

УДК 539.3: 623.4

*М.А. ТКАЧУК, О.В. ХЛАНЬ, А.В. ГРАБОВСЬКИЙ, А.В. ЗАВОРОТНИЙ,
О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, А. М. ГОЛОВІН, А. О. ЧЕРКАШИН*

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ БОЙОВИХ МАШИН ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

У роботі описані математичні моделі напружено-деформованого стану елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення. На основі узагальненого параметричного моделювання сформульовано принципово новий підхід до проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин; розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану елементів технологічних систем для виготовлення деталей та вузлів броньованих машин, а також елементів бойових машин при дії експлуатаційних навантажень; створено математичну модель пружно-пластичного деформування елементів бойових броньованих машин, а також удосконалено математичну модель динаміки їх високооборотних елементів. Сформовано критеріальні вимоги для синтезу проектно-технологічних параметрів елементів бойових броньованих машин та технологічно-виробничих систем для їх виготовлення.

Ключові слова: бойова броньована машина, тактико-технічна характеристика, бойове застосування, засіб ураження, технологічно-виробнича система, параметричне моделювання, напружено-деформований стан

*Н.А. ТКАЧУК, А.В. ХЛАНЬ, А.В. ГРАБОВСКИЙ, А.В. ЗАВОРОТНИЙ,
О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, А. М. ГОЛОВИН, А. О. ЧЕРКАШИН*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БОЕВЫХ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В работе описаны математические модели напряженно-деформированного состояния элементов боевых бронированных машин и технологических систем для их изготовления. На основе обобщенного параметрического моделирования сформулирован принципиально новый подход к проектно-технологически-производственному обеспечению тактико-технических характеристик бронированных машин; разработаны математические модели напряженно-деформированного состояния элементов технологических систем для изготовления деталей и узлов боевых бронированных машин, а также элементов боевых машин при действии эксплуатационных нагрузок; создана математическая модель упруго-пластического деформирования элементов боевых бронированных машин и усовершенствована математическая модель динамики их высокооборотных элементов. Сформированы критеріальні требования для синтеза проектно-технологических параметров элементов боевых бронированных машин и технологически-производственных систем для их изготовления.

Ключевые слова: боевая бронированная машина, тактико-техническая характеристика, боевое применение, средство поражения, технологически-производственная система, параметрическое моделирование, напряженно-деформированное состояние

*М. ТКАЧУК, О. ХЛАН, А. ГРАБОВСКИЙ, А. ЗАВОРОТНИЙ, О. ВЕРЕТЕЛЬНИК,
А. ГОЛОВИН, А. ЧЕРКАШИН*

MATHEMATICAL MODELS OF STRESS-STRAIN STATE OF COMBAT VEHICLE ELEMENTS AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR THEIR MANUFACTURING

The paper describes mathematical models of stress-strain state of elements of armored combat vehicles and technological systems for their manufacturing. On the basis of generalized parametric modeling, a fundamentally new approach to design, technological and production support of tactical and technical characteristics of armored vehicles was formulated; mathematical models of stress-strain state of elements of technological systems for manufacturing of parts and units of armored combat vehicles as well as elements of combat vehicles under the action of operational loads have been developed. A mathematical model of elastic-plastic deformation of armored combat vehicles was developed and a mathematical model of the dynamics of their high-turnover elements was improved. Criterial requirements have been formed for the synthesis of design and technological parameters of elements of armored combat vehicles and technological production systems for their manufacturing.

Keywords: armored combat vehicle, tactical and technical characteristic, combat use, means of destruction, technological and manufacturing system, parametric modeling, stress-strain state

Вступ. Підвищення технічних і тактико-технічних характеристик елементів бойових броньованих машин (ББМ), а також технологічних систем (ТС) для їх виготовлення є на сьогодні актуальною і важливою науково-практичною задачею. На її розв'язання спрямовані зусилля багатьох вчених [1–6]. При цьому застосовуються різноманітні евристичні, системні підходи, оптимізаційні алгоритми тощо. Якщо мова йде про задачу синтезу, то вона передбачає формування цільової функції, обмежень на варійовані параметри та рівняння стану в операторному вигляді.

Формування будь-яких задач синтезу передбачає чітку постановку задач аналізу. У випадку проблеми, що досліджується у роботі, мова йде про конкретизацію загального операторного рівняння

$L(U, P, f, r, t) = 0$, а також власне до визначення об'єктів досліджень.

Що стосується об'єктів досліджень, то ними є відповідні елементи бойових броньованих машин у розрізі фізико-механічних процесів і станів, які відбуваються або реалізуються при їхньому виготовленні, експлуатації та бойовому застосуванні. З іншого боку, – це елементи технологічно-виробничих систем (ТВС), через які проходять ті чи інші елементи ББМ. При цьому відбувається вплив елементів ТВС на деталь, вузол чи машину, які проходять через неї, створюючи, так би мовити, "технологічну спадковість". Остання позначається, наприклад, на точності та якості обробки поверхонь деталей, на їхню міцність та

© О. В. Хлань, М. А. Ткачук, А. В. Грабовський, А. В. Заворотний, О. В. Веретельник, А. М. Головін, А. О. Черкашин, 2018

втривалість тощо.

Таким чином, для кожного випадку потрібно формувати відповідну математичну модель досліджуваного процесу чи стану. Це становить мету роботи. Розглянемо характерні випадки досліджуваних об'єктів.

Технологічно-виробничі системи механообробки. Механічна обробка становить суттєвий відсоток операцій при виготовленні бойових броньованих машин. Так, для умов ДП "Завод імені В.О.Малишева" мова йде про значну питому вагу у загальному обсязі технологічних операцій. Крім того, саме операції механічної обробки забезпечують (або не забезпечують) заданий рівень точності та якості поверхні деталей, що виготовляються. Таким чином, ТВС механообробки є типовими представниками усієї сукупності таких систем. Це дає можливість розглядати загальні закономірності на їх прикладі.

Розглянемо, не зменшуючи загальності, ТВС для операцій фрезерування деталей об'єктів бронетанкової техніки. На рис. 1 наведено загальний склад цієї технологічно-виробничої системи. Основним її елементом є верстат 1, який визначає спектр можливостей цієї технологічно-виробничої системи. На його робочому столі 1 розміщується верстатне пристосування 2. Якщо мова йде про гнучкі переналагоджувальні ТВС, то передбачається, що на пристосуванні може в автоматизованому режимі базуватися та закріплюватися базуючий елемент 3 із системою кріплення 4 та заготовкою (деталлю) 5. Якщо ж розглядається традиційна ТВС, то базуючий елемент розміщується стаціонарно (або є частиною самого пристосування), а змінюється тільки заготовка.

