

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Б.О.Чернов, М.Є.Сімків, В.Б.Чернов

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090  
e-mail: physics@nung.edu.ua

*Проведен анализ существующих методов повышения прочности конических резьбовых соединений. Предложен метод упрочнения резьбовых соединений энергией ультразвуковых колебаний, разработана технология упрочнения, проведены теоретические и экспериментальные исследования моделей и натуральных образцов на усталость, которые подтвердили высокую эффективность данного метода. Метод и технология упрочнения методом УЗО предложено производственным предприятием ВАТ «Укрнефть» для внедрения.*

*The existing methods of conic threaded connection durability improvement are analyzed. The method of ultrasonic vibrations energy strengthening is offered, strengthening technology is developed, technical and experimental model and sample on location fatigue investigation is carried out that proved high efficiency of this method. This method and technology of strengthening by means of US method is introduced by the manufacturing open joint stock company "Ukrnafia".*

Одним із основних напрямів розвитку нафтогазової галузі держави є підвищення рівнів видобутку вуглеводневої сировини. Вирішення цієї важливої проблеми вимагає збільшення об'ємів буріння пошукових та експлуатаційних свердловин, а також, впровадження нових технологій.

У процесі будівництва нафтових і газових свердловин на бурильну колону діють значні статистичні та динамічні навантаження, які часто призводять до корозійно-втомних руйнувань елементів бурильної колони, а відповідно до аварій і ускладнень, на ліквідацію яких витрачаються значні кошти.

Різьбові з'єднання є концентраторами напружень і, відповідно, найчастіше втомні руйнування, в процесі буріння свердловин, відбуваються по різьбі.

Статистичний аналіз аварій з бурильною колоною свідчить, що втомні руйнування замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб, відбуваються по западині першого спряженого витка різьби ніпеля або по западині останнього спряженого витка різьби муфти, залежно від конструктивних особливостей з'єднання.

Експериментальні дослідження на опір втомі натурних зразків замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб свідчать, що границя витривалості ЗРЗ є досить низькою і знаходиться в межах 37-41 МПа. Цим і пояснюються часті втомні руйнування замкових різьбових з'єднань ОБТ під час буріння нафтових і газових свердловин.

Науковими дослідниками проводились інтенсивні пошуки методів та способів, які б змогли забезпечити підвищення довговічності елементів бурильної колони.

Так, авторами [1] проведено комплекс досліджень впливу вигладжування западин різьби на опір втомі конічних різьбових з'єднань. Аналіз результатів експериментальних досліджень засвідчив, що вигладжування різьби спе-

ціальними різцями покращує чистоту різьби, знімає надрізи металу та призводить до підвищення опору втомі лише до 20-25 %.

Одночасно, авторами [2] проводилися роботи з підвищення довговічності замкових різьбових з'єднань за рахунок зміцнення западин різьби методом поверхнево-пластичної деформації. На початковій стадії досліджень в якості вібратора застосовували відбійний молоток, який характеризується низькою частотою віброударів, що призводило до нерівномірного наклепу западин різьби. З цієї причини в лабораторії різьбових з'єднань ВНДІБТ (в м. Москва) було розроблено пристрої УОР-1 та УОР-2 для зміцнення внутрішньої і зовнішньої поверхні конічної різьби методом обкатки роликками [3]. Було проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, а також, розроблено технологію зміцнення різьб методом поверхнево-пластичної деформації. З експериментальних досліджень натурних зразків замкових різьбових з'єднань діаметрами 80, 146, 178 мм виявлено, що при оптимальних параметрах зміцнення, границя витривалості ЗРЗ підвищується до 55-60 % [3]. Авторами [1, 2, 3] встановлено, що під час обкатки роликковим інструментом шорсткість поверхні знижується на 3-4 класи, але, оскільки глибина наклепу становить 0,6÷0,9 мм, то виникають стискаючі залишкові напруження, які досягають 700÷1100 МПа, за рахунок чого підвищується зносостійкість на 80-95 %. Проте, після процесу обкатки, на поверхні виявляються окремі мікро надриви, від яких починають розвиватися втомні тріщини, хоч границя витривалості збільшується.

