

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ БУРИЛЬНИХ ТРУБ

Ю.С. Сичов (мол.)

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (0342) 504612;
e-mail: metalyna@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. В залежності від величини і характеру розподілу залишкових напружень вони можуть бути корисними або шкідливими під час роботи різних виробів. Для виявлення впливу тангенціальних залишкових напружень на втомну міцність бурильних труб був проведений експеримент з бурильною трубою 114x10E, яка відпрацювала більше дев'яти тисяч годин механічного буріння. Результати експериментів показали, що залишкові напруження впливають на втомну міцність бурильних труб. Показано, що після довготривалої експлуатації бурильних труб, необхідно проводити високий відпуск для зняття шкідливого впливу залишкових напружень, що є додатковим резервом підвищення довговічності сталевих бурильних труб.

Ключові слова: буріння, труба, деформація, залишкові напруження, втомна міцність, розтяг, стиск, довговічність.

Приведены причины разрушения стальных бурильных труб при роторном способе бурения. Показано, что кроме воздействия внешних нагрузок и других факторов на долговечность бурильных труб влияют остаточные напряжения, возникающие в металле труб при их изготовлении на трубопрокатных станах в результате пластического деформирования при высокой температуре и значительных прилагаемых усилиях. В зависимости от величины и характера распределения остаточных напряжений они могут быть полезными или вредными при работе разных изделий. Для выявления влияния тангенциальных остаточных напряжений на усталостную прочность бурильных труб был проведен эксперимент с бурильной трубой 114x10E, которая отработала свыше девяти тысяч часов механического бурения. Результаты экспериментов показали, что остаточные напряжения влияют на усталостную прочность бурильных труб. Показано, что после долговременной эксплуатации бурильных труб следует проводить высокий отпуск для снятия вредного влияния остаточных напряжений, что является дополнительным резервом повышения долговечности стальных бурильных труб.

Ключевые слова: бурение, труба, деформация, остаточное напряжение, усталостная прочность, растяжение, сжатие, долговечность.

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 life time 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. Depending on a size and character of distribution of remaining tensions they can be useful or harmful during work of different wares. For the exposure of influence of tangential remaining tensions on tireless durability of drill pipes of 114x10E, that worked the more than nine thousand hours of the mechanical drilling. The results of experiments showed that remaining tensions had an influence on tireless durability of drill pipes. It is shown that after of long duration exploitation of drill pipes. It is necessary to conduct high vacation for the removal of harmful influence of remaining tensions that are additional reserve of increase of longevity of the steel drill pipes.

Keywords: drilling, pipe, deformation, residual stress, tireless durability, tension, compression, lifetive.

У процесі буріння свердловин роторним способом бурильна колона піддається впливу різних за характером і величиною статичних і динамічних навантажень, які створюють в бурильних трубах складні напруження.

Постійно вдосконалюються конструкції бурильних труб, підвищуються їх міцності характеристики, пропонуються нові матеріали для виготовлення труб, щоб забезпечити надійність їх роботи в умовах зростаючих глибин, форсованих режимів буріння і підвищення потужності бурового обладнання.

І все ж таки бурильні труби продовжують залишатись частиною бурового обладнання, яке частіше руйнується. Статистикою встановлено, що при роторному способі буріння близько

60% всіх аварій відбувається внаслідок руйнування бурильних труб.

Основними причинами руйнування сталевих бурильних труб є:

- дефекти металу труб, що виникають при виливанні сталі (пористість, рихлість, чужорідні включення); прокатуванні труб (волосовини, закати, розшарування різного роду, включення окалини); висаджуванні кінців труб (зростання зерна, прогин волокон); термічній обробці (тріщини і мікротріщини гартування);

- втома металу, що виникає від дії знакозмінних напружень;

- абразивне зношування;

- корозія і ерозія.

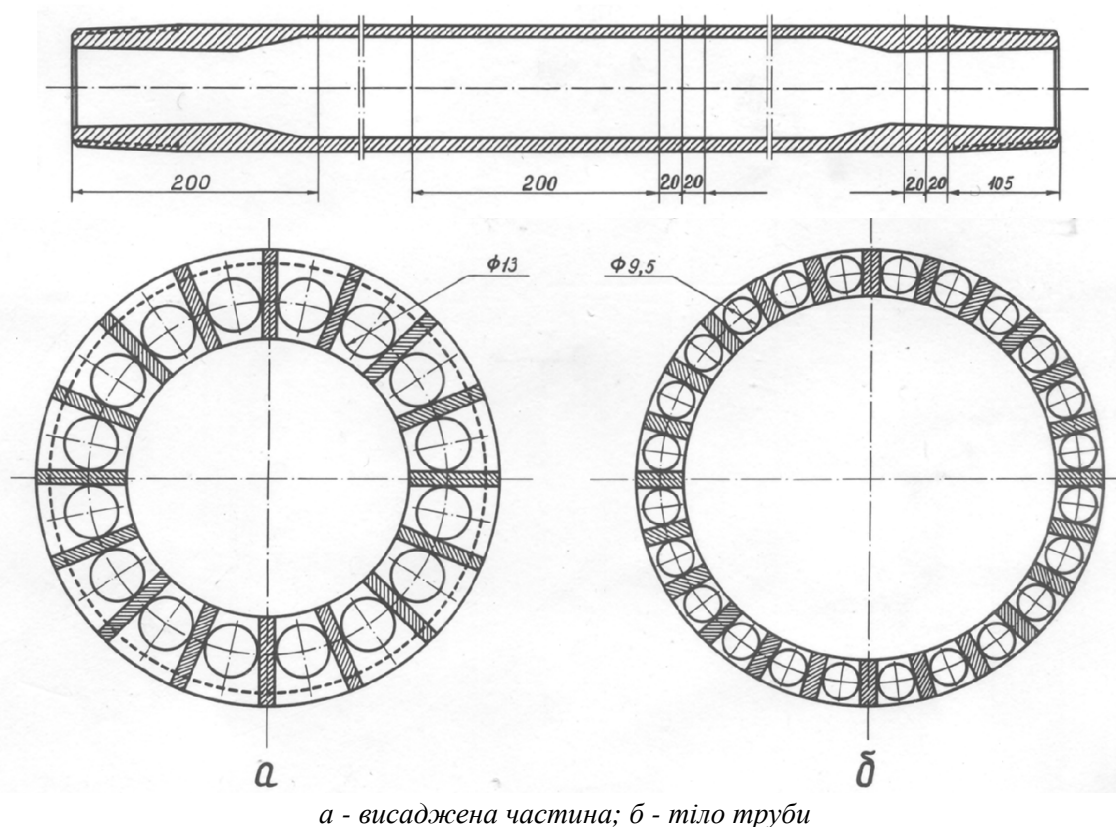


Рисунок 1 – Схема розкрою бурильної труби для отримання зразків

Наведеним причинам руйнування сталевих бурильних труб присвячена велика кількість наукових робіт. Проте необхідно констатувати, що досліджень залишкових напружень, які виникають у процесі виготовлення бурильних труб, і, що особливо важливо, стосовно впливу цих напружень на втомну міцність сталевих бурильних труб, дуже мало.

Відомо [1], що залежно від величини і характеру розподілу залишкових напружень вони можуть бути корисними або шкідливими при роботі різних виробів.

Вплив залишкових напружень на міцність виробів також залежить від величини і характеру розподілу робочих напружень, характеру навантаження і механічних властивостей матеріалу.

В разі неоднорідного напруженого стану початок прояву пластичної деформації, або, іншими словами, границя пружного опору виробу залежить від характеру розподілу залишкових напружень. Якщо сумарна епюра напружень, яка отримана при накладанні напружень від зовнішнього навантаження на залишкові напруження, характеризується меншою величиною максимальних напружень, то в цьому випадку залишкові напруження підвищують границю пружного опору виробу. І навпаки, збільшення максимальних напружень від зовнішнього навантаження за рахунок накладення залишкових напружень призводить до негативного прояву залишкових напружень, тобто до зменшення границі пружного опору виробу.

При бурінні глибоких свердловин (4000-5000м) в умовах Прикарпаття втомне руйну-

вання переважає інші види поломок сталевих бурильних труб.

