

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТАНГЕНЦІАЛЬНИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В СТАЛЕВИХ БУРИЛЬНИХ ТРУБАХ

Ю.С. Сичов (мол.)

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504612,  
e-mail: metalyha@mail.ru

Наведено причини руйнування сталевих бурильних труб при роторному способі буріння. Показано, що крім дії зовнішніх навантажень та інших чинників на довговічність бурильних труб впливають залишкові напруження, які виникають у металі труб під час їх виготовлення на трубопрокатних станах внаслідок пластичного деформування за високої температури та значних прикладених зусиль. Висаджування кінців бурильних труб на горизонтально-ковальських установках в колівий замкнутий пуансон також призводить до появи залишкових напружень. Розроблено і випробувано методику для визначення тангенціальних залишкових напружень у бурильних трубах, яка базується на сучасних методах тензометрування. Основу розробленої методики складають методи Закса і Давіденкова, а їх застосування дає змогу визначити тангенціальні залишкові напруження по всьому перерізі дослідних взірців. Розроблено конструкцію спеціального строю, що уможливує внутрішнє розточування кільця без пошкодження наклеєних на зовнішній поверхні тензорезисторів. Проведено вимірювання тангенціальних залишкових напружень у тілі і висадженій частині нової сталеві бурильної труби групи міцності «К» і отримано конкретні значення цих напружень по всьому перерізі металу труби, що відображено у таблицях і графіках.

Ключові слова: буріння, труба, кільце, деформація, залишкові напруження, тензорезистор, розтяг, стиск, довговічність, методика.

Приведены причины разрушения стальных бурильных труб при роторном способе бурения. Показано, что кроме воздействия внешних нагрузок и различного рода факторов на долговечность бурильных труб оказывают влияние остаточные напряжения, которые возникают в металле труб в процессе их изготовления на трубопрокатных станах в результате пластической деформации при высокой температуре и больших прикладываемых усилиях. Высадка концов бурильных труб на горизонтально-ковачной установке в круговой замкнутый пуансон также приводит к появлению остаточных напряжений. Разработана и опробована методика определения тангенциальных остаточных напряжений в бурильных трубах, которая базируется на современных методах тензометрирования. В основу разработанной методики положены методы Закса и Давиденкова, позволяющие определять тангенциальные остаточные напряжения по всему сечению исследуемых образцов. Разработана конструкция специального приспособления, позволяющего выполнить внутреннюю расточку кольца, не повреждая наклеенные на его внешней поверхности тензорезисторы. Проведено измерение тангенциальных остаточных напряжений в теле и высаженой части новой стальной трубы группы прочности «К» и получены конкретные значения этих напряжений по всему сечению металла трубы, представленные в таблицах и графиках.

Ключевые слова: бурение, труба, кольцо, деформация, остаточные напряжения, тензорезистор, растяжение, сжатие, долговечность, методика.

The causes of steel drill pipes destruction in rotary drilling are presented in the article. It is proved that except for external stresses and various factors residual stress affects the lifetime of drill pipes. Residual stress set in the metal of pipes during their manufacturing in tube work stations as a result of plastic deformation at high temperature and strong applied efforts. Unloading the ends of the drill pipes onto horizontal forging facilities in the closed circular punch also leads to the occurrence of residual stresses. Scientific works at studying residual stresses in steel drill pipes were conducted in 1940 - 1950s have been considered. The technique of determining the tangential residual stresses in the drill pipes basing on modern methods of strain metering have been developed and tested. The basis of the developed technique is the Sachs and Davidenkov' methods. The application of these methods allows determining the tangential residual stresses around the whole sections of samples. The special design of the device that allows you to do the inner boring of the ring without damaging resistive-strain sensors that are attached on the external surface of the ring has been developed. The tangential residual stresses in the body and in the unloaded part of the new steel drill pipe of strength "K" have been measured and the received values of these stresses across the metal pipes sections are presented in two tables and two graphs.

Keywords: drilling, pipe, ring, deformation, residual stress, resistive-strain sensor, tension, compression, lifetime, method.