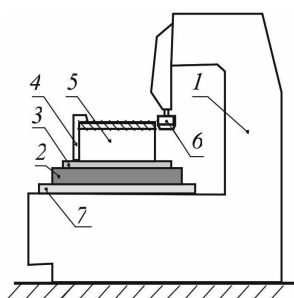


Рис. 1 – Технологічно-виробничі системи для операцій фрезерування:

- 1 – верстат; 2 – верстатне пристосування із базуючим елементом 3 та системою кріплення заготовки 4;
5 – оброблювана деталь; 6 – інструмент;
7 – робочий стіл верстата

Проте в обох випадках підсистема пристосування містить елементи 2, 3, 4. Деталь 5 базується та закріплюється, після чого на неї здійснює кінематично-силовий вплив інструмент 6. При цьому знімається шар металу (див. рис. 1, виділено штриховкою). Можливі декілька переходів на окремому робочому місці, а також – декілька операцій (наприклад, на верстатах з ЧПК типу ОЦ).

Основними завданнями розглянутої технологічно-виробничої системи є формування поверхонь тієї чи іншої деталі з певною точністю та шорсткістю поверхні, а також із якомога більшою продуктивністю. Відповідно, потрібні базові (початкові) характеристики, від яких можна відштовхуватися при формуванні тієї чи іншої характеристики досліджуваної ТВС. Природним чином для цього слід обрати верстат як центральну ланку системи. А це примушує звернутися до характеристик верстата. Серед інших його характеристик (габарити робочого простору, кількість робочих рухів, швидкість основного робочого руху та подачі тощо) є також ті, які безпосередньо впливають на якість обробки: точність та жорсткість. Саме ці характеристики є визначальними для його технологічних можливостей. При цьому вони впливають на баланс переміщень у технологічно-виробничих системах: перша характеристика визначає, так би мовити, "статичну" складову, яка в основному визначає трансляційні зміщення у системі, а друга – "динамічну" складову, яка зумовлена пружними деформаціями елементів системи [7–9]. Отже, загальне переміщення довільної точки системи у якомусь обраному напрямку визначається залежностями типу

$$v_p = K_{Sp}^{\delta} + \lambda_{Dp}^{\delta} \cdot Q. \quad (1)$$

Тут v_p – переміщення у напрямку осі p ($p = 1, 2, 3$ – за осями $x = x_1, y = x_2, z = x_3$); K_{Sp}^{δ} – коефіцієнт, що визначає питомий вклад "статичної" похибки Δu зміщення в напрямку осі p ; λ_{Dp}^{δ} – узагальнена податливість, яка визначає пружне переміщення від сили (або моменту) Q . Отже, загальні переміщення лінійно залежать від характеристик точності та жорсткості верстата.

Розглянемо природу кожного доданку у виразі (1). Перший доданок залежить від характеристик точності верстата, які не залежать від сил Q (або моментів), що діють у системі. Він залежить, наприклад, від зазорів у напрямних верстата, від їхніх нерівностей, хвилястості та похибок виготовлення. Другий доданок, навпаки, прямо пропорційний діючим зусиллям (моментом). Це – сили приводу, які компенсують зусилля різання матеріалу заготовки. Вони залежать від кутової швидкості обертання, подачі, механічних властивостей оброблюваного матеріалу та товщини його шару, що знімається на поточному проході. Отже, для управління рівнем переміщень, породжуваних верстатом, слід контролювати баланс доданків у (1). При чорнових операціях, коли швидкості подачі та обертання інструменту високі, силові характеристики Q зростають, і рівень переміщень v – теж (разом із тим вимоги до точності обробки на цих операціях – відносно невисокі). У цих умовах першим доданком (для високоточних верстатів) можна знехтувати, і

$$v_p \approx \lambda_{Dp}^{\delta} \cdot Q. \quad (2)$$

Якщо ж досліджуються чистові операції, де шар

матеріалу, що знімається, – незначний, подача – невисока при високих обертах інструменту, а, отже, сили Q – незначні, варто оцінювати вклад другого доданку у (1) у половину першого:

$$\lambda_{Dp}^{\delta} \cdot Q \leq K_{Sp}^{\delta} \cdot \Delta / 2. \quad (3)$$

У цьому випадку

$$v_p \leq 1,5 \cdot K_{Sp}^{\delta} \cdot \Delta. \quad (4)$$

Отже, за цих умов рівень переміщень знаходиться приблизно на рівні точнісних характеристик верстата.

Оцінки (1)–(4) стосуються важливого, проте єдиного із декількох елементів досліджуваної технологічно-виробничої системи. Разом із тим, як видно із рис. 1, на баланс переміщень впливають ще три елементи ТВС: пристосування, деталь, інструмент. Якщо проаналізувати систему на рис. 1, то можна відмітити наступні її особливості:

- *система – замкнена*: силові потоки виникають при взаємодії інструмента із заготовкою й передаються, з одного боку, на шпindel, а з іншого – через пристосування на робочий стіл верстата. Отже, на верстаті силові потоки замикаються. При цьому виконуються закони динамічної рівноваги, і діючі навантаження задовольняють умовам рівноваги; таким чином, усі зусилля пропорційні компонентам сил (моментів) Q ;

- *система – підсумовуюча*: розглядаючи баланс переміщень у ній, слід відзначити, що на результуючі переміщення v^{Σ} впливають переміщення, викликані кожним із компонентів; таким чином, можна записати умови балансу:

$$v^{\Sigma} = \sum_I v_I, I = I, II, III, IV, \quad (5)$$

де v_I – складові ТВС ($I = I$ – верстат, $I = II$ – пристосування, $I = III$ – деталь, $I = IV$ – інструмент);

- *із урахуванням перших двох особливостей*, а також співвідношень типу (1), однак записаних для кожного із елементів технологічно-виробничої системи, можна записати загальні переміщення в системі:

$$v_p^{\Sigma} = K_{Sp}^{\delta\Sigma} + \lambda_{Dp}^{\delta\Sigma} \cdot Q. \quad (6)$$

Тут індексом Σ позначені сумарні точнісні характеристики Δ , результуючі коефіцієнти K та податливість λ ; як висновок слід зазначити, що для балансу переміщень у досліджуваній технологічно-виробничій системі справедливі ті ж тенденції, що і для верстата (див. вище), проте із скоригованими величинами жорсткості (або оберненої величини – податливості) та точності.

Для досліджуваної технологічно-виробничої системи як підсистеми загальної системи формування ТТХ елементів бойових броньованих машин

(див. рис. 1) можна застосувати ті ж підходи. Так, розглядаючи співвідношення для складової Δ^{Σ} , можна для простоти відштовхнутися від залежності:

$$\Delta^{\Sigma} = \sum_I \Delta_I, I = I \div IV. \quad (7)$$

Звідси рекомендовані вимоги до $\Delta_I, I = II \div IV$:

$$\Delta_I \leq \Delta_I / 6. \quad (8)$$

Застосувавши аналогічний підхід до λ^{Σ} , можна записати:

$$\lambda_I \leq \Delta_I / 6, I = II, III, IV. \quad (9)$$

Таким чином, "статичну" і "динамічну" складові точності (тут, навпаки, похибки, оскільки зростання переміщень спричиняє зменшення точності) можна "загнати" у коридор до півтораразових значень для верстата.

