

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ З'ЄДНАННЯ ТІЛА СКЛОПЛАСТИКОВОЇ НАСОСНОЇ ШТАНГИ ЗІ СТАЛЕВОЮ ГОЛОВКОЮ

Запропоновано спосіб побудови системи автоматизованого проектування (САПР) пресового з'єднання тіла склопластикової насосної штанги зі сталеву головою. САПР базується на осесиметричній скінченно-елементній моделі з'єднання в системі Abaqus® CAE 6.10 та програмі мовою Python для автоматизації її перебудови і розрахунку. За допомогою розробленої САПР отримано залежності для визначення оптимальних параметрів з'єднання.

Експлуатація штангових свердловинних насосних установок для видобутку нафти часто ускладнена відмовами колони насосних штанг, які працюють в складних умовах циклічного навантаження (осьового та згину), зношування та корозії. Склопластикова насосна штанга являє собою армований скловолокном полімерний стержень, до кінців якого приєднані сталеві головки, які призначені для різьбового з'єднання штанг між собою. Основними перевагами склопластикових штанг, у порівнянні зі сталевими, є вищий опір корозійній втомі та корозії, менша вага, гідрофільна поверхня і менший модуль пружності. Недоліками їх є вища вартість, низька міцність при стисканні, згинанні і крученні, невисока допустима температура експлуатації (до 100 °С), труднощі в ремонті свердловини після обриву штанги по тілу, особливі вимоги до транспортування та зберігання, проблеми в проектуванні надійного з'єднання склопластикового тіла із сталеву головою. Вирішенню останньої проблеми і присвячена дана робота.

Максимальне осьове навантаження розтягу, яке витримує таке з'єднання є основним параметром для його проектування, але потрібно враховувати також собівартість виробництва з'єднання, дію на нього навантаження стиску, циклічного навантаження, температури і середовища. На даний час не існує ефективних методик проектування таких з'єднань.

Оцінювати міцність з'єднання склопластикового стержня зі сталеву головою можна відношенням міцності тіла штанги до міцності самого кріплення при статичному розтязі. Найчастіше цей показник дорівнює 1,75-2,5 [1]. При цьому границя міцності склопластикового тіла $\sigma_s=500\text{...}600$ МПа.

На практиці відомі два типи такого з'єднання: адгезійно-клинове і пресове [1, 2, 3]. Перше з них рекомендовано стандартом API (American Petroleum Institute) і витримує досить високе навантаження розтягу, але чутливе до осьового навантаження стиску. Сталева головка приклеюється до стержня за допомогою клею. Система клинів, утворених з клею, стискає і утримує тіло штанги під час дії осьового навантаження. Пресове з'єднання виконується шляхом пластичного обтискання зовнішньої циліндричної поверхні сталеву головки в радіальному напрямку. Воно простіше адгезійно-клинового технологічно і нечутливе до осьового навантаження стиску, але для досягнення максимальної міцності з'єднання потребує оптимізації зусилля обтискання, механічних характеристик сталі, геометричних параметрів з врахуванням радіальної і осьової міцності склопластикового тіла. Міцність цього з'єднання може зменшитись після проникнення середовища в зону контакту.

Для оптимізації пресового з'єднання автором розроблено його параметричну осесиметричну скінченно-елементну модель в системі Abaqus® CAE 6.10, яка дозволяє моделювати пластичність сталі головки, ортотропію механічних характеристик склопластику, контакт між тілом і головою, процес обтискання головки жорсткими штампами довільної форми (рис. 1). Геометричні параметри з'єднання: діаметр склопластикового тіла – 22 мм, зовнішній діаметр головки – 34 мм, довжина обтискання (довжина штампа) $l_f=100\text{...}180$ мм. Матеріал головки штанги - сталь з такими механічними характеристиками: модуль пружності $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона 0,28. Характеристики пластичності (ГОСТ 13877-96) вводяться в Abaqus® у вигляді пластичної ділянки істинної діаграми деформування (ділянка S_m-S_e), яка задавалась у вигляді степеневу залежності. Характеристики матеріалу склопластикового тіла: модуль пружності в осьовому напрямку $E_y=0,5 \cdot 10^{11}$ Па, в радіальному напрямку $E_x=0,1 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\nu_y=0,22$. Коефіцієнт тертя між поверхнями контакту $f=0,1$.

