

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Овчарова Наталія Юріївна**



**УДК 539.3**

**СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ШВИДКІСНОГО  
ДЕФОРМУВАННЯ ЗАХИСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИНОБУДІВНИХ  
КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Харків – 2017**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі надійності та динамічної міцності Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та на кафедрі газогідромеханіки та тепломасообміну Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України (м. Харків).

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Воробйов Юрій Сергійович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,  
головний науковий співробітник

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Астанін В'ячеслав Валентинович**,  
Національний авіаційний університет України, м. Київ,  
завідувач кафедри механіки

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Ольшанський Василь Павлович**,  
Харківський Національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків,  
професор кафедри теоретичної механіки і деталей машин

Захист відбудеться «29» листопада 2017 року о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2).

Автореферат розісланий «27» жовтня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ларін О.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Елементи сучасних конструкцій часто працюють в умовах ударного та імпульсного навантаження. Це притаманно елементам транспортних засобів, авіаційній та космічній техніці, а також обладнанню, що забезпечує сучасні технологічні процеси.

Аналіз процесів швидкісного деформування конструкцій під дією локального та імпульсного навантаження потребує використання динамічних характеристик матеріалу, які залежать від швидкості деформації. Процеси швидкісного деформування проходять як в пружній так і в пластичній стадії і частково супроводжуються досить великими деформаціями. З математичної точки зору такі задачі є суттєво нелінійними, та потребують аналізу тривимірного динамічного напружено-деформованого стану (НДС).

Традиційні підходи до аналізу таких процесів проводять для ідеалізованих об'єктів або експериментально. Дані підходи мають обмежене застосування до задач практичної спрямованості оскільки не враховують зміни властивостей матеріалів при швидкісному деформуванні, геометричних особливостей тощо. В сучасній практиці науково-інженерних робіт для вирішення окреслених задач використовуються засоби комп'ютерного моделювання на основі методу скінченних елементів (МСЕ). Тим не менш універсальних підходів все ж не існує, і в кожному конкретному випадку виникає потреба побудови адекватної розрахункової схеми, обґрунтування моделі та її параметрів.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею динаміки та міцності машин є розробка розрахункових підходів аналізу процесу швидкісного деформування елементів конструкцій в пружно-пластичній стадії з урахуванням динамічних властивостей матеріалу, а також розробка рекомендацій щодо забезпечення динамічної міцності елементів конструкцій при локальному та ударному навантаженні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** В основу дисертації покладено матеріали використані автором в межах реалізації держбюджетних тем Інституту проблем машинобудування ім. О.М. Підгорного НАН України «Розробка наукових основ комплексного удосконалення міцнісних динамічних властивостей новітніх конструкцій та матеріалів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням технологічних та експлуатаційних факторів» (ДР № 0106U000485); «Розробка наукових основ аналізу нестационарного динамічного напруженого стану елементів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням пошкоджень» (ДР № 0111U001758); «Розробка методів розв'язання нелінійних задач швидкісної деформації тривимірних і оболонкових елементів конструкцій під дією імпульсних навантажень з урахуванням динамічних властивостей матеріалів і конструкційних факторів» (ДР № 0113U003908); цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Розробка нових методів та засобів діагностування енергетичних машин та підвищення їх

міцності та працездатності» (ДР № 0112U002490); договору № 2082/V-27-2013 «Аналіз вібраційної напруги в робочих лопатках компресора ГТД ДН80Л з врахуванням їх взаємодії у вінці» (ДР № 011U001765), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів та розділів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дослідження полягає у визначенні динамічного НДС захисних елементів машинобудівних конструкцій при імпульсному та ударному навантаженні для забезпечення їх міцності та ефективного використання при експлуатації, у тому числі в екстремальних умовах і з пошкодженнями.

Для досягнення мети було поставлено наступні задачі:

1. Аналіз літературних джерел за темою дисертації та визначення основних напрямків дослідження.

2. Розробка теоретичних підходів до розрахунку швидкісного деформування машинобудівних елементів конструкцій.

3. Розв'язання тестових задач, перевірка достовірності та адекватності запропонованих підходів, обґрунтування вибору фізичних співвідношень.

4. Виявлення особливостей динамічного напруженого стану елементів реальних конструкцій і розробка практичних рекомендацій із забезпечення їхньої динамічної міцності. Такими елементами є:

- елементи облицювання транспортних засобів (сучасні локомотиви);
- елементи корпусів газотурбінних двигунів (одношарові та двошарові);
- металополімерне гнучке колесо силової хвильової зубчатої передачі;
- багатошарові захисні елементи.

*Об'єкт дослідження* – процес швидкісного деформування елементів машинобудівних конструкцій під дією локального ударного й імпульсного навантаження.

*Предмет дослідження* – динамічна міцність елементів конструкцій при локальному ударному навантаженні.

**Методи дослідження.** Теоретичні положення дисертації засновані на сучасних методах математичного моделювання НДС елементів конструкцій при локальному ударному навантаженні, нелінійної теорії пружності, динамічної теорії пластичності. Чисельні методи з явними схемами інтегрування в часі та МСЕ використовувались для аналізу напруженого стану елементів конструкцій при локальному ударному навантаженні. Сучасні програмні комплекси інженерного аналізу було застосовано для розв'язку практичних задач.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– набули подальшого розвитку розрахункові моделі тривимірного швидкісного пружно-пластичного деформування елементів транспортного та енергетичного машинобудування, які відрізняються врахуванням динамічних властивостей матеріалів, що дозволяє отримувати уточнені результати для оцінки міцності при ударних та імпульсних навантаженнях;

– вперше отримані залежності розподілу напружень від швидкості удару за просторовими та часовими координатами в елементах конструкцій, які досліджуються, з різних матеріалів, які відрізняються чітким визначенням зон

із високими градієнтами напружень і деформацій, що дозволило отримати обґрунтування для побудови покращених розрахункових сіток;

– вперше виявлені нові особливості процесу швидкісного деформування для елементів корпусів газотурбінних двигунів при локальних навантаженнях, що на відміну від існуючих дозволяють визначити утворення кратерів та дослідити процес розвантаження з виникненням залишкових напружень та пошкоджень;

– визначені нові закономірності розподілу напружень та деформацій в тришаровому елементі для окремих шарів в залежності від швидкості ударника, що дозволило сформулювати практичні рекомендації по характеристикам захисних елементів легкоброньованої техніки.

**Практичне значення одержаних результатів** для галузі машинобудування мають дослідження динамічної міцності конструкційних елементів сучасної техніки під дією локального ударного навантаження. Результати знайшли відображення при визначенні динамічної міцності облицювання транспортних засобів (локомотивів), елементів корпусів газотурбінних двигунів (ГТД) при ударних навантаженнях сторонніми предметами. Виявлені загальні закономірності динамічного НДС в корпусних елементах сприяють забезпеченню та підвищенню динамічної міцності ГТД.

Отримані в дисертаційній роботі результати були впроваджені на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» та використані на ДП «Івченко-Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченко.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати досліджень, що представлені у дисертаційній роботі та виносяться на захист, одержані автором особисто. У публікаціях, що виконані у співавторстві, внесок здобувача полягає в наступному: в усіх публікаціях участь у постановці задач, у формуванні фізичних і математичних моделей; розробка конкретних скінченно-елементних (СЕ) моделей; чисельні дослідження та аналіз НДС металополімерного колеса силової хвильової зубчастої передачі під дією генератора [1, 4]; чисельні дослідження та аналіз НДС елементів корпусів газотурбінних двигунів, участь у розробці практичних рекомендацій щодо забезпечення динамічної міцності елементів реальних конструкцій [2, 3, 5, 6, 7, 14, 18]; чисельні розрахунки та аналіз впливу динамічних властивостей матеріалу на швидкісне деформування захисних елементів машинобудівних конструкцій [8, 10, 11, 13, 15 – 17], чисельний розрахунок НДС прямокутної пластини з розрізом при ударно-хвильовому навантаженні, зіставлення експериментальних результатів з чисельними [9, 19]; чисельні розрахунки та аналіз швидкісного деформування багат шарових елементів при контактній взаємодії [12, 20 – 22].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, що наведені в дисертації, доповідалися на наступних наукових конференціях: X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Streszczenia «Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania» (Польща, Казімір Долни, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (Україна, Харків, 2012 р., 2015 р.); IV та V Міжнародна науково-технічна