Надійність роботи бурильної колони, основу якої складають сталеві бурильні труби, є важливим чинником у процесі буріння свердловин.

При бурінні свердловин роторним способом сталеві бурильні труби сприймають складний комплекс навантажень. Різні за характером і величиною, статичні і динамічні навантаження, накладаючись, створюють напруження, які

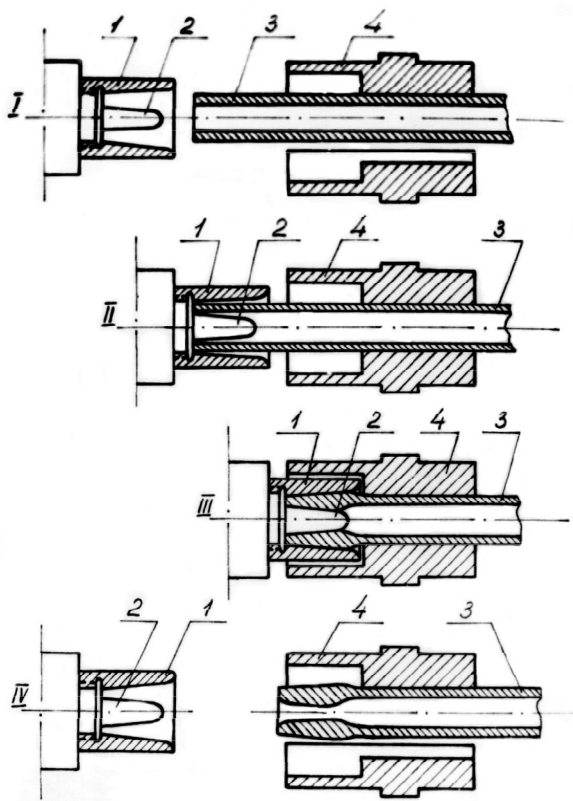
є небезпечними в процесі буріння свердловин [1, 2].

Незважаючи на інженерні розрахунки при проектуванні рівномірної бурильної колони, аварії внаслідок руйнування сталевих бурильних труб відбуваються досить часто. Статистикою встановлено, що при обертовому способі буріння біля 60% всіх аварій відбувається внаслідок руйнування бурильних труб.

Внутрішні залишкові напруження в сталевих бурильних трубах виникають ще в процесі їх виготовлення. У трубній промисловості налагоджено виробництво безшовних труб. Способи виготовлення та елементи теорії прошивання і прокочування труб висвітлено в роботах [3, 4]. У процесі виготовлення бурильних труб із гільзи створюється пластична деформація, і в металі труб виникають внутрішні залишкові напруження від дії вертикальних сил.

Підвищення міцності різьбового з'єднання бурильної труби досягається висаджуванням кінців труби в гарячому стані на горизонтально-ковальських установках. При цьому товщина стінки у висадженій частині труби збільшується за рахунок пластичної деформації, яка створюється в горизонтальному напрямі.

Схема безооблоного висаджування кінців бурильних труб зображена на рис. 1 і описана в роботі [5].



**Рисунок 1 – Схема безооблоного висаджування кінців труб на горизонтально-ковальській установці в коловий замкнутий пуансон**

Інструмент складається з трьох головних деталей: зовнішнього пуансону 1, внутрішнього пуансону 2 і матриці 4. В процесі висаджування метал заповнює простір між стінками обох пуансонів, завдяки чому забезпечується отримання необхідного профілю висадженого кінця бурильної труби 3.

Висаджування кінців бурильної труби за високої температури і значних зусиль призводить не тільки до виникнення залишкових внутрішніх напружень, а також до значного росту зерна і прогину волокон металу.

Отже, завдяки різним способам виконання пластичної деформації тіла труби і її висадженої частини в металі створюються залишкові знакоміні напруження ( розтягу і стиску) на зовнішній і внутрішній поверхнях бурильної труби.

Відомо, що залишкові напруження суттєво впливають на довговічність виробів. Вплив залишкових напружень на довговічність сталевих бурильних труб залежить від величини і розподілу робочих напружень, а також характеру навантаження і механічних властивостей металу.

