

Заключение. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния траверсы козлового крана позволяет заключить следующее.

1. При исследовании напряженно-деформированного состояния пространственных сварных конструкций, аналогичных исследованным, допустимо использование одно-, двуслойных конечно-элементных моделей на основе пространственных конечных элементов, однако используемые КЭ должны содержать на сторонах (ребрах) промежуточные узлы и иметь хотя бы вторые степени интерполяционных координатных функций.

2. При большой размерности конечно-элементной модели (более 100000 узлов) выигрыш во времени выполнения расчета достигается использованием итерационных решателей (FFEplus).

3. Созданная на основе дополнительных специальных расчетно-экспериментальных исследований конечно-элементная модель траверсы обеспечила достаточно высокую точность определения напряженно-деформированного состояния (отличие результатов расчета от экспериментальных данных не превысило 9%).

4. Обнаруженный в исследованиях эффект превышения расчетных напряжений над экспериментальными может быть обусловлен тем, что применяемые тензодатчики имеют базу 10 мм, а точки “измерений” на КЭМ попадают в зону больших напряжений (в пределах базы тензодатчиков).

Примененная методика создания конечно-элементной модели и выполнения расчета может быть использована при исследовании НДС металлоконструкций с аналогичной геометрией при аналогичном характере напряженно-деформированного состояния.

Список литературы. 1. *Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Головченко, В.И. Гоголь Н.А.* Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 53. – С.116-138. 2. *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение параметров конечно-элементных моделей // Механіка та машинобудування. – 1998. – № 1. – С.68-75. 3. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып.53.– С.148-155. 4. *Ткачук Н.А.* Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем // Механіка та машинобудування. – 1999. – № 1.– С.37-46. 5. *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение характера граничных условий в сложных механических системах // Механіка та машинобудування. – 2000. – № 1. – С.28-34. 6. *Ткачук Н.А.* Элементы технологических систем: компьютерные модели, экспериментальные исследования, численный анализ прочности и жесткости // Вісник Інженерної Академії України. – Київ.– 2001.– № 3 (част.2). – С.297-302. 7. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 8. *Касатки Б.С., Кудрин А.С., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. – Киев: Наукова думка, 1981. – 583 с.

Г.П. ГЛІНІН, Ю.Б. ГУСЄВ, В.І. ГОЛОВЧЕНКО, Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут, м. Маріуполь, **Є.А. ОРЛОВ**, ВАТ „Ізюмський вагоноремонтний завод”

МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

В роботі пропонується підхід, що дозволяє аналізувати поведінку складних просторових конструкцій, змінюючи окремі параметри. Множина цих параметрів містить як геометричні та фізико-механічні параметри, так і тип і величину зовнішнього навантаження, типи скінченних елементів та характер скінченно-елементної сітки.

An approach which allows to analyze behaviour of complicated spacial structions by varying some parameters is proposed in this paper. Set of these parameters includes geometric and physico-mechanical ones as well as values of external loads, finite elements types and finite element grid features.

Стан питання. Широке розповсюдження просторових конструкцій різної форми, розмірів та призначення є причиною важливості дослідження їх напружено-деформованого стану (НДС). При проведенні подібних досліджень необхідно враховувати ряд різних аспектів. В роботі пропонується підхід, що дозволяє аналізувати поведінку складних просторових конструкцій, змінюючи певні параметри. Множина цих параметрів містить як геометричні та фізико-механічні параметри, так і тип і величину зовнішнього навантаження, типи скінченних елементів та характер скінченно-елементної сітки [1].

Як відомо, на етапі аналізу міцності та жорсткості існуючих просторових конструкцій найбільш широко застосовуються саме методи скінченно-елементного (МСЕ) аналізу. За останні роки технологія таких досліджень майже не змінилась, а найсучасніші розробки світових постачальників спеціалізованого програмного забезпечення дозволяють досліднику мати широкий вибір інструментів для їх проведення. Розроблений та загальноуживаний алгоритм аналізу напружено-деформованого стану складається з наступних етапів [2]:

- створення геометричної моделі;
- визначення типу задачі;
- створення скінченно-елементної моделі (СЕМ);
- розв'язання задач аналізу напружено-деформованого стану та синтезу раціональних параметрів конструкції.