Якщо звернутися до параметра якості обробки поверхні деталі (наприклад, шорсткості R_a), то вона складним чином залежить від властивостей елементів технологічно-виробничої системи. Визначальними є властивості інструмента та режими різання. При цьому слід зазначити, що оскільки процес різання є динамічним, то різке зростання коливань у системі, а, отже, погіршення якості обробки поверхні, може бути спровоковане резонансними режимами, коли частота збудження від зусиль різання близька до власних частот коливань технологічно-виробничої системи. Якщо підходити до оцінки динамічних властивостей цієї системи із вимогою якомога більшої роздільності за нижніми власними частотами, то можна сформулювати певні вимоги до робочих частот обертання шпindel верстата $n_{ш}$:

$$n_{ш} \ll 60 \cdot \omega_{\min} / 2\pi, \quad (10)$$

де $\omega_{\min} = \min\{\omega_I^I, \omega_I^{II}, \omega_I^{III}\}$,

ω_I^I – нижні парціальні власні частоти коливань деталі, пристосування та інструмента (у припущенні, що у верстаті нижня власна частота коливань набагато вища, ніж у інших елементів ТВС).

Співвідношення (10) можна записати в оберненому вигляді:

$$\omega_{\min} \gg 2\pi n_{ш} / 60. \quad (11)$$

Якщо (10) – вимога до частоти обертання шпindel верстата, то (11) – до динамічних властивостей інших елементів технологічно-виробничої системи. Співвідношення (1)–(9) описують баланс сил та переміщень у досліджуваній технологічно-виробничій системі, а (10), (11) – вимоги до динамічних характеристик її елементів. Тому необхідно розробити математичну модель, яка охоплює усі досліджувані складові.

Що стосується точнісних характеристик верстатів, то цьому питанню приділяється значна увага у

роботах [7–9]. Там же надані відповідні вимоги до них. Разом із тим ці характеристики слід розглядати як такі, що потребують коригування тільки у крайніх випадках, коли вичерпаються усі інші можливості. Це викликано тим, що верстат – дуже цінний елемент технологічно-виробничих систем.

Таким чином, наявні верстати із їхніми паспортними характеристиками розглядаються в цілому як даність, від якої відштовхуємося при співставленні характеристик інших елементів технологічно-виробничої системи.

Якщо ж звернути увагу на жорсткість елементів досліджуваної технологічно-виробничої системи, то, оскільки вони мають складну форму, потрібно визначити їхній напружено-деформований стан (НДС), а вже на основі аналізу НДС вираховувати досліджувані характеристики жорсткості (або оберненої величини – податливості). Оскільки у більшості випадків до аналізу напружено-деформованого стану елементів технологічно-виробничої системи не можна застосовувати моделі стержнів, пластин, оболонок або їх поєднань, то потрібно звернутися до загальної просторової (3D) постановки.

Звертаючись до постановки задачі про визначення напружено-деформованого стану елементів технологічно-виробничих систем, будемо абстрагуватися від конкретного елемента, звертаючись до розгляду довільного об'єкта. Відповідно, будуть опущені індекси, що ідентифікують той чи інший об'єкт.

Слідуючи заявленій методології узагальненого параметричного моделювання, область Ω , яку займає досліджуваний об'єкт, описує множина геометричних параметрів P_G , $\Omega = \Omega(P_G)$, а її границя – $S = S(P_G)$. У межах Ω діє система диференціально-алгебраїчних рівнянь теорії пружності [10–12] (із правилом підсумовування за індексами, які повторюються)

$$2\varepsilon_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i, \quad (12)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (13)$$

$$\partial \sigma_{ij} / \partial x_j = 0, \quad (14)$$

де $u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$ – компоненти відповідно вектора переміщень і тензорів деформацій та напружень,

C_{ijkl} – компоненти тензора модулів пружності матеріалу ($i, j, k, l = 1, 2, 3$).

Система рівнянь (12)–(14) доповнюється співвідношеннями на границі S :

$$u / S = u^*, \quad \sigma / S = \sigma^*, \quad (15)$$

де u, σ – вектори повних переміщень та напружень, відповідно,

u^*, σ^* – вектори заданих переміщень та навантажень на частинах границі.

Граничні (крайові) умови (15) із нескінченної

множини розв'язків системи рівнянь (12)–(14) визначають той єдиний, який дійсно реалізується.

Серед варіантів зовнішніх навантажень σ^* можна обрати ті, що відповідають компонентам сил (моментів) Q (див. (1)). Тоді НДС досліджуваної системи в силу справедливості принципу суперпозиції можна подати у вигляді лінійної комбінації напружено-деформованого стану, які відповідають кожному окремому компоненту Q . Крім того, можна визначити контрольовані пружні переміщення v_{up} , які відповідають другому доданку у (1). Тоді, маючи у розпорядженні (після визначення напружено-деформованого стану) інформацію про v_{up} при заданих компонентах Q , можна визначити параметри податливості

$$\lambda_{Dp}^v = v_{up} / Q. \quad (16)$$

Також попутно при визначенні напружено-деформованого стану при заданому зовнішньому навантаженні вираховуються компоненти тензора напружень $\sigma_{ij}(r)$, а, відповідно, з'являється можливість обчислити еквівалентні напруження $\sigma_{екв}$ (наприклад, за Мізесом [13]) і шляхом порівняння із механічними властивостями або допустимими напруженнями $[\sigma]$ визначити виконання/невиконання умов міцності матеріалу того чи іншого елемента технологічно-виробничих систем [7, 12, 13]:

$$\sigma_i \leq [\sigma] = \sigma_T / n_T, \quad (17)$$

де σ_T – границя текучості матеріалу,

n_T – коефіцієнт запасу міцності.

Враховуючи, що область Ω задається узагальненими параметрами, зокрема, геометричними P_G , то усі компоненти напружено-деформованого стану, а також характеристики, які на основі аналізу НДС вираховуються, теж залежать від P_G . Отже, застосувавши критерії на обмеження λ та σ_i у (16), (17), а також обернувши ці співвідношення, можна сформулювати критерії до визначення таких P_G , які задовольняють вимогам до міцності та жорсткості елементів ТВС.

Таким чином, розв'язання задач аналізу та синтезу упираються у визначення напружено-деформованого стану тіл складної форми при заданих навантаженнях. Для цієї мети на сьогодні найчастіше застосовується сучасний потужний чисельний метод скінченних елементів (МСЕ) [14, 15]. Він полягає у розбитті досліджуваної області Ω на велику кількість фігур простої форми (т.з. скінченні елементи – СЕ) та апроксимації шуканих переміщень у межах кожного СЕ, наприклад, поліномом

$$u = \sum U \cdot \varphi, \quad (18)$$

де U – масив вузлових параметрів (наприклад, переміщень у вузлах СЕ),

φ – базисні функції.

Підсумовування у (18) здійснюється за всіма вузловими параметрами. Із умов рівноваги кожного скінченного елемента та всього їхнього ансамблю (який апроксимує усю область Ω) випливає розв'язувальна система співвідношень [14, 15]

$$K \cdot U = f, \quad (19)$$

де K – матриця жорсткості конструкції,

f – вектор вузлових навантажень (формується із крайових умов (15)).

Після розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) (19) за співвідношеннями (18) визначається поле переміщень u , а далі за формулами (12), (13) – поля деформацій ε та напружень σ .

Таким чином, за допомогою МСЕ вдається замкнути весь цикл визначення напружено-деформованого стану та обґрунтування параметрів технологічно-виробничих систем, які забезпечують задані характеристики точності, жорсткості та міцності.