В наукових роботах [6],[7],[8] зі стійкості залишкових напружень при циклічній дії навантажень розглядаються дослідження взірців зі спеціально створюваними залишковими напруженнями.

У зв'язку з цим доцільно досліджувати зміну фізико-механічних властивостей бурильних труб в процесі буріння свердловин. Це дозволить надати комплексну оцінку стійкості залишкових напружень та визначити їх вплив на довговічність бурильних труб.

Для визначення тангенціальних залишкових напружень у сталевих бурильних трубах пропонується нова методика.

Дослідження залишкових тангенціальних напружень проводили на бурильних трубах групи міцності «К» (марка сталі 36 Г2С), границя плинності яких сягала 55 кг/мм<sup>2</sup>.

Згідно з методикою Н.В.Калакуцького, яку розширив Н.Н. Давіденков [9], при вимірюванні тангенціальних залишкових напружень ширина кільця не повинна перевищувати 1/5 його діаметра. Отже, для труб діаметром 114 мм ширина кільця приймається рівною 20 мм.

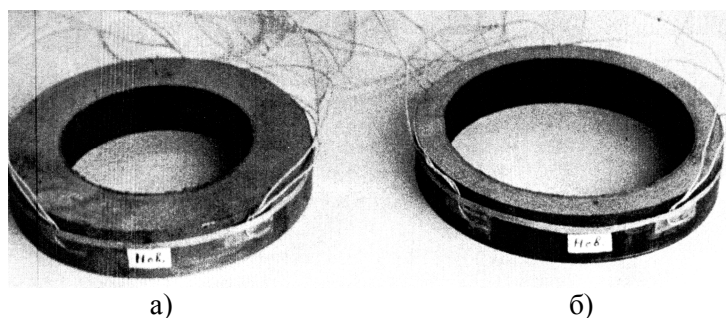
Загалом у бурильних трубах існує тривісний напружений стан:  $\sigma_z$  – осьове напруження;  $\sigma_r$  – радіальне напруження;  $\sigma_t$  – тангенціальне (дотичне, колове) напруження.

Величина  $\sigma_r$  для бурильних труб мала в порівнянні з напруженнями  $\sigma_t$  і  $\sigma_z$ , що стає зрозумілим, якщо врахувати, що на зовнішній і внутрішній поверхнях радіальні залишкові напруження дорівнюють нулю [8].

Згідно з висновками, наведеними в роботі Б.Б.Дадашева [2], тангенціальні залишкові напруження удвічі перевищують осьові залишкові напруження в бурильних трубах. Тому бажано визначати саме тангенціальні залишкові напруження ( $\sigma_t$ ), оскільки вони становлять більшу загрозу міцності труб. Також важливим фактором є те, що при роторному способі буріння бурильна колона сприймає значні напруження кручення. Все це вимагає визначення тангенціальних залишкових напружень, які створюють небезпеку для надійності бурильних труб в процесі буріння свердловини.

Запропоновано метод, який поєднує методи Закса [10] і Давіденкова [9] і дозволяє визначити залишкові напруження по всьому перерізу кільця, вирізаного з бурильної труби.

Спочатку проводиться одностороннє пошарове розточування кільця до того розміру, поки товщина стінки останнього не досягне 2 мм; потім кільце розрізають в радіальному



а) висаджена частина бурильної труби; б) тіло бурильної труби  
**Рисунок 2 – Тензорезистори наклеєні на зовнішній поверхні кілець, вирізаних з бурильної труби**

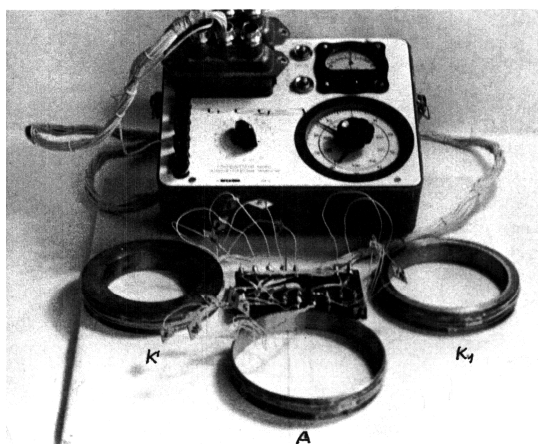
напрямку, що дає змогу визначити залишкові напруження на зовнішній поверхні бурильної труби.