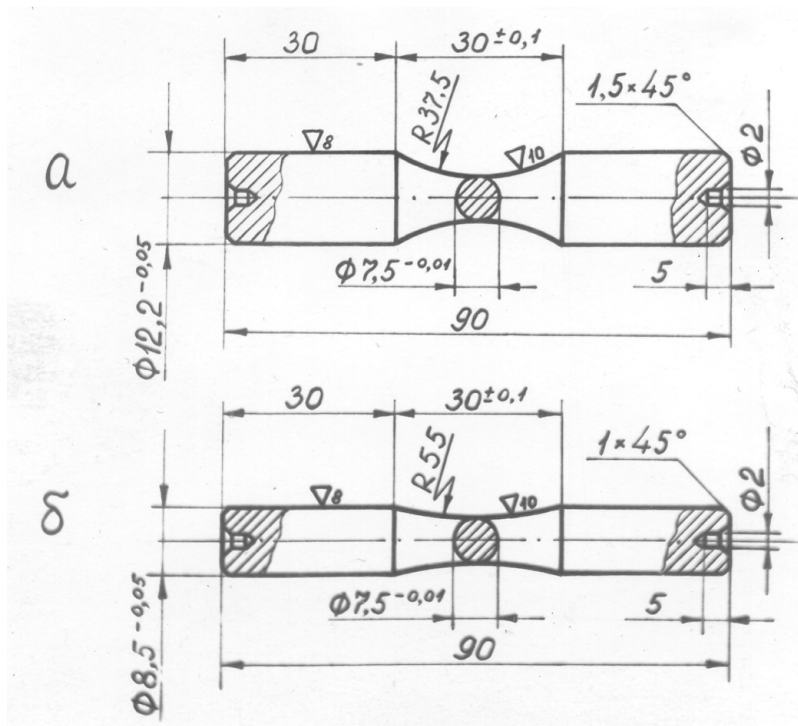
З метою уникнення руйнування сталевих бурильних труб, причиною якого можуть бути дефекти металу, на промислах застосовується обов'язковий контроль труб установкою ультразвукової дефектоскопії [2].

Спочатку виконується ультразвуковий контроль стаціонарною установкою перед згинуванням замків у гарячому стані для нових бурильних труб. Це виключає можливість потрапляння на бурову дефектних труб. Періодичний контроль за станом бурильних труб виконується безпосередньо на буровій пересувною установкою ультразвукової дефектоскопії.

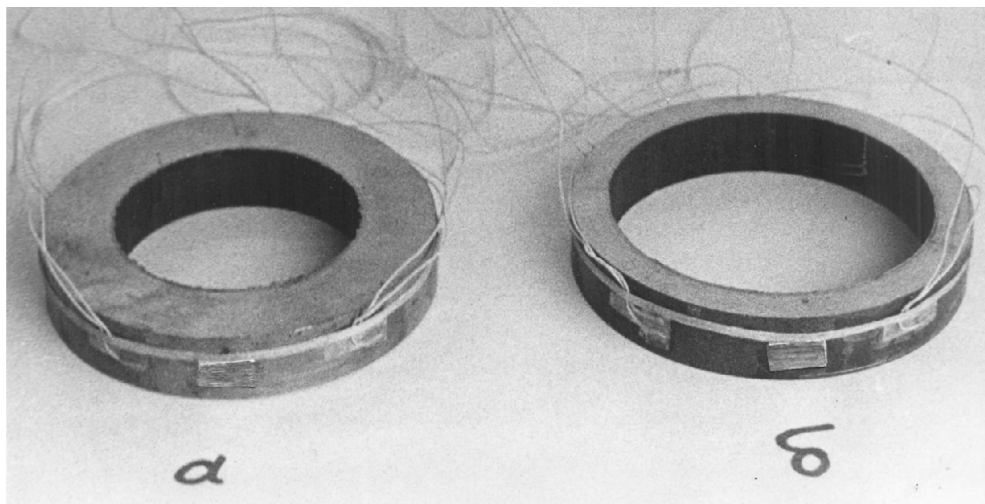
Для виявлення впливу тангенціальних залишкових напружень на втомну міцність бурильних труб був проведений такий експеримент. Бурильна труба 114x10Е, яка відпрацювала більше дев'яти тисяч годин механічного буріння на промислах Стрийського УБР ВАТ «Укрбургаз», була розкrojена за схемою, зображеною на рис. 1.

З цієї труби вирізали з обох кінців й посередині циліндри і кільця за розмірами, які вказані на рис. 1. З циліндрів висадженої частини і тіла труби виготовили зразки (рис. 2) для випробовування на втомну міцність згідно з ГОСТ 2860-65.

Кожне з чотирьох кілець шириною 20 мм (рис. 3) (по два кільця з висадженої частини і тіла бурильної труби) призначалися для визначення тангенціальних залишкових напружень згідно з методикою [3].



а - з висадженої частини бурильної труби; б - з тіла бурильної труби
Рисунок 2 – Конструкції зразків для випробовування на втомну міцність



а - з висадженої частини бурильної труби; б - з тіла бурильної труби
Рисунок 3 – Кільця, вирізані із бурильної труби з наклеєними тензорезисторами

Необхідно зауважити, що виготовлення зразків виконувалось за однією схемою, технологічні операції проводили в тому ж порядку із застосуванням одного і того ж верстатного обладнання.

Умови роботи бурильних труб в свердловині є такими, що при обертанні в них можливе виникнення знакозмінного згину. Тому для матеріалу бурильної труби прийнято визначати границю втомної міцності на згин при симетричному циклі.

Випробування зразків з бурильної труби на втомну міцність проводились на дослідних установках, які розраховані на випробування циліндричних зразків в умовах чистого згину при обертанні по симетричному циклу. Наванта-

ження взірця виконується силою Q , яка створює постійний згинальний момент по всій довжині робочої частини зразка (рис. 4).

Найбільше напруження в робочій частині зразка визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{16QL}{\pi d^3}; \quad (1)$$

де M - згинальний момент в робочій частині зразка;

W - момент опору перерізу зразка;

Q - навантаження, прикладене до зразка;

L - відстань між точкою прикладання сили і опорою;

d - діаметр зразка.

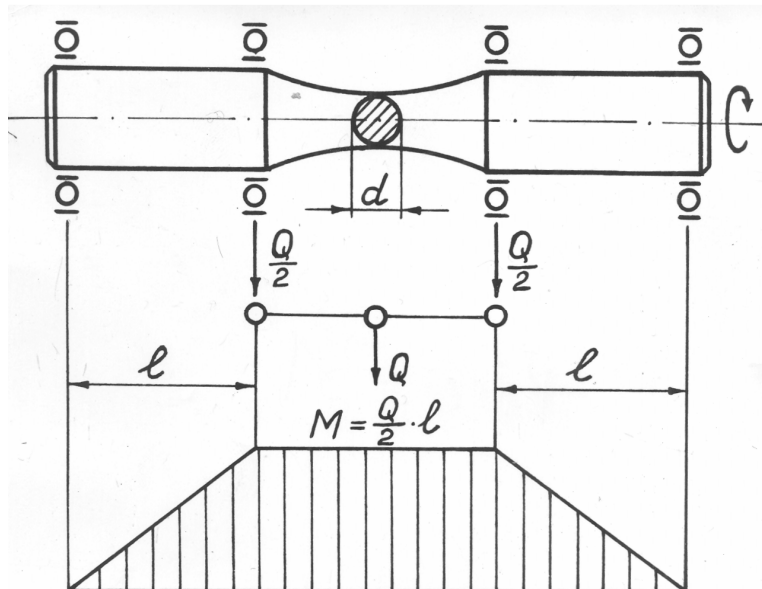


Рисунок 4 – Схема навантаження зразка на дослідній установці ЗКШ-25

Випробування на втому проводились на базі $N=10^7$ циклів при $n=3000\text{хв}^{-1}$. Для випробуваних зразків будувалася діаграма границі витривалості з точністю до 5 МПа. За величину границі витривалості приймалося найбільше напруження, при якому зразок витримував без руйнування 10^7 циклів.

Враховуючи статичний характер залежності втоми металу, результати дослідів можна подати у вигляді кореляційного рівняння [4]:

$$\lg N = \lg \bar{N} + r \frac{S_N}{S_\sigma (\sigma - \bar{\sigma})}; \quad (2)$$

де $\lg N$ - логарифм імовірного значення довговічності на даному рівні напруження;

$\lg N = (\sum \lg N_i) / n$ - середнє арифметичне значення довговічності;

$$r = \frac{\sum (\sigma - \bar{\sigma})(\lg N - \lg \bar{N})}{n S_N S_\sigma} \quad \text{- коефіцієнт кореляції;}$$

кореляції;

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum (\lg N - \lg \bar{N})^2}{n}} \quad \text{- середнє квадратичне відхилення довговічності;}$$

тичне відхилення довговічності;

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\sigma - \bar{\sigma})^2}{n}} \quad \text{- середнє квадратичне відхилення напруження;}$$

відхилення напруження;

σ - напруження на даному рівні;

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n} \quad \text{- середнє арифметичне значення обмеженої витривалості від напруження;}$$

н - кількість випробуваних зразків, $n=20$.