На даний момент всі ці етапи автоматизовані та реалізовані у сучасних CAD/CAE-комплексах, що дозволяють з мінімальними витратами часу й сил

виконувати повний цикл досліджень об'єктів будь-якого рівня складності та отримувати необхідні результати розрахунків у зручній формі. Однак інколи роль дослідника стає визначальною: від вибору типу геометричної моделі, ступеня її детальності, типу скінченних елементів та методу побудови СЕМ може залежати не тільки точність, а навіть і адекватність отриманих результатів. У таких випадках на заваді стоїть брак загальної методики автоматизації всього комплексу дослідницьких робіт. Це стосується, в першу чергу, розв'язання задач синтезу, коли потрібно проводити багатоваріантні розрахунки напружено-деформованого стану об'єктів дуже складної форми, причому заданих за допомогою множини параметрів та взаємозв'язків між ними, що дуже важко формалізуються. Ще більші складності виникають у випадку, коли сама геометрія досліджуваного об'єкту є шуканою в процесі розв'язання задачі. Враховуючи вказані обставини, виникає важлива та актуальна задача розробки нового підходу, що дає змогу автоматизувати весь цикл подібних досліджень.

Постановка задачі. Розглянемо напружено-деформований стан механічної системи, що формально описується рівнянням наступного вигляду:

$$L(u, p, f, t) = 0 \text{ на } \Omega, \quad (1)$$

де L є деяким оператором, структура і параметри якого залежать від типу фізичних процесів та об'єкту досліджень і який враховує граничні умови, зовнішній вплив та умови сполучення; змінна u описує деформований стан пружного середовища в області Ω та є шуканою функцією просторових координат та часу; p являє собою набір параметрів (характеристики фізико-механічних властивостей, геометричні розміри, величини маси та жорсткості) та належить до деякого параметричного простору P ; f включає в себе всі діючі на систему навантаження (поверхневі, об'ємні, зосереджені, теплові навантаження); t – час або інший параметр, що характеризує досліджуване явище як процес.

Підхід до автоматизації досліджень НДС, що пропонується, найкраще себе виправдовує у наступних ситуаціях.

I. Ω являє собою складну, але задану область, що складається з декількох більш простих за формою підобластей $\Omega = \mathbf{U} \Omega_i$. В цьому разі опис кожної підобласті виявляється набагато простішим, ніж опис загальної конструкції. Можемо виділити із загального набору параметрів p ті параметри p_i , що відносяться до підобласті Ω_i . Для такого підходу основна задача полягає у побудові безконфліктної узгодженої моделі $\Omega = \mathbf{U} \Omega_i$ за конструкційними параметрами окремих її елементів. Тоді узагальнений простір P представляється у вигляді:

$$P = \mathbf{U} P_i,$$

де P_i – підпростори, в яких знаходяться визначені параметри p_i .

II. Інша можлива ситуація полягає в тому, що сама область Ω є шуканою чи то:

- при розв’язанні задачі аналізу та синтезу на основі розгляду НДС та критеріїв міцності;
- при розв’язанні додаткової задачі синтезу геометрії за певними вимогами;
- при поєднанні обох вищезазначених критеріїв.

В цьому випадку також $P = \bigcup P_i$. При цьому P_i містять у собі геометричні параметри, що можуть бути як кількісними величинами, так і функціями, що описують форму поверхонь Ω_i . Таким чином, розмірність параметричних просторів може бути як скінченною, так і нескінченною.

Зазначені вище випадки можемо формалізувати, записавши рівняння (1) для кожного з них наступним чином:

$$L_i(u_i, p_i, f_i, t) = 0 \text{ на } \Omega_i. \quad (2)$$

Тепер окрім змінних u_i та параметрів p_i , що відносяться до окремих підобластей, виділяються й зовнішні навантаження f_i , що діють на різні елементи конструкції. При цьому в випадку I область Ω повністю визначається заданими параметрами, а у другому відшукується. Для розв’язання вказаного типу задач необхідно виконати певний цикл досліджень, що складається з декількох взаємопов’язаних етапів.

Структура системи автоматизованого генерування моделей досліджуваних конструкцій. У роботі пропонується наступна структура системи автоматизованого генерування геометричної та скінченно-елементної моделей досліджуваних просторових конструкцій (рис. 1), що є органічною складовою процесу аналізу та синтезу машинобудівних конструкцій, що проектуються та виготовляються із залученням САПР.

Система обміну інформацією у наведеній схемі містить декілька циклів зворотніх зв’язків (на рис. 1 – штрихові лінії), що дозволяють створити стійку цілісну автоматизовану систему, яка відповідає сучасним вимогам до проектних, дослідницьких, технологічних та організаційних робіт на підприємстві, в об’єднанні або в галузі.