Елементи технологічно-виробничих систем та бойових броньованих машин: динамічні властивості. Ще однією із сторін розв'язання поставленої задачі є аналіз динамічних властивостей елементів технологічно-виробничої системи. До цієї задачі можна підійти таким же довгим шляхом, що і до аналізу напружено-деформованого стану. Проте можливий і скорочений підхід, з огляду на те, що раніше вже введено до розгляду скінченно-елементну модель (СЕМ) досліджуваного об'єкта. Тоді його можна подати у вигляді динамічної системи із N ступенями вільності. Ототожнюючи вузлові параметри СЕ із узагальненими координатами, кінетичну T і потенціальну Π енергію цієї системи можна записати наступним чином [16, 17]:

$$T = \frac{1}{2} \dot{U}^T M \dot{U}, \quad \Pi = \frac{1}{2} U^T K U,$$

де M – матриця мас,

\dot{U} – вектор узагальнених (вузлових) швидкостей.

Скориставшись технологією складання рівнянь малих коливань системи зі скінченною кількістю ступенів вільності [17] (на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду [16–18]), отримуємо для вільних коливань:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{U}_k} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial U_k} = 0 \Rightarrow M \ddot{U} + K U = 0. \quad (20)$$

Подаючи нетривіальний розв'язок (20) у вигляді $U = \mu \sin \omega t$, отримуємо для визначення власних форм μ_s і власних частот ω_s коливань наступні співвідношення:

$$(K - \omega^2 M) \mu = 0; \quad \det(K - \omega^2 M) = 0. \quad (21)$$

Із (21) визначається спектр $\omega_s, s = 1, 2, \dots$ та відповідний їм набір μ_s .

Знову ж, звертаючись до того, що сам досліджуваний об'єкт визначається сукупністю узагальнених параметрів P , то і результати розв'язання (21) залежні від P :

$$\omega_s = \omega_s(P); \quad \mu_s = \mu_s(P). \quad (22)$$

Тоді за допомогою співвідношень (10), (22) можливо розв'язати задачі аналізу динамічних характеристик елементів технологічно-виробничих систем, а за допомогою (11) та обернених (22) – задачу синтезу їхніх параметрів за критерієм відлаштування від резонансних режимів.

Отже, задачі аналізу міцнісних, жорсткісних та динамічних характеристик елементів технологічно-виробничих систем, а також синтезу їхніх параметрів за критеріями точності, жорсткості, міцності та відлаштування від резонансних режимів поставлено та розв'язано на основі поєднання методів узагальненого параметричного моделювання і скінченних елементів.

Такі ж підходи, які розглянуті до елементів технологічно-виробничих систем, справедливі для пружної роботи елементів бойових броньованих машин.

Разом із тим для елементів бойових броньованих машин у багатьох випадках властива робота в зоні пружно-пластичних деформацій. Для цього випадку розв'язувальні співвідношення модифікуються (див. нижче).

Математична модель пружно-пластичного деформування елементів бойових броньованих машин.

Традиційна постановка задач аналізу або забезпечення міцності елементів бойових броньованих машин полягає у недопущенні пластичних деформацій їхнього матеріалу. Проте така постановка у деяких випадках недоцільна, а в багатьох – просто неадекватна. В останньому випадку мова йде про те, що сама суть робочих процесів і станів деяких елементів бойових броньованих машин передбачає не просто можливість, а цілеспрямоване створення полів пластичних деформацій на етапі виготовлення. Надалі ці поля напружено-деформованого стану, накладаючись на поля НДС від дії експлуатаційних навантажень, створюють сприятливий ефект для забезпечення міцності цих елементів бойових броньованих машин, разом із тим надаючи їм підвищені властивості деформативності. При цьому виникає цілий спектр задач моделювання напружено-деформованого стану тіл із урахуванням розвинених пластичних деформацій при непростому їх навантаженні [10, 18–20].

Непросте навантаження, на відміну від простого, не пропорційне одному параметру, а передбачає різкі варіювання закону зміни діючих сил. Відповідно, розв'язувати задачу потрібно в інкрементальній постановці [10–12, 18–20], тобто у прирощеннях компонент навантажень та напружено-деформованого стану.

Слідуючи роботі [10], можна записати наступні

розв'язувальні співвідношення для цього випадку:

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma \delta_{ij} + \frac{d\sigma'_{ij}}{2G} + \alpha^{**} h \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} df; \quad (23)$$

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma \delta_{ij} + \frac{d\sigma'_{ij}}{2G}; \quad (24)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \alpha^{**} h \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} df, \quad (25)$$

де $d\epsilon_{ij}^e$ та $d\epsilon_{ij}^p$ – пружні та пластичні частини тензора деформацій відповідно,

$d\sigma = (1/3)d\sigma_{ij}$ та $d\sigma'_{ij} = d\sigma_{ij} - d\sigma \delta_{ij}$ – збільшення гідростатичної та девіаторної частини тензора напружень,

функція h – додатньо визначена форма компонент σ_{ij} ,

функція $f(\sigma_{ij})$ називається умовою плинності,

поверхня $f = c$ – поверхнею плинності,

параметр c визначає кінцевий стан зміцнення, і його величина може змінюватися в тілі від точки до точки.

Оскільки $df = (\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_{ij}$, визначимо наступну технологію для станів навантаження:

$$\begin{aligned} \text{активне навантаження, якщо} & \quad df > 0; \\ \text{нейтральне навантаження, якщо} & \quad df = 0; \\ \text{розвантаження, якщо} & \quad df < 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Величина α^{**} в (23) визначається з урахуванням зазначених вище співвідношень у такий спосіб

$$\begin{cases} \alpha^{**} = 1, & \text{якщо } f(\sigma_{ij}) = c, df \geq 0; \\ \alpha^{**} = 0, & \text{якщо } f(\sigma_{ij}) < c \text{ або} \\ & f(\sigma_{ij}) = c, df < 0. \end{cases} \quad (27)$$

Параметр c може бути заданий як функція повної пластичної роботи

$$c = F \left(\int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \right), \quad (28)$$

де F – монотонно зростаюча додатна функція, а інтеграл обчислюється уздовж шляху навантаження.

Якщо у співвідношеннях (23)–(25) перейти від нескінченно малих до малих, але скінченних прирощень усіх величин, то всю історію навантаження можна розбити на деяку кількість ділянок, на кожній із яких – свій закон навантаження. За еволюцією напружено-деформованого стану при цьому можна призначити відповідальним деякий параметр τ (типу часу чи іншого типу послідовності). Отже, перехід від i -го до $(i+1)$ -го етапу (тобто від моменту τ_i до τ_{i+1}) здійснюється на основі розв'язання набору псевдопружних задач про визначення НДС неоднорід-

них анізотропних тіл, неоднорідність та анізотропія яких формується у процесі розв'язання (тобто за набором компонент на момент τ_i – при переході до τ_{i+1}). За початковий етап завжди можна прийняти розв'язок пружної задачі при такому рівні навантажень у момент τ_i , що при цьому не виникає пластичних деформацій.

