

3. Выбор рационального вида заточки спиральных свёрл. Экспресинформация «Режущие инструменты». – Москва, 2006 г. – № 16.
4. Пат. України №72459 В23В 51/02. Свердло / М. Є. Чернова. – Опубл.2 7.08.12, Бюл. № 16.
5. Пат. України № 77534 Е21В 12/00. Пристрій для контролю прямолінійності отворів / Б. О. Чернов, М. Є. Чернова. – Опубл.25.02. 13, Бюл. № 4.

Надійшла 23.07.14

УДК 622.245

**В. І. Мірненко<sup>1</sup>, Б. О. Чернов<sup>2</sup>**, доктора технічних наук; **М. Я.Ткач<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Національний університет оборони України ім. Івана Черняхівського, м. Київ

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

### **АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛІ 40ХН В УМОВАХ БАГАТОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КІНЦЕВО- ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ**

*В матеріалах статті надається огляд потужного чисельного методу вирішення різноманітних інженерних задач методом кінцевих елементів, який має вирішальне місце в прогнозуванні працездатності елементів бурильної колони при дії експлуатаційних факторів. Для конкретного розрахунку використовувався програмний продукт NASTRAN, який має спільну розрахункову базу на основі методу кінцевих елементів і є однією з програм кінцево-елементного аналізу.*

**Ключові слова:** метод кінцево-елементного аналізу, вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування, бурильна клонна, продукт NASTRAN, сталь, зразок, напружено-деформований стан.

**Вступ.** Метод кінцевих елементів є потужним чисельним методом вирішення різноманітних інженерних задач [1] та має вирішальне місце в прогнозуванні працездатності елементів бурильної колони при дії експлуатаційних факторів.

В залежності від виду розрахунку, складності задачі та направленості того, чи іншого програмного забезпечення для конкретного розрахунку використовуємо програмний продукт NASTRAN, який має спільну розрахункову базу на основі методу кінцевих елементів і є однією з програм кінцево-елементного аналізу. Ці програми обумовлені використанням їх для розрахунку складних задач механіки деформованого твердого тіла, задач теплопровідності, теорії коливань та інших специфічних розрахунків таких як розрахунок елементів конструкції на міцність, або оптимізація конструкції за граничними напруженнями та поперечним перетином деталі. При цьому є можливість моделювати практично всі типи матеріалів, включаючи композитні.

Оскільки конструкційні елементи бурильної колони працюють у важких статичних і динамічних умовах навантаження, та мають складні геометричні форми, то для розрахунку напружено-деформованого стану доцільно застосовувати метод кінцево-елементного аналізу [2, 3]. Для розрахунку напружено-деформованого стану необхідно врахувати особливості геометричних параметрів елементів бурильної колони, властивості конструктивного матеріалу, вид розрахунку (статичний, динамічний та ін.), та умови силового й температурного навантаження, що діють на неї. Розрахунок у роботі проводили з використанням реальних експериментальних зразків зі сталі 40ХН.

Важливим етапом у скінчено-елементному аналізі є побудова розрахункової моделі і її кінцево-елементної сітки. Дискретизація досліджуваної області на кінцеві елементи є складною і відповідальною процедурою, від якої суттєво залежить якість одержаного рішення. Програмний комплекс NASTRAN дозволяє без використання допоміжних САД-програм будувати геометрію та кінцево-елементну сітку у своєму середовищі, або імпортувати з інших програм, таких як AutoCAD, ACIS, Parasolid та ін.[4] Генерація кінцево-елементної сітки по твердотільній моделі проводиться автоматично.

Побудована об'ємна геометрична модель зразка перетворюється в кінцево-елементну сітку у вигляді просторових кінцевих елементів, які з'єднані між собою у вузлах. Кінцеві елементи в NASTRAN можуть мати перший або другий порядок апроксимації. Для розв'язання задачі використовуємо гексагональні та тетраїдальні типи кінцевих елементів першого порядку апроксимації – без проміжних вузлів та кінцеві елементи другого порядку – з проміжними вузлами (рис. 1).