Слід зазначити, що на даний час досить часто, на жаль, зустрічаються публікації, які базуючись на матеріалах інших дослідників, одержали комп'ютерний варіант обробки. Так, зокрема, автор [4] реанімує матеріали 20-ти річної давності, моделюючи конічну різьбу циліндричним витком, і наводить безліч графіків, які

не мають ні наукової, ні практичної цінності, а в кінцевому варіанті, автор зазначає, що зміцнення різьби поверхнево-пластичною деформацією (обкаткою роликками) підвищує опір втомі замкового різьбового з'єднання ОБТ-178 (різьба 3-147) до 60 %.

Під час буріння свердловин турбінним способом та вибійними двигунами спостерігались часті поломки різьбових з'єднань корпусів і валів турбобурів, а також корпусів вибійних двигунів. Тому, з метою підвищення надійності роботи турбобурів та вибійних двигунів в інструктивний документ «РТМ 26-02-25-80» було внесено обов'язкове зміцнення різьбових з'єднань даних конструкцій поверхнево-пластичною деформацією (обкаткою роликками). Але, оскільки, пристрої УОР-1 та УОР-2 закріплювались на супорті різьбонарізного верстата і навантаження 20000÷25000 Н здійснювалось супортом, це призводило до розтяжки ходових гвинтів різьбонарізних верстатів на підприємстві ВО «Турбобур», а відповідно до похибок параметрів різьб (кроку, половини кута профілю, конусності), що викликало велику діаметральну і осьову компенсацію натягу та призводило до саморозгвинчування різьбових з'єднань у процесі буріння свердловин. Тому, дирекція Кунгурського машинобудівного заводу відмовилась від зміцнення різьб методом обкатки.

Границя витривалості різьбових з'єднань залежить від якості поверхневого шару різьби, його мікротвердості та чистоти поверхні.

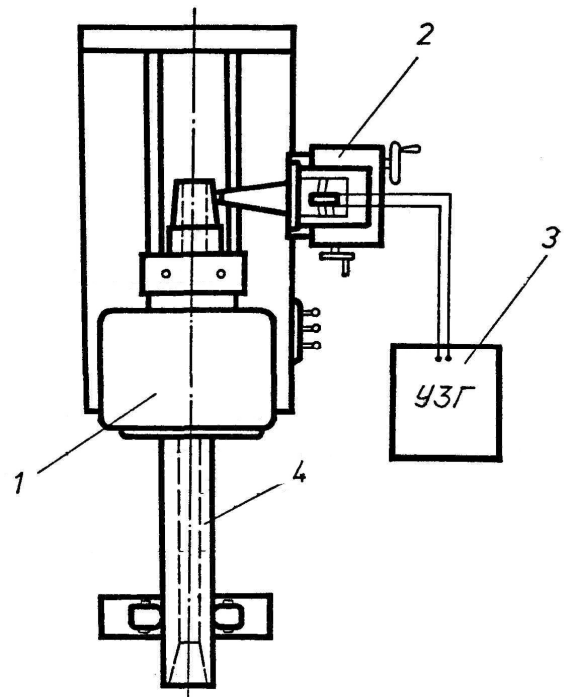
З метою розв'язання даної проблеми нами було запропоновано метод зміцнення конічних різьбових з'єднань з використанням енергії ультразвукових коливань.

Цей метод базується на пластичному деформуванні поверхні за допомогою інструменту, який здійснює коливання з ультразвуковою частотою за невисоких значень величини статичного тиску. Пластична деформація при цьому локалізується в поверхневому шарі.

Для одержання оптимальних параметрів зміцнення конічних різьбових з'єднань розроблено експериментальний стенд, проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень.

Основним елементом експериментального стенду є трубноарізний верстат на супорті якого за допомогою спеціального пристрою кріпиться магнітострикційний перетворювач з пристроєм для статичного навантаження (схему стенду для зміцнення різьб зображено на рис. 1). Нами використано ультразвуковий генератор УЗГ 2-4 М потужністю 4,5±0,5 кВт з частотою на виході 16,8÷19,2 кГц, та магнітострикційний перетворювач ПМС-2,5-18, акустична потужність якого 0,9 кВт з частотою коливань 18 кГц.