Для визначення кореляційного рівняння на основі отриманих експериментальних даних складається допоміжна таблиця.

На основі кореляційного рівняння будується крива втомної міцності в напівлогарифмічних координатах $\sigma - \lg N$.

Результати випробувань на втому міцність зразків, виготовлених з дослідної бурильної труби, представлені на рис. 5 і табл. 1 та табл. 2.

Згідно з рис. 5 і таблиць 1 і 2, границя витривалості зразків відповідно складає: для висадженої частини бурильної труби $\sigma_{-1} = 26 \text{ кг/мм}^2$, для тіла бурильної труби $\sigma_{-1} = 30 \text{ кг/мм}^2$.

Зниження втомної міцності висадженої частини бурильної труби по відношенню до тіла труби є результатом висаджування кінців труби на горизонтально-ковальських машинах за високих температур і значних зусиль, що призводить до росту зерна (рис.6) і прогину волокон металу (рис.7).

Пластична деформація металу характеризується певною орієнтацією зерен, так званою текстурою. Безсистемно орієнтовані зерна під дією деформації повертаються осями найбільшої міцності вздовж напрямку деформації. Результати досліджень свідчать, що із збільшенням деформації густина металу зменшується [5].

Крім цього, процес висаджування кінців труб виконується дуже швидко, в результаті чого температура висаджених кінців залишається високою – в межах $1050-1100^\circ\text{C}$. За такої температури відбувається рекристалізація, яка призводить до росту зерна. Це також понижує міцність металу.

В процесі виготовлення бурильних труб відбувається пластична деформація металу, що призводить до наведення залишкових напружень у його структурі.

Визначення тангенціальних залишкових напружень проводилось згідно з методикою, описаною в статті [3]. Отримані результати визначення тангенціальних залишкових напружень у висадженій частині бурильної труби (рис. 8, табл. 3) і тілі труби (рис. 9, табл. 4), яка застосовувалася в бурінні свердловин на промислах Стрийського УБР ВАТ «Укрбургаз» більше дев'яти тисяч годин механічного буріння.

Таблиця 1 – Допоміжна таблиця для складання кореляційного рівняння випробування зразків з висадженої частини бурильної труби на втомну міцність

i	$X_i = \sigma_i$	$x_i = X_i - \bar{X}$	N_i	$Y_i = \lg N_i$	$y_i = Y_i - \bar{Y}$	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
1	50	12.1667	13500	4.1303	-1.1066	173.3620	1.2245	-14.5702
2	45	8.1667	23600	4.3729	-0.8640	66.6949	0.7465	-7.0560
3	45	8.1667	28200	4.4502	-0.7867	66.6939	0.6188	-6.4247
4	45	8.1667	38400	4.5843	-0.6526	66.6939	0.4258	-5.3295
5	40	3.1667	64700	4.8109	-0.4260	10.279	0.1815	-1.3490
6	40	3.1667	97700	4.9899	-0.2470	10.279	0.0610	-0.7821
7	40	3.1667	163100	5.2122	-0.0247	10.279	0.0006	-0.0782
8	35	-1.8333	131800	5.1200	-0.1169	3.3609	0.0136	0.2143
9	35	-1.8333	215200	5.3328	0.0959	3.3609	0.0092	-0.1753
10	35	-1.8333	283900	5.4532	0.2163	3.3609	0.0467	-0.3967
11	30	-6.8333	376800	5.5761	0.3392	46.6940	0.1150	-2.3178
12	30	-6.8333	551200	5.7414	0.5045	46.6940	0.2545	-3.4474
13	30	-6.8333	1089000	6.0370	0.8001	46.6940	0.6401	-5.4673
14	27	-9.8333	1703000	6.2312	0.9943	96.6938	0.9886	-9.7772
15	26	-11.8333	1849000	6.5117	1.2748	128.4440	1.6151	-14.4476
16	26		10^7					
17	25.5		10^7					
18	25		10^7					
	$\sum X_i = 552.5$ $\bar{X} = 36.833$			$\sum Y_i = 78.5541$ $\bar{Y} = 5.2369$		$\sum x_i^2 = 778832$	$\sum y_i^2 = 6.9515$	$\sum xy = -71.405$

$$m_\sigma = 51.9221 \quad S_\sigma = 7.205$$

$$m_N = 0.4634 \quad S_N = 0.6807$$

$$m_{\sigma N} = -4.7603 \quad r = -0.9706$$

$$\lg N = 8.6145 - 0.0917\sigma$$

Таблиця 2 – Допоміжна таблиця для складання кореляційного рівняння випробування зразків із тіла бурильної труби на втомну міцність

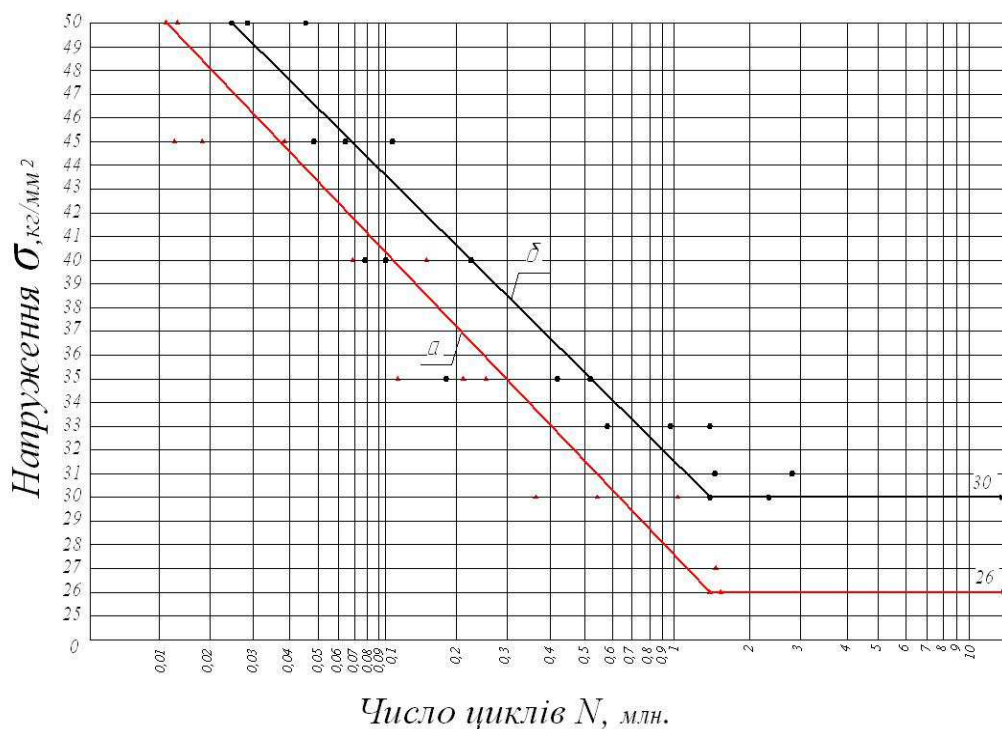
i	$X_i = \sigma_i$	$x_i = X_i - \bar{X}$	N_i	$Y_i = \lg N_i$	$y_i = Y_i - \bar{Y}$	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
1	50	11.0556	24100	4.3820	-0.9958	122.2262	0.9916	-11.0091
2	50	11.0556	28400	4.4533	-0.9245	122.2262	0.8547	-10.2209
3	50	11.0556	44200	4.6454	-0.7324	122.2262	0.5364	-8.0971
4	45	6.0556	47800	4.6794	-0.6984	36.6702	0.4877	-4.2292
5	45	6.0556	67700	4.8306	-0.5472	36.6702	0.2994	-3.3136
6	45	6.0556	112300	5.0504	-0.3274	36.6702	0.1072	-1.9826
7	40	1.0556	74500	4.8722	-0.5056	1.1143	0.2556	-0.5337
8	40	1.0556	98300	4.9926	-0.3852	1.1143	0.1438	-0.4066
9	40	1.0556	216700	5.3359	-0.0419	1.1143	0.0017	-0.0442
10	35	-3.9444	187800	5.2737	-0.1041	15.5582	0.0108	0.4106
11	35	-3.9444	420300	5.6235	0.2457	15.5582	0.0604	-0.9691
12	35	-3.9444	527600	5.7223	0.3445	15.5582	0.1187	-1.3588
13	33	-5.9444	571400	5.7569	0.3791	35.3358	0.1437	-2.2535
14	33	-5.9444	943600	5.9748	0.5970	35.3358	0.3564	-3.5488
15	33	-5.9444	1512000	6.1796	0.8018	35.3358	0.6428	-4.7662
16	31	-7.9444	1573000	6.1967	0.8189	63.1135	0.6706	-6.5056
17	31	-7.9444	2817400	6.4498	1.0720	63.1135	1.1492	-8.5164
18	30	-8.9444	2409500	6.3818	1.0040	80.0023	1.0160	-8.9802
19	30		10^7					
20	30		10^7					
21	29		10^7					
	$\sum X_i = 701$ $\bar{X} = 38.9444$			$\sum Y_i = 96.800$ $\bar{Y} = 5.3778$		$\sum x_i^2 = 838943$	$\sum y_i^2 = 7.8432$	$\sum xy = -76.325$