На рис. 2 проілюстровано механізм функціонування запропонованої технології, так би мовити, „у вузькому колі”, тобто безпосередньо в системі автоматизованого параметричного аналізу та синтезу машинобудівних конструкцій, зокрема, на основі досліджень їх напружено-деформованого стану.

На основі отриманих даних щодо об’єкта досліджень, що можуть містити конструктивні параметри та вимоги, особливості технічної

експлуатації або виготовлення тощо, має бути визначено, до якого із зазначених типів задач належить та, що стоїть перед дослідником. Залежно від ситуації або переходимо безпосередньо від існуючого конструктивного опису об'єкта до створення топологічної структури підобластей та їх параметричного опису, або маємо визначити алгоритм побудови геометрії об'єкта досліджень та на його основі визначити спосіб задання геометрії.



Рис. 1. Місце системи автоматизованого параметричного аналізу та синтезу машинобудівних конструкцій у загальному життєвому циклі проєктування, виробництва та експлуатації

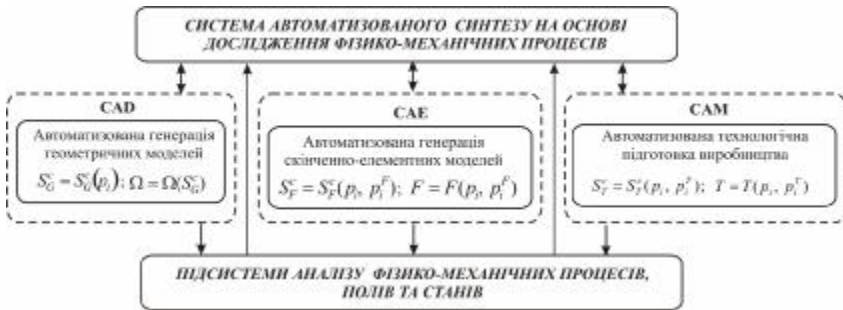


Рис. 2. Структура системи автоматизованого генерування моделей досліджуваних об'єктів

Незалежно від типу задачі мають бути сформовані набори параметрів $p = \{p_i\}$, що вмщуватимуть геометричні, фізичні та технологічні властивості конструкції. Вони можуть бути спільними для різних елементів конструкції.

Наступним кроком є створення геометричної моделі, що потребує побудови системи команд S_G^C . В рамках запропонованого підходу система команд має визначатися тими ж параметрами, що використовуються для опису усієї конструкції, або похідними від них:

$$S_G^C = S_G^C(p_i).$$

В цьому разі стає можливою автоматизація побудови кожної реалізації геометрії за вказаними параметрами $p_i: \Omega = \Omega(S_G^C)$.

На основі створеної геометричної моделі будується скінченно-елементна модель в САЕ-комплексі, безпосередньо з нею пов'язана. Вплив геометричних параметрів може безпосередньо бути внесеним до системи команд опису СЕМ. У поєднанні з параметрами скінченно-елементної моделі p_i^F маємо наступне визначення побудови скінченно-елементної сітки за допомогою команд, що згенеровані автоматично:

$$S_F^C = S_F^C(p_i, p_i^F) \rightarrow F = F(p_i, p_i^F).$$

Аналогічно будуються моделі для технологічної підготовки виробництва: на основі системи команд в S_T^C в САМ-системі створюється „технологічна модель” T , що містить усі дані, потрібні для виготовлення того чи іншого виробу:

$$S_T^C = S_T^C(p_i, p_i^T) \rightarrow T = T(p_i, p_i^T).$$

Таким чином, розроблено технологію побудови автоматизованої системи параметричного опису геометричної, технологічної та скінченно-елементної моделей, що дозволяє проводити аналіз НДС досліджуваної конструкції за різних наборів параметрів. У поєднанні з підсистемою варіювання параметрів ця система дає можливість вирішувати весь спектр зазначених задач та визначати шукані параметри конструкції будь-якого рівня складності.

До переваг запропонованого метода належать:

- автоматизація всього циклу багатоваріантних досліджень, в тому числі етапу опису геометрії;
- можливість передбачати зручний параметричний опис не тільки геометрії, але й скінченно-елементної моделі;
- універсальність, тобто можливість застосування для областей різноманітної форми, задач різних типів з різними граничними умовами та різними видами фізичних процесів.