На відповідно обробленій зовнішній поверхні кільця рівномірно по всьому периметру наклеюють п'ять тензорезисторів (рис. 2).

Чим більша кількість наклеєних тензорезисторів, тим більше число вимірюваних точок на поверхні кільця, а, отже, вища достовірність отриманих результатів.

На сьогодні для вимірювання деформацій, напружень, сил та інших механічних параметрів як у вітчизняній, так і зарубіжній промисловості широкого застосування набули електричні дистанційні методи із використанням тензорезисторів. У нашому випадку для вимірювання деформації застосовано тензорезистори з базою 30 мм і опором 200,7 Ом.

Деформацію замірювали приладом ВСД, основною частиною якого є вимірювальний міст Уйтсона. Установка і взірці з приклеєними на них тензорезисторами зображені на рис. 3.



**Рисунок 3 – Установка для вимірювання деформацій при пошаровому внутрішньому розточуванні кілець**

Тензорезистори підключали у ланцюг вимірювача статичних деформацій (ВСД) через панель, до клем якої припаювалися по одному кінцю з кожного тензорезистора. Інші п'ять кінців під'єднували в одну точку, яка є нульовою фазою (на рис. 3 досліджене кільце позначено буквою А). Зі зворотної сторони до клем

панелі припаювалися кінці від тензорезисторів, наклеєних на двох інших кільцях, з яких одне компенсаційне К, а друге контрольне К<sub>1</sub>. Компенсаційні і контрольні тензорезистори були наклеєні на кільця, вирізані також з цієї нової бурильної труби і не знімалися з установки на впродовж всього експерименту.

Тензорезистори підключали виконувалось за схемою індивідуальної комутації, тобто кожному активному тензорезистору відповідає свій компенсаційний.

Під час замірювання проводився постійний контроль за роботою вимірювальної схеми приладу.

Перед початком механічного розточування дослідних кілець фіксувалися початкові показники тензорезисторів (нульове балансування).

Особлива увага приділялася підтриманню температурних умов активних і компенсаційних тензорезисторів як під час вимірювання вихідних параметрів, так і вимірювання після пошарового розточування кілець.

Внутрішнє пошарове розточування кілець виконувалось на токарному верстаті 1К62. Для того, щоб забезпечити надійне закріплення кілець під час розточування і уникнути пошкодження тензорезисторів, наклеєних на зовнішній поверхні цих кілець, було сконструйовано спеціальний пристрій (рис. 4).

Досліджуване кільце вставляється в розточений паз корпусу і закріплюється притисканням кришкою пристрою до корпусу.

Корпус пристрою, закріплений у патроні, не знімався протягом усього циклу розточування кілець, а кришка пристрою при збиранні підганялася по рисках, зроблених заздалегідь. Цим досягалась ідентичність його закріплення.

Під час механічної обробки на кожному з розточуваних кілець із висадженої частини бурильної труби зрізали шар металу товщиною 2 мм, а з кільця тіла труби – шар товщиною 1 мм. Режим різання при розточуванні кілець був однаковим: глибина різання  $t=0.192\text{мм/об}$ , число обертів шпинделя станка  $n=80\text{ об/хв}$ . При такому режимі різання кілець не розігрівались.

Для стабілізації показів тензорезисторів зразки витримувалися після розточування протягом 18-20 годин.

