

УДК 621.9.4

**К.І. Цідило, Р.Т. Карпик, В.С. Витвицький, О.А. Сапаров***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСЬОВОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*Дослідження напружено-деформований стан суцільних осьових різальних інструментів (на прикладі свердла) методом скінченних елементів, що дозволяє прогнозувати їх жорсткість на стадії технологічної підготовки виробництва. Моделювання конструкцій інструментів здійснювалося створенням 3D-геометричних прототипів в CAD/CAE-системі SolidWorks. При оцінці напружено-деформованого стану осьових інструментів численним методом враховано крутний момент і осьову силу різання, що дозволило отримати деформації, напруження та переміщення. Визначено величину допустимої подачі інструменту.*

*Ключові слова:* осьовий різальний інструмент, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, напруження, деформації, переміщення.

**К.И. Цидыло, Р.Т. Карпик, В.С. Витвицкий, А.А. Сапаров****МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Исследовано напряженно-деформированное состояние сплошных осевых режущих инструментов (на примере сверла) методом конечных элементов, что позволяет прогнозировать их жесткость на стадии технологической подготовки производства. Моделирование конструкций инструментов осуществлялось созданием 3D-геометрических прототипов в CAD/CAE-системе SolidWorks. При оценке напряженно-деформированного состояния осевых инструментов численным методом учтено крутящий момент и осевую силу резания, что позволило получить деформации, напряжения и перемещения. Определена величина допустимой подачи инструмента.*

*Ключевые слова:* осевой режущий инструмент, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, напряжения, деформации, перемещения.

**K.I. Tsidylo, R.T. Karpyk, V.S. Vytvytskyi, O.A. Saparov****STRESS-STRAIN STATE SIMULATION OF AN AXIAL CUTTING TOOL BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

*A stress-strain state of solid axial cutting tools (by the case of a drill) by the finite element method was studied for tool rigidity prediction at the stage of technological preparation of production. Tool design simulation was carried out by 3D-geometric prototypes in the CAD/CAE-system SolidWorks. The margin torque and axial cutting force were considered within assessing the stress-strain state of the axial tools by the numerical method. It made possible to obtain deformation, stress and displacement. The value of permissible tool feed was determined.*

*Keywords:* axial cutting tool, stress-strain state, finite element method, stress, deformation, displacement.

**Постановка проблеми.** Осьові різальні інструменти (свердла, кінцеві фрези, зенкери, розвертки, тощо) при обробці внутрішніх поверхонь під час роботи перебувають у складному напружено-деформованому стані, який викликається силами і моментами різання, а також опором оброблюваного матеріалу. Під дією сил різання зуби різальних інструментів пружно деформуються, в результаті чого змінюється їх форма і геометричні розміри. Елементи різальних кромок переміщуються, тим самим здійснюючи вплив на точність оброблених поверхонь; тіло інструмента втрачає стійкість, наслідком чого є відведення осі інструменту. Останнє при обробці глибоких отворів внаслідок великої довжини вильоту інструменту і його низької жорсткості, а також через втрату поздовжньої стійкості може призвести до поломки інструменту в процесі різання і, як наслідок, виникнення браку в обробленій деталі.

Одним з найважливіших показників, що характеризують довговічність роботи осьового інструменту, є його жорсткість, тому її оцінка на початкових етапах проектування свердел і свердлильних операцій є актуальною і потребує особливої уваги розробника (конструктора, технолога). Оцінку жорсткості осьового різального інструменту на етапах проектування технологічної операції зручно проводити шляхом дослідження напружено-деформованого стану 3D-геометричних прототипів інструменту, сформованих із скінченної кількості макроелементів, визначених сукупністю конструктивних і геометричних параметрів. Систему зовнішнього впливу, що діє на інструмент, слід представляти у вигляді сукупності сил закріплення та різання, виражених конструктивними параметрами та режимами обробки.

Свердління – найбільш поширена і трудомістка операція обробки отворів [1], тобто підвищивши продуктивність свердління можна досягти істотного зниження виробничих витрат.

Розглянемо напружено-деформований стан осьового інструменту на прикладі спірального свердла зі швидкорізальної сталі, яке працює в важких умовах при постійно змінних силах і моментах різання, а також температурних навантажень, які діють на різальну частину, особливо під час свердління глибоких отворів. Дані навантаження призводять до нерівномірного зношування різальних кромки інструменту, тим самим знижуючи точність, якість та продуктивність обробки. З цього випливає, що визначення критичних значень деформацій і напружень, а також переміщень різальної частини свердла, дозволяє прогнозувати міцність і стійкість інструменту.