Для демонстрації можливостей запропонованої технології розглянемо її застосування для генерування моделей таких різноманітних об'єктів, як автоцистерни, рами вітроенергетичних установок великої потужності,

вуглеперевантажувача та рами тепловоза.

Напружено-деформований стан автоцистерни. При розробці системи автоматизованого дослідження напружено-деформованого стану автоцистерн (паливоперевізники, паливозаправники) потрібно виходити не тільки із загальних схем досліджень (див. рис. 1, 2), але й, в першу чергу, із особливостей даних конструкцій. До них ставляться підвищені вимоги, в т.ч. з безпеки, міцності, надійності [3]. Крім того, повинні бути враховані особливості конструкції та навантаження, що визначаються її технічними характеристиками та умовами експлуатації.

В той же час основна частина трудовіткої роботи у загальному обсязі визначення напружено-деформованого стану полягає у генерації параметричної скінченно-елементної моделі. Саме ця проблема є каменем спотикання при організації будь-якого процесу багатоваріантних розрахунків в автоматизованому режимі. Відповідно до описаної вище стратегії на першому етапі досліджень була запропонована на прикладі тестової конструкції технологія генерації параметричної геометричної (рис. 3) та скінченно-елементної (рис. 4) моделей з урахуванням технологічних вимог та з моделюванням експлуатаційних навантажень.

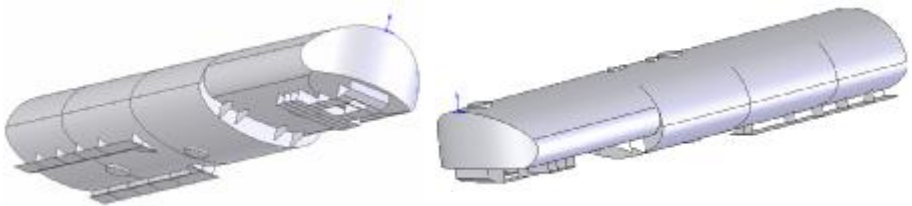


Рис. 3. Геометрична тестова модель автоцистерни



Рис. 4. Скінченно-елементна тестова модель автоцистерни

На рис. 5 представлені результати визначення напружень та деформацій автоцистерни при пробному навантаженні вагою палива, що транспортується.

Основною перевагою запропонованого підходу є можливість організації всіх етапів досліджень за принципом „чорної скриньки”: на вхід подається обмежена кількість параметрів у певному узгодженому форматі, а на виході

одержується можливість у потрібному форматі отримати результати розрахунків.



Розподіл переміщень точок



*Інтенсивність
напружень
за Мізесом*



Рис. 5. Компоненти напружено-деформованого стану автоцистерни при дії ваги рідини при повороті

Отримані пробні результати параметричного аналізу демонструють високу ефективність запропонованої технології досліджень. Так, зокрема, замість багатоденної роботи по підготовці моделей конструкції дослідник витрачає 2-3 години на постановку задачі аналізу. Крім того, цей підхід може бути успішно застосований для розв'язання задач оптимального проектування складних просторових конструкцій під дією динамічних сил різної природи.

Розрахунок напружено-деформованого стану рам вітроенергетичних установок великої потужності. Рами вітроенергетичних установок знаходяться під впливом у загальному випадку нестационарних силових навантажень (рис. 6). Це аеродинамічні сили, що передаються на ротор, вагові та інерційні сили від встановленого обладнання та власне рами. Прагнення охопити весь спектр навантажень у єдиному процесі досліджень породжує необхідність автоматизованого генерування розрахункових моделей.

У руслі запропонованого в статті підходу специфіка розв'язання задачі у даному випадку полягає у складності варіювання скінченно-елементної

моделі. Оскільки дуже важливим є взаємоузгодженість СЕМ та можливість забезпечення управління сіткою скінченних елементів, була запропонована та розроблена геометрична модель спеціальної структури. Ця модель якраз і забезпечує розв'язання поставлених задач у автоматизованому режимі (рис. 6), а також отримання картин розподілу напружень по всій конструкції та в зонах зварювання.