Для визначення дійсного значення відносних одиниць деформації було проведено тару-

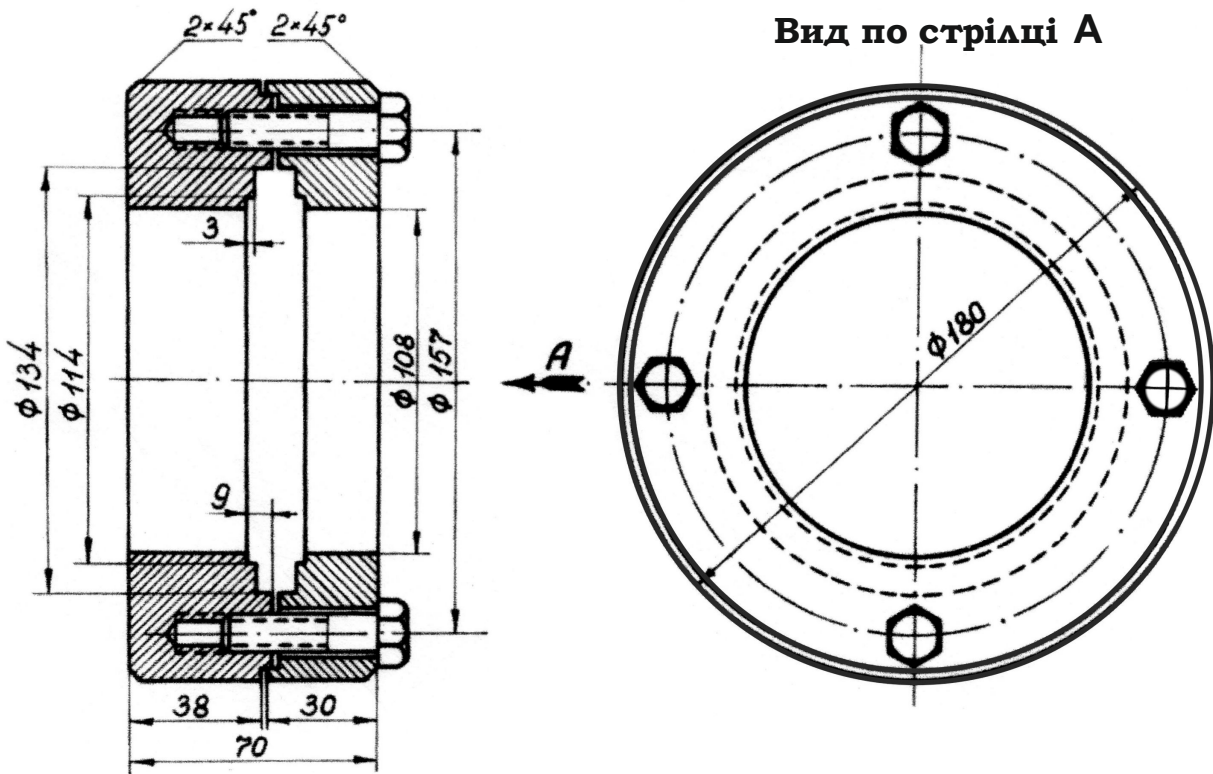


Рисунок 4 – Пристрій для розточування кілець

вання приладів за допомогою тензорезисторів ( $R=200,7 \text{ Ом}$ ), наклеєних на балку рівного опору. Множенням показників приладу, отриманих після чергового розточування кільця, на тарувальний коефіцієнт  $K=0,936 \times 10^{-3}$  отримано дійсні значення відносної деформації.

За отриманими даними побудовано деформаційні криві, за якими визначається інтенсивність наростання деформації при переході від одного шару металу, що відсікається, до іншого.

Розрахунок тангенціальних залишкових напружень виконувався за методикою, описаною в [11].

Величина тангенціальних залишкових напружень при пошаровому розточуванні кілець визначається за формулою

$$\sigma_T = \frac{E}{1 - \mu^2} \left[ (F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} - \frac{F_3 + F}{2F} \cdot \delta \right],$$

де  $\sigma_T$  – тангенціальні залишкові напруження, в  $\text{кг/мм}^2$ ;

$E$  – модуль пружності (для матеріалу сталевих бурильних труб  $E=21000 \text{ кг/мм}^2$ );

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\mu=0,3$ ;

$F_3$  – площа, яка відповідає зовнішньому діаметру кільця, в  $\text{мм}^2$ ;

$F$  – змінна площа, яка відповідає діаметру розточуваного шару, що розглядається, в  $\text{мм}^2$ ;

$\delta$  – відносна зміна зовнішнього діаметра кільця у відносних одиницях деформації.