$$m_\sigma = 46.6079 \quad S_\sigma = 6.8260$$

$$m_N = 0.4357 \quad S_N = 0.6600$$

$$m_{\sigma N} = -4.2402 \quad r = -0.9412$$

$$\lg N = 8.9216 - 0.0910\sigma$$



а - висаджена частина бурильної труби; б - тіло бурильної труби

Рисунок 5 – Криві втоми зразків з бурильної труби, що відпрацювала понад 9 000 годин механічного буріння



Рисунок 6 – Мікроструктура металу висадженого кінця бурильної труби

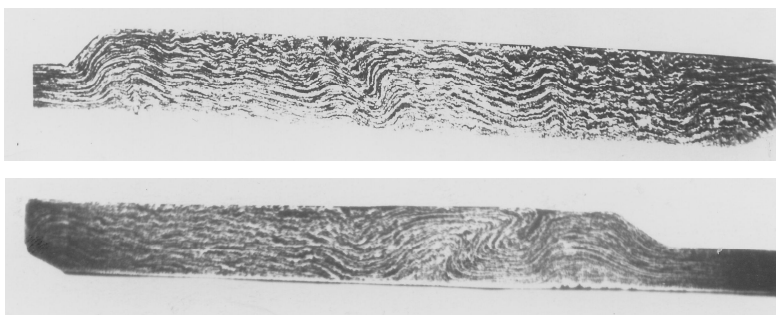


Рисунок 7 – Прогин волокон металу висадженої частини бурильної труби

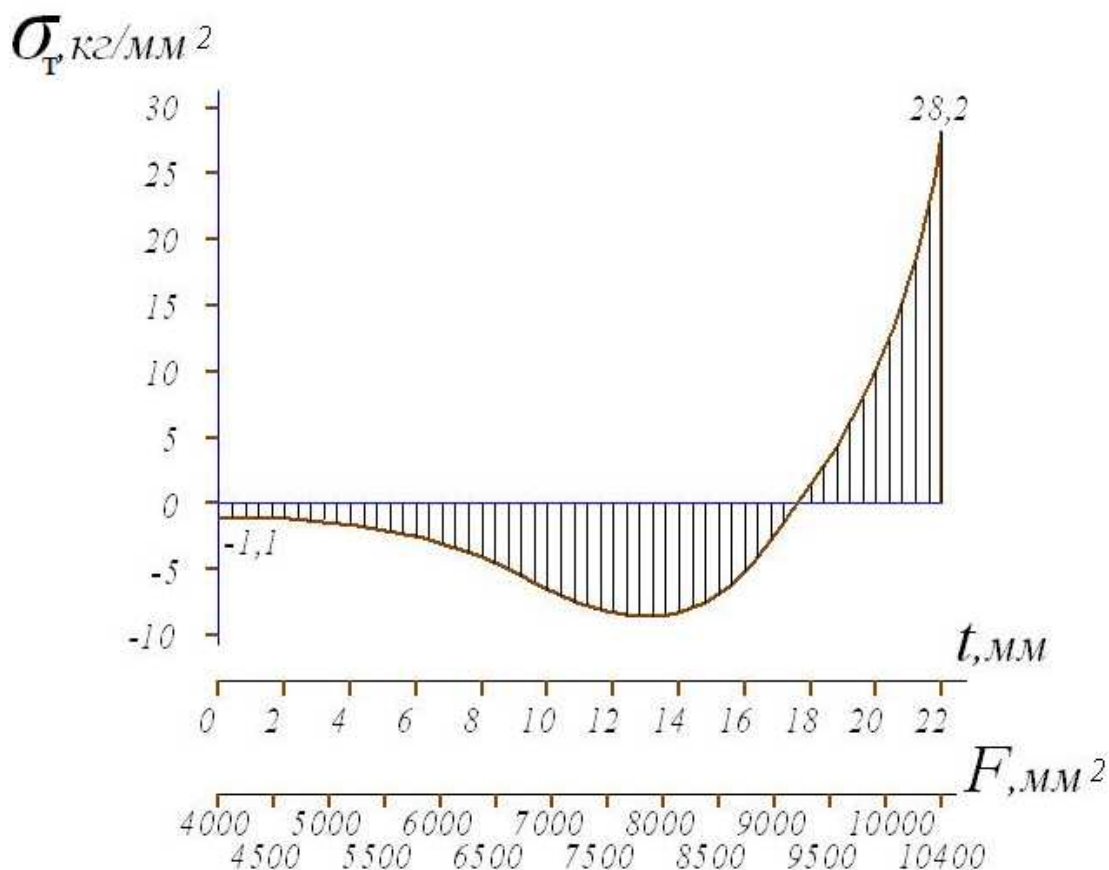


Рисунок 8 – Залишкові тангенціальні напруження у висадженій частині бурильної труби

Таблиця 3 – Розрахункові дані тангенціальних залишкових напружень у висадженій частині бурильної труби
 $D_3 = 115$ мм; $F_3 = 10328$ мм²; $D_{вн} = 71$ мм; $F_{вн} = 3957$ мм²; $E = 21000$ кг/мм²; $\mu = 0.3$

№ з/п	F	$F_3 - F$	$\frac{F_3 + F}{2F}$	$\delta \cdot 10^{-5}$	$\frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$\frac{F_3 + F}{2F} \delta \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF}}{2F} - \frac{F_3 + F}{2F} \delta \right] \cdot 10^{-5}$	$\frac{E}{1 - \mu^2} \cdot 10^{-5}$	σ_T
1	4000	6400	1.80	-2.3	-0.0014	-8.96	-4.14	-4.82	0.23	-1.1
2	4500	5900	1.65	-5.5	-0.0025	-14.75	-9.08	-5.67	0.23	-1.3
3	5000	5400	1.54	-8.4	-0.0037	-19.98	-12.94	-7.04	0.23	-1.6
4	5500	4900	1.44	-17.5	-0.0070	-34.30	-25.20	-9.10	0.23	-2.1
5	6000	4400	1.37	-29.4	-0.0121	-53.24	-40.28	-12.96	0.23	-3.0
6	6500	3900	1.30	-41.3	-0.0184	-71.76	-53.69	-18.07	0.23	-4.2
7	7000	3400	1.24	-56.5	-0.0284	-96.56	-70.06	-26.50	0.23	-6.1
8	7500	2900	1.19	-69.7	-0.0403	-116.87	-82.94	-33.93	0.23	-7.8
9	8000	2400	1.15	-84.2	-0.0552	-132.48	-96.83	-35.65	0.23	-8.2
10	8500	1900	1.11	-92.3	-0.0680	-129.20	-102.45	-26.75	0.23	-6.2
11	9000	1400	1.08	-101.5	-0.0777	-108.78	-109.62	0.84	0.23	0.2
12	9500	900	1.05	-113.2	-0.0924	-83.16	-118.86	35.70	0.23	8.2
13	10000	400	1.02	-119.4	-0.1017	-40.68	-121.78	81.10	0.23	18.7
14	10400	0	1.00	-122.6	-0.1125	0	-122.60	122.6	0.23	28.2

