

## **НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АГРЕГАТІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ РЕГЛАМЕНТОВАНОЇ ЯКОСТІ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ\***

### **Вступ**

Україна входить у десятку країн світу, що мають у своєму розпорядженні замкнутий цикл виробництва ракетно-космічної техніки (РКТ). Проте конкурентоспроможність на світовому ринку послуг, пов'язаних із продажем та експлуатацією цієї техніки, залежить від її досконалості, яка пов'язана в першу чергу з критерієм відношення витрат на всіх етапах її життєвого циклу до вартості еквівалента ефективності виконання цільової задачі. Висока вартість польотної маси РКТ, що досягає 100 тис. дол. США за 1 кг, зумовила пріоритет зниження цього параметра в оцінці досконалості її об'єктів [1].

Пошук шляхів ефективного зниження маси виробів РКТ, особливо в останні два десятиріччя, привів до постійно наростаючої тенденції використання у відповідальних її агрегатах полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), що мають ряд унікальних характеристик [2, 3].

Відомо, що застосування ПКМ дозволяє зменшити масу космічних апаратів на 15...20%, стратегічних ракет з ракетними двигунами твердого палива на 75...80%, великогабаритних ракетних двигунів твердого палива на 85...90%, стратегічних ракет із рідинними ракетними двигунами на 25...30% [4]. Проте реалізація цих можливостей пов'язана в першу чергу з науковим забезпеченням у виробництві агрегатів РКТ із ПКМ їх високих і стабільних фізико-механічних характеристик (ФМХ), що закладаються конструктором у процесі синтезу оптимальних конструктивно-технологічних рішень (КТР) [5, 6].

У зв'язку з цим розроблення наукових основ технології виробництва агрегатів РКТ із ПКМ являє собою актуальну проблему, вирішення якої дозволить забезпечити конкурентоспроможність вітчизняної РКТ на світовому ринку [7].

### **Основна частина**

Проведено огляд застосування полімерних композиційних матеріалів, яке почалося в РКТ одночасно з початком практичного освоєння космосу в США, країнах Західної Європи і в СРСР, а пізніше і в Японії [8].

Висвітлено основні етапи освоєння ПКМ у РКТ з прогресуючою тенденцією для 40-х років минулого століття до застосування вуглепластиків, які поглинули до 2010 року понад 25 % світового вживання вуглево-

---

\* Матеріали, що містяться в статті, опубліковані за результатами обговорення на науково-технічному семінарі кафедри конструкцій і проектування ракетної техніки.

локон. Проаналізовано сучасний стан використання ПКМ у виробах РКТ як суттєвого резерву для підвищення їх масової і функціональної ефективності. Показано, що композити у виробах РКТ становлять від 12...39 % маси конструкції в КА і стратегічних ракетах з РРД до 75...90 % у стратегічних ракетах із РДТП і багатогабаритних РДТП.

Розкрито світові тенденції і проблеми розширення сфери та рівня відповідальності агрегатів РКТ із ПКМ (рис. 1) [9].

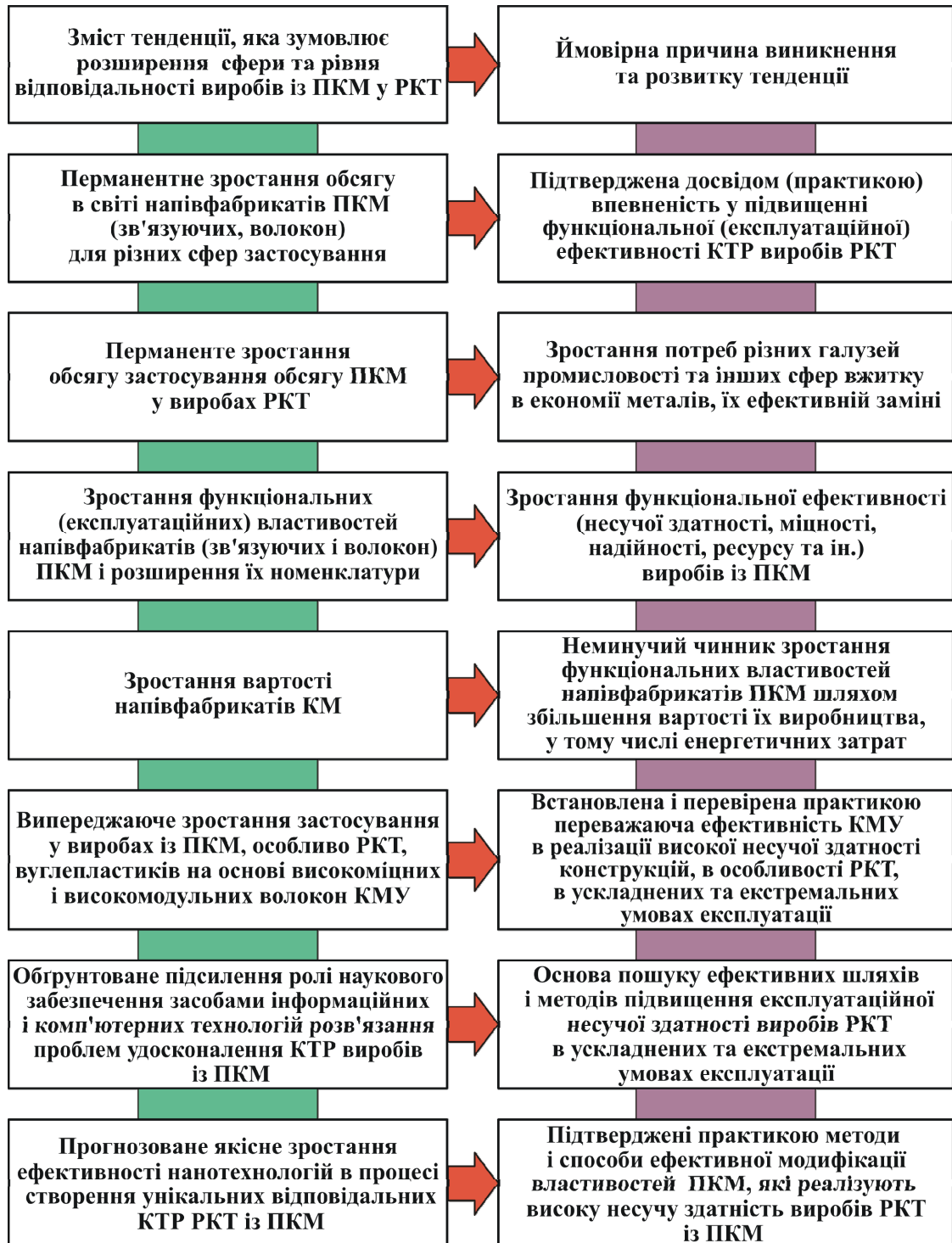


Рисунок 1 – Тенденція зростання застосування ПКМ у конструкціях РКТ та їх ймовірні причини

Наведено аналіз стану проблеми науково-технічного забезпечення ефективної технології виробництва агрегатів РКТ із ПКМ у вітчизняних умовах [10]. З аналізу випливає, що, незважаючи на загальне падіння промислового виробництва в Україні в 90-х роках, ракетно-космічна наукоємна галузь, яка включає ДП «КБ «Південне», ПМЗ ім. О.М. Макарова та інші підприємства, НДІ, ВНЗ, інтегрувала в собі найпередовіші технології, могутню виробничу базу, не втратила своїх позицій як одна з десятка держав світу з повним замкнутим циклом виробництва РКТ: а саме в ці роки були створені і запуснені на орбіту КА «Океан-01» (1991 р.), ряд модифікацій КА «Цілина» (1991 – 2000 рр.), «Тайфун» (1993 – 1995 рр.), АУОС-СМ-КИ (1994 р.). Показано, що для успішного освоєння світового ринку послуг РКТ вважається необхідним глибока перманентна наукова підтримка створення основ технології виробництва агрегатів РКТ регламентованої якості із ПКМ [7, 10]. Сформульовано комплексну проблему наукового забезпечення створення високоефективних агрегатів із композитів.

Проведено аналіз кваліметричних характеристик якості стосовно конструкцій РКТ із ПКМ, які лежать в основі концептуального підходу до створення та реалізації в умовах вітчизняного виробництва високоефективної технології виготовлення виробів досліджуваного класу. [11]. Синтезовано класифікатор всіх ієрархічних рівнів показників якості: одиничних (ОПЯ), групових (ГПЯ), комплексних (КПЯ) і інтегрального (ІПЯ) (рис. 2). При прогнозуванні нової продукції критерієм її ефективності є ІПЯ, який формується на основі моніторингу і аналізу передбачуваного ринку її споживання. Для забезпечення цього ІПЯ при виробництві даної продукції необхідно синтезувати весь ланцюжок формалізованого переходу від ІПЯ до ОПЯ у вигляді функціонала

$$ІПЯ_m = F \left\{ \Phi \left( КПЯ_m \left[ \Psi \left( ГПЯ_m \left\{ f \left( ОПЯ_m \right) \right\} \right) \right] \right) \right\}. \quad (1)$$

ІПЯ<sub>p</sub> реалізованої у виробництві продукції формується функціоналом, структура якого за формою є зворотною структурі (1):

$$F \left\{ \Phi \left( КПЯ_p \left[ \Psi \left( ГПЯ_p \left\{ f \left( ОПЯ_p \right) \right\} \right) \right] \right) \right\} = ІПЯ_p. \quad (2)$$

Значення реалізованих ПЯ продукції не мають перевищувати допуски на них, які задовольняють регламентованим значенням.