конференція «Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций» (Україна, Запоріжжя, 2012 р., 2015 р.); XVII та XVIII Міжнародний конгрес двігунобудівників, (Україна, с. Рибаче, 2012 р., 2013 р.); на 4th and 5th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013, ND-KhPI2016 (Україна, Севастополь, 2013 р., Харків, 2016 р.); X міжнародній науково-технічній конференції «Импульсные процессы в механике сплошных сред» (Україна, Миколаїв, 2013 р.); XIII Science and Technology Conference «Techniki Komputerowe w Inzynierii (TKI)» (Польща, Ліхен Старі, 2014 р.); The 8<sup>th</sup> Symposium of Lightweight Armour Group (LWAG 2014 Symposium) (Польща, Рин, 2014 р.); 10th Workshop Dynamic Behaviour of Materials and its Applications in Industrial Processes (Польща, Познань, 2014 р.); International symposium on Advanced Materials and Additive Manufacturing IS-AMAM (Китай, Харбін, 2016 р.). Дисертація в повному обсязі доповідалась на засіданні науково-технічної проблемної ради «Динаміка та міцність машин» Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та на науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин Національно технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано у 22 роботах, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України, 3 – у іноземних виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 10 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 151 сторінка, з них 76 рисунків по тексту; 5 таблиць по тексту; список з 149 найменувань використаних джерел на 17 сторінках, 2 додатки на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми роботи, сформульовано мету дисертації, завдання та основні результати, що виносяться на захист, їх новизна і практичне значення.

**Перший розділ** дисертації присвячено аналітичному огляду теоретичних та експериментальних наукових досліджень в галузі швидкісного деформування елементів конструкцій під дією імпульсних навантажень, включаючи локальні ударні. Проведено огляд робіт, в яких закладені основи фізичних моделей і аналізу процесів швидкісного деформування елементів конструкцій. Наведено відомості про різні моделі швидкісного пружно-пластичного деформування та їх розвиток. Дається опис особливостей деформування матеріалу при інтенсивних імпульсних навантаженнях: широкий діапазон інтенсивності напружень, висока швидкість зміни напружень при інтенсивному навантаженні, нестационарний характер НДС. Проведено аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень як вітчизняних так і закордонних авторів. Відзначено фундаментальні дослідження, опис особливостей деформування матеріалу, а також експериментальні дослідження в цій галузі, які надано в роботах таких відомих вчених як Іонов В.Н.,

Огібалов П.М., Рахматуллин Х.А., Ільющин А.А., Гольдсміт В., Філіппов А.П., Давиденков Н.І., Діннік О.М., Астанін В.В., Баженов В.Г., Добрушин Л.Г., Воробйов Ю.С., Колодяжний А.В., Кубенко В.Д., Степанов Г.В., Бреславський Д.В., Шупіков О.М., Сметанкіна Н.В., Ольшанський В.П., Огородников В.А., Стрельникова Є.О., Кукуджанов В.Н., Брагов А.М., Ломунов А.К., Харченко В.В., Meyers M.A., Johnson K.G., Cook W.H., Perzyna P., Peirce D., Owen D.R.J., Nowacki W.K., Kruszka L., Miyamoto A., Cadoni E., Forquin P., Walley S. та інші. Критичний аналіз відомих результатів показує, що у більшості експериментальних досліджень оцінка проводиться на стандартизованих зразках, наприклад стрижні Гопкінсона, спрямовані на визначення лише динамічних властивостей матеріалів як таких, а не елементів конструкцій. З іншого боку наявні експериментальні дослідження для конструкцій не достатньої універсальності, не є узагальненими. Теоретичні підходи до аналізу таких процесів проводять для ідеалізованих об'єктів. Таким чином дослідження спрямовані на СЕ аналіз швидкісного деформування захисних елементів машинобудівних конструкцій потребує подальшого розвитку. Проведений аналіз сучасного стану досліджень по темі дисертації дозволив сформулювати мету та основні задачі дослідження дисертаційної роботи.

У **другому розділі** зроблено математичну постановку задачі. Обґрунтовано необхідність використання тривимірних математичних моделей для аналізу динамічного НДС конструкцій у випадку дії локальних ударних навантажень. Динамічний НДС істотно змінюється як по часовим, так і по просторовим координатам, тому навіть для тонкостінних конструкцій використання теорії пластин та оболонок є небажаним, оскільки при цьому заздалегідь передбачається закон розподілу напружень по товщині, а частина напружень перпендикулярних серединної поверхні взагалі не враховується.

Наведені рівняння динаміки для тривимірного неоднорідного елемента конструкції в декартовій та циліндричній системах координат. В декартових координатах такі рівняння мають вигляд:

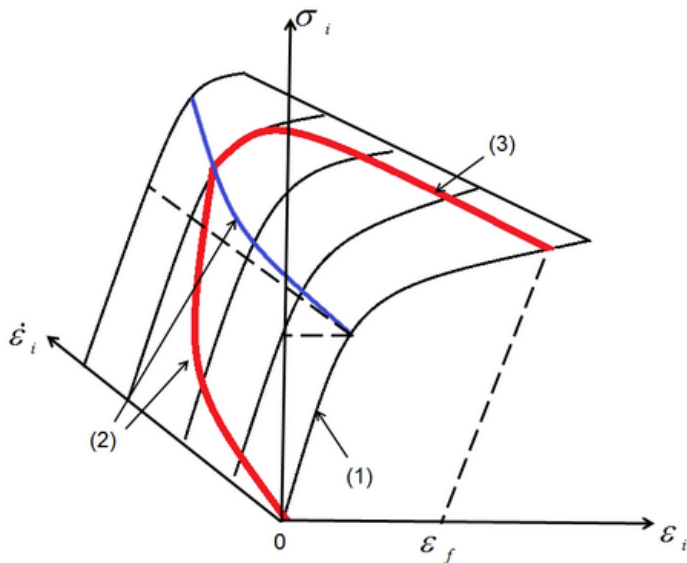
$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  та  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  – відповідно компоненти нормальних та дотичних напружень;  $u, v, w$  – компоненти переміщень;  $\rho$  – щільність матеріалу;  $X, Y, Z$  – проекції масових сил;  $t$  – час.

Компоненти напружень в рівняннях (1) визначаються в залежності від стадії деформування. У даній роботі використовується динамічний варіант теорії пластичних деформацій і компоненти напружень мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\sigma_x - \sigma_0 &= \frac{1}{\psi} \left( \varepsilon_x - \frac{1}{3} \varepsilon_0 \right); & \tau_{xz} &= \frac{1}{2\psi} \gamma_{xz}; \\
\sigma_y - \sigma_0 &= \frac{1}{\psi} \left( \varepsilon_y - \frac{1}{3} \varepsilon_0 \right); & \tau_{yz} &= \frac{1}{2\psi} \gamma_{yz}; \\
\sigma_z - \sigma_0 &= \frac{1}{\psi} \left( \varepsilon_z - \frac{1}{3} \varepsilon_0 \right); & \tau_{xy} &= \frac{1}{2\psi} \gamma_{xy}; \\
\sigma_0 &= \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z); & \varepsilon_0 &= \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z,
\end{aligned} \tag{2}$$

де  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – компоненти нормальних деформацій;  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  – компоненти дотичних деформацій;  $\sigma_0$  – середні напруження;  $\varepsilon_0$  – середні деформації;  $\psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}$  – функція, яка залежить від інтенсивності деформацій ( $\varepsilon_i$ ) та інтенсивності напружень ( $\sigma_i$ ), при цьому  $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$  при пластичному деформуванні. При пружному деформуванні параметр  $\psi$  має вигляд  $\psi = \frac{1}{2\mu}$ , де  $\mu$  – параметр Ламе, та є константою, а залежності (2) стають залежностями закону Гука.



$$(1) - \dot{\varepsilon}_i = 0; (2) - 0 \leq \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_s \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma} \right)^{1/n} \right];$$

$$(3) - \Delta \varepsilon_i \leq 0.$$

Рисунок 1 – Схема залежності між інтенсивністю напружень, деформацією і швидкістю деформації

Наглядно процес швидкісного деформування зручно представити у вигляді схеми в тривимірному зображенні (рис. 1). При цьому враховується динамічне зміцнення матеріалу та підвищення його динамічної границі текучості. Після досягнення динамічної границі текучості деформації елементів конструкцій відбуваються в пластичній стадії. Для урахування динамічних властивостей матеріалів обґрунтовано використання залежності Пежини.

$$\sigma_i = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] E \varepsilon_i, \tag{3}$$

де  $E$  – модуль пружності;  $m$  і  $\gamma$  – коефіцієнти чутливості до швидкості деформування;  $\dot{\varepsilon}_i^{pl}$  – швидкість деформацій пластичності.