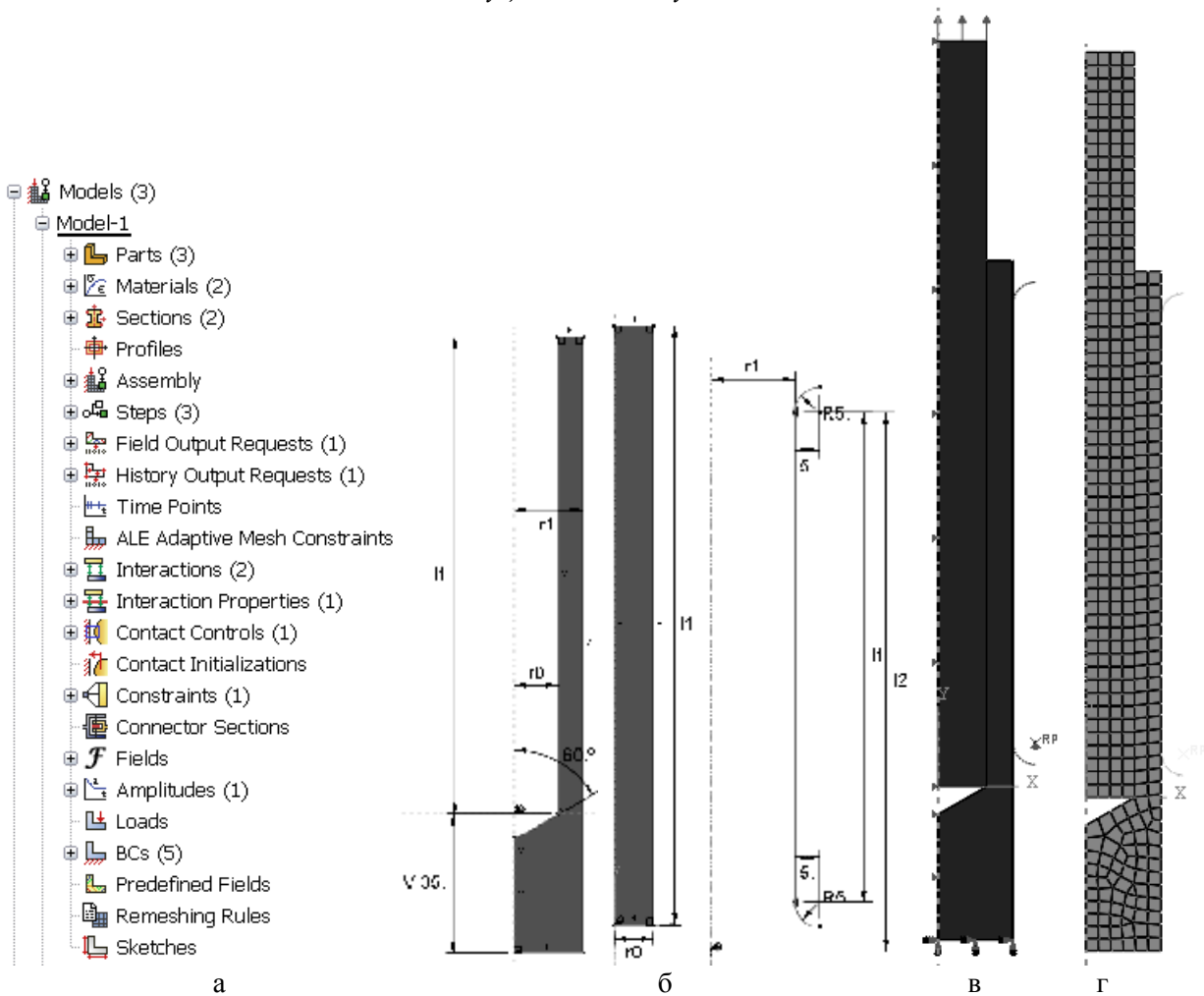


Рисунок 1 - Скінченно-елементна модель з'єднання:

а - дерево побудови моделі; б - параметричні ескізи деталей (сталева головка, склопластикове тіло, жорсткий штамп); в - граничні умови; г - сітка скінченних елементів

Моделювання проводилось в два кроки навантаження. На першому задавалась глибина радіального переміщення штампів $\Delta = 0,1 \dots 0,3$ мм. На другому кроці дія штампів усувалась, а на торці склопластикового тіла задавалась гранична умова осевого переміщення Δ_y . Другий крок розбивався на підкроки (фрейми), на кожному з яких переміщення Δ_y поступово збільшувалось. Фрейм з максимальним значенням напруження σ_y на торці відповідає моменту руйнування з'єднання (рис. 2).

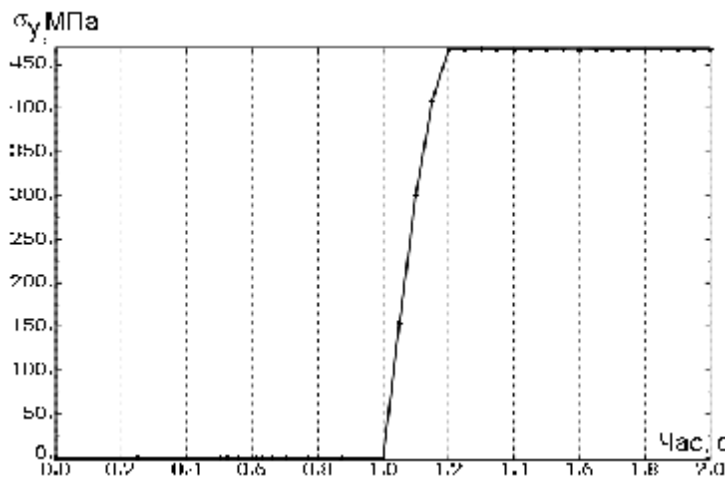


Рисунок 2 - Графік для визначення руйнуючого напруження та моменту руйнування (σ_y - осьове напруження на торці стержня)

На рисунку 3 показано розподіл контактних тисків в з'єднанні ($\Delta=0,25$ мм, $l_l=100$ мм, $\sigma_m=400$ МПа) в різні моменти часу. Ці дані відповідають результатам, отриманим автором раніше за допомогою програмного комплексу Ansys® [1]. Помітно, що контактний тиск на внутрішній поверхні головки не розподіляється рівномірно по довжині контакту. В місцях його максимуму можливе розтріскування поверхневого шару склопластикового стержня і руйнування по тілу [1]. Тому під час обтискання важливо не перевищити величину допустимого контактного тиску, яку слід визначати експериментально. Засобом боротьби з розтріскуванням поверхневого шару і проникненням середовища в з'єднання може бути нанесення клею на поверхні контакту безпосередньо перед обтисканням.