Запропоновані обґрунтовані математичні моделі показників якості й методи їх визначення для одиничних, групових, комплексних та інтегральних показників якості. Для прикладу в табл. 1 наведені переважні (преференційні) математичні моделі ОПЯ, ГПЯ і КПЯ технологічності РКТ.

Показано, що збільшення ІПЯ пов'язано із синтезованими фундаментальними характеристиками ПКМ, що відрізняють композити від інших конструкційних матеріалів: синхронність формування функціональ-

них властивостей ПКМ і виробу –  $K_{сф}^{\phi x}$ ; керованість властивостями ПКМ у виробі конструктивно-технологічними засобами матеріалознавства –  $K_{кер}^{\phi x}$ ; можливість забезпечення збереження деформативних характеристик при зміні параметрів середовища експлуатації конструкції з ПКМ (формостабільність, адаптованість та ін.) –  $K_{інт}^{\phi x}$ ; синергетика властивостей ПКМ щодо компонентів –  $K_{сун}^{\phi x}$ ; визначеність складу і форми компонентів, заданих наперед, –  $K_{визн}^{\phi x}$ ; деструкція ПКМ, що залежить від експлуатаційних чинників і часу, –  $K_{дест}^{\phi x}$ . Проведено аналіз якісного впливу фундаментальних характеристик ПКМ на ефективність КТР виробів РКТ із композитів, фрагмент якого наведено в табл. 2 [12].

Фундаментальні характеристики ПКМ самі по собі не є показниками якості виробу, але функціонально пов'язані з ними і викликають позитивні (рідше – негативні) прирости відповідних ПЯ виробу. Проаналізовано якісний вплив фундаментальних характеристик ПКМ на ОПЯ конструкцій РКТ із ПКМ у рамках запропонованого вище класифікатора (рис. 1). Унаслідок великого обсягу цього аналізу за всіма чотирма КПЯ з метою його комплексного проведення використано табличну форму.

В табл. 2 наведено  $\Delta \bar{q}_i (K_j^{\phi x})$  за умови, що базова конструкція виконана з традиційних (металевих) матеріалів. У роботі [13] подано результати праксеологічного аналізу впливу фундаментальних характеристик ПКМ відповідно на КПЯ економічних властивостей, технологічності і обмежень виробництва та ризику збуту продукції.

Достатньо велике число фундаментальних характеристик ПКМ не залишають альтернативи математичній моделі кількісного обліку їх впливу на КПЯ конструкцій РКТ її адитивній формі:

$$\Delta(\text{КПЯ})_i = \sum_{j=1}^{14} \Delta(\text{КПЯ})_i K_j, \quad \sum_{j=1}^{14} K_j = 1, \quad (3)$$

де  $K_j$  – вагові коефіцієнти приростів  $j$ -го КПЯ за рахунок застосування в конструкції РКТ ПКМ  $j \in (\text{приз, точ, над, ерг та ін.})$ .

Вагові коефіцієнти приростів ГПЯ встановлюються експертним шляхом. Адитивна форма є прийнятною і для кількісного обліку впливу на кожний ГПЯ приросту ОПЯ за рахунок фундаментальних характеристик ПКМ:

$$\Delta(\text{ГПЯ})_i = \sum_{\xi=1}^n \Delta \bar{q}_i (K_{\xi}^{\phi k})_{\xi} K_{\xi}, \quad \sum_{\xi=1}^7 K_{\xi} = 1, \quad (4)$$

де  $\xi$  – число фундаментальних характеристик ПКМ  $K^{\phi k}$  ( $K^{\phi k} = 7$ );  $i$  – число ОПЯ, що входять в  $i$ -й ГПК відповідно до таблиць.

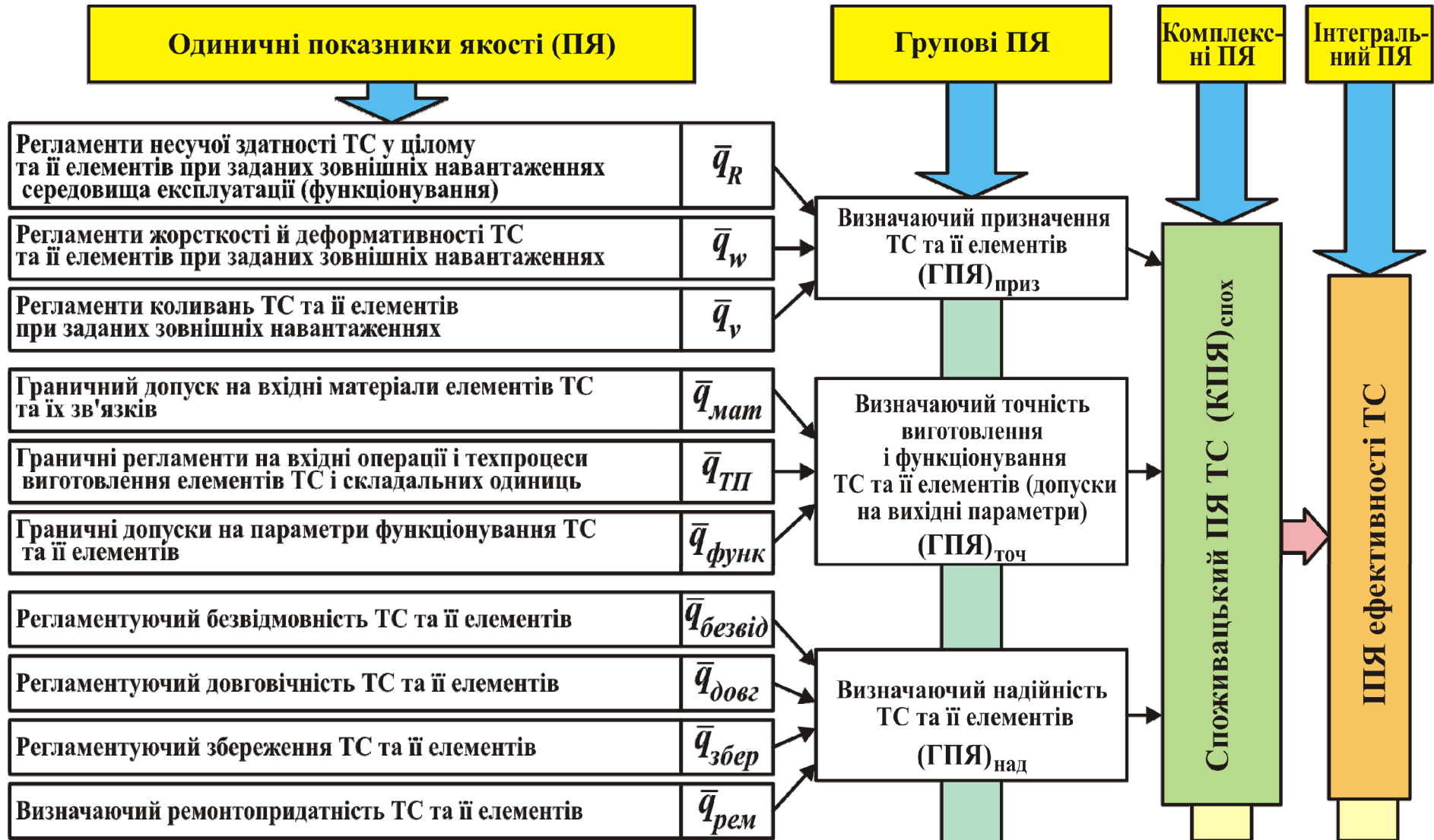


Рисунок 2 – Фрагмент класифікатора ієрархічних рівнів показників якості технічної системи РКТ

Таблиця 1 – Преференційні моделі ОПЯ, ГПЯ і КПЯ технологічності РКТ

Формула ОПЯ	Розшифрування вхідних параметрів ОПЯ	Формула ГПЯ	Формула (КПЯ) <sub>тех</sub>
$\bar{q}_{пцп} = \frac{q_{пцп}}{q_{пцпб}}$	$q_{пцп} = T_{ц} = \sum_{j=1}^k (T_{цo j} + T_{пер j})$ , де $T_{цo j}$ – тривалість циклу $j$ -ї операції; $T_{пер j}$ – час міжопераційних перерв; $k$ – число послідовних операцій на критичному шляху		$(КПЯ)_{тех} = \sum_{i=1}^2 K_i (ГПЯ)_i$ $i \in o_{тех}, ч_{тех}$
$\bar{q}_{спз} = \frac{q_{спз}}{q_{спзб}}$	$q_{спз} = \frac{C_{пл}}{Ц_{опт}}$ , де $C_{пл}$ – планова собівартість виробу; $Ц_{опт}$ – оптова ціна виробу		
$\bar{q}_{тр} = \frac{q_{тр}}{q_{трб}}$	$q_{тр} = T_{ров} = \sum_{i=1}^m T_{рпп} n_i = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m T_{рo} m_i =$ $= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left( \sum_{k=1}^k K_{ni} K_{ki} t_i \right) m_i$ , де $T_{ров}$ – трудомісткість об'єкта виробництва; $T_{рпп}$ – трудомісткість ВП над об'єктом виробництва; $n_i$ – кількість повторень операцій ВП; $m_i$ – загальна кількість операцій ВП; $K_{ni}, K_{ki}$ – коефіцієнти, що враховують професію та кваліфікацію; $t_i$ – час участі кожного виконавця у ВП	$(ГПЯ)_{o_{тех}} = \sum_{i=1}^3 K_i \bar{q}_i$ $i \in пцп, епз, тр$	або  $(КПЯ)_{тех} = b_0 +$ $+ b_1 (ГПЯ)_{o_{тех}} +$ $+ b_2 (ГПЯ)_{ч_{тех}} +$ $+ b_3 (ГПЯ)_{o_{тех}} (ГПЯ)_{ч_{тех}}$

