

## **ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ НА МІЦНІСТЬ РІЗЬБИ НАСОСНОЇ ШТАНГИ**

**Б.В. Копей, В.В. Михайлюк, О.Р. Мартинець, Ю.Я. Бублінський**

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727146;  
e-mail: kopeyb@iifn.org.edu.ua

*Різьбові з'єднання є найбільш поширеним видом з'єднань, а деталі з різьбою складають понад 60 % від загальної кількості деталей. Широке використання різьбових з'єднань в машинобудуванні пояснюється низкою їх переваг, а саме: універсальністю, високою надійністю, малими габаритами і вагою, здатністю створювати і сприймати великі осьові зусилля, технологічністю і можливістю точного виготовлення. Різьбові з'єднання мають також недоліки: значна концентрація напружень у місцях різкої зміни поперечного перерізу, нерівномірність розподілу навантаження на витки різьби та низький ККД рухомих різьбових з'єднань. Авторами досліджено вплив технології виготовлення на міцність різьби насосної штанги.*

**Ключові слова:** різьбові з'єднання, деталі, зусилля, напруження, муфта.

*Резьбовые соединения являются наиболее распространенным видом соединений, а резьбовые детали составляют более 60% от общего количества деталей. Широкое использование резьбовых соединений в машиностроении объясняется тем, что они имеют ряд преимуществ: универсальность, высокую надежность, малые габариты и вес, способность создавать и воспринимать большие осевые усилия, технологичность и возможность точного изготовления. Резьбовые соединения имеют также недостатки: значительная концентрация напряжений в местах резкого изменения поперечного сечения, неравномерность распределения нагрузки на витки резьбы и низкий КПД подвижных резьбовых соединений. В статье исследовано влияние технологии изготовления на прочность резьбы насосной штанги.*

**Ключевые слова:** резьбовые соединения, детали, усилия, напряжения, муфта.

*Threaded connections are the most common type of connections and machine components with threads make up more than 60% of the total number of components. Wide utilization of threaded connections in mechanical engineering can be explained by the fact that they have a lot of advantages, namely: universality, high reliability, small sizes and weight, capability to create and withstand large axial loads, technological effectiveness, and possibility to be manufactured accurately. However, threaded connections also have some disadvantages: large stress concentration in the places of abrupt cross-section change, uneven load distribution on thread turns, and low efficiency coefficient of movable threaded connections. The authors of the article have studied the influence of manufacturing technology on sucker rod thread strength.*

**Key words:** thread connection, components, load, stress, coupling.

### **Актуальність проблеми**

На даний час існує багато способів підвищення рівномірності розподілу навантаження між витками різьби муфтового з'єднання насосних штанг без зміни параметрів профілю різьби: застосування муфти розтягу-стиску зі змінним перерізом розтягнутої частини; зміна модуля пружності матеріалу муфти; застосування покриття різьби муфти пластичним матеріалом; зміна модуля пружності матеріалу ніпеля; вибір оптимальної довжини згвинчування; застосування різьби ніпеля, утопленої в різьбі муфти; зрізання перших витків різьби муфти; застосування розвантажувальної канавки оптимальної форми і розміру; розтискання перших витків різьби муфти у радіальному напрямку; обтискання останніх витків різьби муфти; розтискання останніх витків різьби ніпеля; попереднє пластичне деформування перших витків ніпеля або муфти [1].

### **Виділення невирішених частин проблеми**

На сьогоднішній день існує багато способів формування різьб, але найбільшого розповсюдження в промисловості набули такі спосо-

би, як нарізання та накатування. Електрофізичні, електрохімічні та інші способи мають обмежену область використання (обробка матеріалів з високою твердістю, крихкістю і т.д.). Під час нарізання профіль різьби формується в результаті зняття стружки і вирізання канавки різальним інструментом, при накатуванні – за рахунок утворення виступу видавленим із канавки металом.