Враховуючи залежність (3) функція  $\psi$  має вигляд



$$\Psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] E \varepsilon_i}. \quad (4)$$

Підстановка (4) в (2) дозволяє визначити компоненти напружень, які відображають фізичну нелінійність матеріалу:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_0 &= \frac{2}{3} E \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] \left(\varepsilon_x - \frac{1}{3} \varepsilon_0\right); & \tau_{xy} &= \frac{\gamma_{xy}}{3} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] E; \\ \sigma_y - \sigma_0 &= \frac{2}{3} E \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] \left(\varepsilon_y - \frac{1}{3} \varepsilon_0\right); & \tau_{yz} &= \frac{\gamma_{yz}}{3} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] E; \\ \sigma_z - \sigma_0 &= \frac{2}{3} E \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] \left(\varepsilon_z - \frac{1}{3} \varepsilon_0\right); & \tau_{xz} &= \frac{\gamma_{xz}}{3} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] E. \end{aligned} \quad (5)$$

У разі інтенсивних локальних навантажень припущення про малість переміщень і деформацій неприйнятне. Залежності для скінченних деформацій і переміщень мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right); \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \right); \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \right); \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \right); \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right); \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Чисельні розрахунки виконуються за допомогою МСЕ, у постановці що враховує специфіку процесу. Важливою вимогою до вибору типу скінченних елементів є врахування зазначених раніше факторів. В результаті просторової дискретизації МСЕ розрахункові рівняння руху зводяться до матричного рівняння

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)]\{u\} = \{F_n\}, \quad (7)$$

де  $[M]$ ,  $[K]$  – матриці мас та жорсткості СЕ моделі;  $\{u\}$  – вектор узагальнених вузлових переміщень;  $\{F_n\}$  – вектор приведених до вузлів сил.

В основі часової дискретизації - центральна диференціальна схема інтегрування другого порядку:

$$\begin{aligned} \{\ddot{u}\}_n &= [M]^{-1} (\{F\}_n - [K(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)] \{u\}_n), \\ \{\dot{u}\}_{n+\frac{1}{2}} &= \{\dot{u}\}_{n-\frac{1}{2}} + \{\ddot{u}\}_n \Delta t, \\ \{u\}_{n+1} &= \{u\}_n + \{\dot{u}\}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t. \end{aligned} \quad (8)$$

У **третьому розділі** наведені тестові розрахунки з визначення НДС елементів різних конструкцій при ударному навантаженні. Для оцінки достовірності моделі проведено порівняння чисельних результатів впливу ударної хвилі на пластину з розрізом з експериментальними даними<sup>1</sup>. Чисельні дослідження наведено для пластини з розрізом глибиною  $y/a = 0,14$ , коли локалізація напружень виражена найбільш явно. Розглядається прямокутна пластина з наступними розмірами: товщина  $h = 2,5$  мм, ширина  $a = 140$  мм і довжина  $b = 210$  мм (рис. 2). Матеріал пластини - склотекстоліт, що має щільність  $\rho = 1,7$  г/см<sup>3</sup> і модуль пружності  $E_x = 2,6 \cdot 10^{10}$  Па. Пластина затиснена з двох сторін (рис. 2, а). Посередині пластини є розріз шириною 0,5 мм.

Показано особливості деформівного стану пластини з розрізом поблизу вершини розрізу, уздовж берегів розрізу і на лініях жорсткого защемлення. Характер епюр деформацій відповідає очікуваному згідно фізичним змістом задачі. На рис. 2, б та рис. 2, в показано порівняння чисельних і експериментальних результатів уздовж ліній, які розташовані поблизу вершини розрізу та вище неї.

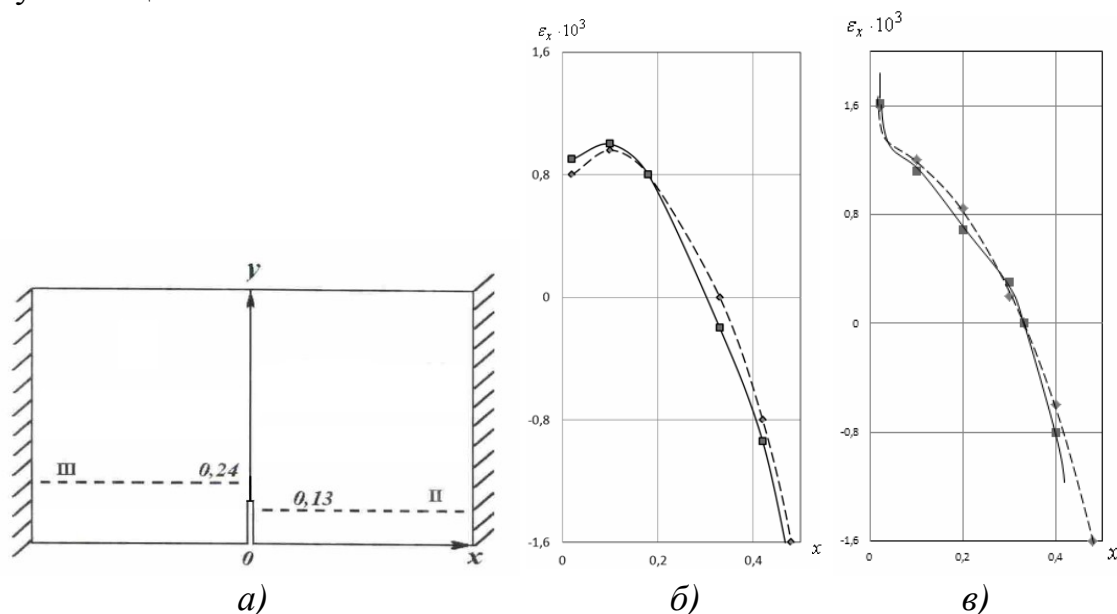


Рисунок 2 – Схема пластини із розташуванням датчиків (а); зіставлення чисельних та експериментальних деформацій поблизу вершини розрізу – лінія II (б); та вище неї – III (в)

<sup>1</sup> Деформирование упругой пластины с краевым разрезом при падении плоской ударной волны - экспериментальное исследование / И.И. Аникьев, М.И. Михайлова, Е.А. Сущенко // Прикл. механика. – 2009. – 45, №11.- С. 115– 121.

Зіставлення експериментальних і розрахункових результатів показує їх гарний збіг з величиною похибки яка в середньому не перевищує 8 %. Розглянуто вплив урахування динамічних властивостей на розвиток процесу швидкісного пружно-пластичного деформування елементів конструкцій при інтенсивних ударних навантаженнях.