Таблиця 2 – Аналіз якісного впливу фундаментальних характеристик ПКМ на ГПЯ споживацьких властивостей конструкцій РКТ

Назва групового ПЯ	ОПЯ	Характер приросту ОПЯ внаслідок впливу ФХ ПКМ	
$(ГПЯ)_{приз}$	$\bar{q}_R$	$n_{max}^e = const$ або $n_{max}^e \uparrow; f_{max} \uparrow$	$\Delta\bar{q}_R(K_{сф}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_R(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_R(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_R(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_R(K_{пред}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_R(K_{дес}^{фх}) \downarrow$
	$\bar{q}_w$		$\Delta\bar{q}_w(K_{сф}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_w(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_w(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_w(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_w(K_{пред}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_w(K_{дес}^{фх}) \downarrow$
	$\bar{q}_v$		$\Delta\bar{q}_v(K_{сф}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_v(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_v(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_v(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_v(K_{пред}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_v(K_{дес}^{фх}) \downarrow$
$(ГПЯ)_{точ}$	$\bar{q}_{мат}$	$\Delta\bar{q}_{мат}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{мат}(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{мат}(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{мат}(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{мат}(K_{пред}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{мат}(K_{дес}^{фх}) \downarrow$	
	$\bar{q}_{отп}$	$\Delta\bar{q}_{отп}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{отп}(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{отп}(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{отп}(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{отп}(K_{пред}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{отп}(K_{дес}^{фх}) \geq 0$	
	$\bar{q}_{функ}$	$\Delta\bar{q}_{функ}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{функ}(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{функ}(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{функ}(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{функ}(K_{пред}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{функ}(K_{дес}^{фх}) \downarrow$	
$(ГПЯ)_{над}$	$\bar{q}_{безвїд}$	$\Delta\bar{q}_{безвїд}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{безвїд}(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{безвїд}(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{безвїд}(K_{син}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_{безвїд}(K_{пред}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{безвїд}(K_{дес}^{фх}) \downarrow$	
	$\bar{q}_{довг}$	$\Delta\bar{q}_{довг}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{довг}(K_{упр}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{довг}(K_{инт}^{фх}) \uparrow; \Delta\bar{q}_{довг}(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{довг}(K_{пред}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{довг}(K_{дес}^{фх}) \downarrow$	
	$\bar{q}_{збер}$	$\Delta\bar{q}_{збер}(K_{сф}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{збер}(K_{упр}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_{збер}(K_{инт}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{збер}(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{збер}(K_{пред}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_{збер}(K_{дес}^{фх}) \downarrow$	
	$\bar{q}_{рем}$	$\Delta\bar{q}_{рем}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{рем}(K_{упр}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_{рем}(K_{инт}^{фх}) = 0; \Delta\bar{q}_{рем}(K_{син}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{рем}(K_{пред}^{фх}) \geq 0; \Delta\bar{q}_{рем}(K_{дес}^{фх}) \downarrow$	
$(ГПЯ)_{ерг}$	$\bar{q}_{гїг}$	$\Delta\bar{q}_{гїг}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{гїг}(K_{упр}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{гїг}(K_{инт}^{фх}, K_{син}^{фх}, K_{пред}^{фх}, K_{дес}^{фх}) = 0$	
	$\bar{q}_{псих}$	$\Delta\bar{q}_{псих}(K_{сф}^{фх}, K_{упр}^{фх}, K_{инт}^{фх}, K_{син}^{фх}, K_{пред}^{фх}, K_{дес}^{фх}) = 0$	
	$\bar{q}_{ант}$	$\Delta\bar{q}_{ант}(K_{сф}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{ант}(K_{упр}^{фх}) \downarrow; \Delta\bar{q}_{ант}(K_{инт}^{фх}, K_{син}^{фх}, K_{дес}^{фх}) = 0$	
	$\bar{q}_{фїз}$	$\Delta\bar{q}_{фїз}(K_{сф}^{фх}, K_{упр}^{фх}, K_{инт}^{фх}, K_{син}^{фх}, K_{дес}^{фх}) = 0$	

Ця ж форма математичної моделі є безальтернативною для приросту  $\Delta I_{ПКМ}$  інтегрального ПЯ виробу РКТ за рахунок застосування ПКМ:

$$\Delta I_{ПКМ} = \sum_{i=1}^7 \Delta(KPK)_i K_i; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^7 \Delta(KПЯ)_i K_i \right) = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^7 \left[ \sum_{\xi=1}^n \Delta \bar{q}_i (K_{\xi}^{\phi_k}) K_{\xi} \right] K_i \right\}; \quad \sum_{i=1}^7 K_i = 1. \quad (6)$$

Залежностями (3) – (6) встановлено кількісні значення приростів ПЯ всіх рівнів, що виникають у конструкціях РКТ із ПКМ унаслідок реалізації фундаментальних характеристик композитів. Подальше використання цієї залежності після встановлення вагових коефіцієнтів  $\Delta \bar{q}_{ПКМ}$  ОПЯ й інтегруючих їх вищестоящих ієрархічних рівнів, аж до  $\Delta I_{ПКМ}$ , дозволить обґрунтовано прогнозувати ефективність тих чи інших синтезуючих рішень для елементів конструкцій і агрегатів РКТ із ПКМ.

Проведено дослідження технологічних мікрodefektів, що виникають у виробництві агрегатів РКТ із ПКМ [14, 15]. Виявлено передумови концептуального аналізу проблеми класифікації технологічних мікрodefektів у виробництві агрегатів РКТ із ПКМ. Встановлено допуски на відхилення товщини виробу, що формується, від проектного значення [16].

Показано, що вхідний контроль визначає реалізоване в препрезі відхилення товщини від номіналу  $\Delta \delta_0$  для одношарового напівфабрикату. Відхилення в товщині паковки від номіналу включає складові, які виникають при її формуванні. Ці складові пов'язані з інтегральними відхиленнями технологічного режиму формування (тиск  $p$ , температура  $T$  та їх зміна в часі) від регламентованого відповідною документацією ( $\Delta p$ ,  $\Delta(p - \tau)$ ,  $\Delta(T - \tau)$ ). Внесок у подальші відхилення ФМХ кожної із цих складових визначають приблизно в рамках експериментально-теоретичних методів.

Значення  $\Delta \theta_{\text{в форм}}$  – інтегральне відхилення товщини паковки, дозволяє визначити істинні ФМХ ПКМ паковки в цій зоні для ухвалення подальшого рішення про допустимість такого рівня відхилень ФМХ ПКМ від паспортних значень або необхідності відбраковування виробу, якщо він не може бути відремontований.

Проведені дослідження технологічних defektів в агрегатах РКТ із ПКМ геометричного типу, які належать до класу порушень суцільності в дискретних об'ємах структур ПКМ, дозволили встановити допуски на ФМХ і міцності властивості композита, які пов'язані з наявністю в ньому пористості [15, 16].

ФМХ однонаправленого ПКМ визначають на основі математичних моделей теорії армування з додаванням у них приростів відповідних характеристик у межах їх паспортного інтервалу допусків. Наприклад, поле



допуску модуля пружності однонаправленого ПКМ уздовж волокон визначається формулою

$$(E_{x_{KM}} \pm \Delta E_{x_{KM}}) = E_{\epsilon}^{+\Delta E_{\epsilon}^n} \cdot \theta_{\epsilon}^{+\Delta \theta_{\epsilon}^n} + E_{\zeta}^{+\Delta E_{\zeta}^n} \left(1 - \theta_{\epsilon}^{+\Delta \theta_{\epsilon}^n}\right), \quad (7)$$

де індекси «в» і «з» відповідають модулям пружності й їх паспортним допускам для волокна і зв'язуючого, об'ємному змісту волокон  $\theta_{\epsilon}^n$  і його паспортному допуску  $\Delta \theta_{\epsilon}^n$ .