Потужність сучасних персональних комп'ютерів і мобільних пристроїв, а також нові програмні технології дозволяють удосконалити блок виведення розрахунків, надаючи інженерам-конструкторам засоби тривимірної візуалізації результатів. Для дослідження напружено-деформованого стану осьового різального інструменту застосуємо скінченно-елементний аналіз, який є потужним засобом, що дозволяє моделювати розподіли переміщень, деформацій і напружень в конструкціях промислового призначення. Основна ідея даного методу полягає в тому, що будь-яку безперервну величину (переміщення, силу, тиск, температуру тощо) можна апроксимувати моделлю, складеною з окремих елементів. На кожному з цих елементів досліджується безперервна величина апроксимується частково-безперервною функцією, яка будується за значеннями досліджуваної безперервної величини в скінченій кількості точок, які належать досліджуваному елементу. Для реалізації скінченно-елементного аналізу розроблено багато різноманітних програмних комплексів (ANSYS, NX Nastran, SolidWorks Simulation тощо), більшість з яких є системами загального призначення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш простим у застосуванні при моделюванні задач напружено-деформованого стану є програмний комплекс SolidWorks з його надбудовою Simulation [2]. Незалежно від того, яку задачу розв'язують в процесі скінченно-елементного аналізу в системі SolidWorks Simulation можна виділити три стадії процесу:

- попередня (препроцесорна) – підготовка моделі;
- прикладання навантажень та отримання розв'язку;
- постпроцесорна – обробка отриманих результатів.

На стадії препроцесорної підготовки здійснюється побудова геометричної 3D-моделі, виконується вибір типу розрахунку та задаються всі необхідні для розв'язку задачі початкові умови: тип системи координат, фізико-механічні властивості матеріалу.

На другому етапі будується скінченно-елементна сітка, виконуються необхідні дії над її вузлами та елементами, прикладаються навантаження, задаються граничні умови та розв'язується задача. Даний етап включає в себе вибір виду аналізу та його опцій, різного виду навантажень, кроку розв'язку і завершується запуском на розрахунок скінченно-елементної задачі.

На постпроцесорній стадії можна звернутись до отриманих результатів та вивести їх необхідним чином. Найбільш ефективним методом візуального представлення числових даних, отриманих методом скінченних елементів, є зображення напівтонової моделі тривимірного каркасу досліджуваної конструкції, тому результатом роботи програми на постпроцесорній стадії є графічне та табличне представлення отриманих результатів – деформацій, сил, напружень та переміщень, як на окремих ділянках, так і їх розподіл по всій конструкції.

Практика експлуатації осьових інструментів, в тому числі для обробки отворів, показує, що його роботоздатність багато в чому визначається інструментальним матеріалом, геометричними параметрами різального елемента, режимами різання, а також способом базування та кріплення інструмента [3, 4].

Аналізуючи характер і причини зношування та руйнування свердел, їх можна розділити на такі групи в залежності від характеру руйнування:

- а) пластична деформація і зношування по задній поверхні відбувається при дуже високій швидкості різання;
- б) кратерне зношування – найбільш поширений вид зносу, що виникає на передній поверхні інструменту внаслідок критично високої температури в зоні різання.
- в) наростування, яке виникає при обробці низьковуглецевих або нержавіючих сталей;
- г) викришування різальної кромки, може виникнути через: неспіввісність осі свердла і осі обертання інструменту; відведення свердла, викликаного надмірним вильотом, подачею або глибиною свердління; недостатньою жорсткістю свердла в результаті неправильного кріплення, а також поганого стану шпинделя або неточного регулювання.

Існуючі методи, спрямовані на досягнення оптимальних параметрів початкового стану інструменту з метою підвищення його експлуатаційних показників [4] (міцність, працездатність, продуктивність тощо) умовно можна розділити на стадії:

- вибору – здійснюється розробка і вдосконалення існуючих інструментальних матеріалів, застосування методів поверхневого зміцнення різальної частини інструменту, що забезпечують підвищення міцності і працездатності;
- проектування – здійснюється вдосконалення конструкції та оптимізація геометричних параметрів різальної частини інструменту;
- експлуатації – здійснюється оптимізація режимів різання.

В даному дослідженні для підвищення роботоздатності свердел приведено методику оптимізації конструктивних параметрів, що може використовуватися на стадії вибору розрахунку і проектування, а також експлуатації на основі порівняльної оцінки напруженого стану та міцності конструкції інструменту.