На торці вібратора амплітуда коливань становить 10-15 мкм, тому, з метою збільшення амплітуди коливань використовуємо ультразвуковий концентратор, який ультразвукову енергію концентрує в малому об'ємі.



1 – трубноарізний верстат; 2 – перетворювач на супорті верстата; 3 – ультразвуковий генератор; 4 – зміцнювана деталь

**Рисунок 1 – Принципова схема стенду зміцнення різьб методом високочастотної вібраційної дії**

Для ультразвукової обробки зовнішніх поверхонь застосовуються прямолінійні концентратори, а для внутрішніх – криволінійні. Основною характеристикою довільного концентратора є його коефіцієнт підсилення амплітуди коливань, який залежить від співвідношення площ вхідного та вихідного торця, форми його твірної, акустичних властивостей матеріалу, точності розрахунку його параметрів та від втрат енергії в концентраторі. Аналітичні та експериментальні дослідження свідчать, що найбільш ефективним для зміцнення різьбових поверхонь є концентратор експоненціальної форми, який за оптимальних параметрів досягає коефіцієнта підсилення амплітуди  $K_v=5,42$  і амплітуда коливань на кінці концентратора становить 75 мкм, що повністю відповідає поставленим вимогам. Кріплення вібратора і концентратора проводиться за допомогою пайки срібним флюсом ПСр-40, що забезпечує найменші втрати енергії.

Під час зміцнення деталі за допомогою енергії ультразвукових коливань найбільше значення сили в імпульсі  $P$  визначається не тільки статичною силою, але і амплітудою коливань торця інструменту:

$$P = 1,7P_{cm} \sqrt{A}, \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда коливань.

Експериментальні дослідження, які були проведені нами підтвердили дану залежність. Висока термічна і динамічна напруженість поверхневого шару зміцнюваної деталі та ефект

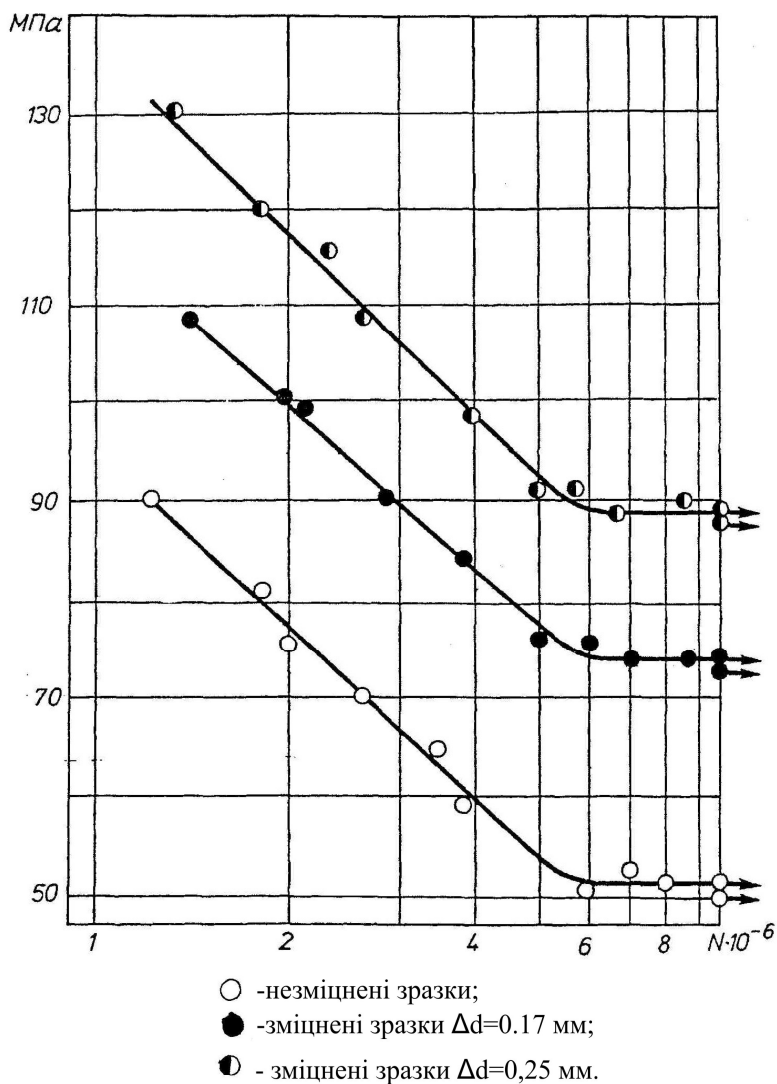


Рисунок 2 – Криві втом зразків зі сталі 40XН2МА діаметром 30мм

зміцнення характеризується інтенсивністю ультразвукової хвилі, яку робочий інструмент передає за одиницю часу в поверхневий шар деталі.