Аналогічна залежність отримана для інших ФМХ і меж міцності при розтягуванні, стисненні та зсуві вздовж і поперек волокон однонаправленого ПКМ. Для структур, що складаються з трьох напрямів армування ( $0^\circ$ ,  $\pm\varphi^\circ$ ,  $90^\circ$ ), поля допусків визначають на основі залежності, що впливає з моделі В.В. Васильєва. Наприклад, поле допуску модуля пружності  $E_x$  визначається формулою

$$(E_x \pm \Delta E_x) = \frac{1}{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0) n} \left[ (B_{11} \pm \Delta B_{11}) - \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})^2}{(B_{22} \pm \Delta B_{22})} \right], \quad (8)$$

де  $n$  – загальне число моношарів у структурі  $(n_0 + 2n_{\pm\varphi} + n_{90}) = n$ ;  $\delta_0, \Delta \delta_0$  – товщина моношару і паспортний допуск на її відхилення;  $B_{ij}, \Delta B_{ij}$  – узагальнені жорсткості багатощарової структури ПКМ та їх приріст в осях ортотропії ( $i = 1, 2; j = 1, 2$ ), які залежать від полів допусків на товщину моношарів  $\Delta \delta_0$ , паспортних допусків на вхідні параметри і кути розорієнтації моношарів  $\Delta \varphi$ .

$$\begin{aligned} (B_{11} \pm \Delta B_{11}) = & \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left(1 + v_{12}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21}^{+\Delta v_{21}^n}\right)} \left\{ n_0 (E_1 \pm \Delta E_1^n) + n_{90} (E_2 \pm \Delta E_2^n) + \right. \\ & + 2n_{\varphi} \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^n) \cos^4(\varphi + \Delta \varphi) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) \sin^4(\varphi + \Delta \varphi) + \right. \\ & + 2(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21}^{+\Delta v_{21}^n} \sin^2(\varphi + \Delta \varphi) \cos^2(\varphi + \Delta \varphi) + \\ & \left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}^n) \left(1 + v_{12}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21}^{+\Delta v_{21}^n}\right) \sin^2 2(\varphi + \Delta \varphi) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (B_{22} \pm \Delta B_{22}) = & \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left(1 + v_{12}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21}^{+\Delta v_{21}^n}\right)} \left\{ n_0 (E_2 \pm \Delta E_2^n) + n_{90} (E_1 \pm \Delta E_1^n) + \right. \\ & + 2n_{\varphi} \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^n) \sin^4(\varphi + \Delta \varphi) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) \cos^4(\varphi + \Delta \varphi) + \right. \\ & + 2(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21}^{+\Delta v_{21}^n} \sin^2(\varphi + \Delta \varphi) \cos^2(\varphi + \Delta \varphi) + \\ & \left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}^n) \left(1 + v_{12}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21}^{+\Delta v_{21}^n}\right) \sin^2 2(\varphi + \Delta \varphi) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 (B_{12} \pm \Delta B_{12}) = & \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left(1 + v_{12}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21}^{+\Delta v_{21}^n}\right)} \left[ (n_0 + n_{90})(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21}^{+\Delta v_{21}^n} + \right. \\
 & + 2n_\varphi \left\{ \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^n) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) \right] \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \\
 & + (E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21}^{+\Delta v_{21}^n} \left[ \sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) \right] - \\
 & \left. \left. - (G_{12} \pm \Delta G_{12}^n) \left(1 + v_{12}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21}^{+\Delta v_{21}^n}\right) \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right\} \right]. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Встановлені також поля допусків на порушення суцільності ПКМ у виробі у вигляді пор (порожнеч), об'ємний вміст яких  $\theta_n = 1 - (\theta_e + \theta_z)$  викликає незначне зниження ФМХ і міцнісних характеристик ПКМ при дії статичних навантажень на виріб в експлуатації та є першим рівнем його дефектності у вигляді порушення монолітності (суцільності). Однак пористість знижує тріщиностійкість виробу (II рівень дефектності ПКМ), що призводить до зниження довговічності виробу (III рівень дефектності ПКМ) [15, 16].

Встановлено допуски на порушення суцільності ПКМ у виробі при статичних навантаженнях (I рівень дефектів), тріщиностійкості (II рівень) і довговічності (III рівень) і наведено схему виявлення трьох рівнів дефектів структури ПКМ методами контролю ступеня дефектності (рис. 3) [17, 18].



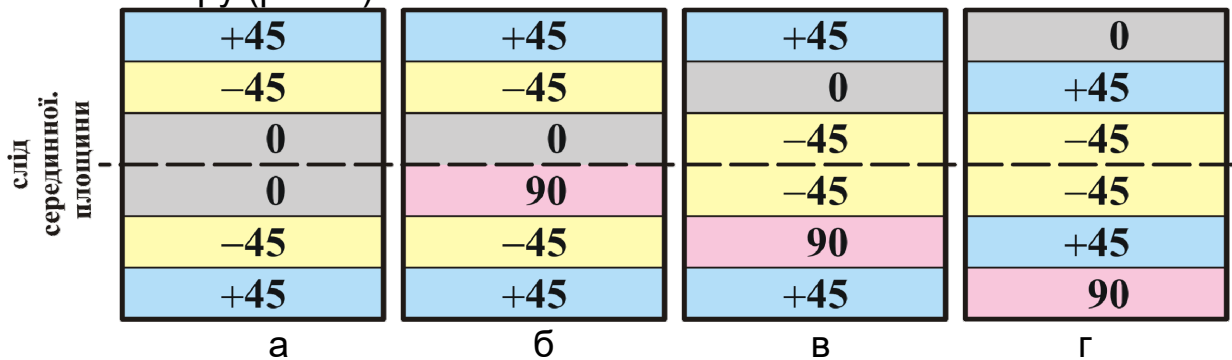
Рисунок 3 – Схема виявлення трьох рівнів дефектів структури ПКМ методами контролю ступеня дефектності

Розроблено концептуальний підхід і реалізуючий його метод нормування полів допусків на макродефекти в ПКМ РКТ, віднесених класифікатором до класу локальних поводок (короблення), – дефектів геометричного виду  $W$  [19]. Ці дефекти пов'язані з термонерівнісністю структури виробів, що виникає внаслідок несиметрії армуючих шарів.

Як умовний ступінь термонерівності  $\xi$  прийнято відношення сумарного відстояння пар моношарів від геометричної серединної площини паковки до її товщини

$$\xi = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \delta_j}{\sum_{i=1}^m n_i \delta_i}, \quad (12)$$

де  $\delta_j$  – номер і товщина  $i$ -го термонерівнісного моношару, відлічуваного від серединної площини;  $k$  – число пар термонерівнісних моношарів у паковці;  $m$  – загальне число моношарів у паковці;  $\delta_i$  – товщина  $i$ -го моношару (рис. 4).



а – терморівноважена; б – мінімальна; в – середня; г – висока

Рисунок 4 – Структури пакета з різним ступенем умовної термонерівності

Показано, що для всього спектра існуючих ПКМ із зростанням максимального рівня термонерівності  $\xi_{max}$  істотно зростає рівень

формонестабільності  $\bar{W}_{max} = \frac{W_{max}}{\delta}$ .

Поводка агрегатів (панелей), які підлягають після деформації монтажу в жорсткому каркасі збірної конструкції, регламентують виходячи з допустимого рівня залишкових (монтажних) напружень, що виникають у панелі після часткової ліквідації переміщень (викривлення) монтажними засобами. Прогинання підкріпленої зони інтегральної конструкції може бути регламентовано виходячи з рівня (індексу) напруженості  $\psi_i$  – числового значення правої частини прийнятого критерію міцності ПКМ, найчастіше Мізеса-Хілла

$$\frac{\sigma_{1i}^2}{\sigma_{e1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{\sigma_{e1i}\sigma_{e2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{\sigma_{e2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{\tau_{e12i}^2} = \psi_i, \quad (13)$$

де  $\sigma_{1i}$ ,  $\sigma_{2i}$ ,  $\tau_{12i}$ ,  $\sigma_{e1i}$ ,  $\sigma_{e2i}$ ,  $\tau_{e12i}$  – діючі напруження у  $i$ -му шарі ПКМ і його межі міцності в системі координат 102, де напрям 1 відповідає розташуванню волокон однонаправленого моношару.

Показано, що практично для всього спектра існуючих ПКМ максимальний індекс напруженості  $\psi_{i \max}$  слабо залежить від  $\xi$  (табл. 3). Тому при регламентації  $\psi_{\max}$  може бути дозволений довільний ступінь термонерівноваженості  $\xi$ , якщо остання не обмежена іншими експлуатаційними вимогами.

Так, для вуглепластиків відносна різниця між  $\psi_{\max}$  для мінімального і максимального рознесення не перевищує 6%, для склопластика – 11%, для органопластиків – 12%.