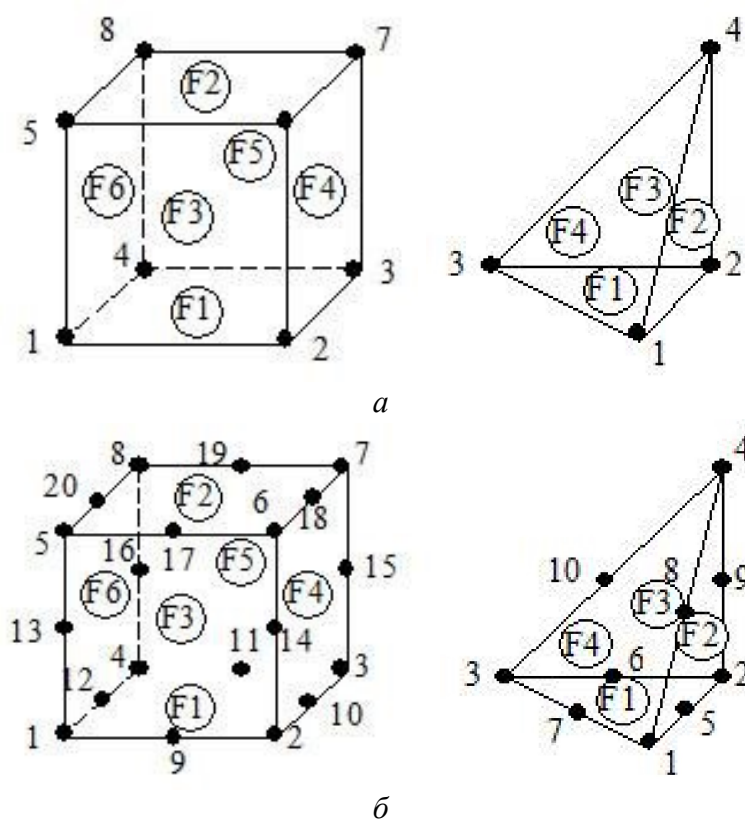


Рис. 1. Тривимірні скінченні елементи та шаблони нумерації вузлів і поверхонь: а – першого (лінійні) порядку апроксимації; б – другого (параболічні) порядку апроксимації

При створенні кінцево-елементної сітки зразків необхідно врахувати, що найбільш густа сітка необхідна там, де градієнт температур, деформацій або напружень є ймовірно більшим. Менш густа сітка використовується в зонах із більш або менш постійними деформаціями або напруженнями, а також в областях, які не потребують детального аналізу. Також, лінійні елементи 1-го порядку наближення вимагають більш густої сітки, ніж квадратичні з його апроксимацією.

На рис. 2 представлено схему дослідження напружено-деформованого стану за допомогою методу кінцево-елементного аналізу з використанням програмного пакету NASTRAN.

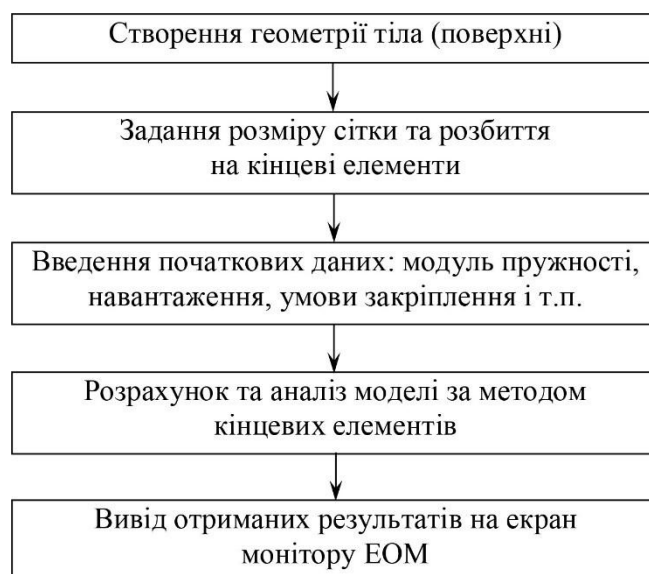


Рис. 2. Схема проведення дослідження напружено-деформованого стану за допомогою методу кінцево-елементного аналізу.