$\sigma_T, \text{кг/мм}^2$

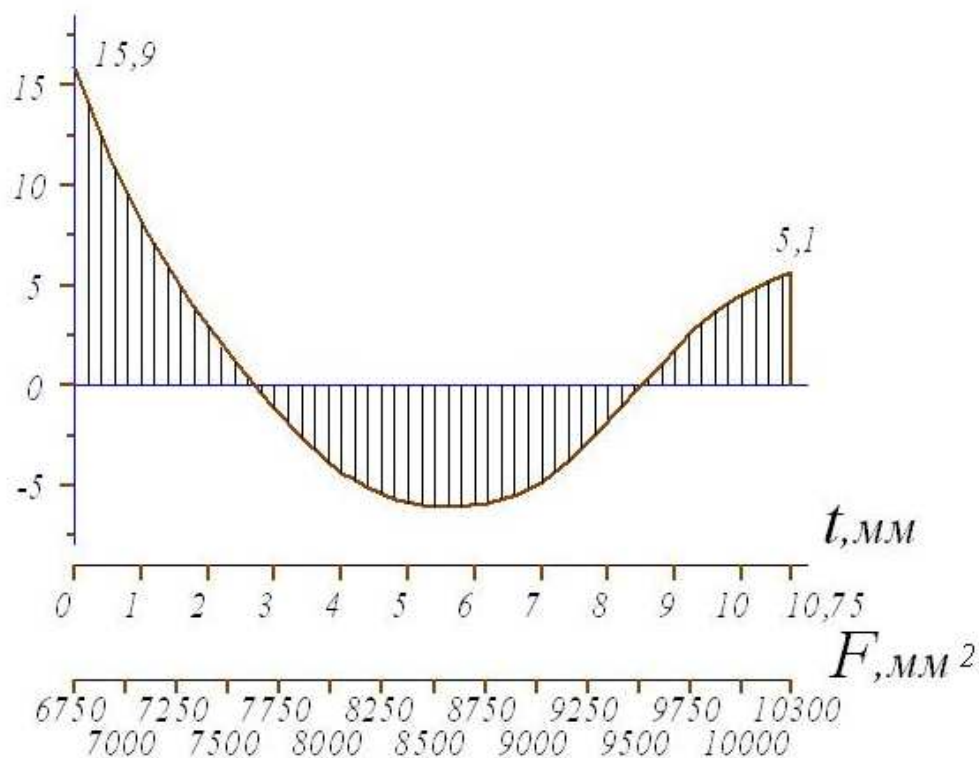


Рисунок 9 – Залишкові тангенціальні напруження в тілі бурильної труби

Таблиця 4 – Розрахункові дані тангенціальних залишкових напружень в тілі бурильної труби

$D_3 = 114 \text{ мм}$; $F_3 = 10202 \text{ мм}^2$; $D_{\text{вн}} = 92,5 \text{ мм}$; $F_{\text{вн}} = 6717 \text{ мм}^2$; $E = 21000 \text{ кг/мм}^2$; $\mu = 0.3$

№ з/П	F	$F_3 - F$	$\frac{F_3 + F}{2F}$	$\delta \cdot 10^{-5}$	$\frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$\frac{F_3 + F}{2F} \delta \cdot 10^{-5}$	$\left[(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} - \frac{F_3 + F}{2F} \delta \right] \cdot 10^{-5}$	$\frac{E}{1 - \mu^2} \cdot 10^{-5}$	σ_T
1	6750	3550	1.26	4.8	0.0212	75.26	6.05	69.21	0.23	15.9
2	7000	3300	1.24	8.5	0.0174	57.42	10.54	46.88	0.23	10.8
3	7250	3050	1.21	12.3	0.0135	41.18	14.88	26.30	0.23	6.05
4	7500	2800	1.19	19.0	0.0112	31.36	22.61	8.75	0.23	2.0
5	7750	2550	1.16	26.8	0.0098	24.99	31.09	-6.10	0.23	-1.4
6	8000	2300	1.14	31.3	0.0083	19.09	35.68	-16.59	0.23	-3.8
7	8250	2050	1.12	35.5	0.0077	15.78	39.76	-23.98	0.23	-5.5
8	8500	1800	1.1	36.2	0.0076	13.68	39.82	-26.14	0.23	-6.0
9	8750	1550	1.09	20.7	-0.0012	-1.86	22.56	-24.42	0.23	-5.6
10	9000	1300	1.07	12.2	-0.0047	-6.11	13.05	-19.16	0.23	-4.4
11	9250	1050	1.06	5.7	-0.0058	-6.09	6.04	-12.13	0.23	-2.8
12	9500	800	1.04	-4.5	-0.0091	-7.28	-4.68	-2.60	0.23	-0.6
13	9750	550	1.03	-10.8	-0.0068	-3.74	-11.12	7.38	0.23	1.7
14	10000	300	1.01	-17.9	-0.0037	-1.11	-18.08	16.97	0.23	3.9
15	10300	0	1	-22.2	-0.0041	0	-22.20	22.20	0.23	5.1

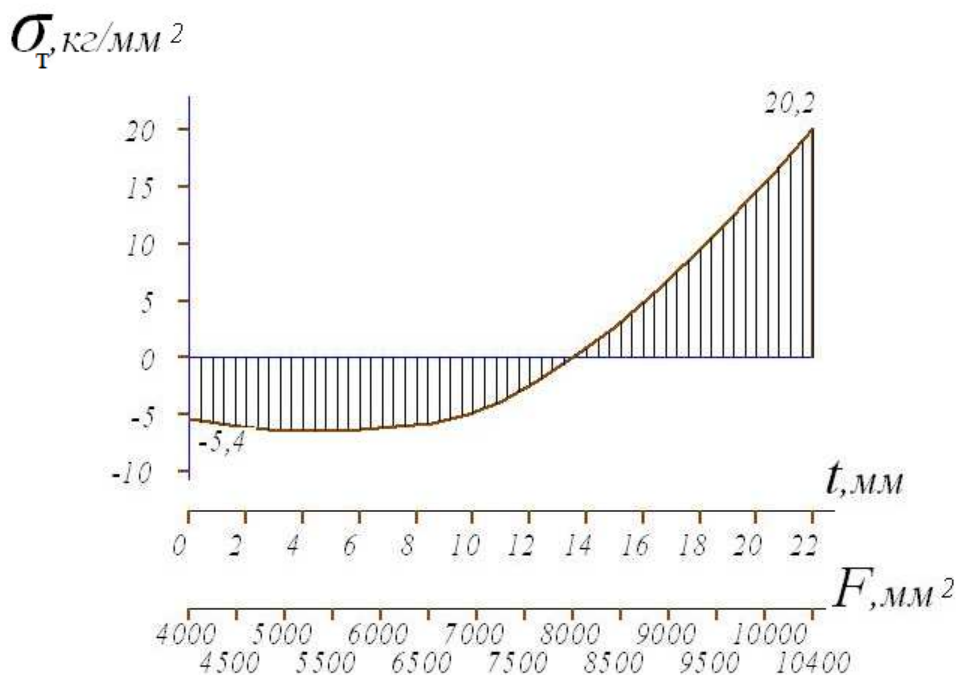


Рисунок 10 – Тангенціальні залишкові напруження у висадженій частині бурильної труби