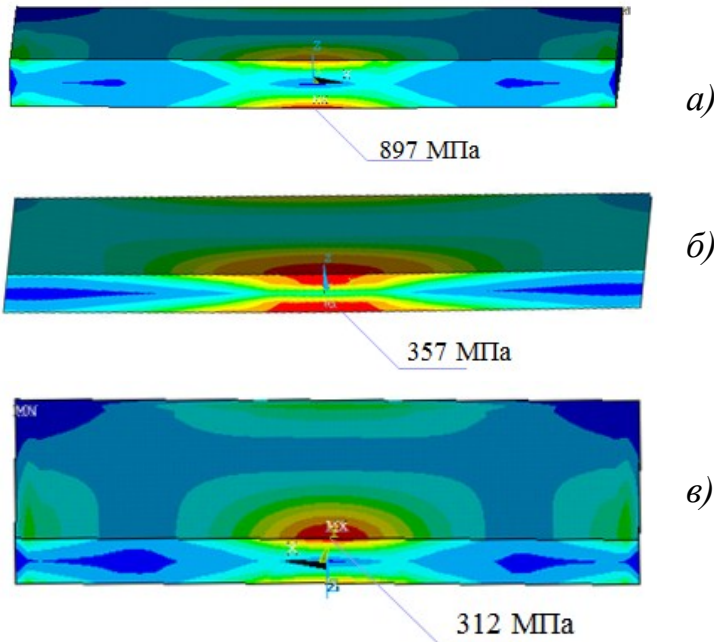


Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень при ударній дії в пружній постановці (а), з урахуванням залежності Пежини (б) і Пірса (в)

Для порівняння розглядається вплив на прямокутний елемент сталеві конструкції товщиною  $h = 8$  мм ударника масою  $m = 0,1$  кг зі швидкістю 200 м/с при різних способах урахування динамічних властивостей матеріалу (рис. 3). Вирішення задачі в пружній постановці при збільшенні інтенсивності навантаження призводить до завищення максимальних напружень (рис. 3, а) при заниженій оцінці переміщень. При використанні залежності Пежини (4) з урахуванням динамічних властивостей

матеріалу спостерігається зниження найбільших еквівалентних напружень (рис. 3, б) і збільшення переміщень, крім того змінюється характер розподілу еквівалентних напружень. Було отримано досить близькі результати. Динамічні властивості матеріалу можуть бути враховані за допомогою залежності Пірса. Величина максимальних еквівалентних напружень ще більш знижується (рис. 3, в). На рис. 4 наведено порівняння розподілу еквівалентних напружень за часом при різних способах урахування динамічних властивостей матеріалу.

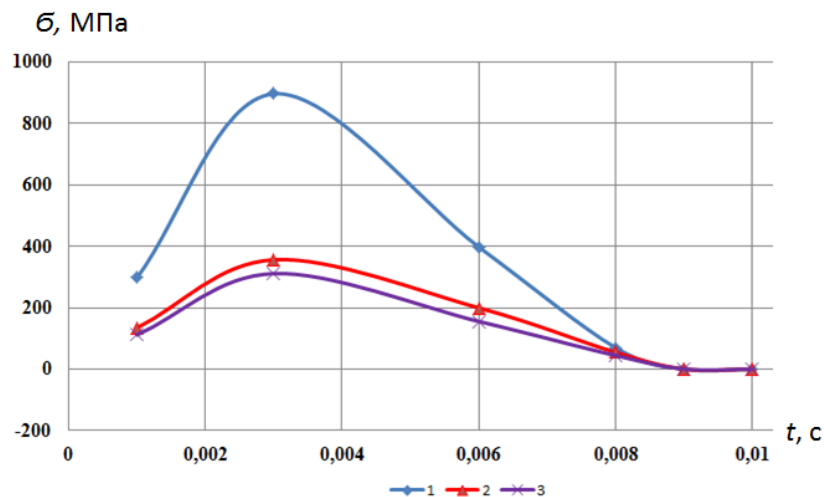


Рисунок 4 – Порівняння розподілу еквівалентних напружень за часом при урахуванні тільки пружних властивостей матеріалу (1), залежності Пежини (2) та залежності Пірса (3)

Показано, що в міру уточнення пружно-пластичних і динамічних властивостей матеріалу, а також скінченних деформацій все більш проявляється нелінійний характер деформування зі збільшенням переміщень і деформацій при більш низьких значеннях напружень.

Розглянуто практичну задачу визначення НДС елемента облицювання транспортного засобу при впливі циліндричного ударника (рис. 5).

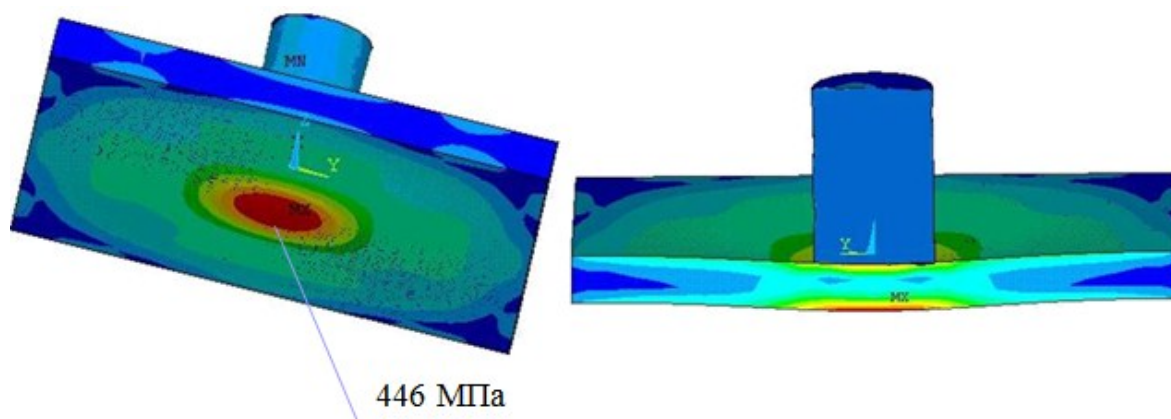


Рисунок 5 – Розподіл еквівалентних напружень в плоскому елементі при дії ударника зі швидкістю 80 км/год

Результати досліджень показують, що при прийнятій середній швидкості руху теплового 80 км/год деформації відбуваються виключно в пружній стадії, і пробивання не спостерігається. При цьому максимальні деформації спостерігаються в ударнику при його стисненні, а максимальні напруження виникають в елементі облицювання, і спостерігається невеликий прогин.

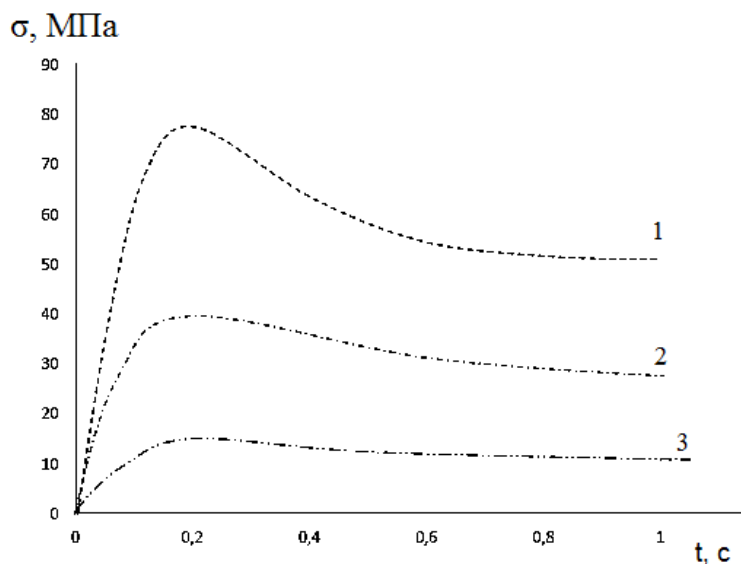


Рисунок 6 – Зіставлення розподілу максимальних еквівалентних напружень при дії ударника зі швидкістю 200 м/с в захисних елементах з різних матеріалів: 1 – сталевий елемент; 2 – з алюмінієвого сплаву; 3 – з композитного матеріалу

Проведено порівняння НДС елементів конструкцій виконаних з різних матеріалів для оцінки необхідної динамічної міцності елементів при заданій товщині і вазі (рис. 6).

Результати досліджень показують, що необхідну міцність і найменшу вагу мають елементи з композитного матеріалу. Проведено аналіз впливу локального ударного навантаження, що діє під різними кутами, на елемент облицювання транспортного засобу. Максимальні напруження в елементі виникають при ударі під кутом  $90^{\circ}$ , однак і при зіткненні під кутом  $45^{\circ}$

виникають як значні напруження в елементі, так і значні переміщення.

У четвертому розділі розглянуто задачі швидкісного пружно-пластичного деформування елементів циліндричних конструкцій. Визначені чіткі зони локалізації деформацій і інтенсивностей напружень, а також особливості їх розподілу по всій оболонці. Розглянуто ряд практичних задач аналізу НДС елементів корпусу газотурбінного двигуна при ударному навантаженні, які відрізняються призначенням, геометричними особливостями та властивостями матеріалів.