Обробку результатів здійснювали в наступній послідовності:

- ідентифікували навантаження шляхом візуалізації переміщень;
- визначали величину еквівалентних напруг у будь-якій точці зразка й одержували картину розподілу напруг по його поверхні.

$$\sigma_{екв} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$  – еквівалентні напруги, Па.

Розрахунок напружено-деформованого стану розглянуто на прикладі зразка, із зміцненням ВГТЦПА (вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування), так і без зміцнення [5–7]. В якості початкових даних застосовувалися фізико-механічні властивості сталі 40ХН [8]:

- густина матеріалу –  $\rho = 7820 \text{ кг/м}^3$ ;
- коефіцієнт лінійного видовження –  $\alpha_l = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ;
- коефіцієнт теплопровідності –  $\lambda = 44 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;
- питома теплоємність –  $c = 466 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;
- модуль Юнга –  $E = 214 \cdot \text{ГПа}$ ;
- модуль зсуву –  $G = 85 \cdot \text{ГПа}$ .

Мета роботи – оцінка напружено-деформованого стану зміцнених зразків зі сталі 40ХН ВГТЦПА в умовах багатоциклової втоми

**Результати досліджень.** Порівняльну оцінку напружено-деформованого стану зразка (робоча ділянка  $l$ ) зі сталі 40ХН як із зміцненням методом вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування (ВГТЦПА) так і без зміцнення, в умовах впливу циклічного навантаження проводили з використанням методу кінцево-елементного аналізу. Розрахунки здійснювалися за допомогою програмного забезпечення NASTRAN.

Кінцево-елементна модель зразка з напружено-деформованим станом, від дії циклічного навантаження, представлена на рис. 3. В якості циклічного навантаження до зразка використовували робочу частоту установки 10 кГц, що прикладена в точці його закріплення. Модель зразка без зміцненого поверхневого шару складається із 460 вузлів та має 264 елементи, а із покриттям – 690 вузлів та 440 елементів.

На рис. 3 зображено поля еквівалентних напружень у моделі зразка без покриття при середньому напруженні циклу.

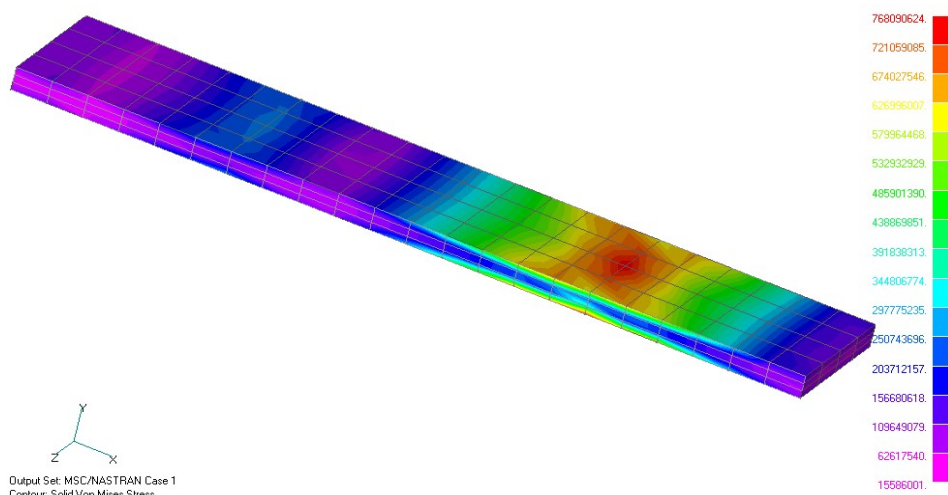


Рис. 3. Поля эквивалентных напряжений у модели зразка без зміцненого поверхневого шару ВГТЦПА при середньому напруженні циклу, Па

На моделі чітко видно наявність трьох вузлових ліній. Найбільші еквівалентні напруження, які приводять до руйнування, знаходяться в третій вузловій лінії. Крім того, в порівнянні з напруженнями в основі  $4,58 \cdot 10^8$  Па, величина напружень в поверхневому шарі становить  $7,32 \cdot 10^8$  Па, що свідчить про виникнення тріщини на поверхні зразка. На рис. 4 представлено зміну еквівалентних напружень у сталевому зразку при середньому напруженні циклу. Крива характеризує усереднене значення напружень у зразку без зміцненого поверхневого шару.