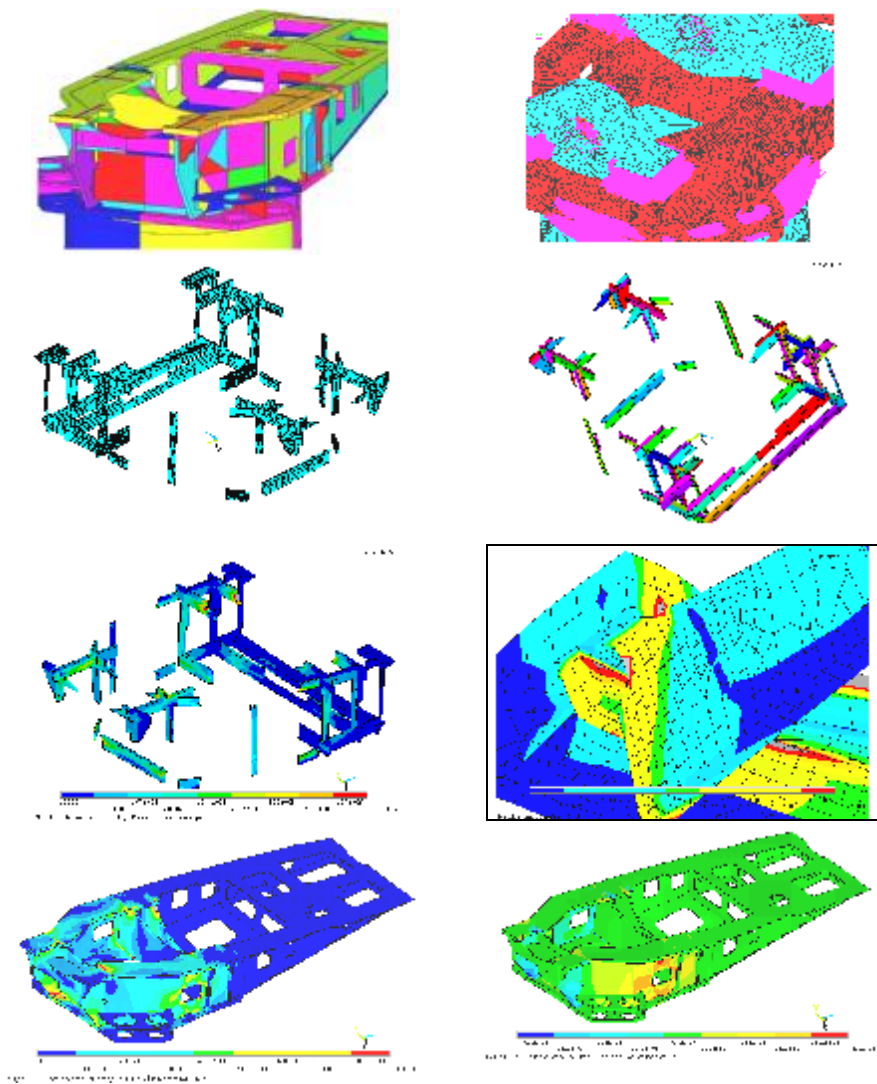


Рис. 6. Геометрична та скінченно-елементна параметричні моделі рами ВЕУ і картини розподілу напружень в окремих частинах її конструкції

Тестові параметричні моделі вуглеперевантажувача. Мостові грейферні перевантажувачі конструкції ВАТ „ГСКТГ”, м. Маріуполь, є великогабаритними просторовими конструкціями, що знаходяться під дією власної ваги та динамічного навантаження від грейферного візка з робочим вантажем. До проведення всього комплексу досліджень неможливо визначити фактори, що є домінуючими для розрахунку його напружено-деформованого стану. Тому параметрична модель, що генерується на перших етапах проведення цього комплексу робіт, повинна охоплювати якомога ширший фронт чинників, що можуть впливати на міцність та жорсткість конструкції.

На рис. 7 показані тестові моделі перевантажувача типу 3281 конструкції ВАТ „ГСКТГ” та результати пробних розрахунків його напружено-деформованого стану (рис. 8).