Результати розрахунків зведені до таблиць 1 та 2 і відображені в графіках (епюрах) тангенціальних залишкових напружень (рис. 5 та 6).

Як бачимо, на зовнішній поверхні тіла труби тангенціальні залишкові напруження стиску складають  $8,2 \text{ кг/мм}^2$ , тобто 15% від границі плинності металу бурильної труби ( $\sigma_{\text{тек}}=55 \text{ кг/мм}^2$  для труб групи міцності «К»). Відповідно, на внутрішній поверхні тіла труби тангенціальні залишкові напруження розтягу досягають величини  $12,3 \text{ кг/мм}^2$ , що складає 22% від границі плинності матеріалу труби.

Для висадженої частини бурильної труби ці значення відповідно складають: на зовнішній поверхні –  $20,2 \text{ кг/мм}^2$  (36,7% від границі плинності матеріалу труби) і на внутрішній –  $5,4 \text{ кг/мм}^2$  (9,8% від границі плинності бурильних труб групи міцності «К»).

Висаджування кінців бурильної труби на горизонтально-ковальських установках (рис. 1) призводить до зміни знаку тангенціальних залишкових напружень на зовнішній поверхні труби, про що свідчать представлені графіки.

З практики буріння свердловин відомо, що більшість аварій з бурильними трубами трапляється саме у висадженій частині бурильної труби. Очевидно, що цьому сприяє не тільки різьба, яка є концентратором напруження, але і значні залишкові напруження розтягу, що виникають у висадженій частині бурильної труби після процесу висаджування кінців труб.

За розробленою методикою можна визначити тангенціальні залишкові напруження, як на зовнішній та внутрішній поверхнях труби, так і по всьому перерізі металу бурильної труби.

**Таблиця 1 – Результати розрахунків. Тіло нової бурильної труби**  
 $D_3=114$  мм;  $F_3=10200$  мм<sup>2</sup>;  $D_{вн}=92,5$  мм;  $F_{вн}=6717$  мм<sup>2</sup>;  $E=21000$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\mu=0.3$

№ з/п	$F$	$F_3 - F$	$\frac{F_3+F}{2F}$	$\delta \cdot 10^{-5}$	$\frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$\frac{F_3+F}{2F} \delta \cdot 10^{-5}$	$\left[ \frac{(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} - \frac{F_3+F}{2F} \delta \right] \cdot 10^{-5}}$	$\frac{E}{1-\mu^2} \cdot 10^{-5}$	$\sigma_T$
1	6750	3550	1.26	2.5	0.0160	56.80	3.15	53.65	0.23	12.3
2	7000	3300	1.24	4.8	0.0163	53.79	5.95	47.84	0.23	11.0
3	7250	3050	1.21	5.6	0.0156	47.58	6.77	40.81	0.23	9.4
4	7500	2800	1.19	7.0	0.0149	41.72	8.33	33.39	0.23	7.7
5	7750	2550	1.16	9.4	0.0143	36.46	10.90	25.56	0.23	5.9
6	8000	2300	1.14	16.0	0.0151	34.73	18.24	16.49	0.23	3.8
7	8250	2050	1.12	23.4	0.0162	33.21	26.21	7.0	0.23	1.6
8	8500	1800	1.1	30.0	0.0167	30.06	33.00	-2.94	0.23	-0.7
9	8750	1550	1.09	33.7	0.0165	25.57	36.73	-11.19	0.23	-2.6
10	9000	1300	1.07	37.4	0.0167	21.71	40.02	-18.36	0.23	-4.2
11	9250	1050	1.06	40.5	0.0168	17.64	42.93	-25.29	0.23	-5.8
12	9500	800	1.04	41.2	0.0158	12.64	42.85	-30.21	0.23	-6.9
13	9750	550	1.03	42.0	0.0170	9.35	43.26	-33.91	0.23	-7.8
14	10000	300	1.01	36.0	-0.0091	-2.73	36.36	-39.09	0.23	-8.9
15	10300	0	1	35.6	-0.0152	0	35.60	-35.60	0.23	-8.2