Для підтвердження теоретичних досліджень впливу статичної сили на мікротвердість та глибину зміцнюючого шару було проведено експериментальні дослідження зразків діаметром 10, 30 і 80 мм зі сталі 45 і 40XН2МА з яких виготовляються більшість ОБТ. На рис. 2 зображено результати досліджень зразків діаметром 30 мм, на боковій поверхні яких були нарізані V- подібні концентратори з радіусом заокруглення  $R = 0,508 \text{ мм}$  рівним радіусу заокруглення різьби 3-62. Як видно з рис. 2, зі збільшенням статичного навантаження  $R_{ст}$  на зміцнюючий інструмент, зростає товщина зміцнюваного шару  $\Delta d$  і, відповідно, границя витривалості зразків.

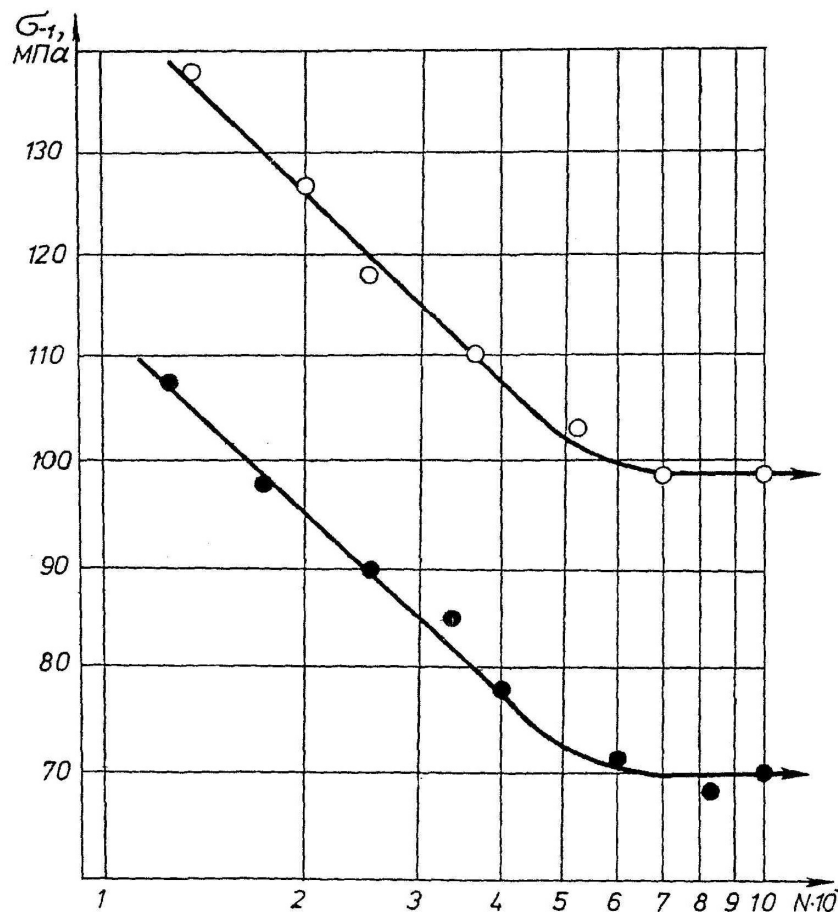
Для визначення максимально допустимої величини залишкової пластичної деформації, яка утворюється під час зміцнення западини різьби методом УЗО, проводились дослідження за різних значень статичної сили  $R_{ст} = 50 \div 350 \text{ Н}$ .