**Мета дослідження** – моделювання зміни напружено-деформованого стану різальної частини спірального свердла при навантаженні осьовою силою та крутним моментом, що виникають в процесі свердління глибоких отворів.

**Викладення основного матеріалу.** Як об'єкт дослідження обрано спіральне свердло з конічним хвостовиком, діаметром 18 мм з довжиною робочої частини 130 мм і загальною довжиною 228 мм, що виготовлене з швидкорізальної сталі Р6М5. Фізико-механічні властивості інструментального матеріалу: границя міцності при розтягу  $\sigma_b = 800$  МПа; модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,28$ ; модуль зсуву  $G = 1,6 \cdot 10^5$  МПа. Для свердла прийнято такі геометричні параметри: кут при вершині  $2\phi = 118^\circ$ ; кут підйому гвинтової лінії  $\omega = 26^\circ$ ; задній кут  $\alpha = 12^\circ$ ; передній кут  $\gamma = 25^\circ$ ; кут нахилу поперечної різальної кромки  $\psi = 52^\circ$ .

Для виконання дослідження було побудовано твердотільну 3D-модель спірального свердла (рис. 1, а) з такими об'ємними властивостями: густина  $\rho = 8138$  кг/м<sup>3</sup>, об'єм  $V = 3,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> та маса  $m = 0,286$  кг.

Проводимо нанесення сітки на побудовану геометричну модель (рис. 1 б) за допомогою генератора сітки, який може обробляти конструкції складної форми автоматично. При цьому реалізується алгоритм розумного вибору розмірів скінченного елемента з урахуванням кривизни поверхні моделі. Також при необхідності можливо задавати загальний розмір елемента та тип сітки.

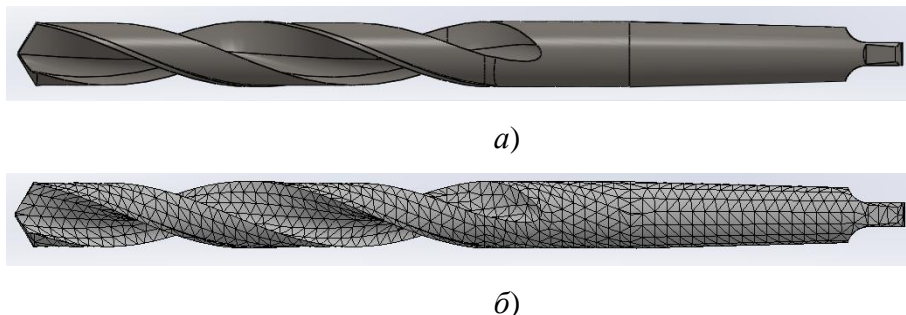


Рис. 1. Твердотільна 3D-модель спірального свердла Ø18 мм (а) та його поділ на скінченну кількість елементів (б)

Швидкість різання та механічні навантаження, що діють на головні різальні кромки в залежності від подачі інструменту (осьова сила та крутний момент) розраховані за рекомендаціями [5] наведено на рис. 2.

Після побудови скінченно-елементної сітки до моделі прикладаються навантаження. Під навантаженнями розуміють як внутрішні та зовнішні сили, так і граничні умови у вигляді обмежень переміщення. В програмі навантаження поділені на такі категорії: обмеження ступенів вільності (обмеження переміщення вузлів вздовж і їх поворотів навколо осей координат); зосереджені сили і моменти; поверхневі навантаження; об'ємні сили; інерційні навантаження.

Слід підкреслити, що мешування моделі (створення скінченно-елементної сітки) і правильне її навантаження, передусім стосовно розміщення і видів граничних умов, є найбільш відповідальним етапом у створенні адекватної моделі об'єкта, що досліджується.