### **Постановка задачі досліджень**

Під час вибору найбільш ефективної технології виготовлення особливу увагу слід звернути на міцність різьби насосної штанги, яка забезпечує універсальність, високу надійність, малі габарити і вагу, здатність створювати і сприймати великі осьові зусилля, технологічність і можливість точного виготовлення, а також можливість відновлення відпрацьованої різьби.

### **Основний матеріал дослідження**

Характеристики технологічних можливостей основних способів формування зовнішніх і внутрішніх різьб зведені до таблиць 1 та 2.

Таблиця 1 – Характеристика способів формування зовнішніх різьб

Спосіб обробки	Розміри різьби			Вимоги до матеріалу			Технологічні можливості		
	Діаметр різьби d, мм	Крок різьби, Р мм	Довжина різьби L, мм	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа, не більше	Твердість, НРС, не більше	Відносне видовження $\delta$ , %, не менше	Продуктивність обробки	Ступінь точності різьби	Шорсткість різьби Ra, мкм
Нов	15-250	0,5-8	10000	1000	35	10	0,5-1	6-8	0,8-1,6
Нок	15-250	0,5-6	10000	1200	35	12	3-6	6-8	0,8-1,6
НПВ	10-250	0,5-16	10000	1200	35	12	2-7	8-10	1,6-3,2
НАГ	1,4-150	0,35-10	6000	1400	35	15	3-5	4-7	0,4-1,6
НР	2-250	0,35-20	300	1400	40	8	2-3	2-6	0,2-0,8
НЗР	3-20	0,35-2	100	1000	40	10	6-10	1-6	0,2-0,8
НГ	1-16	0,35-2	100	1200	35	12	15-30	6-8	0,2-1,6
НТГ	3-60	0,5-5	до 2d	1000	24	10	1-7	4-7	0,8-3,2
НП	0,8-27	0,4-2,5	150	1400	35	8	28-30	2-8	0,2-1,6
НПП	1,5-70	0,2-3	250	900	35	8	6-8	6-8	0,4-1,6
НПл	0,25-33	0,08-3	1000	1400	32	15	1-2	5-8	0,8-1,6
Пл	0,25-72	0,08-3	1000	1400	32	2	0,25-0,8	5-8	3,2-12,5
РНГ	1,5-400	0,35-6	6000	1000	35	2	1	4-8	1,6-3,2
Т	1-1000	0,25-6	6000	1600	60	2	0,25-0,8	4-6	0,8-3,2
Тпа	1-100	0,25-6	165	1600	60	2	1,5-2	4-6	0,8-3,2
В	20-1000	2,5-20	2000	900	45	2	0,2-0,5	6-8	3,2-12,5
ФД	10-400	2-12	2000	1000	50	2	0,2-0,5	6-8	3,2-12,5
ФГ	10-200	0,5-12	70	1000	50	2	0,2-0,5	6-8	3,2-12,5
ФВ	20-200	0,5-3	до 2d	1000	50	2	1,5-8,5	6-8	3,2-12,5
Ш	0,5-400	0,4-3	6000	1600	70	2	0,5-1	1-4	0,2-0,8

Таблиця 2 – Характеристика способів формування внутрішніх різьб

Спосіб обробки	Розміри різьби			Вимоги до матеріалу			Технологічні можливості		
	Діаметр різьби d, мм	Крок різьби, Р мм	Довжина різьби L, мм	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа, не більше	Твердість, НРС, не більше	Відносне видовження $\delta$ , %, не менше	Продуктивність обробки	Ступінь точності різьби	Шорсткість різьби Ra, мкм
НАГ	30-200	0,5-3,0	200	900	30	15	1-2	4-7	0,32-1,6
НМ	1-52	0,25-2,5	200	600	30	15	5-10	2-6	0,4-1,25
М	0,2-300	0,75-10	300	1000	50	2	5-10	2-7	1,6-3,2
РНГ	32-300	0,75-8	200	1000	50	2	1	5-8	1,6-3,2
П	10-150	2,0-10	200	1000	34	2	1	6-7	1,6-3,2
Т	10-1000	0,5-100	500	1600	60	2	0,5-1	4-8	0,8-3,2
В	30-350	3,0-50	300	900	45	2	0,2-0,5	7-9	3,2-12,5
ФД	5-200	0,5-100	100	1000	46	2	0,2-0,5	6-8	3,2-12,5
ФГ	16-200	0,5-5,0	100	1000	37	2	0,4-1	6-8	3,2-12,5
ФВ	8-1000	0,5-5,0	50	1000	37	2	1,5-8,5	6-8	3,2-12,5
Ш	20-400	0,5-100	250	1600	71	2	0,5-1	1-4	0,2-0,8