Застосовуючи й у цьому випадку параметричний підхід, можна за результатами розв'язання співвідношень (23)–(28) розв'язувати як задачі аналізу міцності, так і на цій базі – синтезу.

Принагідно варто відзначити, що і в цьому випадку (як і описано вище у цьому розділі) розв'язання систем початково-крайових задач здійснюється за допомогою методу скінченних елементів.

Аналіз динамічних характеристик високообертових елементів бойових броньованих машин.

Для комплектування матеріально-технічних засобів Збройних сил України потрібно застосовувати комплексний підхід [21–23]. Це зумовлено тим, що в умовах, які склалися на сьогодні, стримування агресора передбачає, серед іншого, інтенсивну розробку та модернізацію військової техніки та озброєння. Зокрема, актуальною проблемою українського бронетанкобудування є підвищення потужності танкових двигунів. Це – один із головних напрямків забезпечення світового рівня тактико-технічних характеристик вітчизняних танків за показниками питомої потужності та рухливості, а також за іншими компонентами ТТХ. З цією метою свого часу були розроблені танкові двигуни серії 6ТД. Вони забезпечують потужність на рівні 1000 к.с. та вище. Разом із зростанням потужності підвищуються потреби двигуна у повітрі для забезпечення робочого процесу згоряння палива. Відповідно, була вдосконалена конструкція крильчатки нагнітача (КН). Проте високі частоти обертання та нова балансировка КН призводять до проблем та поломок при експлуатації. Для аналізу процесів і станів, що виникають при цьому, необхідні нові підходи до математичного і комп'ютерного моделювання.

Аналогічні проблеми – і для інших елементів бойових броньованих машин, які піддаються дії високочастотних або високообертових збурень.

Постановка задачі та математична модель процесів і станів на прикладі крильчатки нагнітача повітря. Досліджується напружено-деформований стан та власні частоти коливань (ВЧК) крильчатки нагнітача, модель якої зображена на рис. 2. На рис. 3 показана схема опирання вала КН на підшипники.

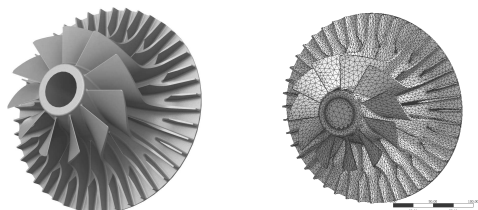


Рис. 2 – Геометрична та скінченно-елементна модель досліджуваної крильчатки нагнітача

Для визначення напружено-деформованого стану крильчатки нагнітача пропонується застосувати МСЕ. При цьому на матеріал тіла крильчатки діє відцентрова об'ємна сила:

$$F = \rho \omega^2 r, \quad (29)$$

де ρ – густина матеріалу,

ω – кутова швидкість обертання,

r – відстань до осі обертання.

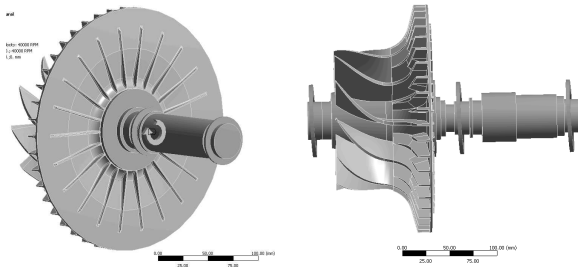


Рис. 3 – Схема обпирання вала крильчатки нагнітача

Таким чином, у "вмороженій" у КН системі координат виникає НДС, який описується рівняннями

$$Ka = b, \quad (30)$$

де K – матриця жорсткості,

b – масив вузлових навантажень, що формується згідно з (29),

a – вектор вузлових параметрів (переміщень).

Розв'язання системи рівнянь (30) дає можливість визначити

$$a = a(\omega). \quad (31)$$

За вектором a обчислюються компоненти переміщень u , деформацій ε та напружень σ :

$$u_i = N_{ki} a_k, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (32)$$

де N_{ki} – функції форми методу скінченних елементів,

C_{ijkl} – компоненти тензора пружних констант.

Отже, у результаті отримуємо компоненти напружено-деформованого стану як поля (32), що параметрично залежить від частоти обертання ω згідно (31).

Варіювання ω дає можливість установлювати залежності від кутової швидкості обертання характеристик міцності та жорсткості.

З іншого боку, для визначення власних частот коливань (ВЧК) p_i та власних форм коливань (ВФК) λ_i необхідно розв'язати задачу на власні значення

$$(K - p_i^2 \cdot M) \cdot \lambda_i = 0, \quad (33)$$

де M – матриця мас.

Тут потрібно зазначити, що матриця жорсткості $K = K(\omega)$, тобто зміна кутової частоти обертання, призводить до зміни жорсткісних характеристик досліджуваного об'єкта. Таким чином,

$$p_i = p_i(\omega), \quad \lambda_i = \lambda_i(\omega), \quad i = 1, 2, \dots \quad (34)$$

Власна частота коливань p_i та власна форма коливань λ_i у результаті змінюються зі зміною ω . Відповідно, можна побудувати діаграми Кемпбела, які цю зміну ілюструють [24] (тобто візуалізують зміну власних частот коливань від частот обертання).

Отже, визначено етапи досліджень, які у підсумку дають можливість визначити компоненти напружено-деформованого стану, ВЧК та ВФК як функції частоти обертання ω . Отримувані результати служать основою для розв'язання оберненої задачі, тобто обґрунтування таких технічних рішень, які дадуть змогу уникати проблем із міцності, жорсткості та збудження резонансних режимів.

Так, можна сформулювати деякі задачі синтезу у вигляді

$$\sigma \rightarrow \min, \quad m \rightarrow \min, \quad \sigma \leq \Sigma, \quad (35)$$

$$\Omega_1 \leq \Omega \leq \Omega_2, \quad u \leq U, \quad (36)$$

де m , σ , u , Ω – характеристики маси, напруженого і деформованого стану та спектра ВЧК,

$\Sigma, U, \Omega_1, \Omega_2$ – деякі обмежувальні рівні досліджуваних характеристик.

Відштовхуючись від цих формулювань, можна розв'язувати задачі визначення таких проектно-технологічних рішень, які дають змогу суттєво підвищувати технічні характеристики танкових двигунів, а відтак – і ТТХ важких бойових машин, які ними оснащуються. При цьому застосована технологія узагальненого параметричного моделювання [25, 26], яка дає можливість багатоваріантних розрахунків процесів і станів у досліджуваних об'єктах. У випадку, що розглядається, варійованою є частота обертання вала. Разом із тим варійованим може виступати будь-який проектний чи технологічний параметр.

Аналогічний підхід – і для інших елементів ББМ, які підлягають дії динамічних навантажень.