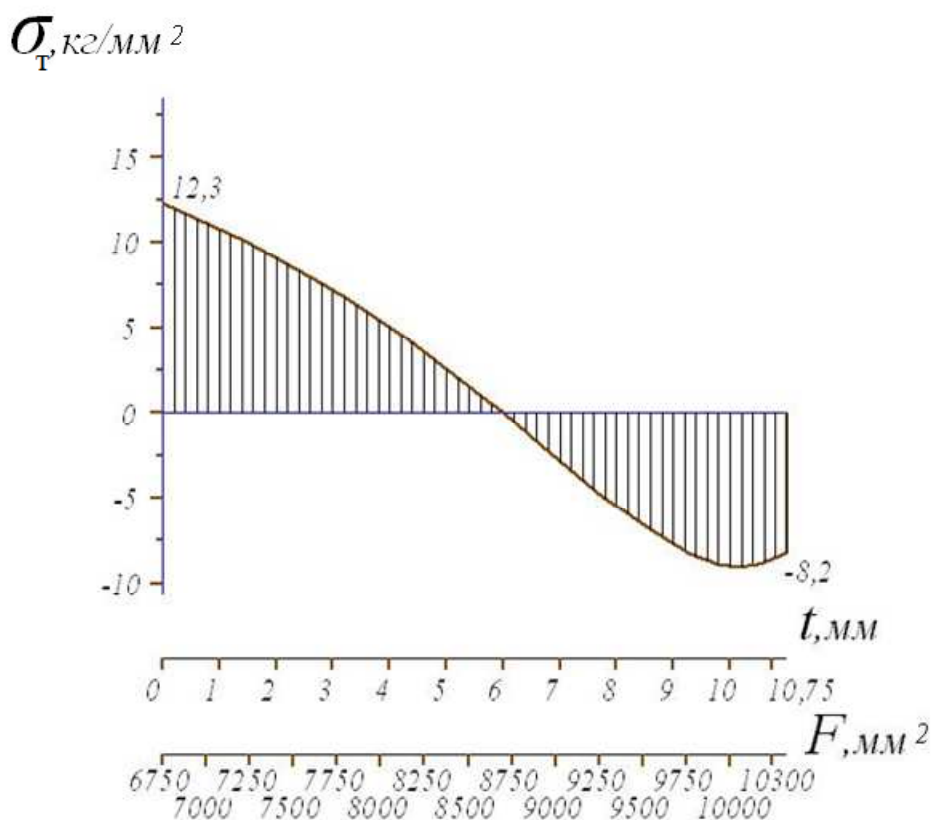
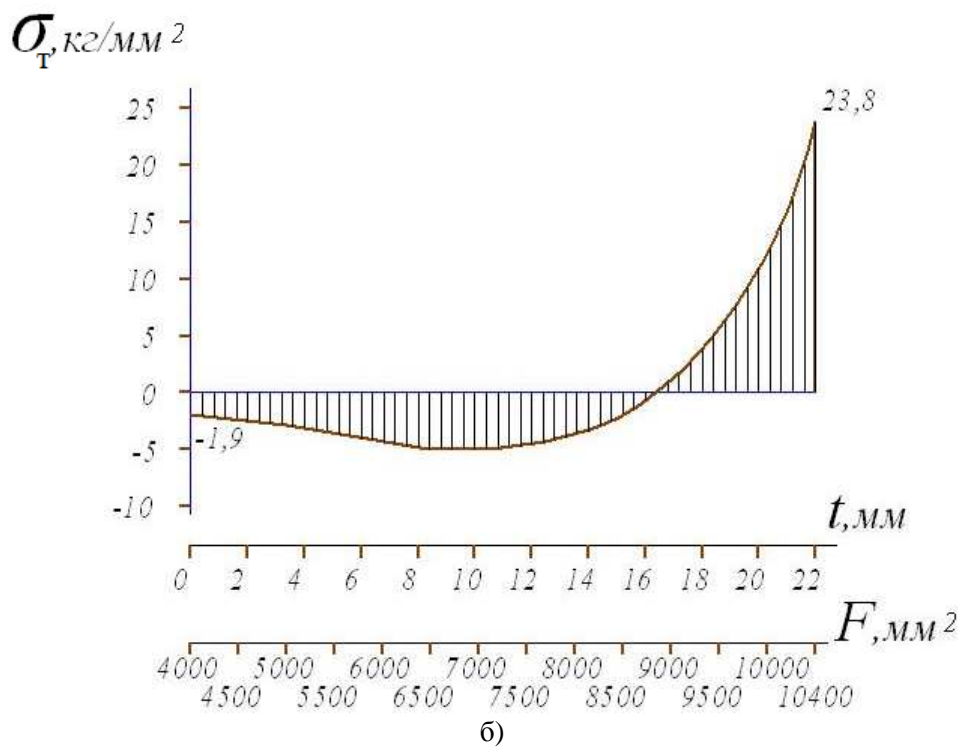
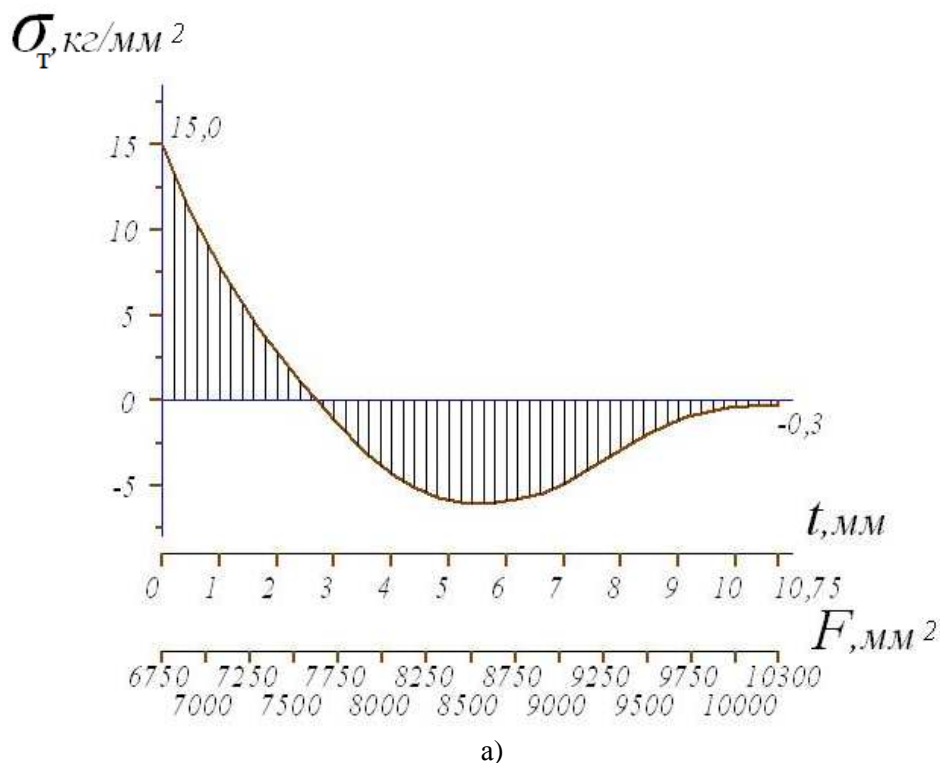


Рисунок 11 – Тангенціальні залишкові напруження у тілі бурильної труби

При розгляді епюр тангенціальних залишкових напружень (рис. 8 і рис. 9) можна вказати на велике значення розтягуючих залишкових напружень на зовнішній поверхні висадженої частині бурильної труби і дещо менші величини цих напружень на внутрішній і зовнішній поверхнях тіла бурильної труби.

К статі [3] представлені епюри тангенціальних залишкових напружень у висадженій частині і тілі нової бурильної труби, яка не застосовувалась в бурінні свердловин (рис. 10 і рис. 11). Для нової бурильної труби тангенціальні залишкові напруження мають дещо інший характер. У висадженій частині труби ці на-



а - тіло труби; б - висаджена частина труби

Рисунок 12 – Залишкові тангенціальні напруження після високого відпуску

пруження розтягуючі на зовнішній поверхні і стиснені на внутрішній поверхні. Для тіла бурильної труби на зовнішній поверхні наведені тангенціальні залишкові напруження стискання, а на внутрішній поверхні – залишкові напруження розтягу.

Для бурильної труби, яка відпрацювала більше 9 тисяч годин механічного буріння зміна знаку залишкових напружень стискання на роз-

тяг на зовнішній поверхні тіла бурильної труби і підвищення розтягуючі залишкових напружень на зовнішній поверхні висадженої частині пояснюється релаксацією внутрішніх напружень в металі труб у процесі їх експлуатації.

Під час роботи труб у свердловині спостерігається зменшення залишкових напружень стискання і збільшення залишкових напружень розтягу. Це пояснюється тим, що в результаті

Таблиця 5 – Розрахункові дані тангенціальних залишкових напружень в тілі бурильної труби після високого відпуску

№ з/п	F	$F_3 - F$	$\frac{F_3 + F}{2F}$	$\delta \cdot 10^{-5}$	$\frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$\frac{F_3 + F}{2F} \delta \cdot 10^{-5}$	$\left[(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} - \frac{F_3 + F}{2F} \delta \right] \cdot 10^{-5}$	$\frac{E}{1 - \mu^2} \cdot 10^{-5}$	σ_T
1	6750	3550	1.26	5.6	0.0204	72.42	7.06	65.36	0.23	15.0
2	7000	3300	1.24	10.3	0.0182	60.06	12.77	47.29	0.23	10.9
3	7250	3050	1.21	18.7	0.0174	53.07	22.63	30.44	0.23	7.0
4	7500	2800	1.19	23.5	0.0156	43.68	27.96	15.72	0.23	3.6
5	7750	2550	1.16	26.8	0.0127	32.39	31.09	1.30	0.23	0.3
6	8000	2300	1.14	29.0	0.0104	23.92	33.06	-9.14	0.23	-2.1
7	8250	2050	1.12	29.5	0.0076	15.58	33.04	-17.46	0.23	-4.0
8	8500	1800	1.1	17.0	-0.0015	-2.70	18.70	-21.40	0.23	-4.9
9	8750	1550	1.09	15.2	-0.0035	-5.42	16.57	-21.99	0.23	-5.1
10	9000	1300	1.07	13.5	-0.0039	-5.07	14.45	-19.52	0.23	-4.5
11	9250	1050	1.06	10.0	-0.0054	-5.67	10.60	-16.27	0.23	-3.7
12	9500	800	1.04	7.5	-0.0022	-1.76	7.80	-9.56	0.23	-2.2
13	9750	550	1.03	3.0	-0.0039	-2.14	3.09	-5.23	0.23	-1.2
14	10000	300	1.01	2.3	-0.0024	-0.72	2.32	-3.04	0.23	-0.7
15	10300	0	1	1.3	-0.0021	0	1.30	-1.30	0.23	-0.3