В таблицях 1 і 2 використано такі позначення:

НОВ – накатування різьби з осьюовою подачею двома або трьома роликками з паралельними осями і гвинтовою нарізкою;

НОК – накатування різьби з осьюовою подачею двома або трьома роликками з осями, що перетинаються, та кільцевою нарізкою;

НПВ – поперечно-гвинтове накатування;

НАГ – накатування зовнішніх і внутрішніх різьб аксіальними різьбонакатними головками з осьюовою подачею інструменту, яким є аксіальна різьбонакатна головка, що складається з декількох (найчастіше трьох) накатних роликків з кільцевими витками, що мають забірну і калібруючу частини;

НР – накатування зовнішніх різьб двома чи трьома роликками з радіальною подачею;

НЗР – накатування зовнішніх різьб двома або трьома затилованими (некруглими) роликками, що мають стаціонарні осі обертання. Радіальна подача здійснюється за рахунок форми інструмента;

НТ – накатування зовнішніх різьб з тангенціальною подачею двома роликками з паралельними осями і гвинтовою нарізкою. Ролики обертаються з різними коловими швидкостями;

НП – планетарне накатування зовнішніх різьб. Інструментами є різьбонакатний ролик та сегмент (рідше кільце). Заготовка одержує тангенціальну подачу, переміщуючись між роликком і сегментом;

НПП – накатування зовнішніх різьб плоскими двома або трьома плашками, одна з яких нерухома, а інша має тангенціальну подачу. Плашки мають забірну і калібруючу частини. Накатування плоскими плашками – один з найпоширеніших способів отримання різьб;

НТГ – накатування двороліковими тангенціальними накатувальними головками;

НМ – накатування внутрішніх різьб безстружковим мітчиком;

М – нарізання внутрішніх різьб мітчиком;

П – протягування внутрішніх різьб мітчиком-протяжкою;

Пл – нарізання зовнішніх різьб плашками;

РНГ – нарізання зовнішніх і внутрішніх різьб з осьюовою подачею різьбонарізними головками, що складаються з декількох різальних гребінок різної форми (круглої, призматичної, сегментної тощо);

Т – точіння зовнішніх і внутрішніх різьб різцями і гребінками, профіль яких має форму впадин різьби, є найбільш універсальним методом отримання різьби. При багатопрохідній обробці різець отримує безперервну осьову подачу, яка рівна кроку різьби;

Тап – точіння по напівавтоматичному циклу твердосплавними різцями;

ВО – вихрова обробка зовнішніх і внутрішніх різьб. Інструментом є вихрова головка, з кількома різцями;

ФД – фрезерування зовнішніх і внутрішніх різьб дисковими фрезами, профіль зубів яких відповідає формі впадини різьби;

ФВ – фрезерування гвинтовими фрезами зовнішніх і внутрішніх різьб. Проводиться аналогічно до фрезерування плоскими дисковими фрезами; одна фреза має декілька витків різьби, що дозволяє різко підвищити продуктивність;

Ф – фрезерування всіма типами фрез;

Ш – шліфування зовнішніх і внутрішніх різьб одно- і багатонитковими шліфувальними кругами. Цей метод найбільш точний, близький за кінематикою до фрезерування різьби.

З таблиці видно, що 1 – 3 ступінь точності при обробленні зовнішніх різьб може бути досягнута тільки шліфуванням або накатуванням затилованими роликками, а при обробленні внутрішніх різьб – шліфування і видавлювання мітчиками. Четверта ступінь точності досягається в результаті обробки точінням, різьбонарізними (тільки зовнішні різьби) і різьбонакатними головками, планетарним накатуванням (внутрішні різьби).