Напружено-деформований стан елементів бойових броньованих машин зі зміненими на мікрорівні властивостями матеріалів. Для зміцнення елементів бойових броньованих машин, що підлягають дії інтенсивних навантажень, на сьогодні існує багато методів (цементация, загартування, азотування, ціанування, напилення тощо) [27]. Кожен із них має певні достоїнства та недоліки. Зокрема, серед достоїнств – високі механічні властивості приповерхневих шарів, підданих зміцненню, високий опір зношуванню, зниження тертя тощо. Разом із тим усім тради-

ційним технологіям притаманні й істотні недоліки. Це, насамперед, компромісний характер зміцнення: одні характеристики підвищуються одночасно зі зниженням інших. Крім того, саме наявність суцільного зміцненого шару із відмінними від основного матеріалу фізико-механічними властивостями (коефіцієнт лінійного розширення, модуль пружності, коефіцієнт Пуасона тощо) створює умови для різноманітного їх деформування. Це спричиняє появу мікротріщин, розшарувань, відокремлень тощо. Крім того, деякі види обробки спричиняють відчутну зміну лінійних розмірів деталі вздовж нормалі до поверхні. Таким чином, позитивні властивості традиційних технологій зміцнення часто перекреслюються негативними. У підсумку виникає науково-практична проблема пошуку альтернативних технологій зміцнення, що поєднують позитивні властивості традиційних, проте позбавлені їхніх недоліків.

Однією із таких технологій є запропонована низкою дослідників технологія дискретного зміцнення [28]. Вона передбачає нанесення на поверхню деталі електроіскровим способом архіпелагу зон дискретного зміцнення з розмірами $0,5 \div 1$ мм за товщиною і в плані. Ці зони дискретного зміцнення, як продемонстрували дослідження багатьох вчених [28], при навантаженні ведуть себе відмінно від основного матеріалу: дещо виступають над номінальною поверхнею, володіють меншим коефіцієнтом тертя та менше зношуються. Таким чином, у результаті формується мікрорельєф, сприятливий для роботи при навантаженні зовнішніми зусиллями. Крім того, цей вид зміцнення не знижує втомної міцності деталей, не викликає розшарування, розтріскування тощо. Таким чином, відбувається одночасне поліпшення не однієї, а цілої низки характеристик.

Для визначення можливого ефекту від застосування описаної технології до зміцнення елементів бойових броньованих машин необхідні попередні дослідження. При цьому, враховуючи неоднорідність матеріалу за товщиною і в плані на поверхні деталі, доцільно застосувати для розв'язання задачі визначення напружено-деформованого стану варіаційний підхід. Цей підхід базується на принципі мінімуму повної енергії системи під дією зовнішніх зусиль σ^* :

$$\exists = \frac{1}{2} \int_{(\Omega)} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dv - \int_{(S)} \sigma_i^* u_i ds \rightarrow \min .$$

При цьому усі співвідношення узагальненого закону Гука (13) та геометричні співвідношення Коші (12) за формою залишаються такими ж. Проте є і відмінності. Вони полягають у наступному:

– область Ω розділяється на дві:

- перша Ω_1 відповідає основному матеріалу,
- друга Ω_2 – набору зон дискретного зміцнення;
- у межах кожної із зон переміщення неперервні та володіють неперервними першими похідними;

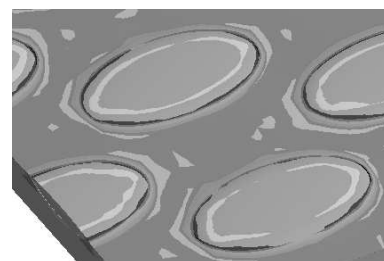
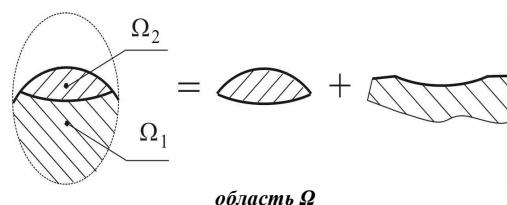
– інтеграл у виразі (27) розбивається кожний на два:

- на границі між зонами переміщення неперервні, проте можуть мати розриви похідних;
- пружні константи при переході через границю між Ω_1 та Ω_2 змінюються стрибкоподібно;

– області $\Omega_1, \Omega_2, S_1, S_2$ розбиваються узгодженою сіткою скінченних елементів, вузли якої належать $\Omega_1 \cap \Omega_2$ та $S_1 \cap S_2$ (рис. 4);

– формується розв'язувальна система рівнянь, аналогічна (19), проте із особливостями формування матриці жорсткості та вектора навантажень, які обумовлені особливостями структури скінченно-елементної моделі;

– після розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь методу скінченних елементів подальший аналіз напружено-деформованого стану аналогічний тому, що проводиться для однорідного матеріалу, проте у кожній області Ω_1 та Ω_2 – окремо; окремо також визначаються еквівалентні напруження у цих областях, а також аналіз виконання умов міцності.



скінченно-елементна модель

Рис. 4 – Подання області Ω

У результаті визначення сумісного напружено-деформованого стану та наступного роздільного аналізу стає можливим аналіз міцності композиції (основний матеріал + зони дискретного зміцнення). При цьому окремо враховуються коефіцієнти запасу за цими складовими композиції. Отже, розроблені моделі дають змогу оцінювати ефект, наприклад, від застосування дискретного зміцнення для поліпшення

технічних характеристик елемента бойових броньованих машин шляхом обробки його поверхні, а також для інших подібних задач.

Висновки. У ході досліджень, які описані у розділі, отримані наступні нові наукові результати, які слугують підґрунтям для низки висновків:

1) на основі розвитку методу узагальненого параметричного моделювання розроблено новий підхід до проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин, який відрізняється тим, що множину варійованих параметрів доповнено проектно-технологічно-виробничими параметрами, що надає якісно нові можливості та властивості варіативності їхніх розрахункових моделей. У підсумку обґрунтування нових технічних рішень стає більш досконалим, оскільки враховує реальні технологічно-виробничі чинники, можливості та обмеження сучасних підприємств вітчизняного бронетанкобудування;

2) розроблені удосконалені математичні моделі фізико-механічних процесів і станів, які відрізняються від відомих інтегруванням у них варійованих проектно-технологічно-виробничих параметрів, що дає можливість здійснювати багатоваріантне моделювання цих процесів і станів, а також шляхом цілеспрямованого пошуку обґрунтовувати раціональні технічні рішення елементів бойових броньованих машин. На цій основі стає можливим забезпечити їх підвищені тактико-технічні характеристики;

3) для низки деталей об'єктів бронетанкової техніки, на відміну від традиційних, пропонується застосовувати моделі напружено-деформованого стану, які враховують неоднорідність фізико-механічних властивостей матеріалу. Ця особливість є особливо цінною для випадку цілеспрямованого створення неоднорідної композиції з різномірних областей, у яких матеріали можуть мати різні властивості;

4) на відміну від традиційних, в удосконалених математичних моделях напружено-деформованого стану враховані не тільки пружні, але й пластичні деформації, що надає їм якісно нових властивостей – нелінійність та адекватність. Перша з них значно ускладнює математичні та комп'ютерні моделі, що будуються. Проте завдяки цьому забезпечується значно вищий рівень адекватності, а, відповідно, обґрунтованості рекомендацій, які розробляються на основі отриманих за їх допомогою результатів. Більш того, ціла множина результатів розв'язання прикладних задач принципово не може бути коректною, якщо не враховувати пружно-пластичний характер деформування, оскільки сама природа низки процесів базується на цілеспрямованому чи закономірному створенні сприятливих полів пластичних деформацій;

5) для визначення небезпечних режимів роботи високообертових деталей бойових броньованих машин у розроблених математичних моделях враховуються, на відміну від існуючих моделей, відце-

нтрові зусилля та гіроскопічні ефекти. Це, по-перше, уточнює отримувані результати, а по-друге, створює можливості більш точного визначення критичних режимів. Така властивість є дуже важливою, оскільки критичні частоти у багатьох випадках лімітують експлуатаційні режими;

6) у роботі набули подальшого розвитку методи аналізу тактико-технічних характеристик як результату взаємодії та взаємовпливу чинників на різних етапах життєвого циклу, а не ізольовано, як у традиційних моделях;

7) у ході аналізу динаміки і напружено-деформованого стану елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення установлені додаткові природні критерії для їхніх міцнісних та жорсткісних характеристик.