Таблиця 6 – Розрахункові дані тангенціальних залишкових напружень у висадженій частині бурильної труби після високого відпуску

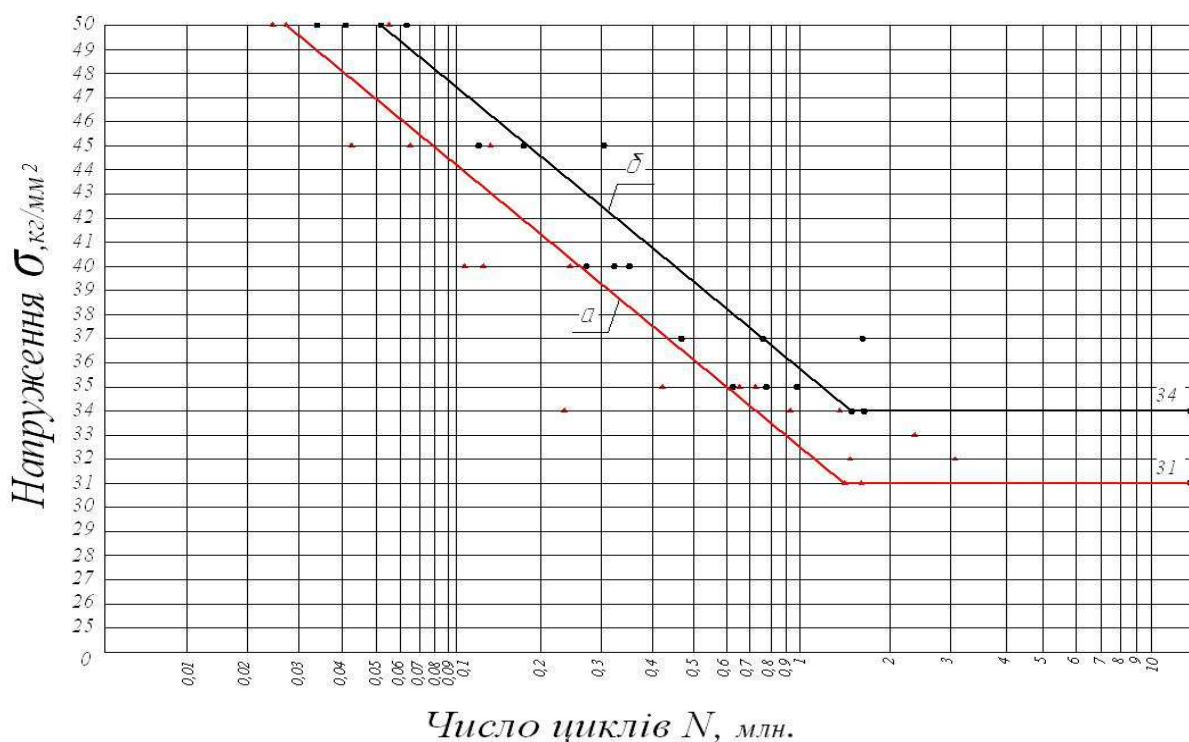
№ з/п	F	$F_3 - F$	$\frac{F_3 + F}{2F}$	$\delta \cdot 10^{-5}$	$\frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} \cdot 10^{-5}$	$\frac{F_3 + F}{2F} \delta \cdot 10^{-5}$	$\left[(F_3 - F) \frac{d\delta}{dF} - \frac{F_3 + F}{2F} \delta \right] \cdot 10^{-5}$	$\frac{E}{1 - \mu^2} \cdot 10^{-5}$	σ_T
1	4000	6400	1.80	-1.5	-0.0017	-10.88	-2.70	-8.18	0.23	-1.9
2	4500	5900	1.65	-3.8	-0.0031	-18.29	-6.27	-12.02	0.23	-2.3
3	5000	5400	1.54	-5.7	-0.0045	-24.30	-8.78	-15.52	0.23	-3.6
4	5500	4900	1.44	-12.4	-0.0074	-36.26	-17.85	-18.41	0.23	-4.2
5	6000	4400	1.37	-21.8	-0.0115	-50.60	-29.18	-21.42	0.23	-4.9
6	6500	3900	1.30	-34.6	-0.0173	-67.47	-44.98	-22.49	0.23	-5.2
7	7000	3400	1.24	-47.8	-0.0288	-80.92	-59.27	-21.65	0.23	-5.0
8	7500	2900	1.19	-59.1	-0.0308	-89.32	-70.33	-18.99	0.23	-4.4
9	8000	2400	1.15	-70.5	-0.0401	-96.24	-81.07	-15.17	0.23	-3.5
10	8500	1900	1.11	-81.7	-0.0522	-99.18	-90.69	-8.49	0.23	-2.0
11	9000	1400	1.08	-88.3	-0.0620	-86.80	-95.36	8.56	0.23	2.0
12	9500	900	1.05	-96.2	-0.0769	-69.21	-101.01	31.80	0.23	7.3
13	10000	400	1.02	-100.5	-0.0910	-36.40	-102.51	66.11	0.23	15.2
14	10400	0	1.00	-103.5	-0.0985	0	-103.5	103.5	0.23	23.8

пониження стискаючих залишкових напружень у поверхневих шарах металу, максимум стискаючих напружень переміщується від поверхневих до внутрішніх шарів металу (рис. 11 і рис. 9), що, в свою чергу, призводить до збільшення розтягуючих напружень на зовнішній поверхні (рис. 10 і рис. 8).

Причину зниження початкових залишкових напружень стискання і підвищення початкових напружень розтягу Л.А. Глікман [1] передбачав в тому, що поверхневий шар металу (зовнішній або внутрішній для бурильної труби)

є ослабленим внаслідок відсутності з однієї її сторони сусіднього зміцнюючого шару металу.

Тому пластична деформація цього шару проходить за більш низьких механічних умов і відбувається за менших напружень. Іншими словами, границя пружного опору поверхневих шарів металу стає нижчою величини від границі плинності для бурильної труби загалом. Перевищення границі пружного опору в ослабленому поверхневому шарі металу під дією сумарних максимальних напружень ($\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_d$) і є причиною зміни епюри початкових залишкових напружень стискання (рис. 11 і рис. 9).



а – висаджена частина бурильної труби; б – тіло бурильної труби

Рисунок 13 – Криві втоми зразків з бурильної труби після високого відпуску

У процесі експлуатації бурильних труб відбувається постійне пониження їх втомної міцності. Це пониження пов'язано з розвитком і накопиченням втомних пошкоджень в структурі сталі і наведенням на поверхні бурильних труб небезпечних розтягуючих залишкових напружень.

Для зняття шкідливого впливу залишкових напружень розтягу на їх втомну міцність був проведений високий відпуск цієї бурильної труби. Для цього від одного кінця і середньої частини цієї труби були відрізані циліндри довжиною 500мм кожний. Циліндри такої довжини від другого кінця і середньої частини цієї ж труби були використані раніше для виготовлення зразків і кілець, які послужили для визначення втомної міцності і залишкових напружень.

Високий відпуск циліндрів проводився в електропечі з нагріванням до 650⁰С і витримкою при цій температурі впродовж двох годин, з наступним повітряним охолодженням.

В подальшому з цих циліндрів, підданих високому відпуску, виготовили зразки для випробування на втомну міцність і відрізали кільця для визначення залишкових напружень згідно зі схемою, описаною раніше (рис. 1, рис. 2, рис. 4).

Внаслідок проведеного високого відпуску залишкові напруження розтягу були частково зняті (рис. 12, табл. 5, табл. 6).

Проведені після цього випробування зразків засвідчили, що втомна міцність їх підвищилась (рис. 13, табл. 7, табл. 8), але не досягла значення, відповідного новим бурильним трубам. Це пояснюється тим, що хоча і було

знято шкідливий вплив залишкових напружень, але залишилось мікроруйнування структури металу, яке виникло в результаті дії циклічних напружень, що є причиною пониження втомної міцності сталевих бурильних труб.