Фрезерування, вихрова та інші види обробки через властиві їм специфічні причини виникнення похибок не дають змоги забезпечити вище п'ятого ступеня точності. Ці види обробки часто використовуються як попередні.

Дані порівняння способів формування різьби за продуктивністю свідчать про значні переваги методів накатування різьб перед методами нарізання. Порівняно з найбільш прогресивним способом нарізання зовнішньої різьби – обробкою різьбонарізними головками, продуктивність накатування циліндричними роликками з радіальною подачею вища в 3 рази, накатування аксіальними головками – в 3...5 разів, тангенціальними головками – 2...7 разів, накатування затилованими роликками – в 6...10 разів, а планетарного накатування – в 28...30 разів.

Область застосування точних і високопродуктивних способів формування різьби обмежена можливостями обладнання і технологічного оснащення. Найбільш продуктивні способи формоутворення зовнішніх різьб – планетарне накатування і накатування затилованими роликками – мають обмеження за діаметром і довжиною різьби. Планетарне накатування використовується для різьб з діаметром 0,8...27 мм, довжиною < 150 мм; накатування затилованими роликками – для різьб з діаметром 3...20 мм, довжиною < 100 мм. Найбільш широкими можливостями серед точних способів формоутворення зовнішніх різьб відрізняються методи: накатування аксіальними головками ( $d = 1,4...150$  мм), накатування циліндричними роликками з радіальною подачею ( $d = 2...250$  мм,  $L = 300$  мм), нарізання різьбонарізними головками ( $d = 1,5...400$  мм), шліфування і точіння.

Найбільшою універсальністю відрізняється обробка різьб точінням і шліфуванням, тоді як фрезерування гвинтовими фрезами доцільне при  $d = 20...200$  мм і  $L < 2d$ . Технологічні можливості нарізання і видавлювання внутрішніх різьб мітчиками, перевищуючи можливості більшості способів обробки, не поступаються точінню і шліфуванню.

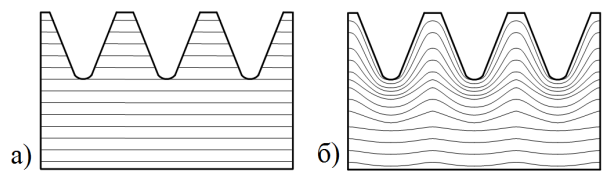
При освоєнні виробництва нового виробу слід намагатися використовувати універсальне обладнання, а технічні вимоги, в тому числі точність розмірів і взаємного розміщення поверхонь, забезпечувати за рахунок використання спеціального технологічного оснащення. Серед розглянутих точних і високопродуктивних способів формування різьби тільки для реалізації планетарного накатування необхідне спеціальне обладнання. Нарізання різьби головками, різцями і гребінками, гвинтовими фрезами, накатування головками проводиться на універсальних верстатах токарного типу, шліфування – на різьбошліфувальних верстатах. Нарізання і видавлювання митчиками на токарних і свердлильних верстатах. Накатування циліндричними роликми проводиться на достатньо широко розповсюджених профіле- і різьбонакатних верстатах.

Одними із найважливіших показників, що характеризують ефективність, якість і стабільність технологічного процесу обробки деталі з гвинтовою поверхнею, є вартість і стійкість різьбооброблюючого інструменту. При аналізі альтернативних варіантів технології обробки різьби необхідно враховувати, що для великих машинобудівних підприємств вартість різьбонакатного інструменту однакова, а за стійкістю співвідношення складає (1,3...2,2):1 на користь різьбонакатного інструменту. При цьому, накатана різьба має більш високу статичну і, особливо, втомну міцність в порівнянні з нарізанною. Доцільність того чи іншого способу формування різьб загалом визначається за критеріями, що відображають необхідність підвищення надійності деталі, її виготовлення в найкоротші терміни з мінімальною трудо- і енергоємністю.