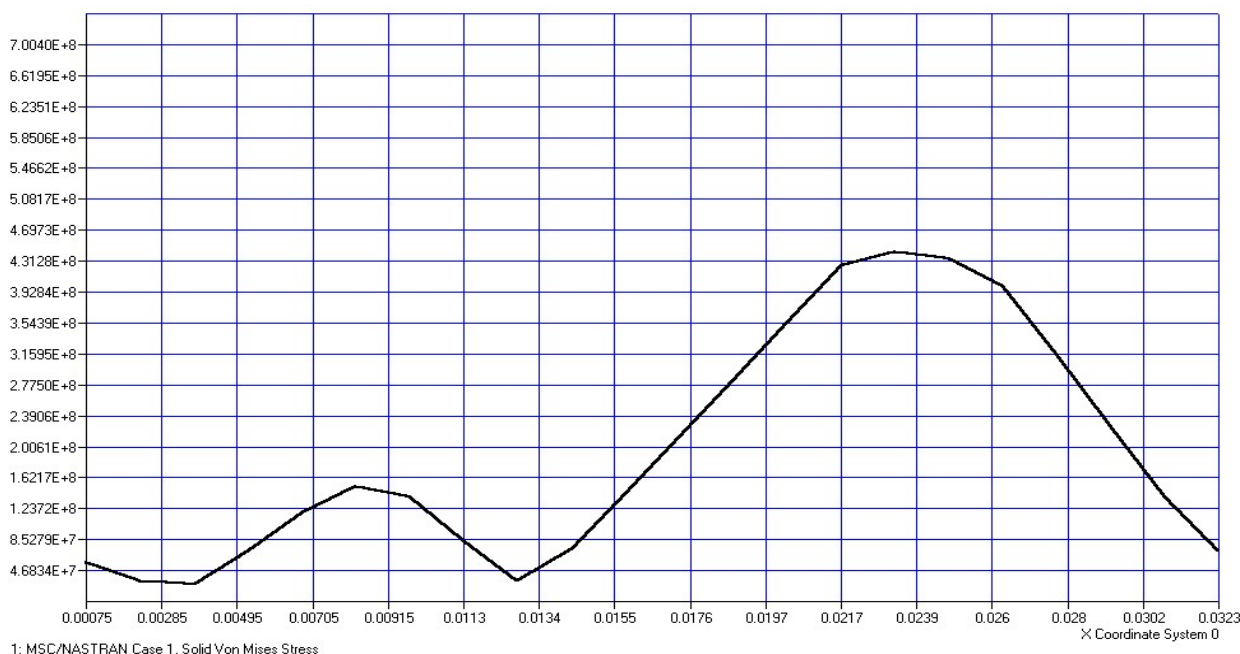


Рис. 4. Зміна напружень по довжині зразка без зміцненого поверхневого шару ВГТЦПА при середньому напруженні циклу, Па.

На рис. 5–7 представлено поля еквівалентних напружень у моделі зразка зі сталі 40ХН із зміцненим поверхневим шаром ВГТЦПА при максимальному, середньому та мінімальному напруженні циклу.