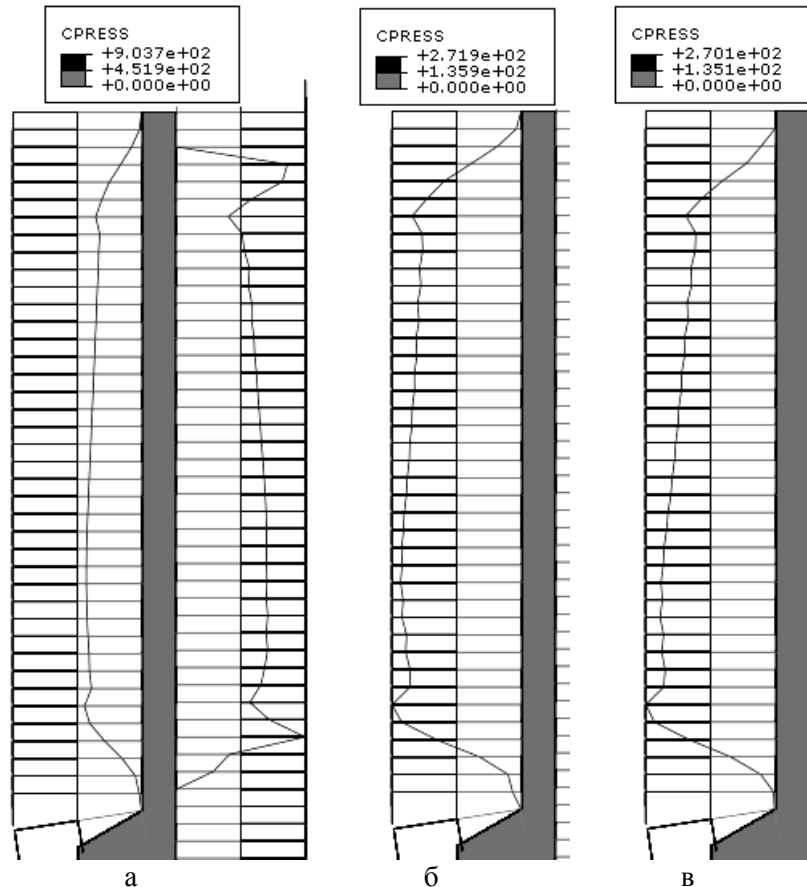
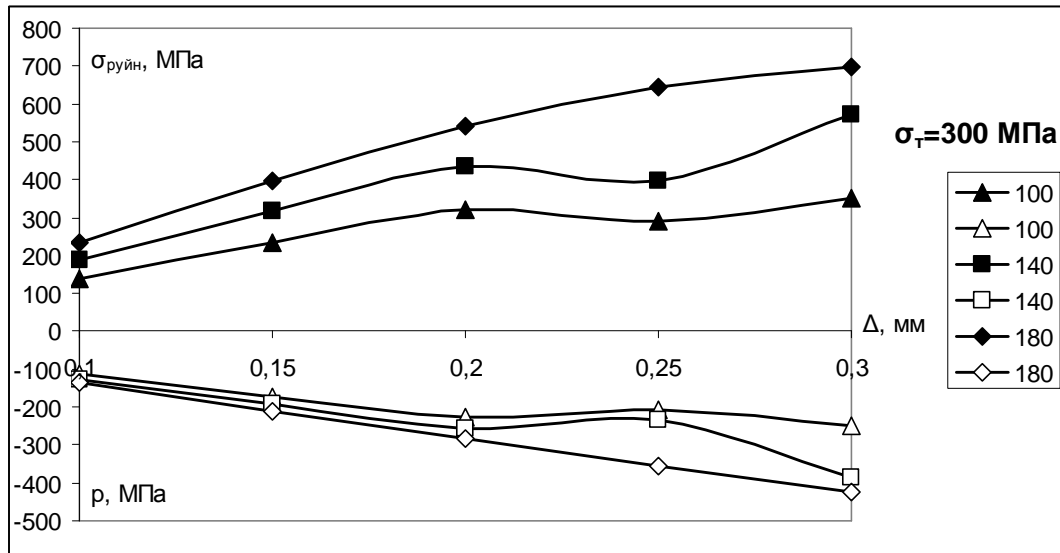


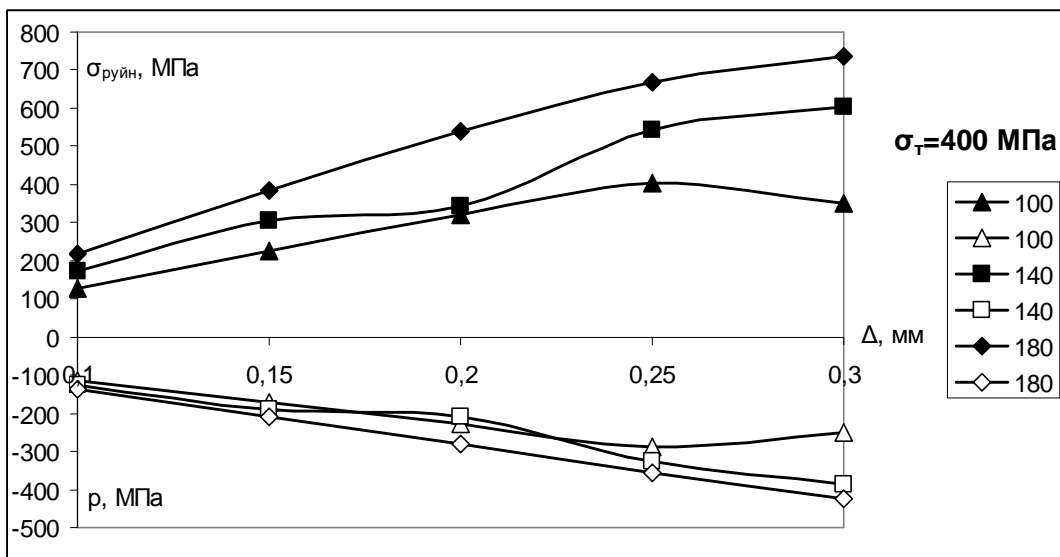
Рисунок 3 - Розподіл контактної тиску p (МПа) на внутрішній (зліва) та зовнішній (справа) поверхнях сталеві головки:

а - під час обтискання штампами; б - після обтискання; в - в момент руйнування

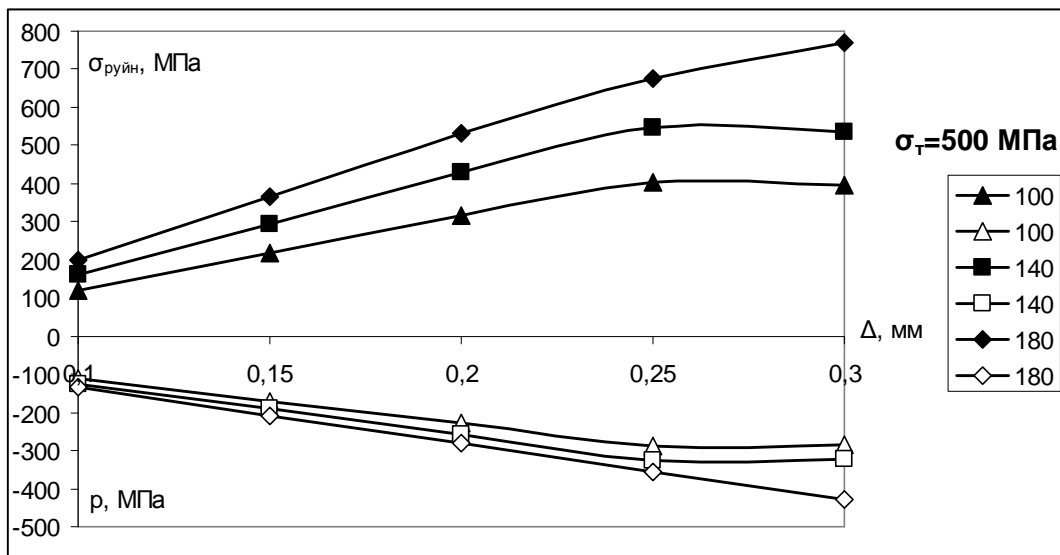
Для автоматизації перебудови моделі із заданими параметрами та отримання результатів розрахунку використовувалась програма-сценарій мовою Python. Параметрична скінченно-елементна модель з'єднання разом з програмою-сценарієм являє собою прикладну систему автоматизованого проектування побудовану на базі Abaqus® CAE. Алгоритм програми містить кілька вкладених циклів. Для прикладу, в зовнішньому циклі змінюється значення глибини переміщення штампів Δ , у внутрішньому - границя текучості сталі σ_m , довжина обтискання l_l або інший параметр з'єднання. В тілі внутрішнього циклу перебудовується модель, виконується розрахунок, визначається контактний тиск, осьове напруження руйнування з'єднання і дані записуються у файл. Таким чином, автоматизовано отримуються залежності руйнуючого напруження $\sigma_{руїн}$ від глибини переміщення штампів Δ і інших параметрів з'єднання (рис. 4). Нижче наведено частину коду програми мовою Python. Для спрощення програмування автором розроблено клас Material та функції set_values, mesh_all, JobSubmit, readODB_set2, findmax.