При механічній обробці виникають різні відхилення у формі різьби та шорсткості поверхонь витків різьби. Відхилення форми суттєво впливає на з'єднання, оскільки збільшує зазор між витками різьби ніпеля та муфти насосної штанги. Однак це суттєво не впливає на підвищення концентрації напружень у з'єднанні та на надійність різьбового з'єднання загалом [1]. Навпаки, шорсткість поверхні і пластична деформація матеріалу позитивно впливають на надійність різьбового з'єднання [1]. Надійність різьбових з'єднань і корозійної стійкості зменшується через підвищення місцевих напружень при збільшенні шорсткості і кута профілю різьби. Внаслідок зміцнення металу [1], вплив шорсткості поверхні зменшується при накатуванні різьби або термічній обробці.

Макро- і мікроструктура матеріалу різьбового з'єднання також впливають на межу витривалості з'єднання [1]. Так, при нарізанні різьби (рис. 1 а) шари матеріалу різьбового з'єднання перерізаються.

В той же час, як вироби з накатаною різьбою мають волокнисту мікроструктуру (рис. 1 б), її шари зігнуті, а не зрізані [7], формування профілю витка різьби звичайними циліндрами, що обертаються, відбувається внаслідок зростаючого навантаження, що прикладається до інструменту.

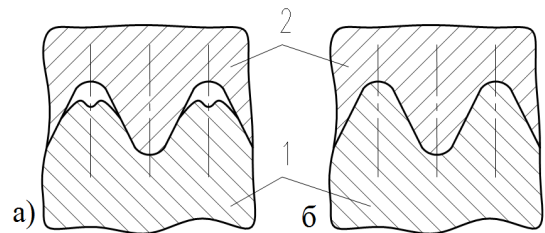


а - при нарізанні; б - при накатуванні

**Рисунок 1 – Схема макроструктури витків різьби**

Макроструктура матеріалу біля впадин витків відрізняється у випадку нарізання і накатування різьби. Будова верхніх шарів при нарізанні різьби подібна до будови нижніх шарів: тут майже відсутня пластична деформація кристалів [7]. Шари накатаної різьби викривлені як на поверхні, так і біля впадин витка та мають волокнисту структуру [5]. Якість поверхневих шарів при накатуванні різьби на високих швидкостях обробки помітно зменшується: у впадині витка утворюються складки, поверхневі шари відокремлюються, шорсткість [5] збільшується. Матеріали з низькою пластичністю, низькою теплопровідністю і високою чутливістю до якості поверхневих шарів особливо відчують зміну швидкості обробки [5].

Ознака, за якою розрізняють деформації оброблюваної деталі, залежить від кінцевої форми витків різьби. Розрізняють витки різьби, сформовані двома методами [5]. Якщо вершини накатаної різьби не торкаються впадин витків інструменту – це незаповнений контур витків різьби (рис. 2а). Якщо інструмент пресує частину оброблюваної поверхні деталі на цій поверхні профілю, тоді вважається, що накатування різьби виконано в заповненому контурі інструменту (рис. 2б). Степінь контурного заповнення залежить від глибини проникнення витків інструменту в оброблювану деталь.



1 - витки, 2 – циліндр, що обертається

**Рисунок 2 – Схема незаповненого (а) і заповненого (б) контуру витків різьби**

У процесі накатування різьби межа міцності матеріалу збільшується на 40–60 %, а також виникає об'ємне напруження в витках різьби. Все це підвищує надійність різьбового з'єднання.