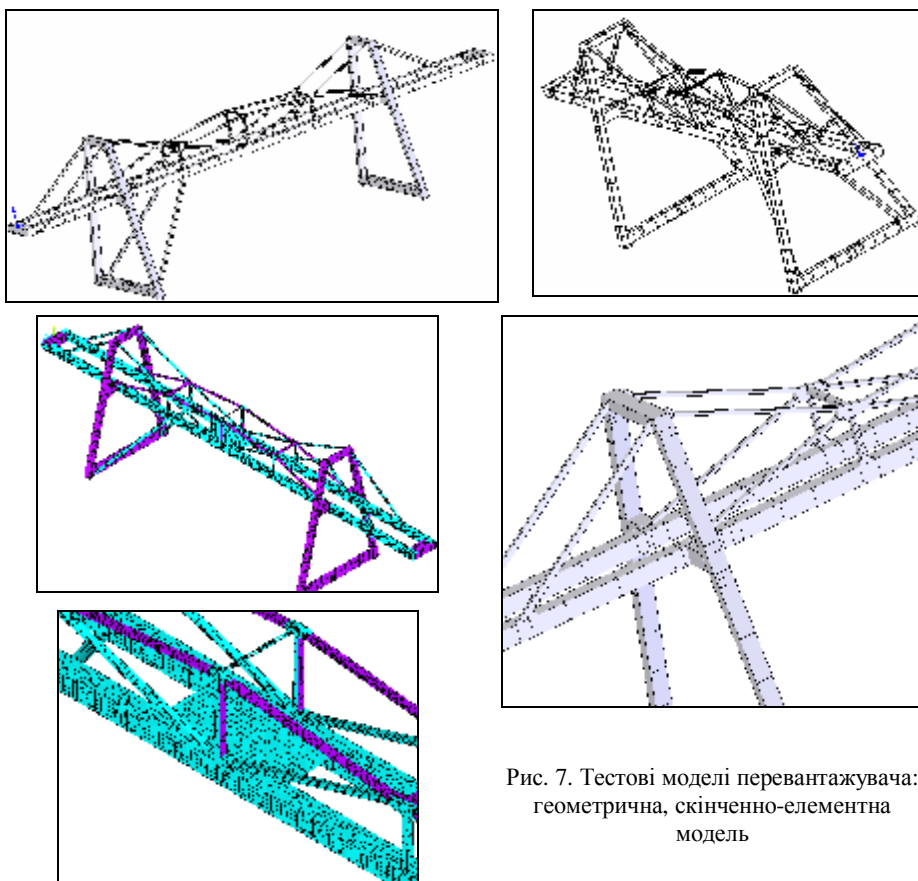
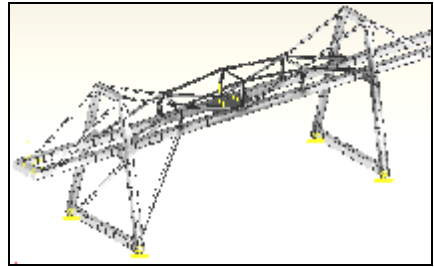
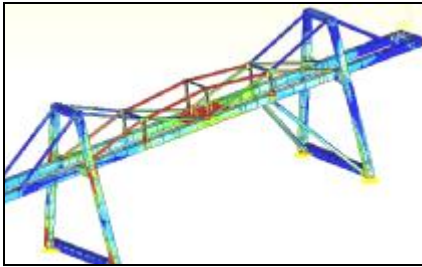
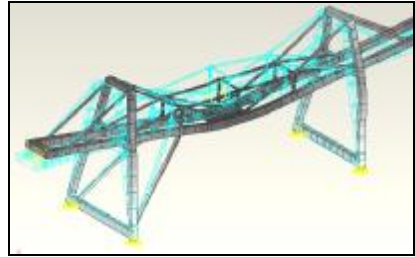
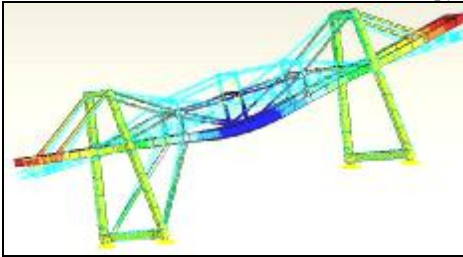


Рис. 7. Тестові моделі перевантажувача:
геометрична, скінченно-елементна
модель



Напруження



Переміщення точок

Рис. 8. Пробні розрахунки компонент напружено-деформованого стану перевантажувача

Особливістю згенерованих моделей є саме широкий діапазон параметрів, що враховуються при їх створенні, а також реалізована при цьому можливість побудови цих моделей за допомогою CAD-систем типу Pro/ENGINEER, SolidWorks, Inventor. Це забезпечує не тільки широкі можливості параметричного моделювання, але й варіативність інструментів для його реалізації.