Експериментальні дослідження свідчать, що зміцнення западин різьби або гладких пове-

рхонь (різьбових розвантажувальних канавок) відбувається лише до певних граничних значень статичної сили, вище яких спостерігається зрізання робочим інструментом поверхневого шару деталі. Так, для сталей 45 і 40XН2МА з  $\sigma_{0,2} = 380 - 680 \text{ МПа}$  максимальні значення залишкової пластичної деформації за допомогою зміцнення методом УЗО знаходяться в межах  $0,23 \div 25 \text{ мм}$ . Криві втомі замкового різьбового з'єднання 3Н-80 з різьбою 3-62, виготовлені зі сталі 40XН2МА із  $\sigma_{0,2} = 680 \text{ МПа}$  та згвинченими  $M_{кр.онт} = 350 \text{ н} \cdot \text{м}$  зображено на рис. 3.

Аналіз результатів експериментальних досліджень на опір втомі натурних зразків свідчить, що зміцнення різьбових з'єднань методом УЗО призводить до підвищення їх границі витривалості до 50%, а, відповідно, і до підвищення експлуатаційних характеристик бурильної колони в цілому.

Враховуючи, що зміцнення методом ультразвукової обробки відбувається при порівняно малих статичних навантаженнях на зміцнюючий елемент і не призводить до розтяжки гвинтів



40ХН2МА,  $M_{кр.св}=3$  кН.,  $\Delta d=0.25$  мм:

- - незміцнені зразки;
- - зміцнені зразки.

Рисунок 3 – Криві втоми замкового з'єднання ЗН-80 з різьбою 3-62 зі сталі

різьбонарізних верстатів, та здійснюється за один прохід, то його переваги над методом обробки роликками не викликає сумніву. При цьому чистота зміцнюваної поверхні западин різьби підвищується на 3–4 класи, а мікротвердість поверхні – на 135–160%.

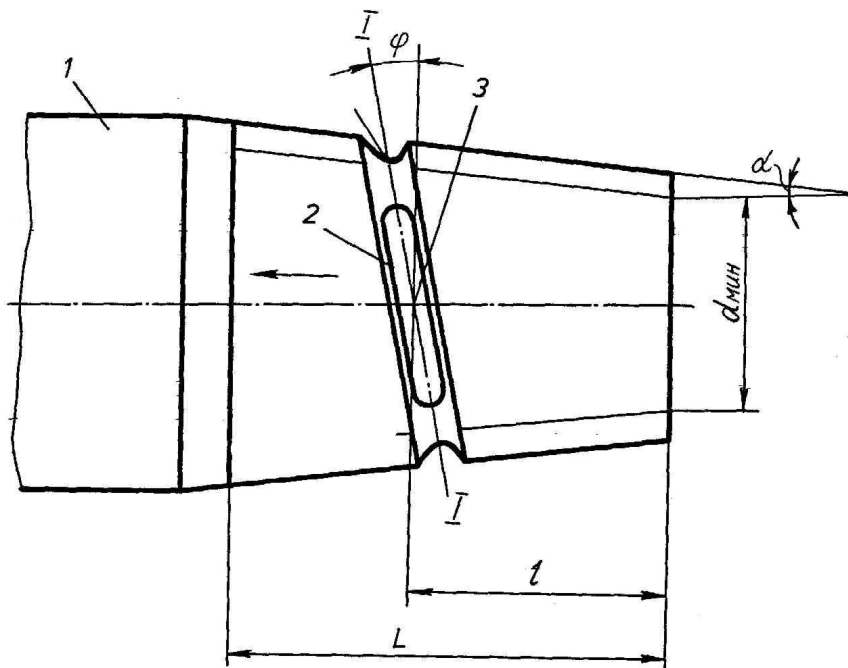
Всі існуючі способи зміцнення конічних різьбових з'єднань, суть яких зводиться до пластичного деформування впадин різьби, здійснюються інструментом, який має радіус заокруглення при вершині на 0,05–0,07 мм менший, ніж радіус заокруглення западини різьби, а кут профілю на 3–5° менший, ніж кут профілю різьби. За рахунок цього здійснюється нерівномірне зміцнення западини конічної різьби.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень, з метою забезпечення рівномірності зміцнення западини різьби конічних з'єднань елементів бурильної колони, а, відповідно, і підвищення їх довговічності, запропоновано радіус заокруглення западин різьби формувати більшим, ніж радіус заокруглення западини різьби стандартного різьбового з'єднання на величину, яка визначається товщиною шару залишкової пластичної деформації  $\Delta d$  та кутом профілю  $\alpha$  різьби [5]. При