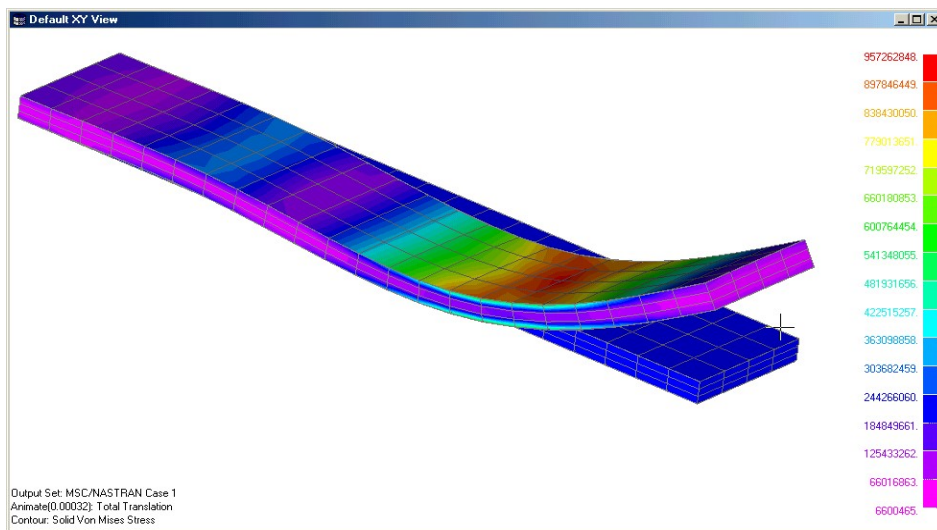


Рис. 5. Поля эквивалентных напряжений у модели зразка зі зміцненим поверхневим шаром при максимальному напруженні циклу, Па

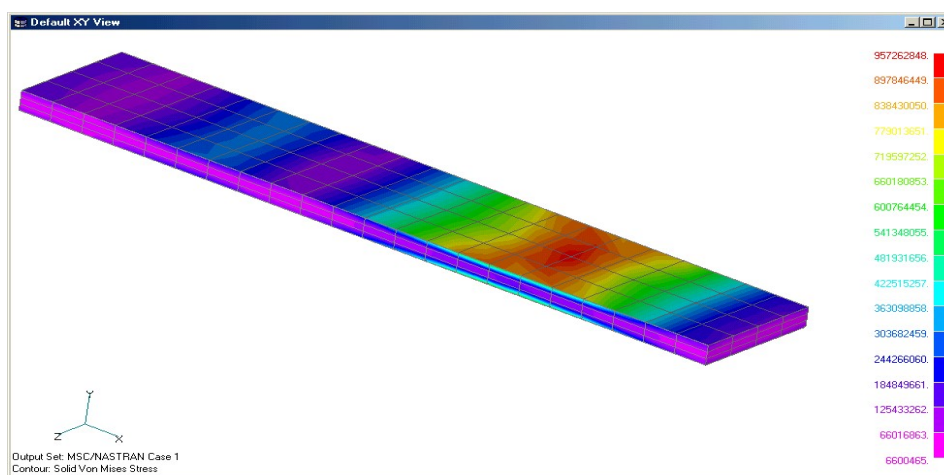


Рис. 6. Поля эквивалентных напряжений у моделі зразка зі зміцненим поверхневим шаром при середньому напруженні циклу, Па

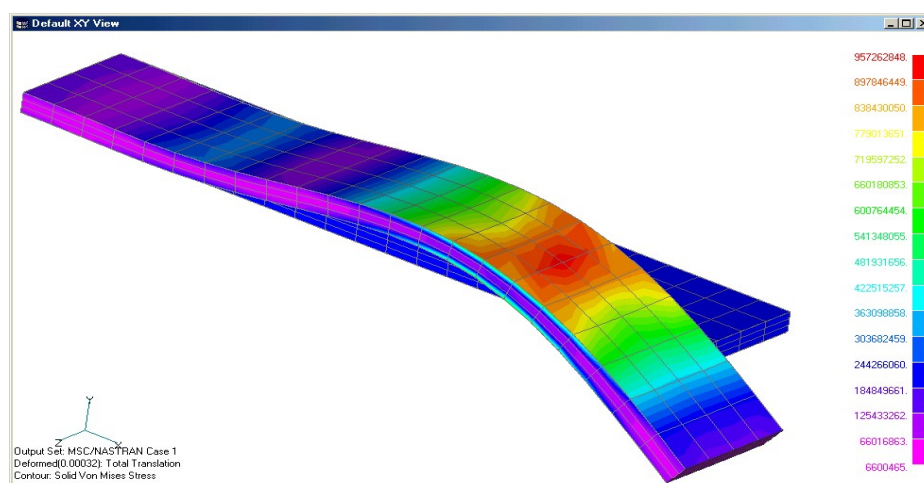


Рис. 7. Поля эквивалентных напряжений у моделі зразка зі зміцненим поверхневим шаром при мінімальному напруженні циклу, Па