Моделювання динамічних навантажень та параметричного аналізу напружено-деформованого стану елементів тепловозів. Запропонована технологія досліджень має ще одну позитивну складову: можливість впровадження технології не тільки на етапі розробки конструкції, але й під час її подальшої модернізації чи ремонту. Так, у ВАТ „Ізюмський вагоноремонтний завод” виникла актуальна і важлива задача розробки науково обґрунтованих схем капітального ремонту та реконструкції силових рам тепловозів серії 2ТЕ10М. Інформація щодо зон найбільших напружень може бути отримана експериментальним шляхом, а також при проведенні комплексу розрахункових досліджень, що складаються з етапів моделювання динамічних навантажень (рис. 9) та параметричного аналізу напружено-деформованого стану рам тепловозів (рис. 10).

Таким чином, запропонована технологія досліджень дозволяє обґрунтовано обирати схему ремонту рам тепловозів на основі прогнозу ймовірних зон виникнення тріщин та пластичних деформацій.

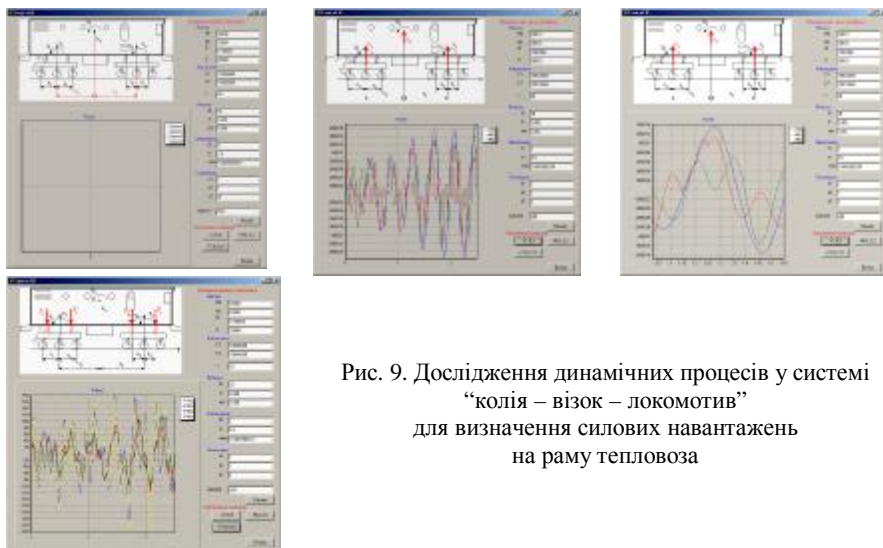


Рис. 9. Дослідження динамічних процесів у системі
 “колія – візок – локомотив”
 для визначення силових навантажень
 на раму тепловоза

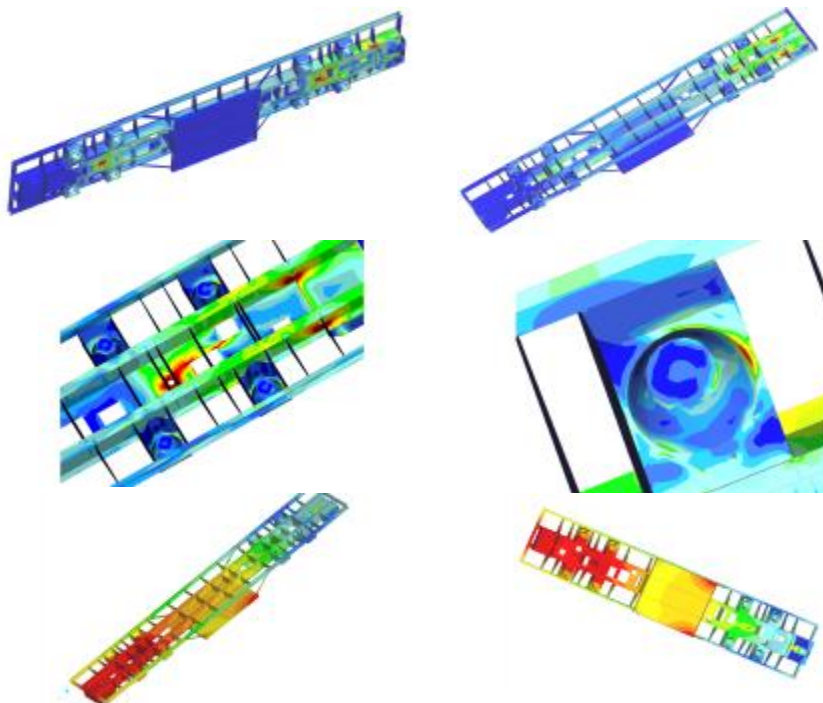


Рис. 10. Параметричний аналіз напружено-деформованого стану
 рами тепловозу серії 2ТЕ10М

Висновки. В роботі представлена технологія досліджень напружено-

деформованого стану елементів складних механічних систем в автоматизованому режимі. На основі застосування узагальненого параметричного опису вдалося побудувати єдиний цикл від задання геометрії до аналізу результатів розрахунків.