цьому величина кута профілю інструмента  $\alpha_1$  пов'язана з величиною формуючого радіусу заокруглення западини різьби  $R$  залежністю:

$$\frac{R - r \cos\left(\frac{\alpha - \alpha_1}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha - \alpha_1}{2}\right)} = \frac{r_c \left(1 - \sin\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{H - h - btg\Psi}{2}}{\cos\frac{\alpha}{2}} - r \cdot ctg\frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

де:  $R$  – формуючий радіус заокруглення западини різьби (мм);  
 $r$  – радіус заокруглення западини профілю різьби згідно ГОСТ (мм);  
 $\alpha$  – кут профілю різьби;  
 $\alpha_1$  – кут профілю інструменту;  
 $r_c$  – радіус заокруглення вершини профілю різьби (мм);  
 $H$  – висота профілю різьби (мм);



1 – зміцнююча деталь; 2 – зміцнюючий інструмент; 3 – точка контакту  
**Рисунок 4 – Схема зміцнення конічних різьб з заданим кутом нахилу зміцнюючого інструмента**

$h$  – робоча висота профілю різьби згідно ГОСТ (мм);

$b$  – величина зрізу вершини профілю різьби (мм);

$\Psi$  – кут конуса різьби.

Схему зміцнення різьби зображено на рис. 4.

Так, наприклад, для замкового різьбового з'єднання ЗН–80 з різьбою З–62 за заданих значень параметрів різьби  $r = 0,508 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 60^\circ$  розрахункові значення радіуса заокруглення при вершині  $R = 0,64 \text{ мм}$ , а кут профілю  $\alpha_1 = 57,2^\circ$ .

Експериментальні дослідження западин різьби замкових різьбових з'єднань зміцнених методом УЗО за оптимальних режимів інструментом, який виготовлено згідно поданих розрахунків, свідчать, що пружно-пластична деформація здійснюється по всій западині різьби, і поверхневі шари металу зміцнюються так, що в них формуються залишкові напруження стиску.

З метою підтвердження достовірності результатів проведено експериментальні дослідження на опір втомі натурних зразків замкових різьбових з'єднань ЗН–80 з різьбою З–62 із сталі 40ХН2МА ( $\sigma_{0,2} = 680 \text{ МПа}$ ) зміцнених методом УЗО за даною технологією, та згвинчених оптимальним крутним моментом  $3500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Дослідження свідчать, що зміцнення різьб інструментом з розрахованими геометричними параметрами призводить до підвищення границі витривалості різьбових з'єднань на 25%, порівняно з різьбовими з'єднаннями, які було зміцнено за попередньою технологією.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень – вказує, що метод ультразвукової обробки різьбових з'єднань елементів бурильної колони має певні переваги над іншими методами поверхнево-пластичної деформації, і, в кінцевому результаті, призводить до підвищення границі витривалості ЗРЗ конічних різьб на 65–70%, а, відповідно, і до підвищення надійності та довговічності бурильної колони в процесі буріння нафтових і газових свердловин.

### Література

1 Кудрявцев И.В. Усталостная прочность резьбовых соединений больших диаметров / И.В. Кудрявцев, Н.Д. Щербюк, Ю.И. Газанчан // Исследование по упрочнению деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1972. – С. 15-24.

2 Кудрявцев И.В. Повышение несущей способности крупных резьбовых соединений поверхностно-пластической деформацией / И.В.Кудрявцев, Н.Д.Щербюк, Ю.И.Газанчан // Вестник машиностроения. – 1982. – № 6. – С. 44-56.

3 Сёмин В.И. Оптимизация технологии упрочнения замковой резьбы методом поверхностно-пластического деформирования / В.И.Сёмин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2005. – № 1. – С. 23-27.

4 Чернов Б.А. Способ упрочнения конических резьб / Б.А.Чернов, Б.Ю.Оглабьяк, Л.Я.Ропяк // А.С. 1722671 МКИ ВМНЗ/04. (СССР). – №4770014/27. Опубл. 30.03.92, Бюл. №12. – 4с.