Показано, що найбільші переміщення і напруження розвиваються в обмежених зонах і швидко зменшуються по просторовим координатам і в часі, а також при розвантаженні. Також показано, що на робочих швидкостях обертання ГТД удари по корпусу спричинені відривом фрагментів лопаток або попаданні частинок у потік виникають локальні напруження, які не перевищують межі пружності. Показано, що в деяких випадках перевага надається двошаровим конструкціям, тому що вони краще чинять опір ударним навантаженням, ніж одношарові з більшою товщиною з того ж матеріалу. На рис. 7 показано розподіл еквівалентних напружень та переміщень в елементі корпусу газотурбінного двигуна з накладкою при дії ударника зі швидкістю 350 м/с. При збільшенні швидкості удару виникають пластичні деформації в зоні удару і виникнення залишкових деформацій. В локальній зоні доцільно збільшити гущину сітки для більш детального розгляду динамічного НДС (рис. 8).

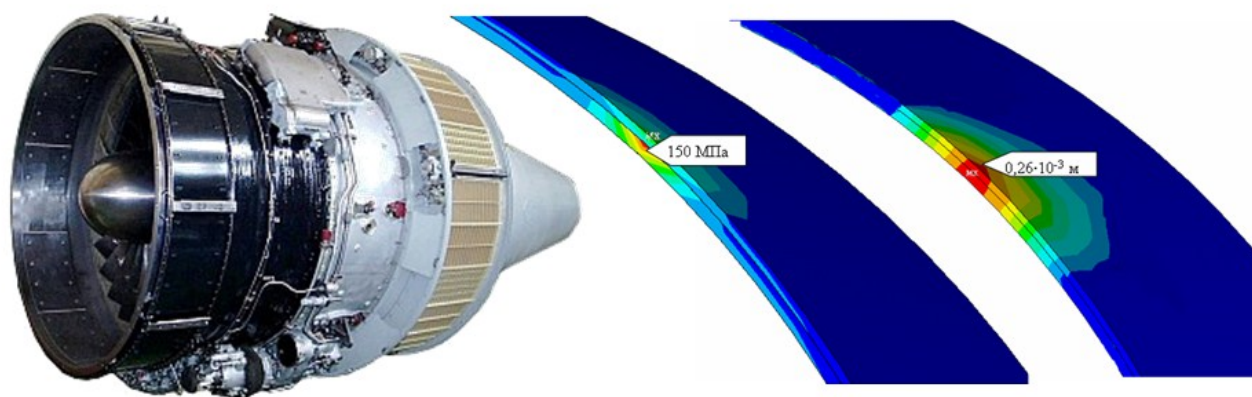


Рисунок 7 – Розподіл еквівалентних напружень (ліворуч) та переміщень (праворуч) в двошаровому елементі газотурбінного двигуна при дії ударника зі швидкістю 350 м/с

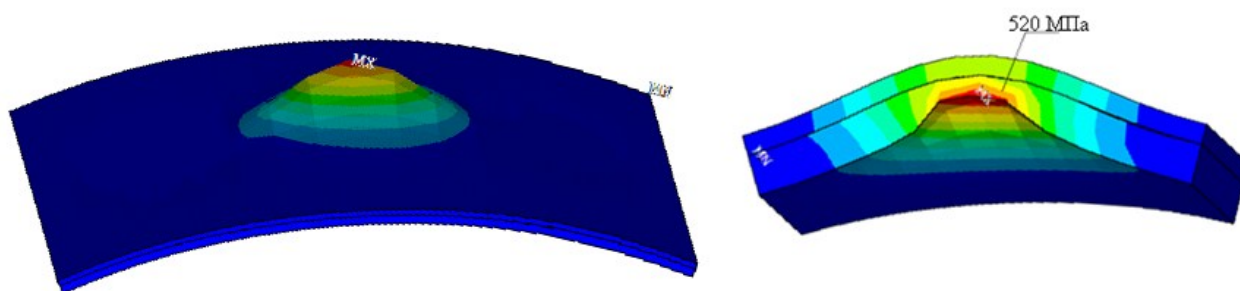


Рисунок 8 – Розподіл полів напружень в елементі при дії ударника зі швидкістю 800 м/с (ліворуч) та з більш густою сіткою (праворуч)



Розглянуто практичну задачу аналізу НДС двошарових металополімерних коліс силових хвильових передач, під дією різних навантажень (рис. 9).

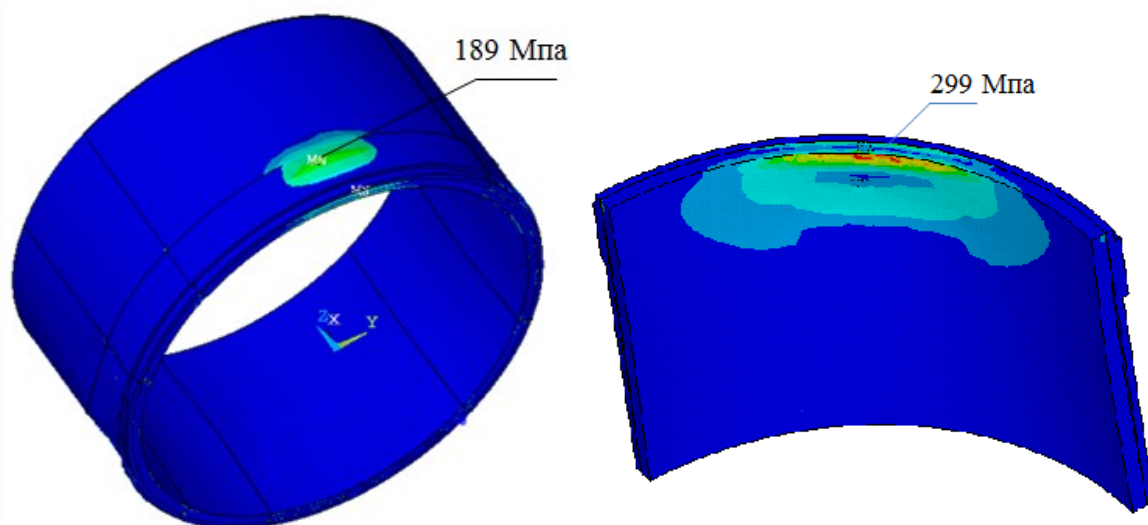


Рисунок 9 – Поля напружень на зовнішній поверхні гнучкого колеса від впливу динамічного навантаження (ліворуч) та внутрішній поверхні – від впливу статичного (праворуч)

Напруження, які виникають у внутрішньому композитному шарі від впливу статичного навантаження вищі, ніж напруження в металевому зовнішньому шарі, який знаходиться під впливом динамічного навантаження. Однак вони не перевищують межі міцності.

Результати чисельних досліджень показують, що найбільші переміщення і напруження розвиваються в обмежених зонах і швидко зменшуються по просторовим координатам і в часі, при зростанні швидкості зіткнення  $V \geq 150$  м/с область інтенсивних переміщень і напружень дорівнює  $R \leq (10 - 12) r$ , де  $r$  радіус зони навантаження.

У п'ятому розділі досліджено НДС тришарового елемента з двох тонких шарів титанового сплаву Ti6Al4V і середнього керамічного при дії ударника. При швидкості удару до 400 м/с видно зони локалізації як для розподілу полів деформацій так і напружень по всіх трьох шарах (рис. 10).

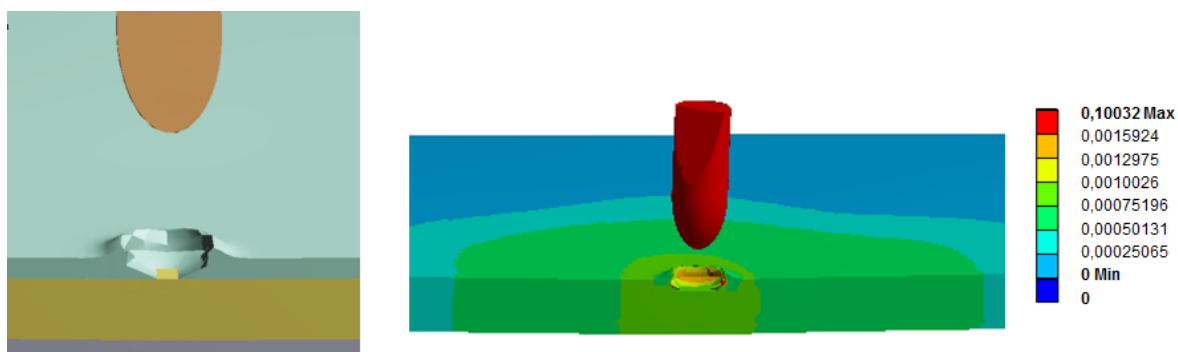


Рисунок 10 – Розподіл деформацій у тришаровій пластині при дії ударника зі швидкістю 400 м/с через  $3 \cdot 10^{-4}$  с після контакту

Показано, що тришарова конструкція добре чинить опір ударним навантаженням, навіть при пошкодженнях верхнього шару в середньому шарі розвиваються обширі деформації, які обмежуються нижнім шаром (рис. 11).