Таблиця 3 – Результати розрахунків для вільно опертої панелі розмірами 500x500 мм різної умовної термонерівноваженості  $\xi$  структури ПКМ (фрагмент)

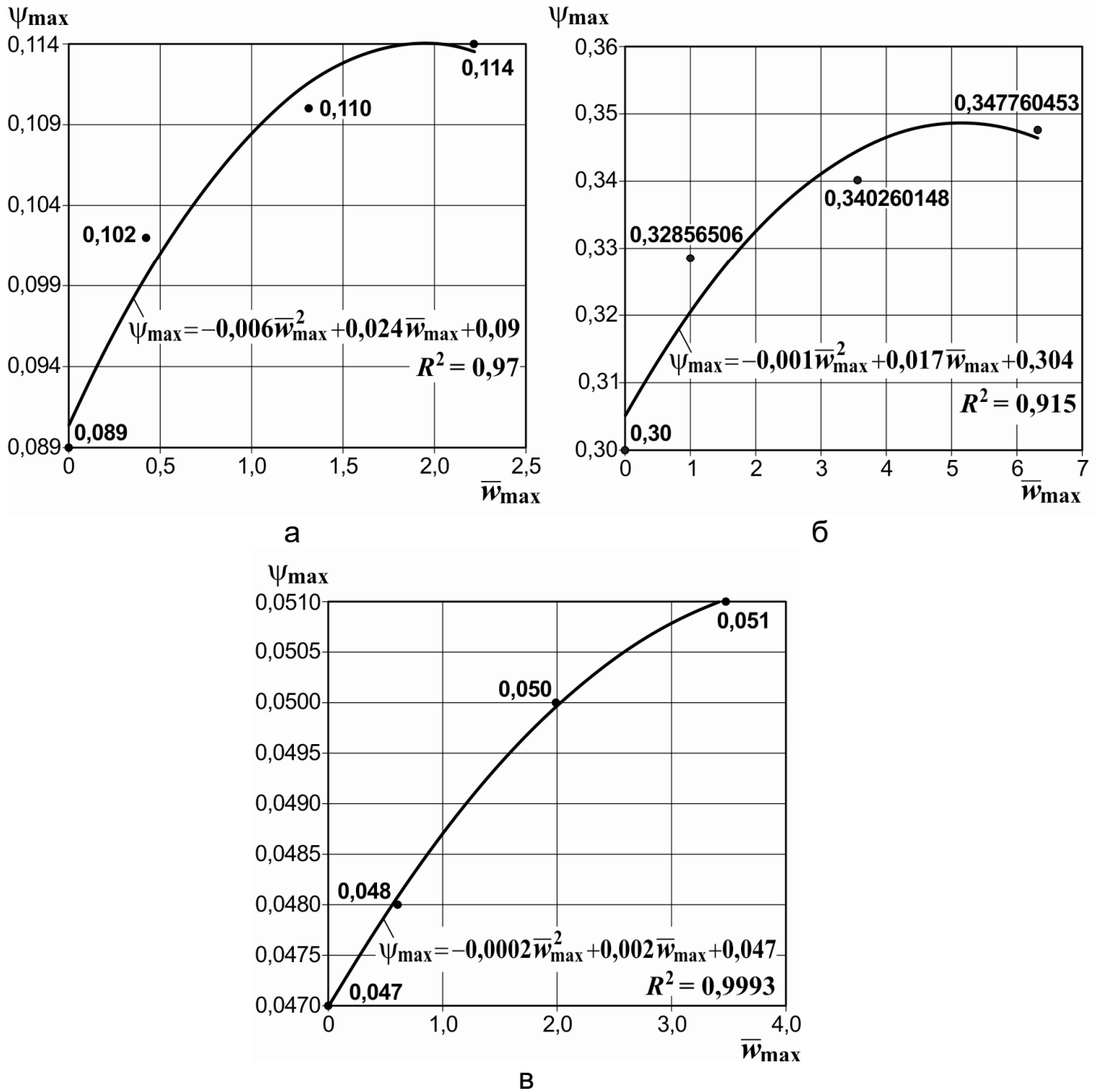
Матеріал ПКМ	Ступінь умовної термонерівноваженості							
	$\xi=0$		$\xi= 0,167$		$\xi= 0,334$		$\xi=0,5$	
	$W_{\max}$ , мм	$\psi_{\max}$	$W_{\max}$ , мм	$\psi_{\max}$	$W_{\max}$ , мм	$\psi_{\max}$	$W_{\max}$ , мм	$\psi_{\max}$
Вуглепластик однонаправлений – тип 1	0	0,047	0,434	0,048	1,43	0,05	2,5	0,051
Вуглепластик однонаправлений – тип 2	0	0,0168	0,302	0,0159	1,04	0,0163	1,848	0,0167
Вуглепластик однонаправлений – тип 3	0	0,0268	0,365	0,0288	1,257	0,0298	2,22	0,03
Склопластик однонаправлений	0	0,089	0,3	0,102	0,938	0,11	1,59	0,114
Органопластик однонаправлений – тип 1	0	0,023	0,768	0,012	2,69	0,013	4,75	0,013
Органопластик однонаправлений – тип 2	0	0,3	0,726	0,329	2,57	0,34	4,55	0,348

Між індексом переднапруженості  $\psi_{\max}$  і рівнем формостабільності  $\bar{W}_{\max}$  встановлено виражений зв'язок: індекс переднапруженості є квадратична функція рівня формостабільності  $\bar{W}_{\max}$ :

$$\psi_{\max} = A\bar{W}_{\max}^2 + B\bar{W}_{\max} + C, \quad (14)$$

де  $A, B, C$  – константи, які залежать від типу ПКМ і розмірів зони поводки.

Як приклад на рис. 5 показано такі залежності для вільно опертої склопластикової, органопластикової та вуглепластикової панелей.



а – склопластик; б – органічний пластик; в – вуглепластик

Рисунок 5 – Залежність індексу максимальної напруженості вільно опертій панелі  $\Psi_{\max}$  від максимального відносного прогину  $\bar{W}_{\max}$

Показано, що поля допусків на розорієнтацію кутів армування при однакових відхиленнях у всіх моношарах паковки ( $+3^\circ$  і  $+5^\circ$  або  $-3^\circ$  і  $-5^\circ$ ), які відповідають механізованому і автоматизованому намотуванню (викладенню), не перевищують 1 % зміни переднапруженості  $\Delta\Psi_{\max}$  і формостабільності  $\Delta\bar{W}_{\max}$  порівняно з ідеальною схемою армування для всіх рівнів термонерівноважених структур у діапазоні  $0,167 \leq \xi \leq 0,5$ . Із цього виходить, що поля допусків для ФМХ ПКМ, регламентовані за умов

технології виробництва композитних виробів, не вимагають розширення для забезпечення вимог заданого ресурсу і термостабільності.

Встановлено, що рівні дефектів механічного виду типу складок при статичному навантаженні в локальній зоні виробу в площині моношарів можуть підвищити інтенсивність напружень до 15 % порівняно з бездефектною зоною [20]. Це вимагає для особливо відповідальних виробів призначати технологічні процеси їх формування, що виключають можливість появи складок у моношарах або регламентувати зниження допуску на рівень напруженості в експлуатації виробу не менше ніж  $\Delta\psi=0,03$  від рекомендованого для високонавантаженого і 0,06 для середньонавантаженого агрегату.

Показано, що дефекти у вигляді зазорів та напусків підпорядковані з аналогічними дефектами класу «невідповідність товщини або локальна сходінка» геометричного виду, допуски на які встановлено в нашій роботі [21]. Дефекти класу «порушення порядку укладання моношарів» є одною з першопричин класу дефектів «локальні поводки (коробління)», допуски на які нами встановлено. Виявлено, що механічні дефекти в ПКМ у більшості своїй підпорядковані геометричним, допуски на які досліджені. Ступінь цього підпорядкування для різних класів дефектів механічного виду є різним.

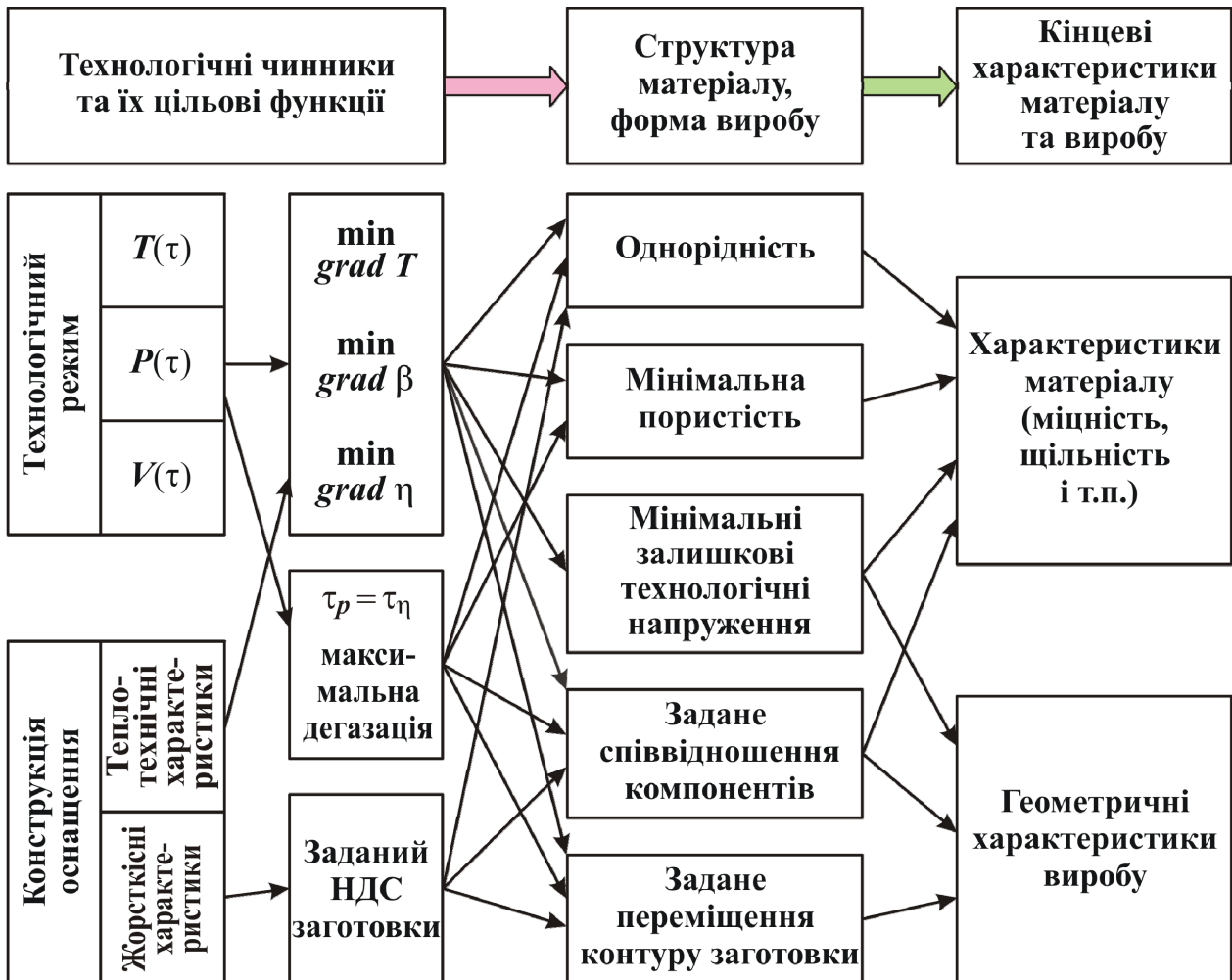
Встановлено, що технологічні відхилення в режимах формування є однією з першопричин, які мають місце в процесі приготування зв'язуючого в реакторі, – нехватка або надлишок розчинника, затверджувача, пластифікатора, інших компонентів або інгредієнтів зв'язуючого.