В порівнянні з моделлю зразка без зміцненого поверхневого шару спостерігаємо збільшення площі еквівалентних напружень на поверхні зразка та зменшення їх ширини в поперечному перетині. На рис. 8 та 9 зображено криві еквівалентних напружень по довжині зразка.

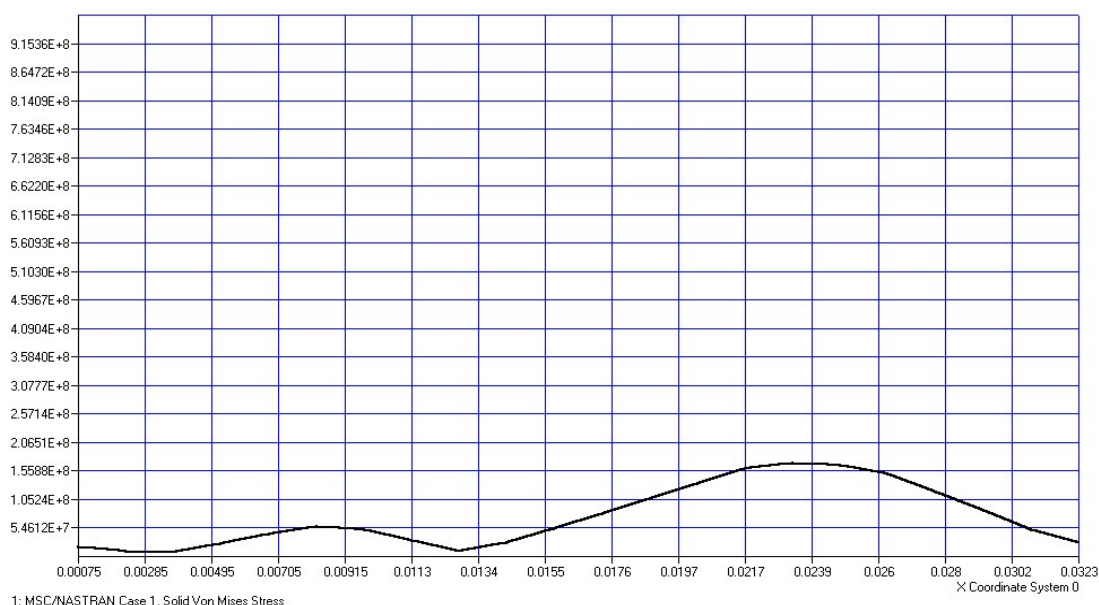


Рис. 8. Зміна напружень в основі зразка зі зміцненим поверхневим шаром при мінімальному напруженні циклу, Па.