Необхідно відмітити, що втомна довговічність різьбової частини оцінена амплітудою граничного напруження  $\sigma_{al}$ , яке фактично не залежить від середнього напруження  $\sigma_m$ , тому загальне збільшення границі міцності  $\sigma_u$  призводить до збільшення допустимого навантажен-

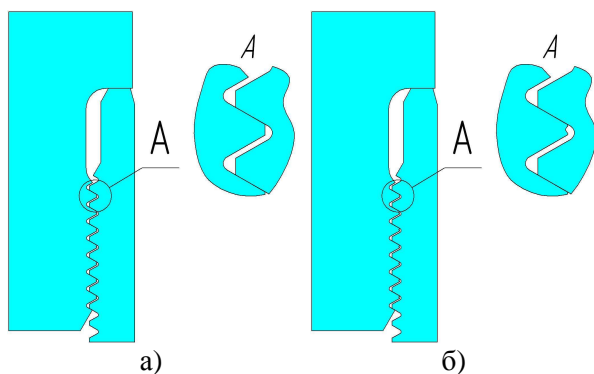
Таблиця 1 – Розподіл напружень у небезпечних зонах з'єднання насосної штанги і муфти (19 мм)

Небезпечні зони	заповнений контур витків різьби	незаповнений контур витків різьби
	$\sigma_m$ , МПа	
Перший радіус канавки	402	402
Другий радіус канавки	329	357
Перша впадина різьби ніпеля	447	463
Остання впадина різьби муфти	401	419

ня на різьбове з'єднання  $\sigma_{al} \approx (0,05 \dots 0,12) \sigma_u$  [2].

Отже, необхідно розглянути розподіл напружень в різьбовому з'єднанні, врахувавши наповненість контуру різьби, що формується при накатуванні, так як можливе повне і неповне заповнення контуру різьби.

Для виявлення характеру розподілу напружень в різьбовому з'єднанні розроблено комп'ютерні скінченно-елементні осесиметричні моделі стандартного з'єднання штанг діаметром 19 мм (ГОСТ 13877-96). В першій моделі різьбового з'єднання виконані як заповнений контур (рис 3а), в другому – як незаповнений (рис. 3б). Матеріалом деталей з'єднання вибрана сталь 40 після нормалізації ( $E=2,1 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu=0,28$ ,  $\sigma_m=420$  МПа,  $\sigma_e=620$  МПа). Під час розрахунку враховувались пластичність матеріалу і тертя між поверхнями контакту. Для моделювання зусилля згвинчування з'єднання між уступом ніпеля і опорним торцем муфти було введено ділянку матеріалу, здатного до термічного розширення в осьовому напрямку на величину  $l_z=0,0241$  мм, яка дорівнює видовженню ніпеля від попереднього затягнення.



а – заповнений контур витків різьби;  
б – незаповнений контур витків різьби

Рисунок 3 – Модель різьбового з'єднання

Небезпечними зонами з'єднання насосної штанги є перший радіус канавки, другий радіус канавки, перша впадина різьби ніпеля, остання впадина різьби муфти.

Напруження за критерієм Мізеса по впадинах вздовж різьби ніпеля для заповненого контура витків різьби (див. рис. 4а) розподіляється

наступним чином: в першому витку різьби напруження найбільше, далі величина напружень від витка до витка поступово спадає, а на останніх впадинах різьби ніпеля напруження зростають. Аналогічно відбувається розподіл напружень за критерієм Мізеса по впадинах вздовж різьби ніпеля для незаповненого контура витків різьби (див. рис. 4б). Як видно з рис. 5, при незаповненому контурі витків різьби напруження в перших двох впадинах різьби є дещо більшим за напруження в різьбовому з'єднанні з заповненим контуром витків різьби, але в наступних впадинах різьби стають значно нижчими.