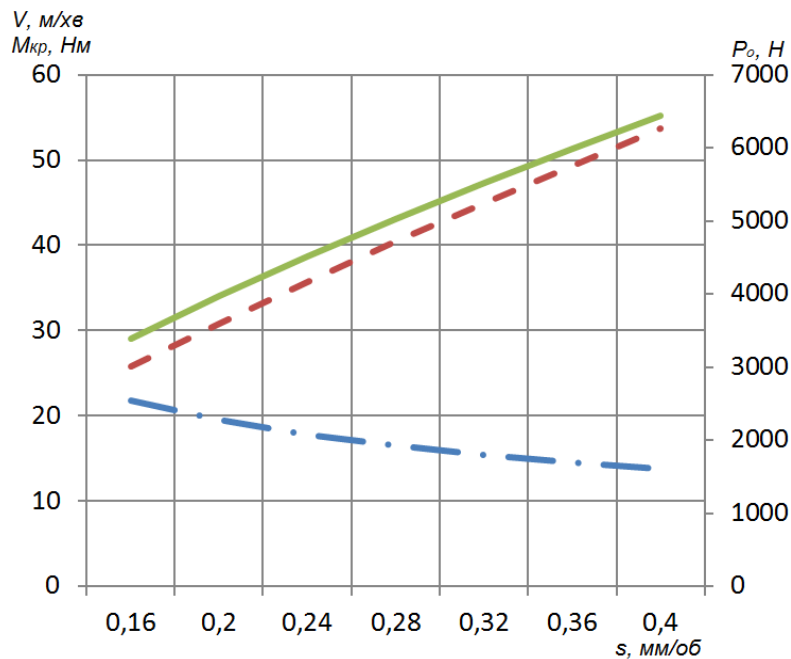


Рис. 2. Залежності швидкості різання (— · —) і крутного моменту (— · —) та осьової сили (—) від подачі інструменту

У розробленій моделі осьова сила прикладена до різальної кромки вздовж осі, тангенційну силу замінено крутним моментом, який старається «розкрутити» свердло (рис. 3 а). Умовам закріплення і роботи осьового інструменту для обробки отворів свердлінням найточніше відповідає схема з фіксованим закріпленням хвостової частини (рис. 3 б), тобто не враховується можливе проковзування свердла в конусі Морзе, так як воно не впливатиме на стійкість інструменту.

Задавши всі необхідні параметри, виконуємо розв'язок, при якому програма звертається до бази даних за інформацією про модель та прикладені до неї навантаження, формує та розв'язує системи рівнянь (кількість яких у декілька разів перевищує кількість елементів моделі) і видає результати для даного виду аналізу. Результати записуються в спеціальний файл та базу даних. В розрахунковому відношенні ця частина процесу потребує найбільшої кількості машинного часу, але при цьому не потребує втручання користувача.

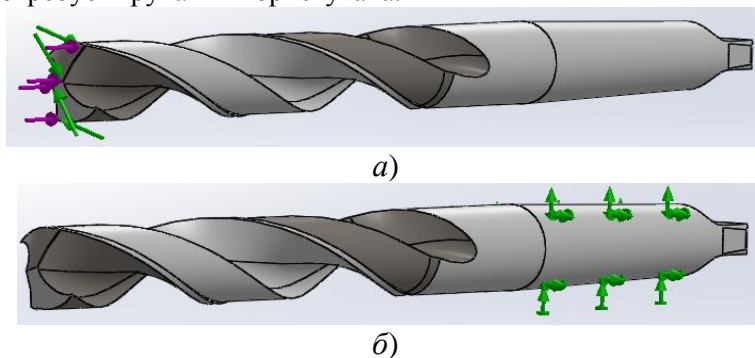


Рис. 3. Схема прикладення механічних навантажень, що діють на головні різальні кромки (а) та кріплення (б) свердла

Результати розв'язаної задачі представлені у вигляді інтерактивних епюр (рис. 4 а, б, в): напружень за Мізесом, результуючих переміщень і еквівалентних деформацій.

Максимальне значення напруження за Мізесом спостерігається близько середини різальної кромки, що може призводити до можливих сколів і відповідно виходу з ладу інструменту. Розроблений програмний алгоритм дозволяє візуалізувати розподіл деформацій, переміщень і напружень, що виникають в осьовому інструменті (на прикладі спірального свердла) при його навантаженні у процесі експлуатації осьовою силою та обертовим моментом.

Для оцінки можливості обробки при заданих режимах проведена серія чисельних експериментів із зміною подачі та залежних від неї параметрів, результати яких приведено на рис 5.