У результаті у роботі створені методологічні основи подальших досліджень. Зокрема, створені передумови для розв'язання наступних задач:

- створення спеціалізованого програмно-модельного комплексу, який реалізує запропоновані підходи, методи та математичні моделі;

- розв'язання низки прикладних задач для вітчизняного бронетанкобудування та розроблення на основі аналізу отриманих результатів науково обґрунтованих рекомендацій щодо проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин;

- розрахунково-експериментальні дослідження зразків елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення, оцінка адекватності створених математичних моделей, точності результатів комп'ютерного моделювання та обґрунтованості вироблених на їхній основі результатів.

У результаті створені передумови для розв'язання низки прикладних задач підвищення технічних і тактико-технічних характеристик елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виробництва.

Список літератури

1. Литвиненко А.В. Проектно-технологическое обеспечение тактико-технических характеристик легкобронированных машин на основе исследования прочностных характеристик корпусов. *Вісник НТУ "ХПИ"*. Харків: НТУ "ХПИ", 2014. №14 (1057). С. 50–56.
2. Литвиненко А.В., Ткачук Н.А., Грабовский А.В. [и др.] Методы и средства решения проблемы проектно-технологического обеспечения защищенности корпусов боевых бронированных машин. *Вісник НТУ "ХПИ"*. Харків: НТУ "ХПИ", 2014. №22 (1065). С.106–119.
3. Карапейчик И.Н., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые гибридные расчетно-экспериментальные модели для анализа и синтеза элементов специальных транспортных средств: развитие технологий исследований. *Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения. Сб. науч. тр.* – Орск: Изд-во Орского гум.-техн. ин-та (филиала) ОГУ, 2012. С. 171–179.
4. Ткачук М.А., Хлань О.В., Малакей А.М., Шейко О.І. Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних та колісних машин на етапах проектування, технологічної підготовки виробництва та виготовлення. *Зб. тез доповідей Міжнар.ї наук.-техн. конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ" (11-*

- 12 травня 2017 р., Львів). Львів: Нац. акад-я сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, 2017. С. 11.
5. Литвиненко О.В., Ткачук М.М., Танченко А.Ю. [та інш.]. Проектно-технологічне забезпечення міцності бронекорпусів. *Зб. тез доповідей Міжнар. наук.-техн. конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ" (14-15 травня 2015 р., Львів)*. Львів: Нац. акад-я сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, 2017. С. 41.
 6. Литвиненко А.В., Вакуленко В.В., Ткачук Н.А. [та інш.]. Оценка чувствительности прочностных, жесткостных и динамических характеристик бронекорпусов на варьирование проектно-технологических параметров. *Інтегровані технології та енергозбереження. Науково-практичний журнал*. Харків, 2014. № 3. С. 145–153.
 7. Решетов Д.Н., Портман В.Т. *Точность металлорежущих станков*. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
 8. Крагельский И. В. *Основы расчетов на трение и износ*. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
 9. Балакшин Б. С. *Основы технологии машиностроения*. М.: Машиностроение, 1969. 558 с.
 10. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 542 с.
 11. Лурье А.И. *Теория упругости*. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1970. 940 с.
 12. Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела. Учеб. пособие для вузов*. М.: Наука, 1988. 712 с.
 13. Феодосьев В.И. *Сопrotivление материалов*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
 14. Zienkiewicz, O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals [Text] /- 7th ed.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
 15. Стренг Э., Фикс Дж. *Теория метода конечных элементов*. М.: Мир, 1977. 349 с.
 16. Лурье А.И. *Аналитическая механика*. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
 17. Бабаков И.М. *Теория колебаний 4-е изд., испр.* М.: Дрофа, 2004. 591 с.
 18. Сокольников И.С. *Тензорный анализ (теория и применения в геометрии и в механике сплошных сред)*. М.: Наука, 1971. 376 с.
 19. Hashiguchi K., Yamakawa Y. *Introduction to Finite Strain Theory for Continuum Elasto-Plasticity*. Wiley, 2012. 417 p.
 20. Седов Л. И. *Механика сплошной среды*. Том 1. М.: Наука, 1970. 492 с. Том 2. М.: Наука, 1970. 568 с.
 21. Лапицкий С.В. [и др.] *Методология исследования сложных систем военного назначения; под ред. С. В. Лапицкого*. 2013. 477 с.
 22. Чепков І.Б., Нор П.І. Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2014. № 1. С. 4–13.
 23. Чепков І.Б. Основні напрями розвитку озброєння і військової техніки. Організаційні і економічні механізми державної підтримки оборонної промисловості. *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформ.-комунікат. захід (22–23 вересня 2015р., Київ)*. – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр", 2015. С. 8–13.
 24. Кельзон А.С., Журавлев Ю.Н., Январев Н.В. *Расчет и конструирование роторных машин*. Л.: Машиностроение, 1977. 288 с.
 25. Ткачук Н.А., Чепурной А.Д., Грищенко Г.Д. [и др.] Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Дала. Луганск*, 2007. №9(115), част. 1. С. 196–205.
 26. Литвиненко А.В. Общий подход к проектно-технологическому обеспечению тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин путем обоснования параметров бронекорпусов по критериям прочности и защищенности. *Вісник НТУ "ХПИ"*. Харків: НТУ "ХПИ", 2014. №29 (1072). С. 68–77.
 27. Дьяченко С.С., Пономаренко И.В. Влияние генезиса модифицированного поверхностного слоя на конструктивную прочность изделий. *Физика металлов и металловедение*. Москва, 2017. Т. 118. № 6. С. 639-652.
 28. Ткачук Н.А., Дьяченко С.С., Посвяненко Э.К. [и др.] *Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография*. Харків: Щедра садиба плюс, 2015. 259 с.