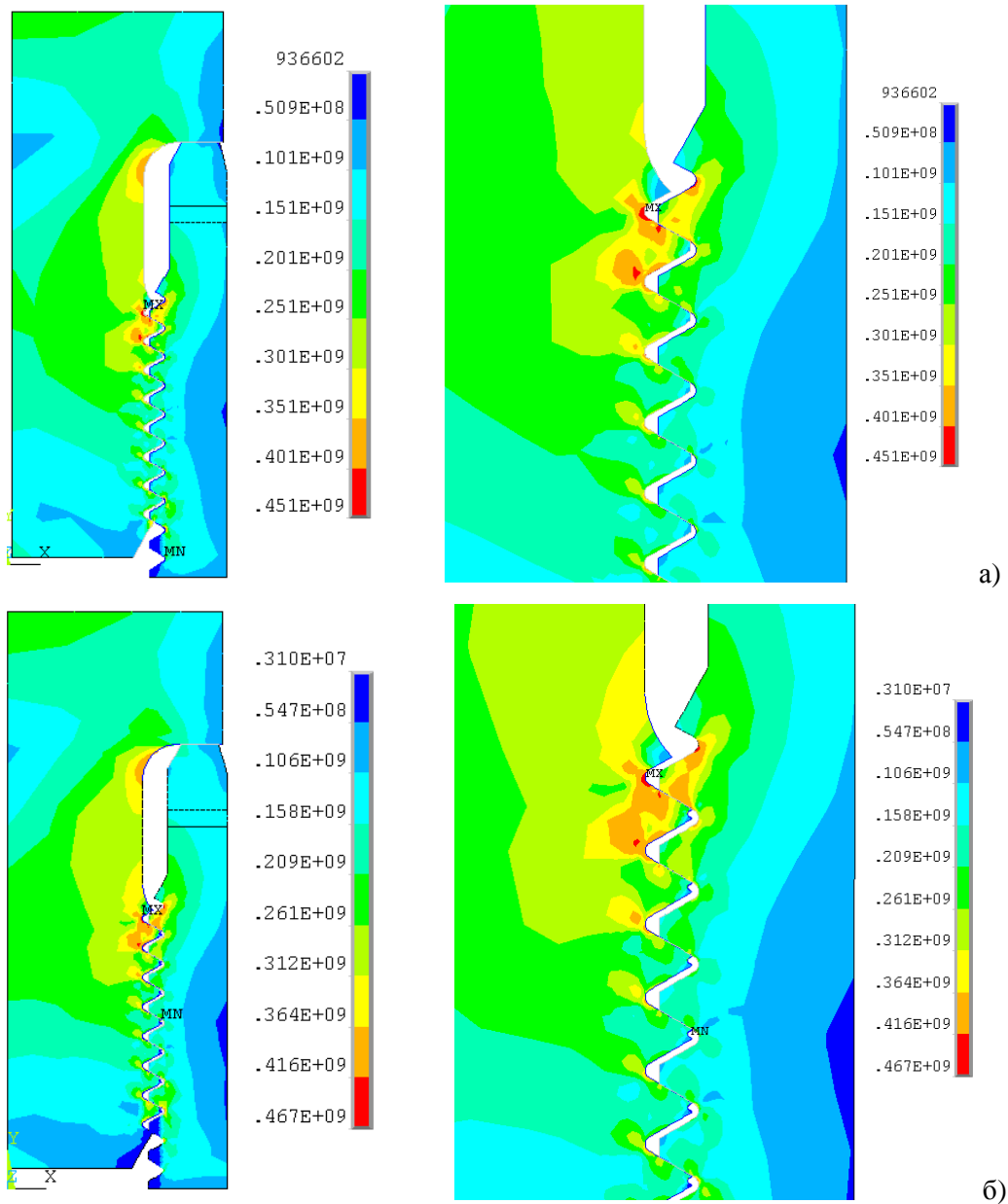
### Висновки

1. Отже, існує велика різниця між напруженнями, що виникають у впадинах витків різьби для незаповненим і заповненим контуром. Навіть не зважаючи на те, що у незаповнених контурах напруження в останніх впадинах є значно меншими, ніж у заповнених, все ж рекомендується використовувати насосні штанги з повністю заповненим контуром витків різьби, оскільки через значну концентрацію напружень в перших двох впадинах різьби насосної штанги можливе її руйнування в процесі експлуатації.

2. Міцність різьбової частини збільшується до повного заповнення контуру витків при накатуванні різьби.

3. Міцність різьбової частини зменшується наслідок осьового видовження поверхневих шарів металу.

Попри те, що напруження в останніх впадинах різьби з незаповненим контуром є значно меншим, ніж із заповненим, все ж рекомендується використовувати насосні штанги, виготовлені із повністю заповненим контуром витків, оскільки через значну концентрацію напружень в перших двох витках ймовірність руйнування штанги в процесі експлуатації є значно вищою (зростає).