Синтезована наближена (одновимірна) і уточнена (двовимірна) моделі, які встановлюють залежності для визначення допустимого в експлуатації розміру зони непроклею у виробі. У випадку одновимірної моделі така залежність має вигляд

$$l \leq \pi n_1 \delta \sqrt{\frac{\left( E_1^0 \pm \Delta E_1^0 \right) \left[ n_1 + (n - n_1) \frac{(E_2 \pm \Delta E_2)}{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)} \right] \xi}{3n(\sigma \pm \Delta\sigma) \left[ 1 - (v_{12}^0 \pm \Delta v)(v_{21}^0 \pm \Delta v) \right]}}, \quad (15)$$

де  $\sigma$ ,  $\Delta\sigma$  – середні напруження на межах дефектної зони і допуск на їх відхилення;  $n$ ,  $n_1$  – число моношарів у пакеті й частині, що відшарувалася;  $E_1^0$ ,  $\Delta E_1^0$ ,  $E_2$ ,  $\Delta E_2$  – модулі пружності й допуски на них у частинах паковки, що відшарувалися, і монолітних;  $\delta$  – товщина паковки;  $v_{12}^0$ ,  $v_{21}^0$ ,  $\Delta v$  – коефіцієнти Пуассона і середній допуск у частині паковки, що відшарувалася;  $\xi$  – коефіцієнт підвищення стійкості, який знаходиться числовим експериментом на основі скінченно-елементної моделі.

Було досліджено також похибки та відповідні їм допуски КТР формоутворювального оснащення і режимів формоутворення виробу, а також взаємодія технологічних чинників та їх сумісного впливу на кінцеві характеристики виробу, які схемно показані на рис. 6.



$\beta$  – ступінь отвердження;  $\eta$  – в'язкість;  $\tau_p$  – час прикладення тиску;  $\tau_\eta$  – час досягнення  $\eta$  форм; НДС – напружено-деформований стан

Рисунок 6 – Взаємодія технологічних чинників та їх сумісний вплив на кінцеві характеристики виробу

Проведено аналіз становлення, розвитку і стану технології виробництва виробів із ПКМ, що дозволив установити основні чинники, що визначають і стимулюють створення теоретичних основ технології виготовлення даного класу конструкцій в плані забезпечення їх відповідності сучасним вимогам і критеріям, що пред'являють до виробів РКТ. На основі класифікацій попередніх дослідників і зарубіжного досвіду розроблення і використання типових процесів виробництва виробів РКТ із ПКМ уточнено і розширено їх номенклатуру з урахуванням сучасних досягнень в області технології створення відповідальних конструкцій АРКТ із ПКМ.

Запропонована модифікована класифікація типових технологічних процесів виробництва виробів РКТ із ПКМ дозволила науково обґрунту-

вати порядок вибору ефективних КТР агрегатів досліджуваного класу конструкцій для реалізації їх в процесі проектування і виробництва в умовах підприємств вітчизняної галузі. Синтезовано і обґрунтовано блок-схему створення нових агрегатів РКТ у системі корпорації «проектування – виробництво» вітчизняної галузі, загальну для об'єктів із традиційних матеріалів і ПКМ (рис. 7).

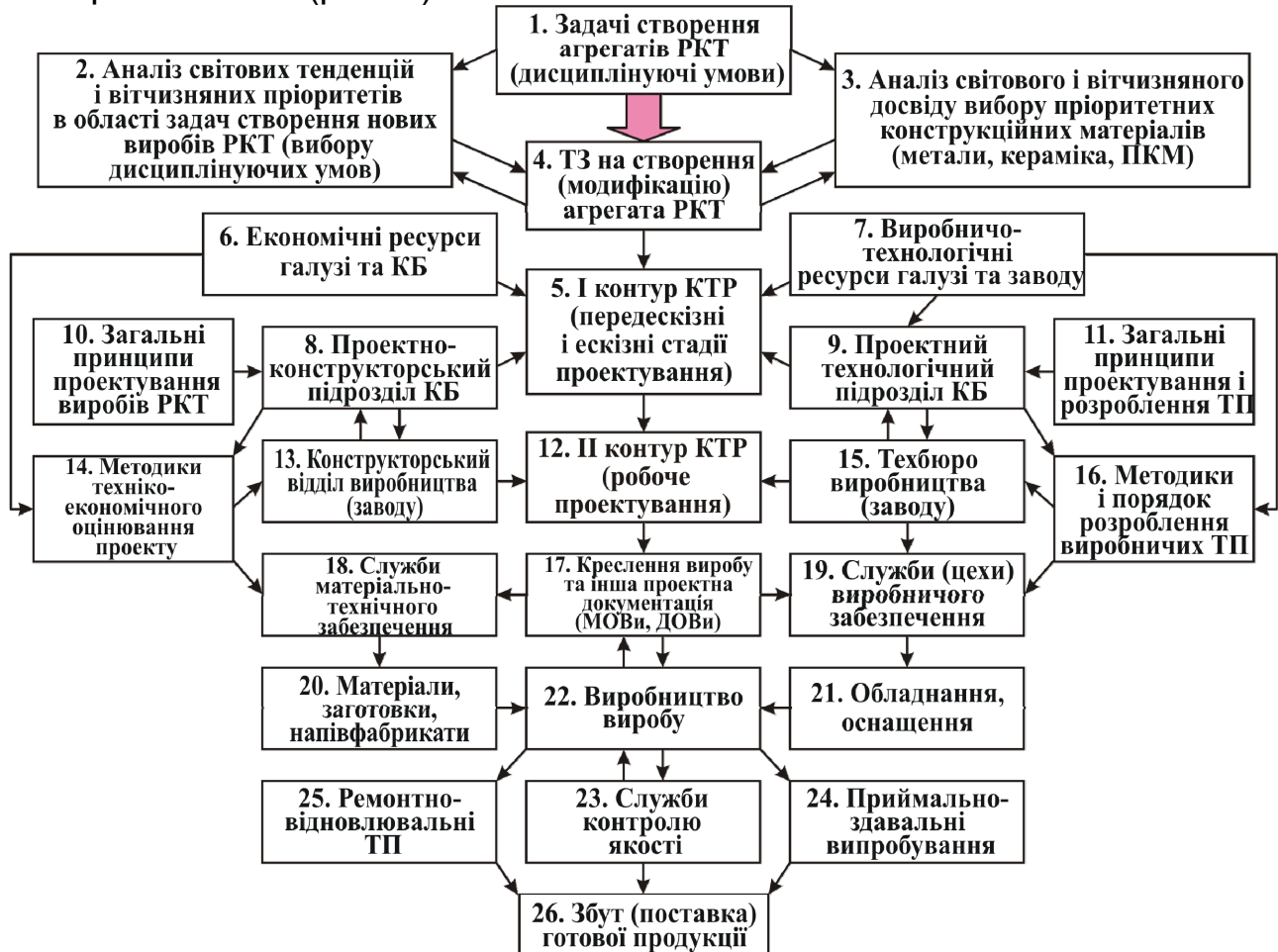


Рисунок 7 – Блок-схема створення нових агрегатів РКТ у системі корпорації «проектування – виробництво» (КБ – завод)

У проведеному в роботі [22] аналізі принципів аспектів теоретичних основ технології виробництва деталей, вузлів і агрегатів РКТ із ПКМ розкрито роль і місце загальних принципів проектування технологічних процесів виробництва виробів досліджуваного класу і розроблено блок-схему наукового забезпечення ефективної технології виробництва агрегатів РКТ із ПКМ відмінною їх принциповою орієнтацією на аспекти досягнення високої якості виробів, визначувані кваліметрією КТР, регламентами полів допусків на типові технологічні дефекти мікро- і макрорівнів (рис. 8).