**Таблиця 2 – Результати розрахунків. Висаджена частина бурильної труби**  
 $D_3=115$  мм;  $F_3=10400$  мм<sup>2</sup>;  $D_{вн}=71$  мм;  $F_{вн}=3957$  мм<sup>2</sup>;  $E=21000$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\mu=0.3$

№ з/п	$F$	$F_3 - F$	$\frac{F_3+F}{2F}$	$\delta \cdot 10^{-5}$	$\frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$\frac{F_3+F}{2F} \delta \cdot 10^{-5}$	$\left[ \frac{(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} - \frac{F_3+F}{2F} \delta \right] \cdot 10^{-5}}$	$\frac{E}{1-\mu^2} \cdot 10^{-5}$	$\sigma_T$
1	4000	6400	1.8	-1.2	-0.004	-25.60	-2.16	-23.44	0.23	-5.4
2	4500	5900	1.65	-3.2	-0.0053	-31.27	-5.28	-25.99	0.23	-6.0
3	5000	5400	1.54	-5.5	-0.0065	-35.10	-8.47	-26.63	0.23	-6.1
4	5500	4900	1.44	-7.1	-0.0077	-37.73	-10.22	-27.51	0.23	-6.3
5	6000	4400	1.37	-12.9	-0.0100	-44.00	-17.67	-26.38	0.23	-6.0
6	6500	3900	1.30	-23.6	-0.0141	-54.99	-30.68	-24.31	0.23	-5.6
7	7000	3400	1.24	-31.7	-0.0174	-59.16	-39.31	-19.85	0.23	-4.6
8	7500	2900	1.19	-42.4	-0.0216	-62.64	-50.46	-12.18	0.23	-2.8
9	8000	2400	1.15	-51.3	-0.0244	-58.56	-58.99	0.43	0.23	0.1
10	8500	1900	1.11	-65.4	-0.0313	-59.47	-72.59	13.12	0.23	3.0
11	9000	1400	1.08	-72.2	-0.0336	-47.04	-77.98	30.94	0.23	7.1
12	9500	900	1.05	-79.6	-0.0383	-34.47	-83.58	49.11	0.23	11.3
13	10000	400	1.02	-84.7	-0.0399	-15.96	-86.39	70.43	0.23	16.2
14	10400	0	1	-87.8	-0.0401	0	-87.80	87.80	0.23	20.2

**Висновки:**

Розроблено методику визначення тангенціальних залишкових напружень у сталевих бурильних трубах.

Тангенціальні залишкові напруження мають різний знак (розтяг, стиск) як в тілі труби, так і у її висадженій частині.

Висаджування кінців бурильної труби на горизонтально-ковальських установках призводить до зміни знаків залишкових тангенціальних напружень.

Тангенціальні залишкові напруження складають відповідно від 10% до 22% відносно границі плинності матеріалу бурильних труб групи міцності «К», і тільки для зовнішньої поверхні висадженої частини бурильної труби вони сягають 36,7%.

Розроблено конструкцію спеціального пристрою для закріплення і пошарового розточування дослідних кілець, у разі застосуванні якого тензорезистори не пошкоджуються і досягається ідентичність проведення експерименту.