а



б



в

Рисунок 4 - Залежність руйнуючого напруження $\sigma_{руйн}$ і середнього контактного тиску в з'єднанні під час обтискання p від глибини переміщення штампів Δ для різних значень довжини обтискання головки l_1 (100, 140, 180 мм) і границі текучості сталі:
 а) $\sigma_m = 300$ МПа; б) $\sigma_m = 400$ МПа; в) $\sigma_m = 500$ МПа

```
#цикл для зміни глибини переміщення штампів
for deltax in [0.1,0.15,0.2,0.25,0.3]:
    #цикл для зміни довжини обтискання
    for lc in [100.0,140.0,180.0]:
        #цикл для зміни границі текучості сталі
        for st in [300.0,400.0,500.0]:
            #установити значення геометричних параметрів
            set_values(part='Nipple',feature='Shell planar-1',
                par={'l1':lc+20,'r1':17})
            set_values(part='Tool',feature='Wire-1',par={'l1':lc,'l2':lc+10})
            set_values(part='Rod',feature='Shell planar-1',par={'l1':lc+70})
            model.rootAssembly.regenerate() #оновити
            #створити матеріал
            mat_steel=Material(E=210000.0,mu=0.28,st=st,
                sv=600.0,delta=21.0,psi=56.0)
            #задати матеріал
            model.materials['Material-1'].elastic.setValues(table=
                ((mat_steel.E, mat_steel.mu), ))
            model.materials['Material-1'].plastic.setValues(table=
                mat_steel.power(8)['pl'])
            mesh_all() #створити сітку
            #гранична умова
            model.boundaryConditions['BC-4'].setValues(u1=-deltax)
            JobSubmit() #виконати задачу
            #відкрити базу даних результатів
            myOdb = openOdb(path=model.name + '.odb')
            session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=myOdb)
            #отримати напруження
            x1=readODB_set2(set='Up',step='Step-2',var=
                ('S','S22'),pos=INTEGRATION_POINT)
            x1max=findmax(x1)#знайти максимальне з усіх фреймів
            #отримати контактний тиск
            x2=readODB_set2(set='Nip',step='Step-1',var=('CPRESS',''))
            x2max=findmax(x2)#знайти максимальне з усіх фреймів
            #записати дані у файл
            writer.writerow([deltax, st, lc, x1max[0],
                x1max[1], x2max[0], x2max[1]])
            myOdb.close() #закрити базу даних результатів
```

Аналіз таких залежностей дозволяє вибрати оптимальні параметри з'єднання - глибину переміщення штампів, границю текучості сталі, довжину обтискання. Наприклад, для заданої міцності з'єднання $\sigma_{руїн}=400$ МПа глибину переміщення штампів потрібно вибирати з таблиці 1.

Таблиця 1 - Глибина переміщення штампів Δ та контактний тиск в з'єднанні під час обтискання p для з'єднання з $\sigma_{руїн}=400$ МПа

Границя текучості сталі σ_m , МПа	Довжина обтискання l_j , мм					
	100		140		180	
	Δ , мм	p , МПа	Δ , мм	p , МПа	Δ , мм	p , МПа
300	-	-	0,18	230	0,15	160
400	0,25	290	0,22	230	0,16	180
500	0,25	300	0,19	250	0,16	210

Розроблена САПР може бути використана для ґрунтового різностороннього аналізу з'єднань такого типу. Зокрема можна оптимізувати інші параметри з'єднання, такі як зовнішній діаметр головки, форму штампів та попередній натяг, розраховувати з'єднання на втомну міцність, удар, аналізувати міцність з'єднання для різних механічних характеристик склопластику.

1. Копей, В.Б. Підвищення ресурсу штангової колони при видобутку парафіністих нафт: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12: захищена 16.11.04: затв. 09.03.05 / Копей Володимир Богданович. – Івано-Франківськ, 2004. – 175 с.
2. Насосні штанги і труби з полімерних композитів: проектування, розрахунок, випробування / Б.В. Копей, О.В. Максимук, Н.М. Щербина, В.В. Розгонюк, В.Б. Копей - Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2003. – 352 с.
3. Копей, Б.В. Використання методу скінченних елементів та тривимірного комп'ютерного моделювання для конструювання та оптимізації параметрів нафтогазового обладнання: Навчальний посібник / Б.В. Копей, В.Б. Копей - Івано-Франківськ: Факел, 2008 – 117 с.