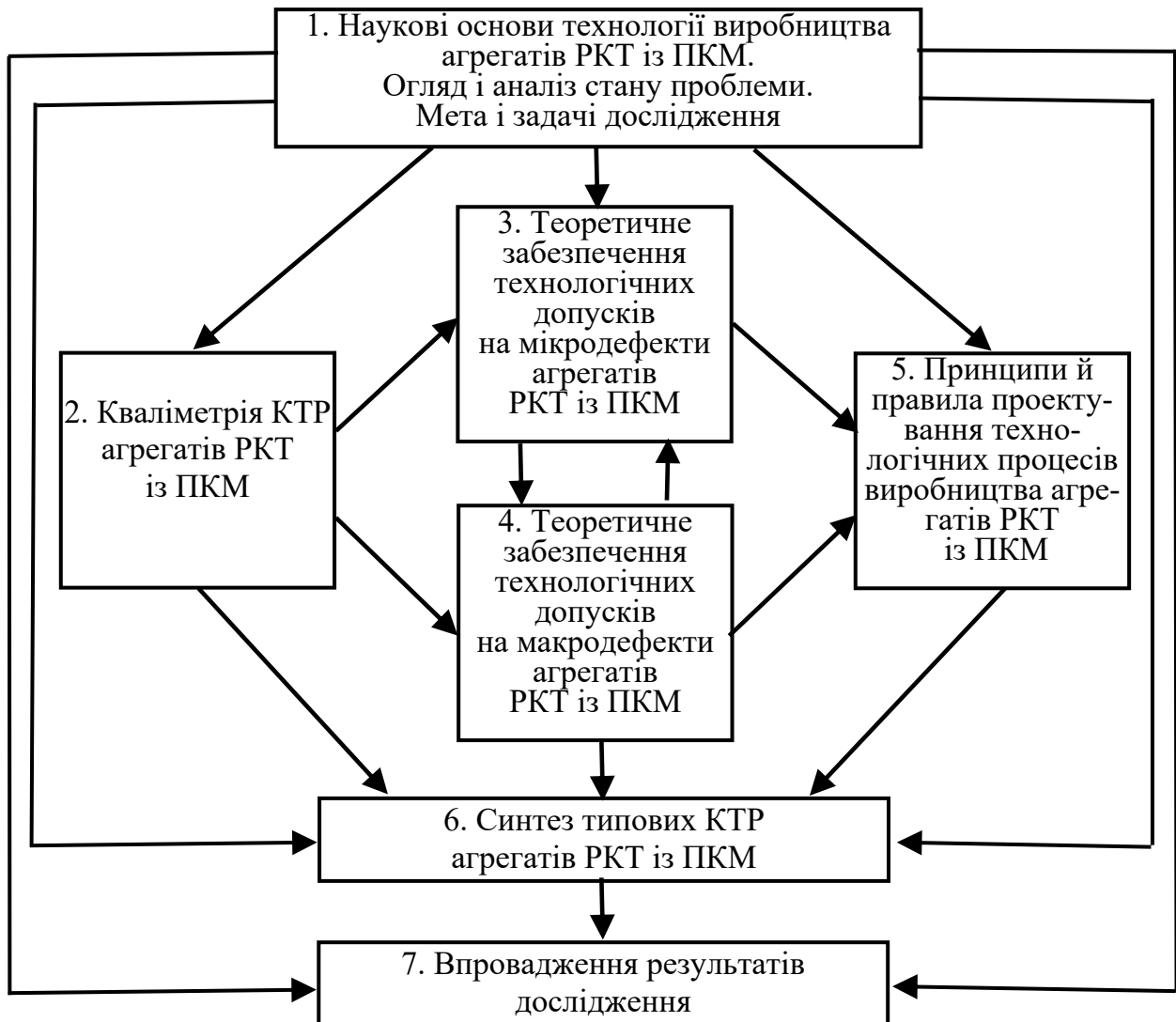


Рисунок 8 – Блок-схема досліджень наукового забезпечення ефективної технології виробництва агрегатів РКТ із ПКМ

Синтезовано основні загальні принципи й правила проектування технологічних процесів і операцій виробництва композитних виробів (рис. 9) [23]. Пропоновані принципи та правила позбавлені недоліків, властивих умовам, що висуваються раніше іншими дослідниками як принципи проектування технологічних процесів виробництва виробів РКТ із ПКМ і включають ті із цих умов, які не суперечать методологічним та ієрархічним аспектам. Розроблені принципи й правила зберігають спадкоємність із загальними для технології авіабудування і машинобудування принципами, сформульованими провідними вітчизняними вченими в галузі технології. Все відзначене вище дозволяє рекомендувати ці принципи і правила КБ і підприємствам, що займаються питаннями технологічної підготовки виробництва виробів РКТ із ПКМ.

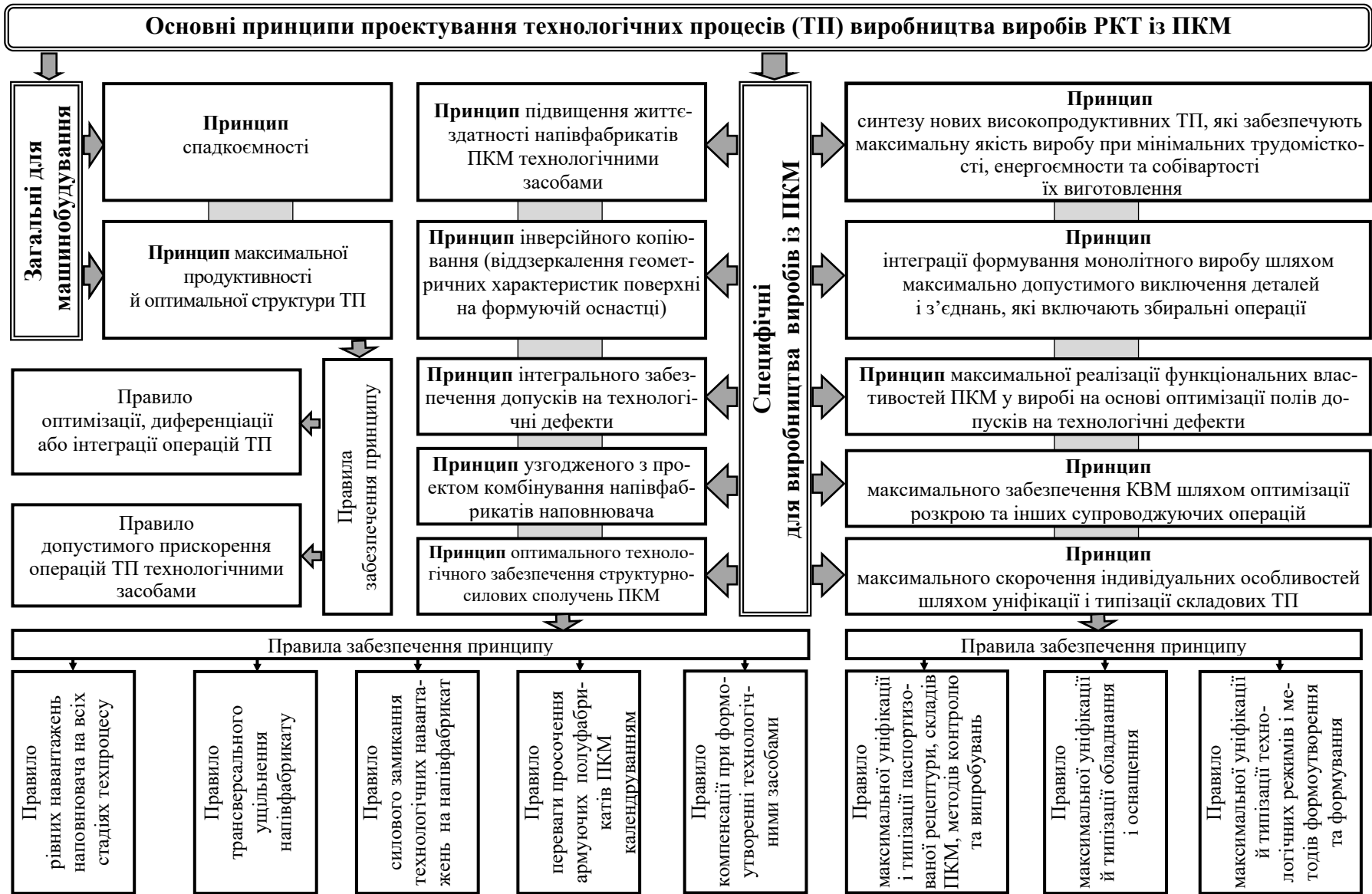


Рисунок 9 – Основні принципи та правила проектування технологічних процесів виробництва виробів РКТ із ПКМ

Викладено результати синтезу КТР композитних агрегатів РКТ ДП «Конструкторське бюро «Південне» на базі комплексу експериментально-теоретичних досліджень, що включають наведені вище [24, 25].