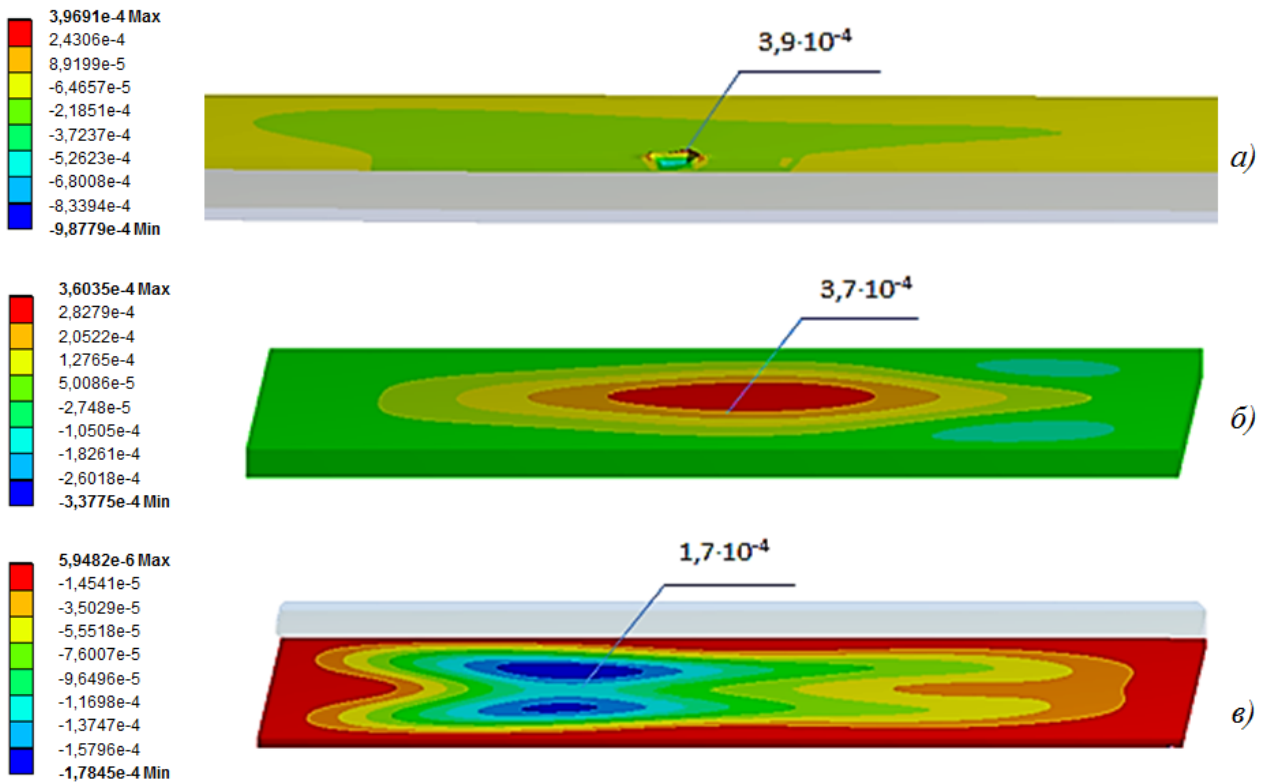


Рисунок 11 - Розподіл деформацій у верхньому титановому шарі (а) середньому керамічному (б) нижньому титановому шарі (в) у тришаровій пластині при впливі ударника зі швидкістю 200 м/с через  $3 \cdot 10^{-4}$  с після контакту

Отримані залежності максимальних динамічних напружень у верхньому шарі з титану (1) і в керамічному шарі (2) від швидкості удару (рис. 12). Помітна тенденція різкого зростання напружень в шарі з титанового сплаву при низьких швидкостях удару.

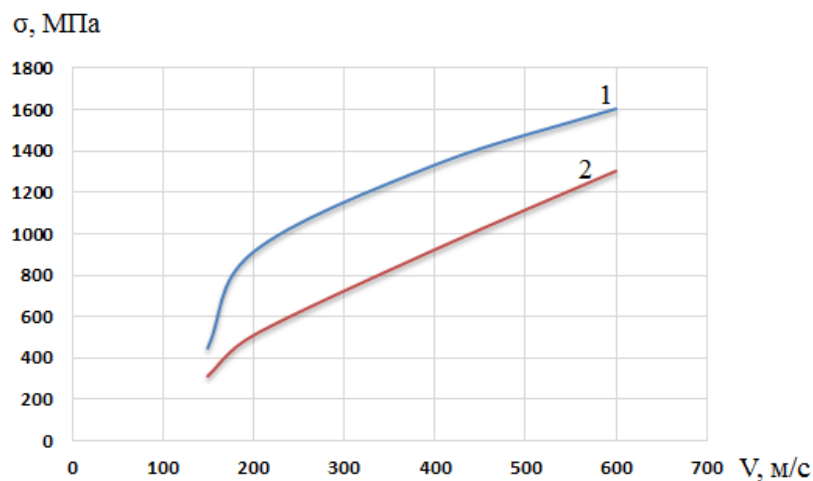


Рисунок 12. – Залежності максимальних динамічних напружень у верхньому шарі з титанового сплаву (1) і в керамічному шарі (2) від швидкості удару.

Таким чином, середній шар поглинає основну енергію удару і збільшує опір елемента локальним ударним навантаженням. При збільшенні швидкості удару у верхньому шарі виникають ушкодження у вигляді кратера, але незважаючи на це тришаровий елемент зберігає свої захисні властивості. З

ростом швидкості зіткнення відбувається динамічне зміцнення матеріалу, а також перерозподіл напружень між верхнім та середнім шаром і зростання опору елементів до ударних навантажень, що забезпечує необхідну динамічну міцність тришарових елементів конструкцій.

У додатках наведені акти впровадження на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» та на ДП «Івченко-Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченко, список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача динаміки та міцності машин з визначення динамічного тривимірного НДС захисних елементів машинобудівних конструкцій при імпульсному та ударному навантаженнях для забезпечення їх міцності та ефективного використання при експлуатації, у тому числі в екстремальних умовах і з пошкодженнями.

Основні наукові та практичні результати виконаних досліджень полягають у наступному:

1. На основі наведеного аналізу сучасного стану досліджень швидкісного деформування машинобудівних конструкцій як напрям дисертаційної роботи обрано визначення динамічного НДС елементів транспортної та енергетичної техніки при імпульсному та ударному навантаженнях для забезпечення їх надійності та ефективного використання.

2. Запропоновано розрахунковий підхід та математичну модель для аналізу процесу швидкісного пружно-пластичного деформування, яка враховує неоднорідність матеріалу елементів конструкцій як спочатку задану, так і ту, що виникає в процесі швидкісного деформування, що дозволило отримати уточнені результати для оцінки міцності при ударних та імпульсних навантаженнях.

3. Розв'язано ряд тестових задач, що дозволило провести порівняння результатів отриманих в роботі із даними отриманими теоретично та експериментально іншими авторами. При цьому:

– Порівняльний аналіз показав якісну збіжність отриманих результатів та задовільне кількісне узгодження, величина похибки в середньому не перевищує 8 %.

