сітка має підвищену стійкість, оскільки в умовах високотемпературної деформації

зберігаються ті дислокаційні утворення, які є стабільними в заданих умовах. Причому у зміцненні металу в результаті ТМО бере участь спадкова передача дислокаційної структури від деформованого аустеніту до мартенситу і збільшення кута розорієнтації між фрагментами.

Оскільки в'язкість руйнування є одним з найінформативніших показників міцності сталей [4], були проведені порівняльні дослідження впливу ВТМО на властивості сталі. Застосовуючи методику оцінки в'язкості руйнування, описану в [11, 12], було виготовлено дві партії дослідних зразків. Одну партію виготовили з прокату у стані поставки, а другу – із заготовок, підданих ВТМО.

Оцінку критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} проводили на балкових зразках прямокутного перерізу з односторонньою тріщиною при їх випробовуваннях за схемою чотириточкового згину.

У заводських умовах заготовки нагрівали в камерній печі до температури 1453 ± 323 К. Контроль температури здійснювали пірометром «Промінь МІ». Заготовку протягували способом кантування на 90° на молоті моделі МА 4136. При цьому добивались, щоб співвідношення між висотою заготовки і шириною заготовки становило 2–2,5. Потім за температури не нижче 1073 К збивали грані протяжки і округлювали її по перерізу. Для надання заготовці потрібних геометричних параметрів (регламентованих технологічною документацією) її піддавали обтисканню за допомогою спеціальних бойків.

Високотемпературну пластичну деформацію здійснювали у три етапи. Ступінь деформації за кожне обтискання становив $\varepsilon \approx 0,07$, що загалом складало близько $\varepsilon \approx 0,2$. Далі заготовки оброблялись за існуючою технологією. За результатами досліджень, проведених на зразках зі сталі 14ХНЗМА з метою визначення K_{Ic} , було виявлено відмінності в розповсюдженні тріщини (рис. 1) відповідно до варіанту виготовлення заготовки.

У першому випадку, коли зразок був вирізаний з прокату у вихідному стані (рис. 1, а), тріщина розповсюджувалася по межах аустенітних зерен. На старті попередньо наведеної тренування тріщини спостерігали пришвидшений ріст магістральної тріщини.



а) б)

а — зразок, вирізаний з прокату у стані поставки; б — зразок, вирізаний із заготовки, підданої ВТМО

Рисунок 1 — Порівняння розвитку тріщин на загартованих і низьковідпущених зразках зі сталі 14ХНЗМА

Ріст тріщини в зразках, вирізаних із заготовок, підданих ВТМО, має нерівномірний характер (рис. 1,б). Тут спостерігаються зупинки (очевидно пов'язані з субструктурною структурою, яка сприяє релаксації напружень у гирлі поширюваної макротріщини, та обумовлює різку зміну її найкоротшої траєкторії), яка визначається полем макронапружень. Однією з головних причин полегшення релаксації напруження в цьому випадку можна вважати високий рівень мікронапружень на межах пакетів і зерен, які характеризуються різко вираженою локальністю.

Отже, існують підстави стверджувати, що в'язкість руйнування деталей, отриманих із заготовок високоміцної сталі після ВТМО, є більшою порівняно з вихідним станом. Отримані дані підтверджуються встановленими в [3] основоположними засадами механіки руйнування термічно й термомеханічно оброблених сталей.

Результати випробувань на циклічну тріщиностійкість подано на рис. 2. Встановлено, що для діапазону високих значень $\Delta K = 20-30$ МПа-м^{1/2} проведення ВТМО мало впливає на тріщиностійкість сталі. Зі зниженням рівня циклічного навантаження стає відчутним позитивний ефект оброблення металу, що збільшується зі зменшенням ΔK і максимально проявляється на припороговій ділянці навантаження. Так, пороговий рівень розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} зростає від 4,5 МПа-м^{1/2} для сталі у вихідному стані до 8,5 МПа-м^{1/2} для сталі, підданої ВТМО. Таким чином, ВТМО приблизно удвічі підвищує тріщиностійкість досліджуваної сталі.

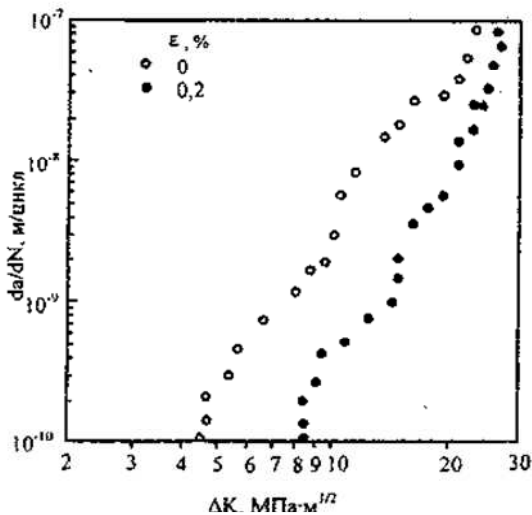


Рисунок 2 — Кінетичні діаграми втомного руйнування $da/dN - \Delta K$ для загартованих і низьковідпущених зразків зі сталі 14ХНЗМА у стані поставки і після ВТО

Висновки. Отримано математичну модель процесу зміцнення ВТМО заготовки з урахуванням схильності до технологічного спадку, що формує якість деталі. Перевірка можливості використання моделі для прогнозування технологічної спадковості заготовки підтвердилася. Встановлено, що високотемпературна деформація заготовок з високоміцних легованих ста-

лей типу 14ХНЗМА, виготовлених згідно з діючими типовими технічними умовами, забезпечує сприятливий технологічний спадок та приблизно удвічі знижує схильність до циклічного тріщиноутворення.

Перспективним є розв'язання задачі формування сприятливого технологічного спадку при термічному та фінішному обробленні деталей машин і обладнання нафтогазової промисловості.

Література

- 1 Никифоров А.Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А.Д. Никифоров. — М.: Высшая шк., 2006. — 392 с.
- 2 Новая технология производства бурового инструмента / А.Р.Черненко, З.А.Корнет, В.Г.Крыжный, В. И. Шаманаев // Горный журнал. — 1991. — №9. — С. 50—51.
- 3 Романив О.Н. Некоторые вопросы прочности и механики разрушения термически и термомеханически обработанных высокопрочных сталей: автореф. дис. на соискание науч. степени доктора техн. наук: спец. 320 “Металловедение и термическая обработка металлов” / О.Н. Романив. — Львов, 1970. — 56 с.
- 4 Одосій З.М. Підвищення роботоздатності змінних деталей бурових насосів / З.М. Одосій, Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 1999. — №36. — С. 323-329. — Серія: Методи і засоби технічної діагностики.
- 5 Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів / С.С. Дяченко. — Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. — 226 с.
- 6 Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании: справочник / А.В. Третьяков, Г.К. Трофимов, М.К. Гурьянова. — М.: Машиностроение, 1970. — 63 с.
- 7 Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, З.В. Рыжов, В.И. Аверченков. — Минск: Наука и техника, 1977. — 256 с.
- 8 Математическая энциклопедия; под ред. И.М. Виноградова в 5-ти т. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — Т. 2, 1972. — С. 393—394.
- 9 Браун У. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации; пер. с англ. под ред. Б.А.Дроздовского, Е.М. Морозова / У. Браун, Дж. Сроули. — М.: Мир, 1972. — 246 с.
- 10 ГОСТ 25.506-85. Расчет и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 62 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
03.03.11

Рекомендована до друку професором
Крилем Я.А.