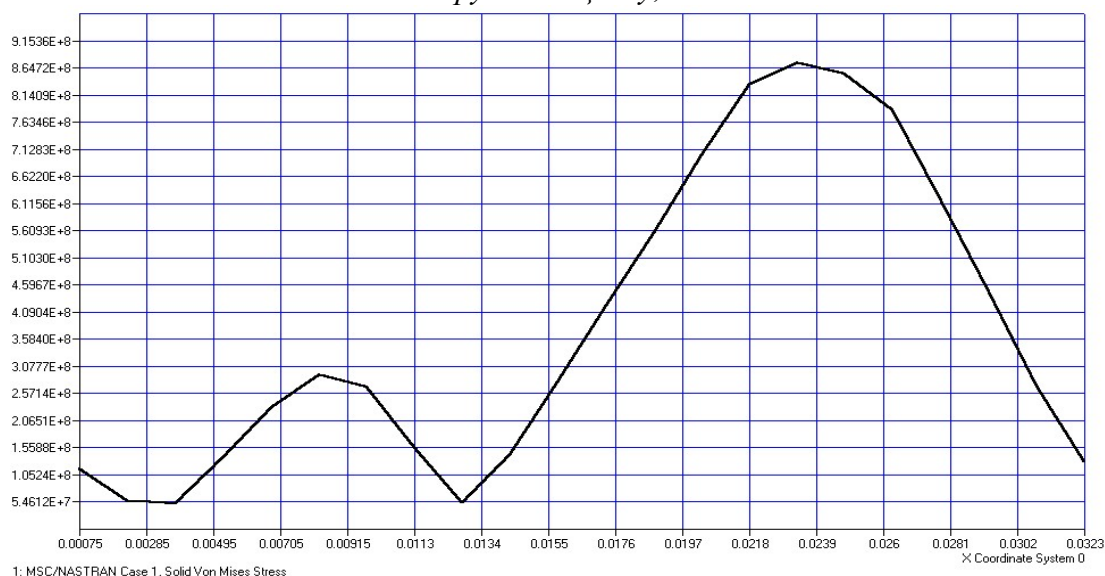


Рис. 9. Зміна напружень в основі зразка зі зміцненим поверхневим шаром при максимальному напруженні циклу, Па.

До того ж можна зазначити зменшення напружень в основі до  $2,1 \cdot 10^8$  Па та збільшення у зміцненому поверхневому шарі до  $8,46 \cdot 10^8$  Па, що свідчить про сприйняття покриттям значної частини еквівалентних напружень при збереженні несучої здатності основи.

### Висновок

Таким чином, за допомогою методу кінцево-елементного аналізу можна передбачити роботу сталевих конструктивних елементів бурильної колони зі зміцненим поверхневим шаром в умовах дії циклічних навантажень, а саме межу витривалості, кількість циклів до руйнування та місце руйнування.



*В материалах статьи предоставляется обзор мощного численного метода решения самых разнообразных инженерных задач методом конечных элементов, который имеет решающее место в прогнозировании работоспособности элементов бурильной колонны при воздействии эксплуатационных факторов. Для конкретного расчета использовался программный продукт NASTRAN, который имеет общую расчетную базу на основе метода конечных элементов и является одной из программ конечно-элементного анализа.*

**Ключевые слова:** метод конечно-элементного анализа, вакуумное газотермоциклическое ионно-плазменное азотирование, бурильная клонна, продукт NASTRAN, сталь, образец, напряженно-деформированное состояние.

*The files of the article provides an overview of powerful numerical methods for solving engineering problems different finite element method, which is critical in predicting the performance space of elements under the action of the drill string operational factors. For specific calculations used the software NASTRAN, which has a common base calculated based on the finite element method is one of the applications of finite element analysis.*

**Keywords:** finite element analysis, vacuum hazotermotsyklichne ion-plasma nitriding, boring clone product NASTRAN, steel specimen, the stress- strain state.

### Література

1. Осадчий Н. В. Конечно-элементное моделирование фланцевого соединения с контактирующими круговыми фланцами. Сопоставление результатов конечно-элементного расчета с результатами экспериментального исследования // Инженерный журнал. – 2003. – С.33 – 40.
2. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
3. Басов К. А. ANSYS в примерах задачах. / Под общ. Ред. Д. Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
4. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows . – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
5. Титов Е. Покрытия для режущего инструмента. Состояние вопроса и перспективы // – Мир техн. и технол. – 2005. – № 1, – С. 15–17.
6. Верещака А. С. Анализ основных аспектов проблемы совершенствования инструментальных материалов путем модификации их поверхностных свойств // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб.науч.тр. Сер. Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. – К.: ИСМ НАНУ. – 2002. – С. 301–315.
7. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий ионной имплантацией, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий: В 2-х книгах. – Харьков: АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 588 с.
8. Справочник металлиста. В 5-и т. Т .2 / Под ред. А.Г. Рахштадта и В.А.Бромстрема. – М.: Машиностроение, 1976.– 720 с.

Надійшла 23.07.14