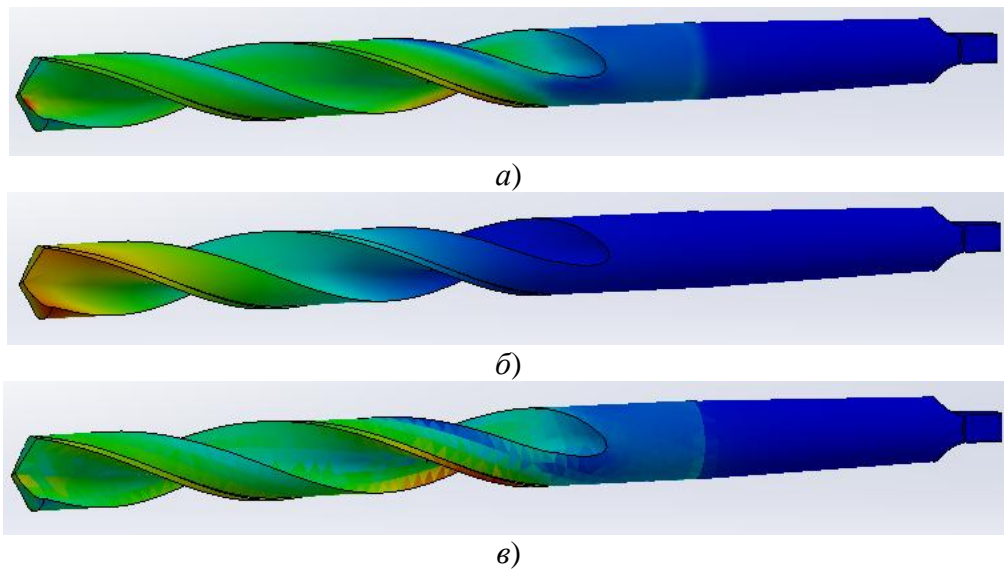


Рис. 4 а, б, в. Епюри напружень за Мізесом (а), результуючого переміщення (б) та еквівалентної деформації (в)

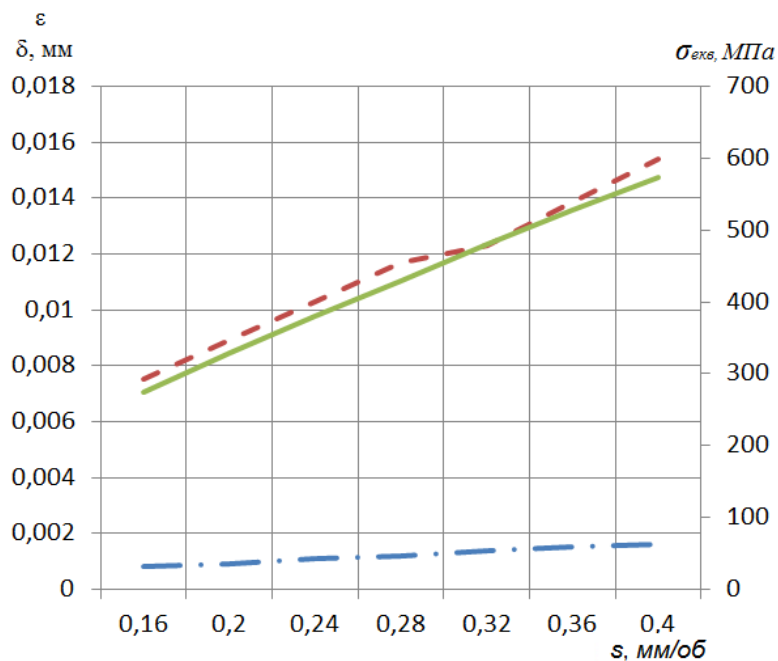


Рис. 5. Залежності напружень за Мізесом (—), результуючого переміщення (---) та еквівалентної деформації (- · -) від подачі інструменту

За результатами досліджень напружено-деформованого стану осевого інструменту на прикладі спірального свердла зі швидкорізальної сталі, можна зробити висновок, що при діаметрі свердла 18 мм і розрахунку режимів різання за нормативами [5] доцільно використовувати подачу не більшу, ніж 0,36 мм/об.

Результати розрахунків дозволяють проводити оцінку впливу конструктивних і геометричних параметрів свердел на точність і довговічність та розробляти рекомендації для можливості проведення оптимізації при їх проектуванні.

**Висновки.** Моделювання динаміки процесу деформації різальної частини свердла, при впливі на неї характерних навантажень, дозволяє визначити «слабкі» місця при проектуванні та подальшому виготовленні різального інструменту.

В результаті проведених досліджень розроблено методику скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану суцільних осьових різальних інструментів, яка дозволяє оцінити розподіл напружень в інструменті, оптимізувати режими різання та вдосконалити геометрію, що в кінцевому варіанті дозволить збільшити запас міцності, продуктивність інструменту на початкових етапах його проектування, розроблення операцій металообробки і тим самим підвищити ефективність процесу різання.

#### **Список використаних джерел**

1. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
2. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А.А. Алямовский. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
3. Аваков А.А. Физические основы теории стойкости режущих инструментов. / А.А. Аваков – М.: Машгиз, 1960 – 308 с.
4. Режущие инструменты: учебное пособие / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе [и др.] – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 388 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

#### **Рецензент:**

**В.Г. Панчук**, докт. техн. наук.

Стаття надійшла до друку 20.06.2018