– На основі тестових розрахунків обґрунтовано необхідність застосування моделей пластичності з динамічними характеристиками при вирішенні задач ударного навантаження тонкостінних елементів конструкцій. Крім того доведено, що при швидкісному ударному деформуванні виникає складний тривимірний НДС і навіть для тонкостінних конструкцій використання теорії пластин та оболонок є небажаним, оскільки при цьому заздалегідь передбачається закон розподілу напружень по товщині, а частина напружень перпендикулярних серединної поверхні взагалі не враховується.

– Досліджено залежності розподілу максимальних еквівалентних напружень за часом для різних матеріалів, та наведено їх порівняння.



Результати досліджень показують, що необхідну міцність і найменшу вагу мають елементи з композитного матеріалу.

– Показано, на прикладі циліндричних елементів, що при зростанні швидкості удару до 150 м/с область інтенсивних переміщень та напружень стає більш локальною та дорівнює 10 – 12 радіусів області навантаження. З віддаленням від цієї зони та при розвантаженні спостерігається швидке зниження напружень. Це дозволяє відокремлювати область навколо зони навантаження, та проводити уточнення результатів за рахунок згущення сітки в цій зоні.

4. На основі розробленого та обґрунтованого підходу до аналізу ударних та імпульсних навантажень було побудовано СЕ моделі для визначення динамічного НДС реальних конструкцій транспортного та енергетичного машинобудування. А саме:

– Виявлені особливості динамічного напруженого стану елементів облицювання транспортних засобів. Результати цих досліджень показують, що при прийнятій середній швидкості руху тепловоза 80 км/год деформації відбуваються в пружній стадії, і пробивання не спостерігається. Для сталевих елементів облицювання проведено дослідження зіткнення з ударником під різними кутами. Максимальні напруження в елементі виникають при ударі під кутом  $90^{\circ}$ . При зіткненні під кутом  $45^{\circ}$  напруження нижче лише на 5 %, але в елементі виникають переміщення до 3,7 мм.

– Для елементів корпусів газотурбінних двигунів, які відрізняються призначенням, геометричними особливостями та властивостями матеріалу проведено аналіз НДС при ударних навантаженнях. Це композитні накладки, одношарові або двошарові сталеві елементи. Показано що використання накладок дозволяє зменшити товщину елемента корпусу у 2,5 рази та зменшити величину переміщень з 2 мм до 0,26 мм.

– Проведено аналіз НДС двошарового металополімерного колеса силової хвильової передачі, під дією статичного та динамічного навантажень. Показано, що максимальні напруження, які виникають під час динамічного навантаження, що діє на металевий зовнішній шар, нижче ніж від статичного на внутрішній поверхні. Показано зростання напружень у момент дії динамічного навантаження. Проте максимальні напруження не перевищують допустимих.

– Розглянуто опірність тришарового елемента з двох тонких шарів титанового сплаву і середнього керамічного шару. Титанові сплави мають гарну опірність до ударних навантажень, яка росте зі швидкістю деформації. У роботі показано, що середній шар поглинає основну енергію удару і збільшує опір елемента локальним ударним навантаженням. При збільшенні швидкості удару у верхньому шарі виникають пошкодження у вигляді кратера, але незважаючи на це тришаровий елемент зберігає свої захисні властивості, забезпечуючи необхідну динамічну міцність конструкції.

5 Розроблено рекомендації щодо забезпечення динамічної міцності елементів газотурбінних двигунів та інших елементів машинобудівних конструкцій. Результати роботи впроваджені в ЗМКБ «Прогрес» та ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», що підтверджено актами впровадження.

## СПИСОК ПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Овчарова Н.Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния металлопластикового колеса силовой волновой зубчатой передачи под действием генератора / Ю.С. Воробьев, А.Г. Приймаков, Н.Ю. Овчарова, Т.Ю. Евченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2012. – Вип. 128. – С. 268 – 271.

*Здобувачем прийнято участь у виборі фізичної моделі та проведено та проведено чисельні дослідження НДС колеса під дією генератора.*

2. Овчарова Н.Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием локальных ударных нагрузок / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Методы решения прикладных задач механики деформируемого тела. – Дніпропетровськ: Ліра. – 2012. Вип. 13. – С. 86 – 91.

*Здобувачем прийнято участь у виборі математичної моделі і методу розрахунку НДС елементів облицювання транспортних засобів та проведено чисельні розрахунки та порівняння з експериментальними даними.*

3. Овчарова Н.Ю. Локальное ударное воздействие на цилиндрические элементы конструкций. / Н.Ю. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2012. – № 10 (97). – С. 29 – 32.

*Здобувачем досліджено локальна ударна дія на циліндричні елементи конструкцій з різними швидкостями удару та різними моделями урахування динамічних властивостей матеріалів.*

4. Овчарова Н.Ю. Динамика и статика металлопластикового колеса силовой волновой зубчатой передачи / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова, Т.Ю. Евченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2013. – Вип. 139. – С. 337 – 341.

*Здобувачем отримані результати чисельних досліджень напружено-деформованого стану металополімерного колеса силовій хвильовій зубчастій передачі під дією статичного та динамічного навантаження*

5. Овчарова Н.Ю. Влияние ударных нагрузок на скоростное деформирование элементов корпуса ГТД / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Вестник двигателестроения. – Запорожье: АО «Мотор Сич». – 2013. – № 2. – С. 209 – 213.

*Здобувачем обґрунтовано вибір математичної моделі, проведено чисельні розрахунки елементів корпусу газотурбінного двигуна.*

6. Овчарова Н.Ю. Динамика элементов конструкций при ударных нагрузках / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова. // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця: ВНАУ. – 2014. – № 2 (74). – С. 5 – 11.

*Здобувачем отримано розподіл напружень в елементах при збільшені швидкості зіткнення та досліджено динамічну міцність елементів облицювання сучасних локомотивів.*

7. Овчарова Н.Ю. Влияние динамических свойств материала на скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Вісник Запорізького національного університету. – Запоріжжя: ЗНУ. – 2015. – № 1. – С. 12 – 22.

*Здобувачем прийнято участь у виборі математичної моделі та обґрунтовано урахування динамічних властивостей матеріалу, виконано чисельні розрахунки та проаналізовано результати*

8. Овчарова Н.Ю. Воздействие ударной волны на прямоугольную пластину с разрезом / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова / Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця: ВНАУ. – 2015. – № 4 (80). – С. 5 – 9.

*Здобувачем проведено дослідження та порівняння з експериментальними результатами впливу ударної хвилі на пластину з розрізом.*

9. Овчарова Н.Ю. Скоростное деформирование многослойных элементов при контактном воздействии / Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова // Технічна механіка. – Дніпро: ІТМ НАН України і ДКА України. – 2016. – № 3. – С. 17 – 24.

*Здобувачем прийнято участь у виборі математичної моделі та проведено чисельні розрахунки деформування багат шарових елементів при контактній взаємодії.*

10. Ovcharova N.Y. FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. – 2014. – Vol. 566. – P. 499 – 504.

*Здобувачем прийнято участь у виборі математичної моделі, побудована скінченно-елементна модель та виконано чисельні розрахунки*

11. Ovcharova N. Sensitivity of high strain rate of structural elements in relation to dynamics properties of material / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // European Physical Journal Web of Conferences. – 2015. – Vol. 94. – P. 1 – 3.

*Здобувачем виконано урахування динамічних властивостей матеріалу та чисельні дослідження їх впливу на розподіл напружень в елементі.*

12. Ovcharova N. The Resistance of Structural Elements to Impact and Shock-wave Load / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova / Key Engineering Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. – 2016. – Vol. 715. – P. 216 – 221.

*Здобувачем прийнято участь у виборі математичної моделі та проведено чисельні розрахунки динамічного напружено-деформованого стану захисних двошарових елементів.*

13. Овчарова Н.Ю. Анализ скоростного деформирования элементов конструкций на основе МКЭ. / Ю. Воробьев, М. Чернобрышко, Н. Овчарова // Programy MES we wspomaganiu analazy, projektowania i wytwarzania: X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Streszczenia (Kazimir Dolny, 13-16 listopada 2007). – 2007. – P. 143 – 144.

*Здобувачем прийнято участь у виборі методів розрахунку напружено-деформованого стану, та проведено чисельні розрахунки циліндричних елементів конструкцій під дією ударників різної маси.*

14. Овчарова Н.Ю. Анализ ударного воздействия на корпус ГТД. / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Международная научно-техническая конференция. – Харьков: ИПМаш, 2012. – С. 1 – 7.