Аналіз застосування запропонованої технології дає змогу зробити наступні висновки:

1. Методика є досить ефективною для дослідження конструкцій різного типу.

2. Із застосуванням розробленого підходу вдається усунути принципові складності, що властиві скінченно-елементному моделюванню з дуже великою кількістю скінченних елементів.

3. Створена технологія, нечутлива до типу досліджуваних задач: можливе розв'язання як статичних, так і динамічних задач, лінійних та нелінійних, для масивних та тонкостінних конструкцій.

4. Застосований метод узагальненого параметричного опису машинобудівних конструкцій має ту суттєву перевагу, що він є фактично інструментом для створення на основі формальних правил класичного параметричного підходу математичних, числових, геометричних, силових, структурних, а також експериментальних моделей елементів досліджуваних механічних систем. Таким чином, насправді присутній як розвиток традиційної технології досліджень, так і набуття нею принципово нових якісних можливостей.

Основними напрямками подальших досліджень, що проводяться у цій області, зокрема у центрі „Тензор” Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”, ВАТ „Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут”, м. Маріуполь, а також у ВАТ „Ізюмський вагоноремонтний завод”, можна вважати розвиток даної технології та отримання розв'язків прикладних задач параметричного аналізу та синтезу складних просторових конструкцій.

Список літератури. 1. *Ткачук Н.А.* Специализированные системы автоматизированного исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологической оснастки // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – № 12. Т.1. – С.166-171. 2. *Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л.* Метод конечных элементов и САПР. – М: Мир, 1989. – 190с. 3. ГОСТ 27352-87 “Автотранспортные средства для заправки и транспортирования нефтепродуктов. Типы, параметры, общие технические требования”.

Надійшла до редакції 25.12.05

Н.А. ДЕМИНА, О.П. НАЗАРОВА, канд. техн. наук, Таврическая государственная агротехническая академия, г. Мелитополь,
А.Д. ЧЕПУРНОЙ, докт. техн. наук, Головной специализированный конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь,
Я.Н. БАРАНИКОВ, КП “Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А.Морозова”

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Для моделирования операции пробивания листа в штампе створена спеціалізована система скінченно-елементного аналізу. На основі поєднання спеціалізованих програмних модулів, системи ANSYS, LS DYNA та параметричних моделей матриці, пуансона та заготовки створено програмно-модельний комплекс для вивчення процесу штамповки.

The specialized system of finite-element analysis is created for the modeling of operation of sheet punching in stamp. On the basis of combination of the specialized program modules, ANSYS and LS DYNA-systems and parametrical models of matrix, puncheon and billet the program and model complex is created for study of stamping process.

Введение. До настоящего времени исследование стойкости штамповой оснастки и качества штампуемых деталей производилось либо на основе экспериментальных данных, либо на основе расчетных исследований с применением существенных упрощающих предположений [1-7]. В связи с этим возникает актуальная и важная задача создания средств моделирования процесса холоднолистовой штамповки в как можно более общей постановке с как можно меньшим количеством допущений и ограничений.

Постановка задачи. Рассмотрим вырезной штамп (рис. 1). В отличие от классической технологии формирования расчетных схем (табл. 1, 2 и рис. 2, 3) и методик расчетов напряженно-деформированного состояния элементов технологической системы холоднолистовой штамповки [1] требуется совместное рассмотрение элементов штампа и заготовки для более адекватного описания их поведения при осуществлении этой технологической операции.

Возникающая задача моделирования процесса разделительных операций имеет следующие основные принципиальные трудности теоретического, алгоритмического и программного характера:

- необходимость учета геометрической нелинейности, обусловленной большими перемещениями исследуемых объектов;
- нелинейность, создаваемая контактным взаимодействием в системе пуансон – листовая материал – матрица;
- нелинейность, возникающая при моделировании упруго-пластического поведения материала заготовки;