References (transliterated)

1. Litvinenko A.V. Proektno-tehnologicheskoe obespechenie taktiko-tehnicheskikh harakteristik legkobronirovannykh mashin na osnove issledovaniya prochnostnykh harakteristik korpusov. *Visnik NTU "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, no. 14 (1057), pp. 50-56.
2. Litvinenko A.V., Tkachuk N.A., Grabovskij A.V. [i dr.] Metody i sredstva reshenija problemy proektno-tehnologicheskogo obespechenija zashhishhennosti korpusov boevykh bronirovannykh mashin. *Visnik NTU " KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, no. 22(1065), pp.106-119.
3. Karapejchik I.N., Litvinenko A.V., Tkachuk N.A. Mnogourovnevye gibridnye raschetno-jekspymental'nye modeli dlja analiza i sinteza jelementov special'nykh tranportnykh sredstv: razvitie tehnologij issledovaniy. *Innovacionnye tehnologii v mashinostroenii: problemy, zadachi, reshenija. Sb. nauch. tr.* – Orsk: Izd-vo Orskogo gum.-tehn. in-ta (filiala) OGU, 2012. P. 171-179.
4. Tkachuk M.A., Khlan' O.V., Malakey A.M., Sheyko O.I. Zabezpechennya taktiko-tehnichnykh kharakterystyk viys'kovykh husenychnykh ta kolisnykh mashyn na etapakh proektuvannya, tekhnolohichnoyi pidhotovky vyrobnytstva ta vyhotovlennya. *Zb. tez dopovidey Mizhnar.yi nauk.-tekhn. konferentsiyi "Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki sukhoputnykh viys'k" (11-12 travnya 2017 r., L'viv)*. L'viv: Nats. akad-ya sukhoputnykh viys'k im. het'mana P. Sahaydachnoho, 2017. P. 11.
5. Lytvynenko O.V., Tkachuk M.M., Tanchenko A.Yu. [ta insh.]. Proektno-teknolohichne zabezpechennya mitsnosti bronekorpusiv. *Zb. tez dopovidey Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsiyi "Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki sukhoputnykh viys'k" (14-15 travnya 2015 r., L'viv)*. L'viv: Nats. akad-ya sukhoputnykh viys'k im. het'mana P. Sahaydachnoho, 2017. P. 41.
6. Litvinenko A.V., Vakulenko V.V., Tkachuk N.A. [ta insh.]. Ocenka chuvstvitel'nosti prochnostnykh, zhestkostnykh i dinamicheskikh harakteristik bronekorpusov na var'irovanie proektno-tehnologicheskikh parametrov. *Integrovani tehnologii ta energozberezhennya. Naukovo-praktichnij zhurnal*. Kharkiv, 2014, no. 3, pp. 145–153.
7. Reshetov D.N., Portman V.T. *Tochnost' metallorzechushhih stankov*. М.: Mashinostroenie, 1986. 336 p.
8. Kragel'skij I. V. *Osnovy raschetov na trenie i iznos*. М.: Mashinostroenie, 1977. 526 p.
9. Balakshin B. S. *Osnovy tehnologii mashinostroeniya*. М.: Mashinostroenie, 1969. 558 p.
10. Vasidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti*. Per. s angl. М.: Mir, 1987. 542 p.
11. Lur'e A.I. *Teorija uprugosti*. М.: Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1970. 940 p.
12. Rabotnov Ju.N. *Mehanika deformiruemogo tverdogo tela. Ucheb. posobie dlja vuzov*. М.: Nauka, 1988. 712 p.
13. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov: Ucheb. dlja vuzov. 10-e izdanie, pererab. i. dop.* М.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauma, 1999. 592 p.
14. Zienkiewicz, O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals [Text] /- 7th ed.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
15. Streng Je., Fiks Dzh. *Teorija metoda konechnykh jelementov*. М.: Mir, 1977. 349 p.
16. Lur'e A.I. *Analiticheskaja mehanika*. М.: Fizmatgiz, 1961. 824 p.
17. Babakov I.M. *Teorija kolebanij 4-e izd., ispr.* М.: Drofa, 2004. 591 p.
18. Sokol'nikov I.S. *Tenzornyj analiz (teorija i primeneniya v geometrii i v mehanike sploshnykh sred)*. М.: Nauka, 1971. 376 p.
20. Sedov L. I. *Mehanika sploshnoj sredy*. Tom 1. М.: Nauka, 1970. 492 s. Tom 2. М.: Nauka, 1970. 568 p.
21. Lapickij S.V. [i dr.] *Metodologija issledovaniya slozhnykh sistem voennogo naznachenija; pod red. S. V. Lapickogo*. 2013. 477 p.
22. Chepkov I.B., Nor P.I. *Zahal'ni tendentsiyi rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki. Ozbroynennya ta viys'kova tekhnika*. 2014, no. 1, pp. 4–13.

23. Chepkov I.B. Osnovni napryamy rozvytku ozbroynyya i viys'kovoyi tekhniki. Orhanizatsiyni i ekonomichni mekhanizmy derzhavnoyi pidtrymky oboronnoyi promyslovosti. *Perspektyvy naukovo-tekhnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Inform.-komunikat. zakhid (22–23 veresnya 2015r., Kyiv)*. K.: TOV "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015. P. 8–13.
24. Kel'zon A.S., Zhuravlev Ju.N., Janvarev N.V. *Raschet i konstruirovaniye rotornykh mashin*. L.: Mashinostroenie, 1977. 288 p.
25. Tkachuk N.A., Chepurnoj A.D., Gricenko G.D. [i dr.] Osnovy obob-shhennogo parametricheskogo opisanija slozhnykh mekhanicheskikh sistem. *Visnik Shidnoukr. nac. un-tu im. V.Dalja*. Lugansk, 2007. №9(115), chast. 1, pp. 196–205.
26. Litvinenko A.V. Obs'hij podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniju taktiko-tehnicheskikh harakteristik voennykh ko-lesnykh i gusenichnykh mashin putem obosnovaniya parametrov bronekorpusov po kriterijam prochnosti i zashhishhennosti. *Visnik NTU "KhPI". Serija: Mashinoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, no. 29(1072), pp. 68–77.
27. Dyachenko S.S., Ponomarenko I.V. Vliyanie genezisa modifitsirovannogo poverhnostnogo sloya na konstruktivnyuyu prochnost izdeliy. *Fizika metallov i metallovedenie*. M., 2017. T. 118. no. 6, pp. 639–652.
28. Tkachuk N.A., Dyachenko S.S., Posvyatenko E.K. [i dr.] *Kontinual'naya i diskretno-kontinual'naya modifikatsiya poverh-nostey detaley: monografiya*. Kharkiv: Schedra sadiba plus, 2015. 259 p.

Надійшла (received) 05.10.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>. тел.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Хлань Олександр Володимирович (Хлань Александр Владимирович, Khlan Oleksandr) – генеральний директор ДП "Завод ім. В.О. Малишева", м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902, e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовський Андрій Владимирович, Grabovskiy Andrey) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>. тел.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Заворотній Антон Валерійович (Заворотный Антон Валерьевич, Zavorotnyiy Anton) – заст. генерального директора ДП "Завод ім. В.О. Малишева", м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902, e-mail: tma@tmm-sapr.org

Веретельник Олег Вікторович (Веретельник Олег Викторович, Veretelnyk Oleg) – науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин"; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6322-1837>. тел.: (057)7076901; e-mail: veretelnyk@yandex.ru

Головін Андрій Михайлович (Головин Андрей Михайлович, Golovin Andrey) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент гр. ТМ-846, м. Харків, Україна

Черкашин Андрей Олегович (Черкашин Андрій Олегович, Cherkashin Andrey) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент гр. ТМ-836, м. Харків, Україна