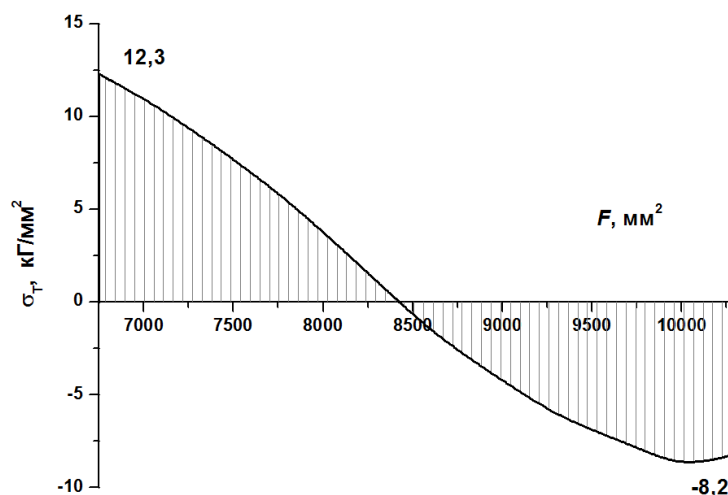


Рисунок 5 – Тангенціальні залишкові напруження в тілі бурильної труби

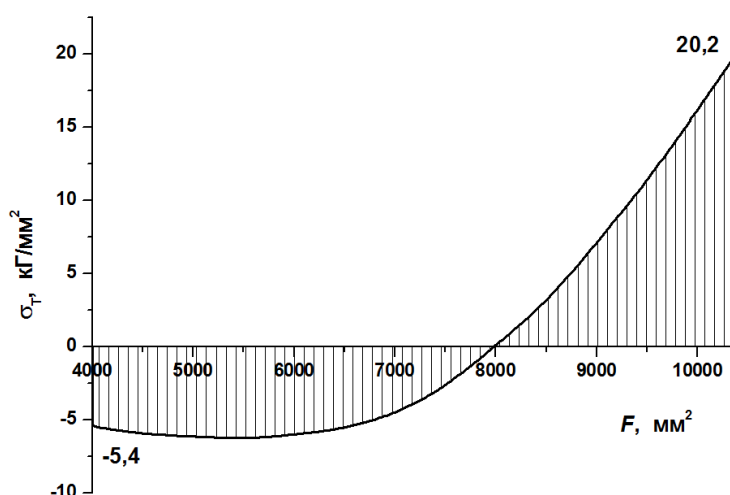


Рисунок 6 – Тангенціальні залишкові напруження у висадженій частині бурильної труби

### Література

1 Шищенко С.И. Бурьльные трубы, математическая теория их работы и экспериментальное исследование их материалов / С.И.Шищенко, С.Г.Саркисов. – Баку-Москва: Азнефтеиздат, 1933.

2 Дадашев Б.Б. Остаточные напряжения в бурьльных трубах / Б.Б.Дадашев // Сб. тр. АЗНИИ «Бурьльные трубы». – Баку: Азгостоптехиздат, 1940.

3 Данилов Ф.А. Производство стальных труб горячей прокаткой / Ф.А.Данилов, А.З.Глейберг, В.Г.Балакин. – М.: Metallurgizdat, 1954.

4 Шевченко А.А. Непрерывная прокатка труб / А.А.Шевченко. – М.: Metallurgizdat, 1954.

5 Вождаев С.Н. Некоторые вопросы разработки технологии безоблойной высадки бурьльных труб: Кандидатская диссертация. – М.: МИНХ и ГП им. Губкина, 1970.

6 Гликман Л.А. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на механические свойства металла и прочность изделий /

Л.А.Гликман // Труды Ленинградского инженерно-экономического института. – 1956. – Вып.13.

7 Кудрявцев И.В. О снятии остаточных напряжений при осевых нагружениях поверхностно-наклёпанных стержнем / И.В.Кудрявцев, Л.М.Розенман // Металловедение и обработка метал лов. – 1957. – № 7.

8 Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А.Биргер. – М.: Машгиз, 1963.

9 Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений / Н.Н.Давиденков // Заводская лаборатория. – 1950. – №2 и №12.

10 Sashs G.Z. f. Metallkunde, 1952. 19.352

11 М.М.Кобрин М.М. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях / М.М.Кобрин, Л.И.Дехтярь. – М.: Машиностроение, 1965.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
25.10.12

Рекомендована до друку професором  
Дрогомирецьким Я.М.