Відомо, що відпуск сталі впливає безпосередньо на кінетику розвитку втомної тріщини. Після високого відпуску швидкість розповсюдження (росту) тріщини понижується, що підтверджують і результати дослідження [6].

Проведений експеримент показав, що високий відпуск є додатковим резервом підвищення довговічності сталевих бурильних труб, які відпрацювали досить тривалий час механічного буріння у свердловинах.

Плануються подальші дослідження: бурильні труби, які відробили певний час механічного буріння будуть піддані дробоструминній обробці. Відомо [7], що при дробоструминній обробці виробів на зовнішній поверхні відбувається пластична деформація металу, в результаті чого в поверхневих шарах металу наводяться залишкові напруження стискання, що сприяє підвищенню їх втомної міцності. Отже, проведення дробоструминної обробки зовнішньої поверхні бурильних труб, які відпрацювали певний час механічного буріння, є ще одним способом підвищення їх довговічності.

Висновки

В процесі відробки бурильних труб відбувається безперервна зміна величини і характеру розподілу залишкових напружень. На зовнішній поверхні висадженої частини бурильної труби відбувається збільшення небезпечних

Таблиця 7 – Допоміжна таблиця для складання кореляційного рівняння випробування зразків з висадженої частини бурильної труби на втомну міцність після високого відпуску

i	$X_i = \sigma_i$	$x_i = X_i - \bar{X}$	N_i	$Y_i = \lg N_i$	$y_i = Y_i - \bar{Y}$	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
1	50	11.35	23700	4.3747	-1.0955	128.828	1.2001	-12.4339
2	50	11.35	26400	4.4216	-1.0486	128.828	1.0995	-11.9016
3	50	11.35	55100	4.7412	-0.7290	128.828	0.5314	-8.2741
4	45	6.35	42800	4.6314	-0.8388	40.322	0.7036	-5.2741
5	45	6.35	64700	4.8109	-0.6593	40.322	0.4347	-4.1365
6	45	6.35	156200	5.1937	-0.2765	40.322	0.0764	-1.7559
7	40	1.35	109400	5.0390	-0.4312	1.8225	0.1859	-0.5821
8	40	1.35	136200	5.1341	-0.3361	1.8225	0.1129	-0.4537
9	40	13.5	241300	5.3825	-0.0877	1.8225	0.0077	-0.1184
10	35	-3.65	427100	5.6305	0.1603	13.3225	0.0257	-0.5851
11	35	-3.65	644700	5.8094	0.3392	13.3225	0.1150	-1.2330
12	35	-3.65	702300	5.8465	0.3763	13.3225	0.1416	-1.3735
13	34	-4.65	275600	5.4402	-0.0300	21.6225	0.0009	0.1395
14	34	-4.65	913700	5.9608	0.4906	21.6225	0.2407	-2.2813
15	34	-4.65	1333100	6.1249	0.6547	21.6225	0.4286	-3.0443
16	33	-5.65	838200	5.9233	0.4531	31.9225	0.2053	-2.5600
17	33	-5.65	2442100	6.3878	0.9176	31.9225	0.8419	-5.1344
18	32	-6.65	1504700	6.1772	0.7070	44.2226	0.4998	-4.7015
19	32	-6.65	3189800	6.5036	1.0334	44.2226	1.0679	-6.8721
20	31	-7.65	1744500	5.8719	0.4017	58.5225	0.1613	-3.0730
21	31		10'					
22	31		10'					
23	30.5		10'					
24	30.5		10'					
	$\sum X_i = 773$ $\bar{X} = 38.65$			$\sum Y_i = 109.405$ $\bar{Y} = 5.4702$		$\sum x_i^2 = 32856$	$\sum y_i^2 = 8.0809$	$\sum x_i y_i = -76085$

$$m_\sigma = 41.428 \quad S_\sigma = 6.436$$

$$m_N = 0.4040 \quad S_N = 0.6356$$

$$m_{\sigma N} = -3.8042 \quad r = -0.929$$

$$\lg N = 9.0182 - 0.0918\sigma$$

Таблиця 8 – Допоміжна таблиця для складання кореляційного рівняння випробування зразків з тіла бурильної труби на втомну міцність після високого відпуску

i	$X_i = \sigma_i$	$x_i = X_i - \bar{X}$	N_i	$Y_i = \lg N_i$	$y_i = Y_i - \bar{Y}$	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
1	50	9.8889	34000	4.5403	-1.0896	97.7903	1.1872	-10.7749
2	50	9.8889	41400	4.6170	-1.0129	97.7903	1.0259	-10.0764
3	50	9.8889	64800	4.8116	-0.8188	97.7903	0.6696	-8.0920
4	45	4.8889	130100	5.1142	-0.5157	23.9013	0.2659	-2.5212
5	45	4.8889	179600	5.2544	-0.3755	23.9013	0.1410	-1.8357
6	45	4.8889	309700	5.4910	-0.1389	23.9013	0.0192	-0.6790
7	40	-0.1111	281300	5.4492	-0.1807	0.0123	0.0326	0.0200
8	40	-0.1111	315400	5.4989	-0.1310	0.0123	0.0171	0.0145
9	40	-0.1111	353100	5.9310	0.3011	0.0123	0.0906	-0.0334
10	37	-3.1111	481300	5.6824	0.0525	9.6789	0.0027	-0.1633
11	37	-3.1111	769100	5.8860	0.2561	9.6789	0.0655	-0.7967
12	37	-3.1111	1708600	6.2324	0.6025	9.6789	0.3630	-1.8744
13	35	-5.1111	634100	5.8022	0.1723	26.1233	0.0296	-0.8806
14	35	-5.1111	776200	5.8900	0.2601	26.1233	0.0676	-1.3293
15	35	-5.1111	983400	6.2632	0.6333	26.1233	0.4010	-3.2368
16	34	-6.1111	1661600	6.2204	0.5905	37.3455	0.3486	-3.6086
17	33		10'					
18	33		10'					
19	33		10'					
20	33		10'					
	$\sum X_i = 722$ $\bar{X} = 40.1111$			$\sum Y_i = 10.8331$ $\bar{Y} = 5.6299$		$\sum x_i^2 = 597.777$	$\sum y_i^2 = 5.7218$	$\sum x_i y_i = -54959$

$$m_\sigma = 33.2098 \quad S_\sigma = 5.7620$$

$$m_N = 0.3178 \quad S_N = 0.5637$$

$$m_{\sigma N} = -3.0532 \quad r = -0.9400$$

$$\lg N = 9.3161 - 0.0919\sigma$$

залишкових напружень розтягу в процесі буріння глибоких свердловин. В тілі труби залишкові напруження стискання на зовнішній поверхні після довготривалого часу механічного буріння можуть перейти в напруження розтягу.

Крім накопичених в процесі буріння дефектів структури металу, наведені на поверхні труб небезпечні залишкові напруження розтягу понижують довговічність бурильних труб і є суттєвими причинами пониження їх втомної міцності.

Додатковим резервом підвищення довговічності бурильних труб є їх високий відпуск після довготривалого часу роботи в свердловині, який дозволяє частково зняти небезпечні залишкові напруження розтягу на зовнішній поверхні труб і, таким чином, підвищити втомну міцність сталевих бурильних труб.

Література

1 Гликман Л.А. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на механические свойства металла и прочность изделий // Труды Ленинградского инженерно-экономического института. – 1956. – Вып. 13.

2 Карпаш О.М. Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту / О.М. Карпаш, Є.І. Крижанівський, П.Я. Криничний, І.Г. Мігаль, І.Й. Рибчич, Я.М. Зінчак. – Івано-Франківськ: Факел, 2001. – 380 с.

3 Сичов Ю.С. (мол.). Методика визначення тангенціальних залишкових напружень в сталевих бурильних трубах / Ю.С. Сичов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 4(45). – С. 93-98.

4 Кагаев В.П. Определение расчётных характеристик выносливости деталей машин // Механическая усталость в статическом аспекте. – М.: Наука, 1969.

5 Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1966.

6 Финкель В.М. Физика разрушения / В.М.Финкель. – М.: Металлургия, 1970.

7 Копей Б.В. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти / Б.В. Копей, В.Б. Копей, І.Б. Копей. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 406 с.

*Стаття надійшла до редколегії
11.09.14*

*Рекомендована до друку
професором **Петриною Ю.Д.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Студентом О.З.**
(відділ корозійно-водневої деградації та
захисту матеріалів Фізико-механічного
інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України,
м. Львів)*