а – заповнений контур витків різьби; б – незаповнений контур витків різьби

Рисунок 4 – Розподіл напружень у різьбовому з'єднанні

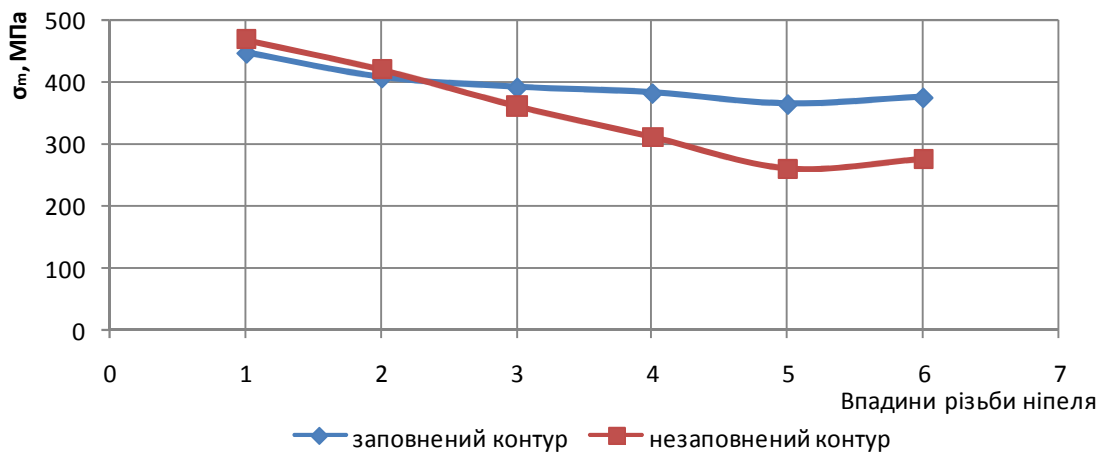


Рисунок 5 – Графічні залежності розподілу напружень за критерієм Мізеса по впадинах різьби ніпеля насосної штанги діаметром 19 мм і різним заповненням контуру різьби

**Література**

- 1 Фаерман И. Л. Штанги для глубинных насосов / И.Л. Фаерман. – Баку.: Азнефтеиздат, 1955. – 323 с.
- 2 Копей В.Б. Підвищення ресурсу штангової колони при видобутку парафіністих нафт рукопис: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – Машина нафтової і газової промисловості / В.Б. Копей. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ. –2004. – 175 с.
- 3 Ишмурзин А.А. Методика расчета крутящих моментов в трубах и штангах, возникающих при спуске в скважину с пространственным искривлением ствола / А.А. Ишмурзин, Хоанг Тхинь Нян // Нефтегазовое дело. – 2006. –№2. –С. 28.
- 4 Уразаков К.Р. Эксплуатация наклонно-направленных скважин штанговыми глубинными насосами / К.Р.Уразаков. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 48 с.
- 5 Ришмюллер Г. Добыча нефти глубинными штанговыми насосами; пер. с нем. / Г.Ришмюллер, Х.Майер. – М.: Фест-Альпине, 1988. – 151 с.
- 6 Бабаян С.А. Исследование процесса изнашивания цилиндрической резьбы // Известия Национальная академия наук Армении и государственного инженерного университета Армении. – 2007. – № 2. – Серия технических наук.
- 7 Биргер И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
- 8 ГОСТ 13877-96. Межгосударственный стандарт. Штанги насосные и муфты штанговые. Технические условия. – Киев. Госстандарт Украины, 2002. – 28 с.
- 9 Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях / М.Н. Персиянцев. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. – 653 с.
- 10 <http://newrolik.narod.ru/metod.htm>

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
27.09.14*

*Рекомендована до друку  
професором **Петриною Ю.Д.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук **Хоминцем З.Д.**  
(ЕМПІ-сервіс, м. Івано-Франківськ)*