### **Висновки**

На основі проведених досліджень отримані такі результати:

1. Вперше виконано широкомасштабний аналіз і розкрито стан проблеми наукового забезпечення в умовах вітчизняної виробничо-технічної бази створення агрегатів РКТ із ПКМ як могутнього резерву підвищення її масової і функціональної ефективності, що відображає світові тенденції розширення сфери й рівня відповідальності композитних конструкцій, які забезпечують зростання конкурентоспроможності української РКТ на ринку послуг.

2. Розроблено новий науковий напрям у технології виробництва виробів РКТ, що реалізовує концептуальний підхід до підвищення її ефективності шляхом широкого впровадження КТР із ПКМ, які базуються на істотно розширеній номенклатурі кваліметричних показників їх якості, що дозволило:

- розробити класифікатор всіх ієрархічних рівнів показників якості технічної системи даного класу;

- розробити нові обґрунтовані математичні моделі показників якості й методи їх визначення для одиничних, групових, комплексних та інтегральних показників якості;

- синтезувати фундаментальні характеристики ПКМ, що викликають приріст показників якості виробів РКТ всіх рівнів і провести праксеологічний аналіз якісного впливу цих характеристик на ефективність конструктивно-технологічних рішень елементів конструкцій РКТ із композитів;

- отримати кількісну залежність приростів показників якості всіх ієрархічних рівнів, на основі використання якої після встановлення експертним шляхом їх вагових коефіцієнтів прогнозувати ефективність синтезуючих рішень для типових елементів конструкцій і агрегатів РКТ із ПКМ.

Ці результати входять в основу розроблення науково обґрунтованих методів і документів забезпечення відповідності агрегатів РКТ із ПКМ (МОВів і ДОВів) прогнозованому рівню їхньої інтегральної якості й відповідної міжнародним стандартам системи управління якістю в процесі виробництва цих виробів.

3. Проведено широкі дослідження технологічних дефектів в агрегатах РКТ з ПКМ геометричного вигляду, що відносяться до класу порушень щільності в дискретних об'ємах структур ПКМ, що дозволило встановити допуски на ФМХ і міцнісні властивості композита, пов'язані з наявністю в ньому пористості, тріщиностійкості і утомленістю, а також лока-

льними поводками виробу і відповідної їм напруженістю термонерівноважених структур.

4. Вперше встановлено ієрархічний порядок трьохрівневої системи виявлення дефектів структури ПКМ, що виникають у процесі підготовки і виробництва виробів із композитів. Проведено аналіз причин виникнення і типових видів дефектів суцільності ПКМ, що є першопричиною зниження експлуатаційної якості елементів композитних конструкцій і їх ресурсу. Запропоновано схему виявлення трьох рівнів дефектів структури ПКМ прямими і опосередкованими методами контролю ступеня дефектності матеріалу.

5. Доведено необхідність обліку рівня індексу напруженості інтегральних терморівноважених структур ПКМ, який робить істотний внесок у напружений стан конструкцій РКТ із ПКМ від експлуатаційних дій. Цей внесок збільшується при зростанні рознесення термонерівноважених шарів відносно серединної поверхні пакета інтегрально терморівноваженої структури.

6. На основі скінченно-елементного аналізу виявлено наявність зв'язку між індексом максимальної напруженості в певній точці одного з моношарів паковки і її відносним максимальним прогинанням, що апроксимується для різних структур різних типів ПКМ квадратичними поліномами.

7. На основі класифікацій попередніх дослідників і зарубіжного досвіду розроблення і використання типових процесів виробництва виробів РКТ із ПКМ уточнено і розширено їх номенклатуру з урахуванням сучасних досягнень в області технології створення відповідальних конструкцій РКТ із ПКМ.

8. Запропонована модифікована класифікація нових технологічних процесів виробництва виробів РКТ із ПКМ дозволила науково обґрунтувати порядок вибору ефективних КТР агрегатів досліджуваного класу конструкцій для реалізації їх у процесі проектування і виробництва в умовах підприємств вітчизняної галузі.

9. Синтезовано і обґрунтовано блок-схему створення нових агрегатів РКТ у системі корпорації «проектування – виробництво» вітчизняної галузі, загальну для об'єктів із традиційних матеріалів і ПКМ.

10. Проведений широкий комплекс НДДКР на базі наукового супроводу технології виробництва виробів РКТ із ПКМ у ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» в сукупності з експериментально-теоретичними дослідженнями, освітленими вище, є надійною основою подальшого вдосконалення виробів РКТ із ПКМ, які відповідають світовим досягненням.

### Список використаних джерел

1. Дегтярев А.В. Ракетная техника. Проблемы и перспективы. Избранные научно-технические публикации. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2014. – 420 с.
2. Скороход В.В., Никифоров Н.А, Резник С В. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3 т. – Т. 2. Передовые технологии производства / под ред. С.В. Резника. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – С. 86 – 160.
3. Kondratiev A., Gaidachuk V. Weight-based optimization of sandwich shelled composite structures with a honeycomb filler. – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol 1/1 (97). – Pp. 24 – 33. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154928.
4. Близниченко В.В., Джур Є.О., Краснікова Р.Д. Проектування і конструювання ракет-носіїв / за ред. С. М. Конюхова. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2007. – 504 с.
5. Линник А.К., Красникова Р.Д., Липовский В.И., Баранов Е.Ю. Композиты в конструкциях корпусов ракет-носителей. Системный анализ проблем и перспектив разработки и применения: монограф. / под ред. А.В. Дегтярева. – Д.: ЛИРА, 2018. – 260 с
6. Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Кириченко В.В., Сливинский В.И. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники: монограф. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.
7. Дегтярев А.В., Коваленко В.А., Потапов А.В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 2(89). – С. 34 – 38.
8. Кондратьев А.В., Коваленко В.А. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(67).– Х.: ХАИ, 2011. – С. – 7 – 18.
9. Коваленко В.А., Кондратьев А.В. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5(82). – С. 14 – 20.
10. Кондратьев А.В., Коваленко В.А. Состояние проблемы научного обеспечения эффективной технологии производства агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 6(83). – С. 17 – 25.

11. Коваленко В.А. Показатели качества этапов жизненного цикла конструкций ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 50. – Х., 2011. – С. 128 – 140.

12. Коваленко В.А. Фундаментальные характеристики полимерных композиционных материалов и их влияние на показатели качества конструкций ракетно-космической техники // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 51. – Х., 2011. – С. 66 – 74.

13. Коваленко В.А., Московская Н.М., Сливинский В.И. Анализ и модификация математических моделей показателей качества и методов их определения применительно к изделиям ракетно-космической техники // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (68). – Х., 2011. – С. 7 – 22.

14. Коваленко В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на отклонения толщины формируемого изделия от проектного значения // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №3(90). – С. 10 – 21.

15. Коваленко В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2. Допуски на нарушения сплошности материала и локальные поводки изделия // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №4(91). – С. 5 – 15.

16. Kondratiev A., Gaidachuk V., Nabokina T., Kovalenko V. Determination of influence of deflections of the thickness of composite material on the physical and mechanical characteristics at the local disturbance of its complexity // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol 4 (100). – Pp. 24 – 33.

17. Гайдачук В.Е., Коваленко В.А. Уровни дефектов снижения эксплуатационных характеристик конструкций из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №6(93). – С. 5 – 12.

18. Коваленко В.А. Анализ механических дефектов и отклонений в соотношениях и свойствах полимерных композиционных материалов для авиакосмической техники // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (72). – Х., 2012. – С. 57 – 64.

19. Коваленко В.А., Кондратьев А.В., Кичка А.А. Исследование температурного напряженно-деформированного состояния композитных панелей при различной степени термонеровесности их структуры // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппа-

ратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (70). – Х., 2012. – С. 20 – 33.

20. Кириченко В.В., Коваленко В.А. Исследование влияния складки в полимерном композиционном материале на его упругие свойства и характер изменения локального напряженно-деформированного состояния // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С. 127 – 132.

21. Коваленко В.А. Анализ и нормирование дефектов локального нарушения сплошности, возникающих в производстве изделий авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(71). – Х., 2012. – С. 7 – 22.

22. Коваленко В.А. Порядок выбора эффективных конструктивно-технологических решений агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов и их реализации в производстве // Вестник Восточн. ун-та им. В. Даля. – 2013. – 8 (179). – С. 95 – 105.

23. Гайдачук В.Е., Коваленко В.А., Потапов А.В. Основные принципы и правила проектирования технологических процессов производства агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов // Технологические системы. – 2013. – № 2(63). – С. 29 – 39.

24. Гайдачук А.В., Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Коваленко В.А., Кириченко В.В., Потапов А.М. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: монограф. в 2 т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / под. ред. А.В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с.

25. Гайдачук А.В., Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Коваленко В.А., Кириченко В.В., Потапов А.М. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: монограф. в 2 т. Т. 2. Синтез параметров композитных агрегатов ракетно-космической техники при разнородном нагружении / под. ред. А.В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 250 с.

*Поступила в редакцию 15.05.2018.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*