*Здобувачем проведено розрахунки елементів корпусу ГТД, виконаних з різних матеріалів та з різними геометричними особливостями*

15. Овчарова Н.Ю. Использование МКЭ для анализа воздействия локальных ударных нагрузок на цилиндрические элементы конструкций. / Импульсные процессы в механике сплошных сред. / Н.Ю. Овчарова, Ю.С. Воробьев // материалы X Международной научной конференции (19 – 22 августа 2013 г.). – Николаев, 2013. – С. 194 – 197.

*Здобувачем проведено чисельні розрахунки елементів циліндричних конструкцій під дією локального навантаження*

16. Овчарова Н.Ю. Анализ динамической прочности корпусов ГТД при ударных нагрузках / Н.Ю. Овчарова // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Международная научно-техническая конференция. Харьков: ИПМаш, 2015. – С. 1 – 9.

17. Ovcharova N. Nonlinear deformations of structures cylindrical element under local shock / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 4th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013 - June 19-22, 2013, Sevastopol, Ukraine. – P. 351 – 356.

*Здобувачем обґрунтовано вибір математичної моделі, проведено розрахунки елементів конструкцій під дією локального навантаження.*

18. Ovcharova N. Computer analysis of high-rate deformation of plane and cylindrical structural elements under impact / Iu. Vorobiov, T. Niezgoda, L. Kruszka, N. Ovcharova // Proceedings of The XIII Science and Technology Conference (TKI 2014), WAT, Poland, 2014. – P. 201 – 202.

*Здобувачем досліджено НДС елементів облицювання транспортних засобів виконаних з композитних матеріалів при різних швидкостях удару.*

19. Ovcharova N. Nonlinear deformation of structure elements from different materials under impulse and shock loads / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 5th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2016 - September 27-30, 2016, Kharkov, Ukraine. – P. 406 – 413.

*Здобувачем досліджено НДС багатопарових елементів, отримані залежності перерозподілу деформацій*

20. Ovcharova N. Dynamics strength analysis of protective structures under local impact loads / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Analysis and Practice of Protective Structures /Proceedings of the 4th International Conference on Protective Structures Beijing, China, 18-21 October 2016. – P. 359 – 367.

*Здобувачем досліджено НДС елементів виконаних з різних матеріалів та проведено зіставлення з експериментальними даними.*

21. Ovcharova N. Nonlinear Deformation of Structure Elements from New Materials under Impulse and Shock Loads / N. Ovcharova // International symposium on Advanced Materials and Additive Manufacturing IS-AMAM, Harbin, China, November 27-30, 2016. – P. 13.

22. Ovcharova N.Y. Dynamic Behaviour of Structure Element Under Impact Loads L. Kruszka, Iu.S. Vorobiov and N.Y. Ovcharova / Book of Abstracts «10th Workshop Dynamic Behaviour of Materials and its Applications in Industrial Processes» 24-26 August 2016. – Poznan University of Technology. – Poland. – P. 53 -55.

*Здобувачем проведено чисельні розрахунки досліджено НДС багат шарових елементів захисних конструкцій, отримані залежності напружень від швидкості удару.*

## АНОТАЦІЇ

**Овчарова Н.Ю. Скінченно-елементний аналіз швидкісного деформування захисних елементів машинобудівних конструкцій.**

– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача визначення динамічного напружено-деформованого стану захисних елементів машинобудівних конструкцій при імпульсному та ударному навантаженнях для забезпечення їх міцності та ефективного використання при експлуатації.

На основі тривимірної моделі швидкісного деформування елементів конструкцій, з урахуванням пружно-пластичних скінченних деформацій і динамічних властивостей матеріалів отримані залежності розподілу напружень від швидкості удару за просторовими та часовими координатами в елементах конструкцій. Виявлені нові особливості процесу швидкісного деформування елементів при локальних навантаженнях, що відрізняються визначенням розмірів обмеженої зони напружень з великими градієнтами, утворенням кратерів тощо. Отримані залежності між напруженнями та швидкостями удару в тришаровому елементі для окремих шарів та деформаціями в шарах в залежності від швидкості ударника.

*Ключові слова:* швидкісне деформування, ударні навантаження, динамічні властивості матеріалів, МСЕ, пружно-пластичні деформації,

**Овчарова Н.Ю. Конечно-элементный анализ скоростного деформирования защитных элементов машиностроительных конструкций.**

– На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный

технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача определения динамического напряженно-деформированного состояния защитных элементов машиностроительных конструкций при импульсном и ударном нагружении для обеспечения их прочности и эффективного использования при эксплуатации.

На основе трехмерной модели скоростного деформирования элементов конструкций с учетом упругопластических конечных деформаций и динамических свойств получены зависимости распределения напряжений от скорости удара по пространственным и временным координатам в элементах конструкций. Показаны новые особенности процесса скоростного деформирования элементов при локальных нагрузках, отличающиеся определением размеров ограниченной зоны напряжений с большими градиентами, образованием кратеров и т.д. Получены зависимости между напряжениями и скоростями удара в трехслойном элементе для отдельных слоев и деформациями в слоях в зависимости от скорости ударника.

*Ключевые слова:* скоростное деформирование, ударные нагрузки, динамические свойства материалов, МКЭ, упругопластические деформации.

**Ovcharova N.Yu. Finite element analysis of high-rate deformation of protective elements of machine-building structures.** – Manuscript.

The thesis for a candidate of technical science degree in speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines (engineering sciences) – Kharkov National University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, 2017.

In the thesis, the actual scientific and technical problem of determining the dynamic stress-strain state of the protective elements of machine-building structures under impulse and shock loads solved to ensure their strength and effective use during operation.

The thesis proposes an improved three-dimensional model of high-rate deformation of structural elements, which is different by taking into account elastic-plastic finite deformations and dynamic properties of materials. Based on the proposed model, the dependences of the distribution of stresses on the speed of impact on spatial and temporal coordinates in structural elements made of various materials obtained. New features of the process of high-rate deformation of elements under local loads detected, differing in the definition of the size of a restricted stress zone with large gradients, the formation of craters and the process of unloading with the appearance of residual stresses and damages. Dependencies between stresses and impact speeds in a three-layer element for individual layers and deformations in layers depending on the speed of the impactor obtained.

The dynamic stress-strain state changes significantly both in space coordinates and in time. Therefore, even for thin-walled constructions, the use of the theory of plates and shells is undesirable, since in this case the law of stress distribution over the thickness is preliminarily assumed, and part of the stresses perpendicular to the middle surface are not taken into account at all. The processes of high-speed

deformation occur both in the elastic and in the plastic stage and partially accompanied by rather large deformations. Therefore, the work uses three-dimensional models, even for thin-walled structures. From a mathematical point of view, such problems are essentially non-linear and require analysis of a three-dimensional dynamic stress-strain state.

The problems of high-rate elastic-plastic deformation of elements of cylindrical structures are considered. It is shown, that the largest displacements and stresses develop in local zones and in the case when the speed is increase up to  $V \geq 150$  m/s, the area of intense displacements and stresses is  $R \leq (10-12) r$ , where  $r$  is the radius of the zone load. These features of the dynamic stress-strain state make it possible to isolate the corresponding region of the element and to make refined calculations for it using a denser grid.

A number of practical problems of analyzing the stress-strain state of the elements of the gas turbine engine corps under shock loading considered which differ in the purpose, geometric characteristics and properties of the materials. It is shown, that the largest displacements and stresses develop in bounded zones and rapidly decrease in spatial coordinates both in time and in unloading. It is shown, that when the blade fragment is detached, as well as the foreign particles fall into the flow at the working speeds of the gas turbine engine rotation, the stress intensities do not exceed the prescribed boundaries. In some cases, preference is given to two-layer structures, since they resist shock loads better, than single-layer ones with a larger thickness of the same material.

*Key words:* Speed deformation, impact loads, dynamic properties of materials, FEM, elastic-plastic deformation.



Підписано до друку 18.10.2017 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетн. Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9  
Гарнітура Times New Roman. Тираж 100 прим. Замовлення № 27

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В.)  
Свідоцтво ВО4№022953  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)

---